

Membranska desalinacija - stanje u istraživanju i praksi

Puškarčić, Marika

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:149:721282>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Marika Puškarić

ZAVRŠNI RAD

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Marika Puškarić

Membranska desalinacija - stanje u istraživanju i praksi

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Krešimir Košutić

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr. sc. Krešimir Košutić

prof.dr.sc. Marija Vuković Domanovac

prof.dr.sc. Ana Lončarić Božić

Ovaj rad posvećujem svojim najbližima koji su mi u najtežim trenucima bili podrška.

Hvala i prof. dr.sc. Krešimiru Košutiću na ukazanom povjerenju!

SAŽETAK

Ubrzan rast populacije, industrijalizacija i urbanizacija uzimaju sve više maha u današnje vrijeme, posljedično uzrokujući nepovratne nepovoljne klimatske promjene zbog kojih je na određenim područjima sve teže doći do vode, osnovne sastavnice neophodne za ljudsko preživljavanje. Potrebnija za vodom s kojom se svijet suočava otvara put ka iskorištavanju nekonvencionalnih izvora vode za konzumaciju. Procesom desalinacije iz morske vode, industrijske otpadne vode, bočate vode i sl. može se osigurati voda za piće kao i za daljnje korištenje u industrijskom, poljoprivrednom i komunalnom sektoru. Jasno je da će kapaciteti desalinacije vode nastaviti rasti i upravo zato povlači se strateško pitanje učinaka koje ono ima na okoliš. S obzirom da se radi o energetski zahtjevnom procesu, nije teško zaključiti da može doći do posljedica opasnih za morski okoliš. Iz tog razloga potrebno je sagledati sve tehničke poteškoće koje se mogu javiti tijekom procesa desalinacije te najbolje tehnike za rješavanje problema koje uzrokuju. Unatoč znatnom napretku i poboljšanjima procesa kroz hibridne sustave, nove materijale, nadograđene strojarske komponente i mogućnosti gotovo minucioznog sagledavanja procesa desalinacije, o mnogo informacija o stvarnom stanju na tržištu i u svijetu gotovo se ne vodi računa. Ovaj rad sažima razvoj ključnih komponenti membranskog procesa desalinacije do današnjeg dana, većinu izazova koje je još potrebno nadići te prikazuje sive zone logistike vezane uz sve faktore membranske desalinacije.

Ključne riječi: *membranska desalinacija, reverzna osmoza, novi materijali, hibridni sustavi, biološka onečišćivala, membranski moduli, modifikacija membrane, visok koncentrirana izlazna struja*

ABSTRACT

Population growth and the expansion of industrialization and urbanization in today's world have caused irreversible climate change due to which the supply of water, the elementary component needed for one's survival, has become a great challenge to come by. High water demands that the world is now facing call for the use of unconventional sources of water for consumption. Through the process of desalination of seawater, industrial wastewater, brackish water etc., water of adequate quality can be provided for further use in industrial and municipal sectors. It is clear that water desalination capacities will continue to grow, therefore it is of crucial importance to understand the impact that it may have on the environment. Given that this is an energy-intensive process it is not difficult to image the possibility of dangerous consequences for the marine environment. For this reason, it is necessary to consider all the technical difficulties that may arise during the desalination process and the best possible techniques for solving consequential problems. Despite significant progress and process improvements through hybrid systems, new materials, upgraded mechanical components and with a meticulous view of the desalination process, much information about the real situation in the market and the world is still not under scrutiny. This paper summarizes the development of key components of membrane desalination processes to date, covers most of the challenges that we still need to overcome and outlines the grey areas in membrane desalination logistics.

Key words: *membrane desalination, reverse osmosis, new materials, hybrid systems, biofouling, membrane modules, membrane modification, brine*

Sadržaj:

1. Uvod	1
2. Opći dio.....	2
2.1. Vremenska linija upotrebe membrana.....	2
2.2. Svjetski kapaciteti i karakteristične potrebe za specifičnim tipovima membrana	4
2.3. Princip rada membranske desalinacije.....	9
3. Membrane	11
3.1. Polimerni (organski) materijali.....	11
3.1.1. Celuloza.....	13
3.1.2. TFC.....	14
3.2. Anorganski materijali.....	16
3.2.1. Membrane od metalnih oksida	16
3.2.2. Membrane na bazi ugljika.....	17
3.2.3. Membrane s kombiniranim matricama	17
3.3. Moduli	18
3.3.1. Spiralni modul	18
3.3.2. Modul sa šupljim vlaknima	19
4. Izazovi i metode poboljšanja procesa desalinacije	20
4.1. Koncentracijska polarizacija.....	22
4.2. Modifikacija površine	23
4.3. Biomimetika.....	23
4.4. Blokiranje membrane	24
4.5. Predobrada ulazne struje	25
4.6. Hibridni sustavi.....	26
4.7. Zbrinjavanje nusprodukta.....	26
5. Zaključak.....	28
6. Literatura	30
7. Dodatci	34
7.1. Popis slika	34
7.2. Popis tablica.....	35
7.3. Životopis	36

1. Uvod

Tehnologije membranske separacije najisplativije su i široko rasprostranjene tehnologije za pročišćavanje vode. Još od 80-ih godina prošlog stoljeća metode obrade voda s nanoporoznim membranama postale su aktivne na tržištu i membranska separacija pretvorila se u brzorastuću i dominantnu tehnologiju u industriji hrane, kemijskoj industriji, industriji drva i papira, farmaceutskoj i elektroničkoj industriji. Pritom je primjena polimernih membrana bila na vrhu ljestvice iako je daljnji razvoj, u želji za njihovim unaprijeđenjem, iziskivao mnogo vremena [1]. Kako su potrebe za pitkom vodom postajale sve veće zbog faktora koji uzrokuju stres vode: industrijalizacija, urbanizacija, velike količine otpadne vode, veliki zahtjevi za pitkom vodom, visoki standardi pitke vode, širok spektar primjene, klimatske promjene, pojavila se intencija da se pripreme membrane koje će biti još produktivnije. Tako počinje potraga za novim materijalima, novim strojarskim komponentama, poboljšanjem modula kako bi se izbjeglo laminarno, odnosno potaknulo turbulentno strujanje da se izbjegne koncentracijska polarizacija uz membranu i sl.

Na tržište su, zbog svojih povoljnih svojstava, počele pristizati efektivne membrane napravljene od anorganskih materijala poput metalnih oksida, grafen oksida, ugljikovih nanocjevčica i njihovih kombinacija. Nove membrane imale su mogućnost morfološke modifikacije te su bile iznimno kemijski, mehanički i termički tolerantne. Razvoj i potraga za sve boljim materijalima i tehnikama provedbe desalinacije u današnje vrijeme, dakako nije dosegla svoj kraj, ali visoki troškovi sinteze i stapanja materijala su nešto na što treba obratiti pozornost prije masovne proizvodnje i tržišne komercijalizacije. Trenutno se proučavaju alternativne anorganske membrane načinjene od jeftinijih ili otpadnih materijala, poput letećeg pepela kako bi se smanjili troškovi proizvodnje. Istraživanja se i dalje provode kako bi se riješili preostali problemi vezani uz ograničenja u izvedbi i tretiranje retentata (koncentrata) kao nusprodukta procesa desalinacije. Unatoč izazovima koje treba prebroditi, vrlo je moguće da će keramičke membrane u skoroj budućnosti postati širokoupotrebljavane u procesima pročišćavanja vode i području desalinacije [1].

Reverzna osmoza (RO) trenutno je najpouzdanija suvremena tehnika za desalinaciju morske i bočate vode kao alternativa za dobivanje čiste vode. Njeno korištenje značajno se povećalo od 1950-ih godina pa se trenutno oko 50% desalinirane vode dostupne na globalnoj razini,

proizvodi primjenom upravo RO. Njena učinkovitost ovisi o brojnim čimbenicima, uključujući operativne parametre, korištene membrane i karakteristike ulazne struje [2].

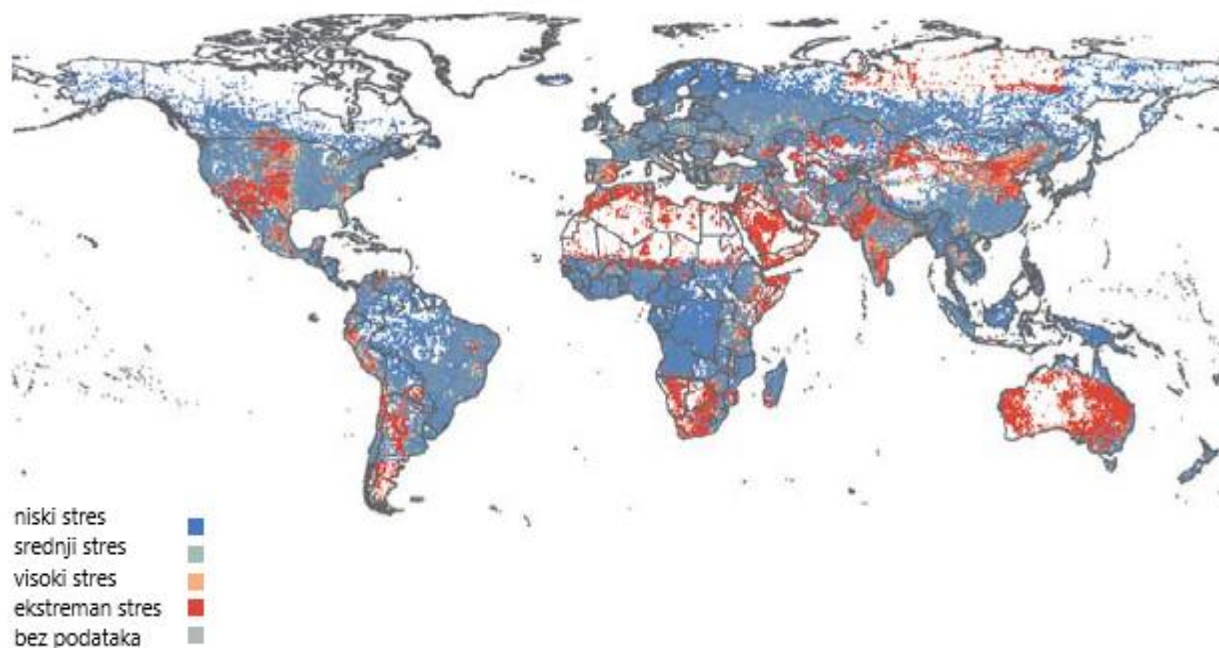
2. Opći dio

2.1. Vremenska linija upotrebe membrana

Prve naznake mogućnosti dobivanja pitke vode iz morske vode sežu još u šesnaesto i sedamnaesto stoljeće. Povijesni izvori tvrde da su mornari uspijevali doći do pitke vode putem destilacije morske vode na svojim putovanjima. Prva konkretnija postrojenja ugledala su svjetlo dana 30-ih godina 20-og stoljeća na otočju Curacao te na Arapskom poluotoku [2]. Nakon završetka Drugog svjetskog rata, kada se stanje u svijetu počelo stabilizirati, opće zdravlje populacije se poboljšalo, a smrtnost smanjila. U korak s time, svjetska populacija dostiže vrhunac demografske tranzicije 1968. godine, a porast u brojkama do današnjeg dana nemoguće je ne uočiti. Populacija se u posljednjih sto godina učetverostručila iz čega direktno proizlaze višestruki razlozi i potrebe razvijanja te unapređivanja tehnologije membranske desalinacije u ovom kontekstu [3]. Glavni razlog je svakako očit rast u potrebi vode za piće, osobito na područjima s veoma suhom klimom i mjestima s nedovoljno izvora visokokvalitetne pitke vode. Nadalje, tu su brzo napredujuća urbanizacija i industrijalizacija čega su posljedice onečišćenje vode i klimatske promjene [2,4].

Obzirom da je samo 3% svjetske vode, neslana pitka voda, od čega 80% čine glečeri i ledenjaci, zaključujemo da je samo 0,5% svjetske vode direktno dostupno, u vidu nisko salinitetne podzemne vode ili rijeka i jezera, za ljudsku konzumaciju. Za razliku od Rusije, Skandinavije, centralne i južne obale Južne Amerike te Kanade i Aljaske, predjeli poput jugozapada SAD-a, veći dio Afrike, zemlje Bliskog Istoka te velikog dijela Azije suočavaju se s visokim indeksom stresa vode kao što je vidljivo na slici 1 [4]. Posljedično bi se 2,8 bilijuna ljudi moglo suočiti s nedostatkom izvora vode za piće do 2025. godine [5].

Jasno je da će zbog toga proces desalinacije ostati potreban, ali i održiv način generiranja pitke vode. Prema svjetskim bazama podataka o desalinacijskim postrojenjima, danas je u svijetu aktivno njih oko 20 000 sa ukupnim kapacitetom proizvodnje 97,4 milijuna m^3/dan pitke vode [6].



Slika 1. Procjena dostupnosti vode za 2011. godinu [3].

Prije 1980-ih većina desalinacijskih postrojenja radila je s termalnom tehnologijom, osobito na Bliskom istoku što je područje bogato naftom, ali siromašno izvorima pitke vode. S druge strane nakon 80-ih godina na popularnosti jako dobivaju membranske tehnologije, osobito RO. U narednih dvadeset godina i nadalje, uporaba termalnih tehnologija zadržava *status quo* dok korištenje RO eksponencijalno raste. Iako su termalne tehnologije manje podložne onečišćenju (obzirom da ne koriste membrane) te se mogu kombinirati s proizvodnjom električne energije u termoenergetskim postrojenjima, negativni aspekti doveli su ih do ruba postojanja. Postrojenja koja koriste termalne tehnologije glomazna su jer iziskuju korištenje strojeva velikih dimenzija. Drugi problem jest činjenica da su isparivači koji se koriste u ovakvim postrojenjima često nesofisticirani i koriste tekućine visoke ogrjevne vrijednosti [7, 8]. Među ostalim, korištena tehnologija uvelike je ovisila o naftnom tržištu.

Balansiranje troškova goriva korištenog za pokretanje sustava i resursa korištenih za dobivanje željenih proizvoda u postrojenjima nije bilo najučinkovitije. U trenutku kada se cijena nafte povećala za gotovo 800% po barelu (1 barel=160 L), troškovi vode povećali su se za 300% kao i svijest o opasnosti povećanja emisija CO_2 [9]. Iz tih razloga druge tehnologije počele su prednjačiti pa tako trenutna proizvodnja desalinirane vode pomoću RO iznosi 65,5 milijuna m^3/dan i tako čini 69% volumena dobivene pitke vode postupcima desalinacije

[10]. Takav trend i dalje je prisutan u današnje vrijeme stoga su dizajneri i operateri ovakvih postrojenja okrenuti prema osmišljanju inovativnih ideja, proširenim istraživanjima i razvoju kako bi pogurali postojeća tehnološka rješenja prema postizanju učinkovitijih rezultata s nižim troškovima [9].

Tablica 1. Predviđanje troškova desalinacije za srednja i velika postrojenja [11].

Parametri za najbolja postrojenja u klasi	Godina 2016	Unutar 5 godina	Unutar 20 godina
Cijena vode [$\\$/m^3$]	0,8-1,2	0,6-1,0	0,3-0,5
Cijena gradnje [$\\$/MLD^*$]	1,2-2,2	1,0-1,8	0,5-0,9
*mega litara po danu			
Električna energija [kWh/m^3]	3,5-4,0	2,8-3,2	2,1-2,4
Produktivnost membrane [$m^3/membrana$]	28-47	35-55	95-120

Tako su troškovi dobivanja vode na nekoliko projekata u Saudijskoj Arabiji i Abu Dhabiju u današnje vrijeme po prvi puta dostigli cijenu manju od $0,5 \$/m^3$. Novi ugovorni i financijski modeli doprinjeli su sklapanju konzorcija sposobnih za učinkovito upravljanje poslovnim rizicima. Zajedno s nižim kamatnim stopama u financijskom sektoru, sve prethodno navedeno pridonosi snižavanju tarifne cijene. Niska cijena nafte smanjila je trošak proizvodnje komponenata postrojenja koje se baziraju na materijalima dobivenim iz nafte, kao što su membrane i plastične cijevi [6].

2.2. Svjetski kapaciteti i karakteristične potrebe za specifičnim tipovima membrana

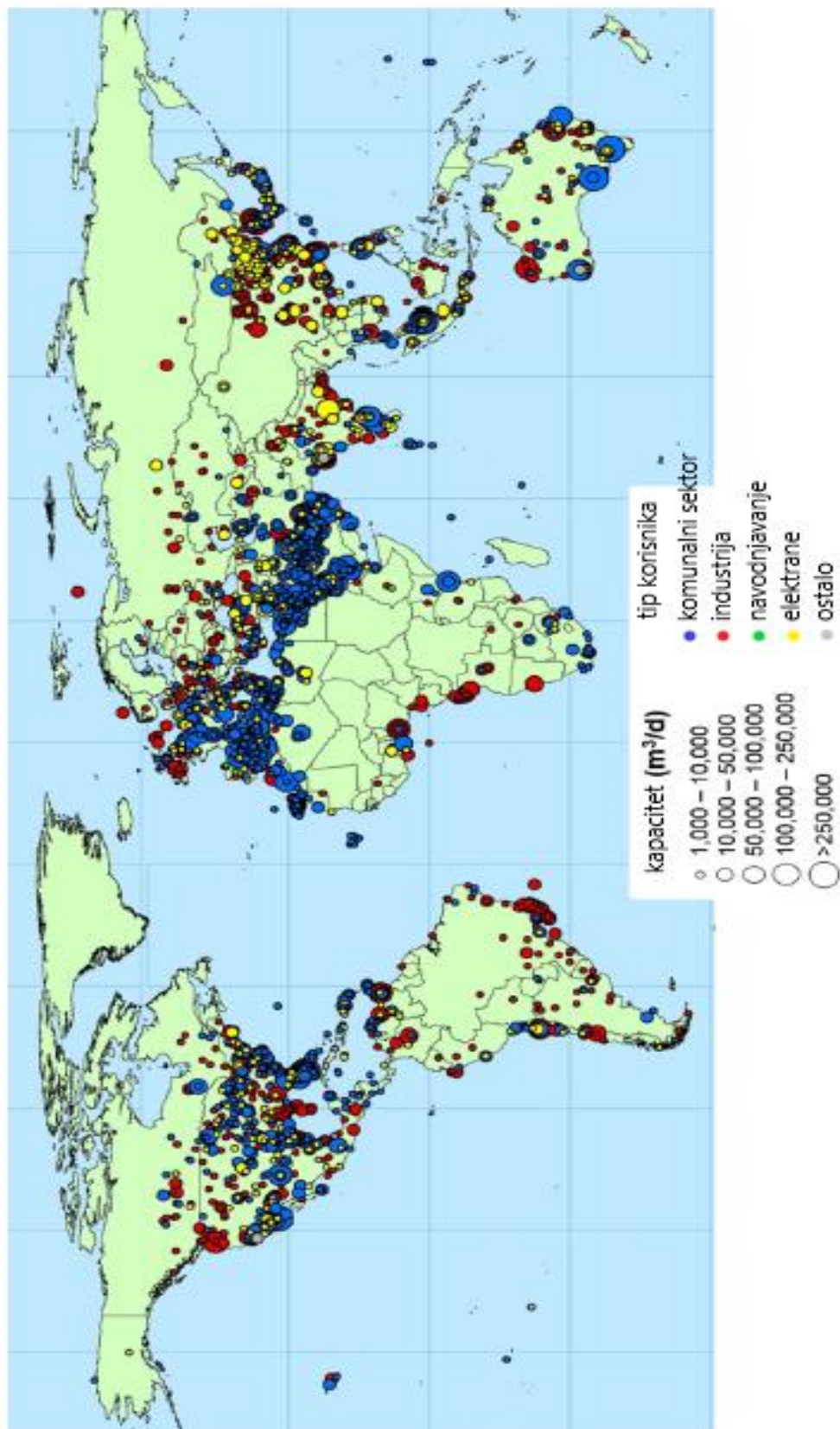
Tržište svjetske vode i tretiranja otpadne vode može se geografski segmentirati na pet većih područja: Sjeverna Amerika, Europa, Azija Pacifik, Latinska Amerika, Bliski istok i Afrika. [12]. Uže gledano, velik se broj desalinacijskih pogona nalazi se u SAD-u, Kini, Australiji, Europi te na Bliskom Istoku i sjeveru Afrike. Često se mogu pronaći na obalama kako bi bili

blizu izvoru vode te su na tim mjestima i većih kapaciteta nego oni u kontinentalnim dijelovima. Više od polovine postrojenja dobiva pročišćenu vodu za industrijske svrhe dok se kapacitivno najviše vode proizvodi u komunalne svrhe.

Na Bliskom istoku i sjeveru Afrike dominira potreba za dobivanjem pitke vode za komunalni sektor, sa pojedinačnim kapacitetima proizvodnje u intervalu od 1000 pa sve do 250 000 m^3/dan . Najveće postrojenje za desalinaciju morske vode je Jubail u Saudijskoj Arabiji gdje se dobiva čak 1,401,000 m^3 pročišćene vode dnevno. Diljem SAD-a, Europe i Australije postrojenja su kapacitivno najveća (nekoliko njih sa preko 250 000 m^3/dan proizvodnje), ali je na tim područjima lako pronaći i postrojenja čija proizvodnja služi za industriju ili dobivanje električne energije što je vidljivo na slici 2. Sjeverna Amerika druga je najveća regija prema instaliranom kapacitetu, s većinom upotrebe vode usmjerene na poljoprivredni i industrijski sektor u SAD-u. Španjolska se nalazi na vrhu europskog tržišta oporabe otpadnih voda još od 2010. s velikim projektima usmjerenim prema korisnicima iz agrikulturalnog sektora. Indija je sada tržište s najbržim rastom u svojoj regiji, uglavnom pokrenuto novim zakonima o zaštiti okoliša. Što se tiče sektora dobivanja električne energije i navodnjavanja koji zauzimaju ukupno 4,8% i 1,8%, oni čine manji, ali i dalje značajan doprinos u potrebi za dobivanjem čiste vode.

Vidljivo je da se većina postrojenja nalazi u zemljama s visokim prihodima, čak njih 67% i osiguravaju 71% kapaciteta pročišćene vode. Suprotno tome mali broj postrojenja može se pronaći u zemljama s niskim prihodima koji pridonose kapacitetima u gotovo zanemarivom postotku od 0,1% [13].

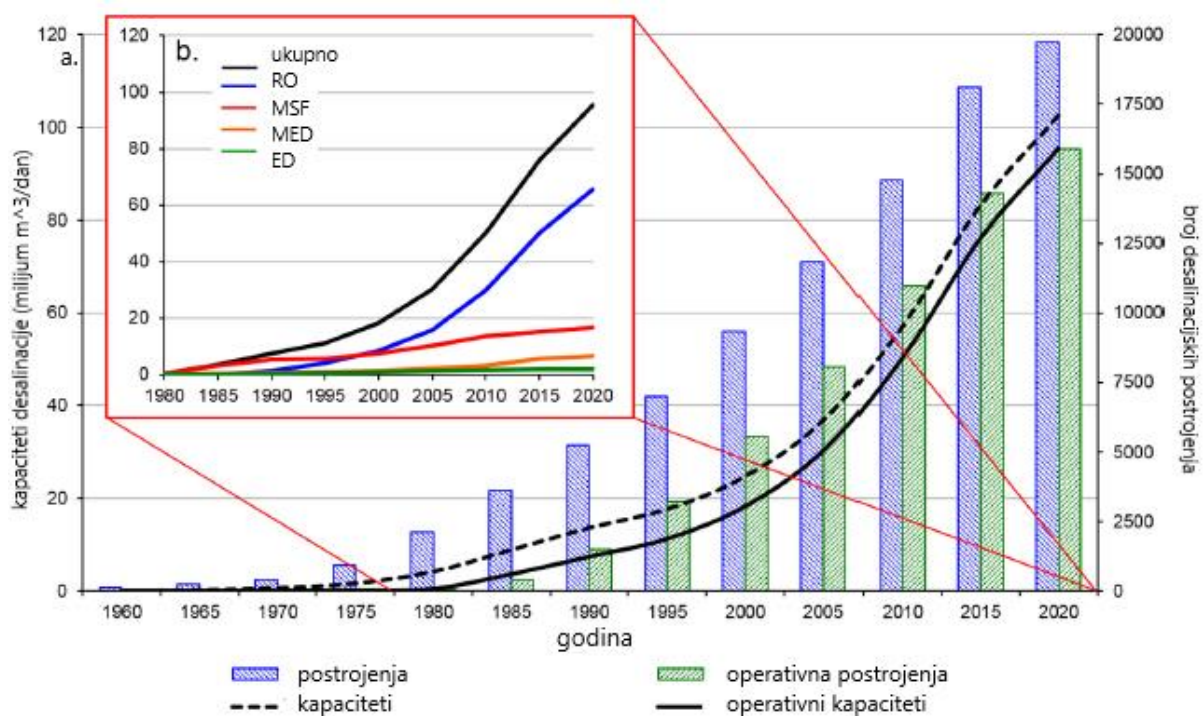
Očekuje se da će regija Azija Pacifik do 2025. dominirati ovim tržištem, a slijedit će ju Sjeverna Amerika, Europa i Latinska Amerika. Tu će, dakako, prednjačiti Kina zbog iznimno velike populacije te daljnje industrijalizacije, porasta u količini netretiranog mulja i velikih količina ispuštenih otpadnih voda [12].



Slika 2. Globalna raspodjela operativnih postrojenja i kapaciteta za desalinizaciju (>1000m³/dan) prema sektorima korisnika proizvedene vode u sektoru [10].

Područja koja su dodatno utjecala na rast kapaciteta koji je potrebno osigurati su uzvodna i nizvodna industrija nafte i plina, rudarstvo i brzi napredak u industriji mikroelektronike obzirom da je u nekim slučajevima potrebna veća količina vode za iskapanje istog elementa nego što je to bilo prije dok krajnji korisnici vide svoju priliku u situacijama gdje veća čistoća vode u procesu rezultira boljim prinosima u proizvodnji [13].

Kao što je već navedeno, RO se dominantno koristila kroz povijest dok višestupanjska jednokratna destilacija (MSF) i višestruka destilacija (MED), koje koriste termalne tehnologije, zauzimaju većinu ostale obrade vode, iako ih je brojčano mnogo manje. Te tri tehnologije čine 94% današnje proizvodnje dok se u manjim postocima još mogu pronaći nanofiltracija (NF, 6%), desalinacija elektrodijalizom (ED, 2%) i elektrodeionizacija (EDI, 1%) [9, 10].



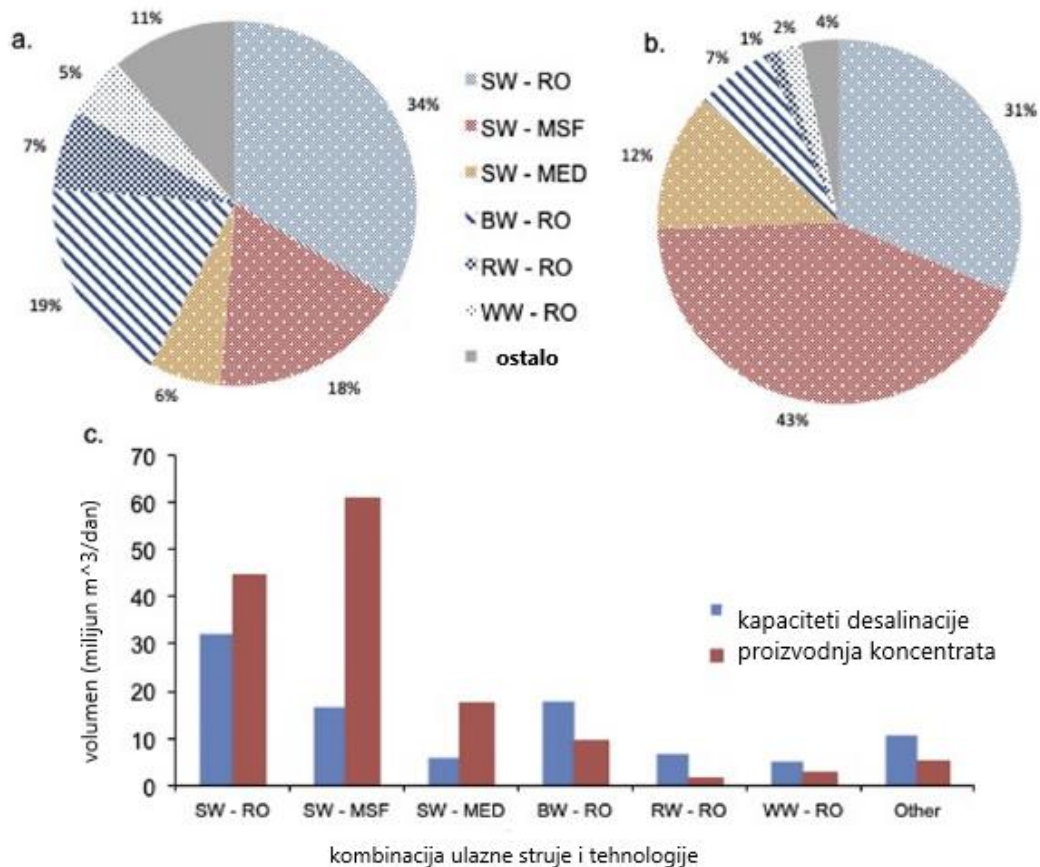
Slika 3. Trendovi desalinacije u svijetu: a. Prema broju i kapacitetu ukupnih i operativnih desalinacijskih postrojenja, b. Prema operativnim kapacitetima i desalinacijskim tehnologijama [10].

Tip desalinacije može se definirati i prema izvoru ulazne struje, obzirom da to uvelike utječe na učinkovitost procesa. Prema tome razlikujemo morsku vodu (SW), bočatu vodu (BW) i slatku vodu (RW), odnosno vodu iz rijeka i jezera.

Desalinacija morske vode prednjači sa 61% ukupne proizvodnje, a slijede ju BW i RW. U malim postocima na tržištu se javlja i mogućnost desalinacije čiste vode (PW) i otpadne vode (WW).

Ovisno o kombinaciji tih dvaju faktora dobivamo drastično različitu učinkovitost procesa desalinacije. Primjerice, termalne tehnologije obično se koriste kod vode niske kvalitete, dakle visokog saliniteta (SW), dok se elektrodijalizom pročišćava voda mnogo više kvalitete, ona s puno nižom koncentracijom soli (BW, RW). Proces desalinacije, prema tome, moguće je izvesti u osam kombinacija: SW-RO, BW-RO, SW–MSF, SW–MED, RW-RO, WW-RO, BW-ED, RW-ED [10].

Sada je moguće konkretnije usporediti trendove koji se odvijaju u svijetu. MED i MSF koje koriste SW dominiraju na Bliskom Istoku (izuzev velikog broja BW-RO postrojenja u kontinentalnom dijelu Saudijske Arabije). Izvan ovog područja dominira tehnologija RO sa širokim intervalom tipova ulazne struje (npr. u Australiji se SW, BW i WW pročišćavaju putem RO). U SAD-u također dominira RO koja koristi RW i BW sa nekoliko postrojenja za obradu SW na jugozapadnoj obali. Situacija u Europi slična je onoj u Americi, izuzev značajnog broja postrojenja koja koriste EI i NF. Što se tiče Azije, najčešće se mogu pronaći SW-RO verzije na obalnim dijelovima odnosno BW- i RW-RO verzije u kontinentalnim dijelovima [10]. Može se zaključiti da su pogoni bazirani na membranskim tehnologijama popularni na rastućim tržištima, poput Alžira, Španjolske i Australije, dok su termalni procesi teško zamjenjivi na tržištu Bliskog Istoka gdje su energetske troškovi niži [6].



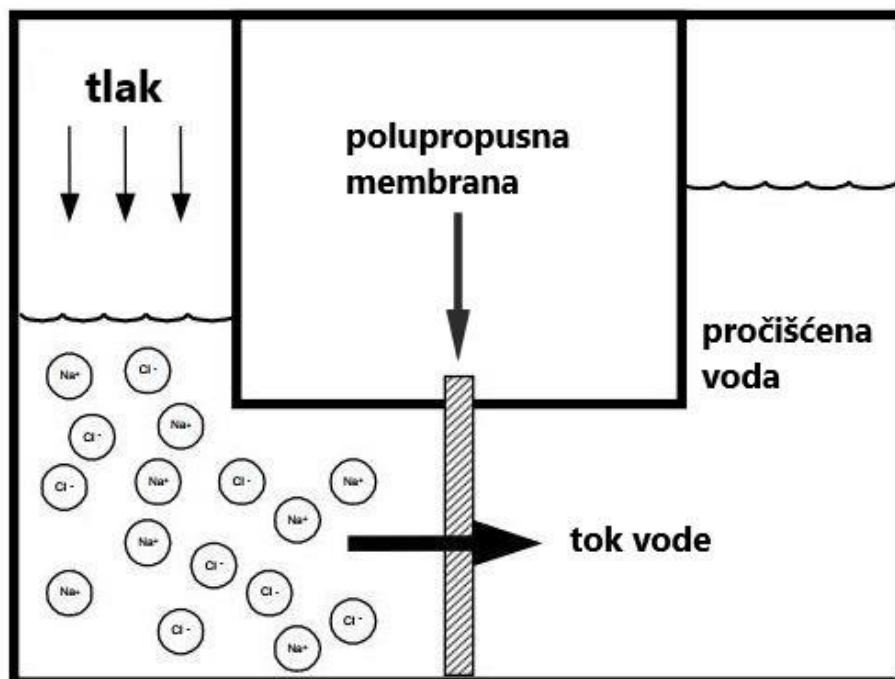
Slika 4. Glavne kombinacije tipa ulazne struje i tehnologije prema: a. globalnom udjelu u proizvodnji desalinirane vode (%), b. globalnom udjelu u proizvodnji slanice (%), c. ukupnom kapacitetu proizvodnje desalinirane vode i volumenu proizvedene slanice (milijun m^3/dan) [10].

2.3. Princip rada membranske desalinacije

Tlačni postupci koriste polupropusne membrane za pročišćavanje vode tijekom čega molekule vode difundiraju kroz membranu, dok se soli zadržavaju s tlačne strane membrane. Ulazna struja, tzv. *feed*, dolazi do semipermeabilne membrane koja ju razdvaja na struju permeata, što je pročišćena voda koja izlazi van pod atmosferskim tlakom te na struju retentata koja se zadržava ispred membrane. Takva ideja dolazi od svojevrsne modifikacije procesa osmoze. Osmoza se može definirati kao prirodni proces u kojem se molekule vode spontano kreću iz otopine niske koncentracije soli (niskog osmotskog tlaka) do otopine visoke koncentracije soli (visokog osmotskog tlaka) preko polupropusne membrane koja ne dopušta prolazak otopljenim tvarima.

Otopina s većom koncentracijom soli ima niži kemijski potencijal tako da će molekule čiste vode putovati preko membrane u tu otopinu sve dok se ne postigne ravnoteža kemijskih potencijala dviju otopina. To će se dogoditi kada se izjednače hidrostatski i osmotski tlak. Međutim, takav protok molekula vode može se promijeniti dodavanjem vanjskog pritiska na ulaznu struju. Dodatni tlak povisit će kemijski potencijal vode u koncentriranoj otopini što će uzrokovati prijelaz molekula vode na drugu stranu, jer ona sada ima niži kemijski potencijal. Taj fenomen poznat je kao reverzna osmoza i nalazi široku upotrebu u procesima pročišćavanja vode, a prikazan je na slici 5 [2].

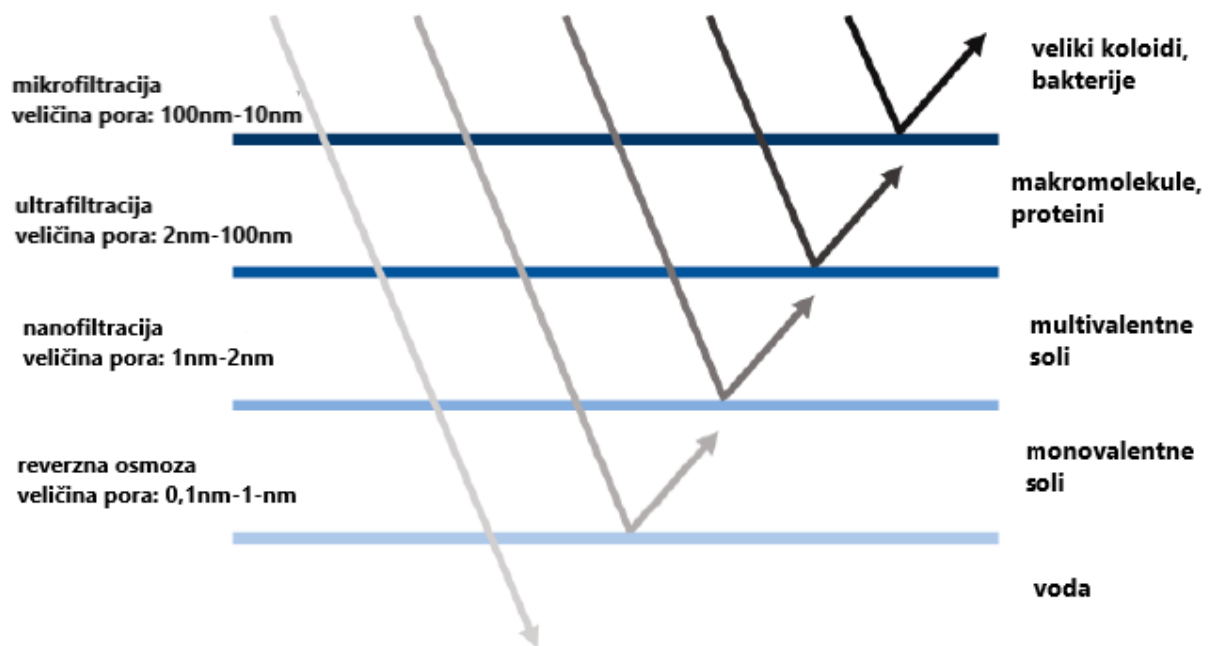
Dakle, desalinacijom osiguravamo dobivanje vode pročišćene od nečistoća, poput raznih soli te otopljenih i neotopljenih organskih komponenti iz ulazne struje koje ne mogu proći kroz membranu. Produkt, dakako, ne mora biti potpuno čista voda već mora imati relativno nisku koncentraciju soli (>500mg/L) koje su čovjeku i tako potrebne za normalno tjelesno funkcioniranje. Ako su prisutne, male molekule poput klorida, amonijaka i ugljikovog dioksida, one mogu proći kroz polupropusnu membranu pa ih treba naknadno ukloniti adsorpcijom na aktivni ugljen. Neke bakterije i virusi također u iznimnim slučajevima mogu proći kroz polupropusnu membranu, stoga je tada potrebno provesti i dezinfekciju vode kloriranjem, ozonom, UV zračenjem i sl.



Slika 5. Jednostavan shematski prikaz reverzne osmoze [4].

3. Membrane

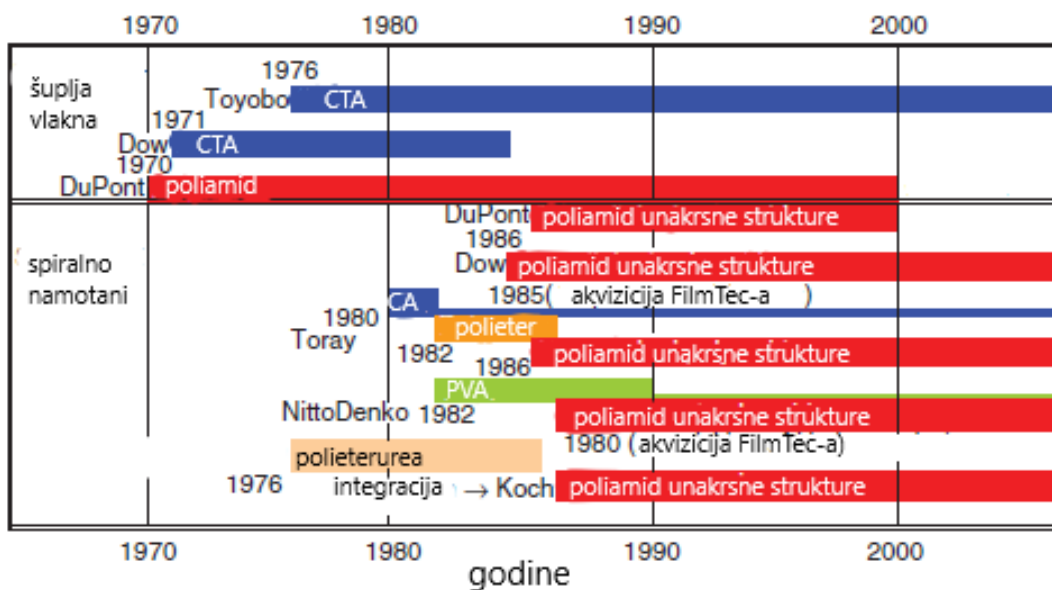
Za pripremu membrana mogu se koristiti sve vrste različitih sintetskih materijala: anorganski (keramika, staklo, metal) ili organski (polimeri). Materijal se modificira kako bi se dobila membranska struktura s morfologijom pogodnom za određeni tip separacije [15]. Dostupni materijali i tehnologije na tržištu nisu konačne, najefikasnije i najisplativije, ali najbolje su od onoga što se trenutno pruža.



Slika 6. Klasifikacija membrana za pročišćavanje vode prema veličini pora i zaostalim tvarima [1].

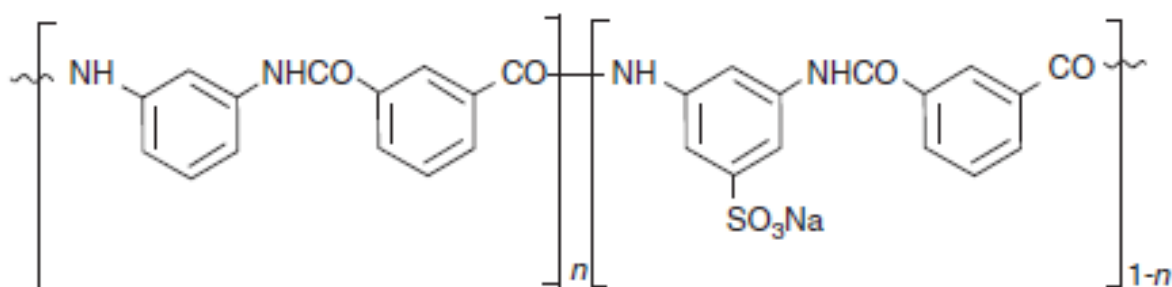
3.1. Polimerni (organski) materijali

Membrane izrađene od raznih polimera dominiraju tržištem od 1970-ih, obzirom da ih karakteriziraju izvrsne performanse i niski troškovi. Glavne podvrste su celulozne (CA) membrane (celulozni acetati, celulozni diacetati, celulozni triacetati) i tankoslojne kompozitne membrane (TFC), pripravljene od poliamida, piperazina, poliakrilnitrila, polisulfona, polietersulfona, politetrafluoretilena, polietilena itd. [1, 15]. TFC membrane zbog svojih su sveobuhvatno dobrih svojstava lako postale dominantna varijanta na tržištu.



Slika 7. Vremenska crta razvoja materijala RO membrana [9].

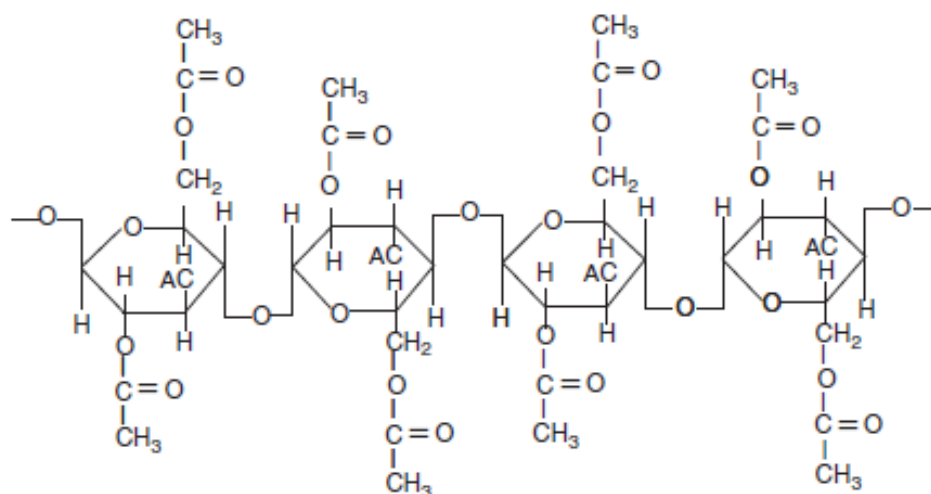
Poliamid je makromolekula koja sadrži ponavljajuće amidne skupine (-CO-NH-) i može se pronaći u prirodi (vuna, svila, angora), ali dobiti i sintezom u laboratoriju [1]. 1969. godine razvijena je i komercijalizirana membrana od aromatskih poliamida linearne strukture, koja se koristila kod membrana sa šupljim vlaknima. Inicijalno su se njome obrađivale samo bočate vode, ali za nekoliko godina uspješno je desalinirana i morska voda. Karakteristike takvog materijala su mogućnost uvijanja lanaca uporabom odgovarajućih otapala i aditiva, određene skupine koje nose ione mogu osigurati dodatna hidrofилna svojstva, mikroorganizmi ne mogu razvijati enzime koji bi reagirali za sintetskim polimerom te su membrane sposobne raditi pri višim temperaturama i širem području pH vrijednosti (4-11) bez da hidroliziraju. Ozbiljan negativni aspekt ovakvih membrana je visoka razina osjetljivosti na oksidanse poput klora koji se učestalo koristi u dezinfekciji [4, 9].



Slika 8. Struktura tipičnog materijala RO membrane (aromatski poliamid linearne strukture) [9].

3.1.1. Celuloza

Celulozni materijali dugo su bili smatrani pionirima u području membranske tehnologije. Iako ih limitiraju manjak temperaturne i kemijske stabilnosti, celuloza diacetat i celuloza triacetat često se koriste zbog bolje otpornosti na klor od poliamida. Obično se pripremaju faznom inverzijom gdje se polimer transformira iz tekućeg u kruto stanje. Polimer se prvo otopi u organskom otapalu ili mješavini otapala da bi se formirala otopina za lijevanje. Otopina se potom nanosi na ravni ili cijevni nosač koji se uroni u kupelj bez otapala te dolazi do koagulacije polimera i tako se formira membrana na bazi celuloze. Očvršćivanje je često pokrenuto prijelazom iz jednog u dva tekuća stanja, potom se tekuća faza koncentriranijeg polimera očvrstne i stvara čvrstu matricu. Kontroliranjem tog prijelaza može se utjecati na morfologiju mebrane [9]. Kao dodatak mogućnosti oblikovanja, membrane su hidrofilne ali istovremeno nisu topljive u vodi što je bitan kriterij pri odabiru materijala. Trenutno se membrane na bazi celuloze najčešće izrađuju od mješavine celuloza diacetata i celuloza triacetata [4].



Slika 9. Struktura tipičnog materijala RO membrane (celuloza triacetat) [9].

Iako su se tijekom zadnjih nekoliko desetljeća TFC membrane pokazale superiornijima, membrane na bazi celuloze i dalje se koriste na tržištu uslijed njihove izuzetne otpornosti na klor što istovremeno ovisi o tipu polimera, postupku sinteze i pH vrijednosti ulazne struje. Obzirom da je dezinfekcija vode prije desalinacije bitna u RO i NF postrojenjima, važno je imati membrane koje će biti tolerantne na klor, kao najčešći izbor sredstva za dezinfekciju.

Učinak ovakvih membrana može se poboljšati dispergiranjem nanočestica srebra na njihovu površinu što jača biostabilnost, održavajući permeabilnost za vodu i nepropusnost za soli [20]. Na temelju modela koji predviđa promjene u performansi RO modula razvijena je metoda gdje se povremeno injektira klor i tako se kontrolira onečišćenje membrane na bazi celuloza triacetata. Time se omogućava stabilan rad postrojenja i dugoročno korištenje membrane obzirom na minimalnu potrebu njenog čišćenja. Primjeri korištenja takve tehnologije mnogobrojni su na Bliskom istoku gdje je stopa onečišćenja membrane uvećana zbog visokih temperatura koje se postižu tijekom procesa [9].

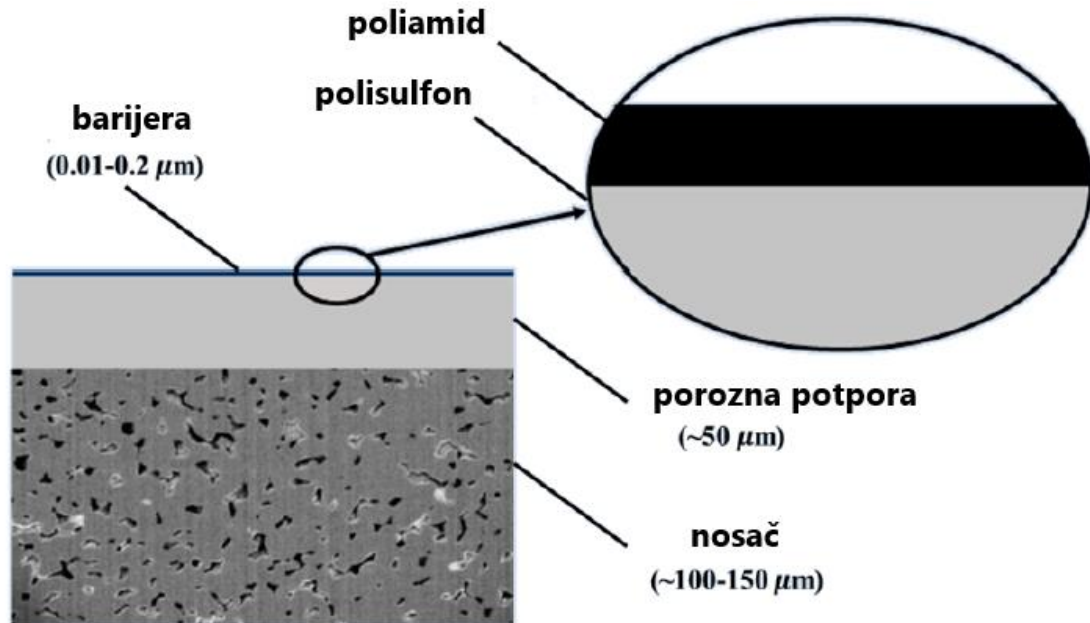
Prevlačenjem fosfolipidnog polimera preko celulozne membrane također se smanjuje mogućnost onečišćenja membrane pri visokom fluksu vode, a mali postotak mineralnih punila (npr. aluminij oksid) može spriječiti kompaktiranje membrane [16, 17]. Ususret takvim poboljšanjima, CA membrane i dalje se često koriste u procesima s učestalom dezinfekcijom kao što je to situacija u farmaceutskoj industriji i povremeno u prehrambenoj industriji [4].

3.1.2. TFC

Pokazalo se da su tankoslojne kompozitne membrane (TFC) u zadnja četiri desetljeća pozicionirale na samom vrhu tržišta zbog svoje dobre propustljivosti za vodu, odnosno odbijanja soli, koje je efikasnije nego što je slučaj kod celuloznih membrana. Konkretno, poliamidna tankoslojna kompozitna membrana (PA TFC) ima najbolju izvedbu i rezistenciju na klor. Struktura PA TFC membrane sastoji se od tanke selektivne barijere na poroznom nosaču. Te mikropore osiguravaju mehaničku snagu i veći fluks vode dok barijera sudjeluje u ionskoj separaciji. Za sintezu ili modifikaciju tih dvaju slojeva mogu se koristiti razni materijali i pristupi u cilju postizanja termičke i kemijske stabilnosti, propusnosti za vodu, odnosno odbijanje soli itd.

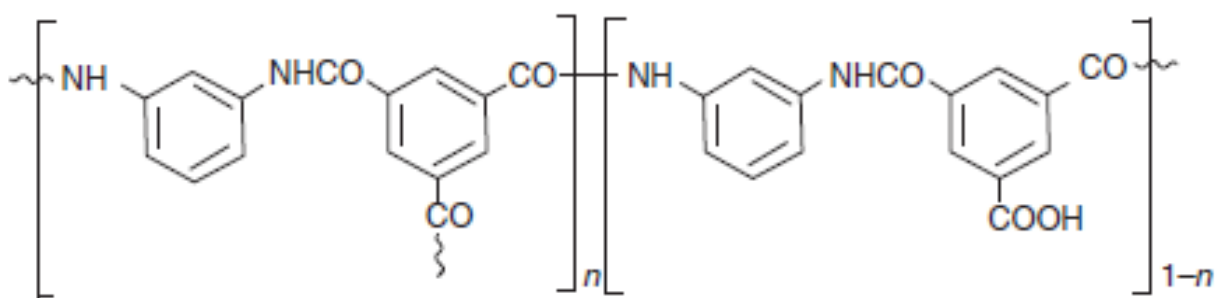
U usporedbi s CA, PA TFC membrane bolje odbijaju soli i silicij dioksid te mogu raditi u uvjetima šireg raspona temperature (do 45 °C) i pH (2-12), a za dobre rezultate potreban je niži radni tlak. Ipak, morfologija površine ovih membrana hrapava je pa to omogućuju lakše onečišćenje [4].

Trošak proizvodnje ovih membrana viši je nego što je to slučaj sa celuloznim membranama obzirom da su potrebna minimalno dva koraka: sinteza mikroporoznog nosača koju slijedi sinteza i nanošenje barijere na nosač [1].



Slika 10. Struktura TFC kompozitne membrane [1].

Na TFC membrane često se primjenjuje aromatski poliamid unakrsne strukture prikazane na slici 11.



Slika 11. Struktura tipičnog materijala RO membrane (aromatski poliamid unakrsne strukture) [9].

Glavni problem sa TFC membranama jest činjenica da postepeno dolazi do pada fluksa i odbijanja soli kako se membrana onečišćuje tijekom procesa, osobito ako tretirana voda sadrži bakterije i nutrijente. Radijacijom ili tretmanom plazmom moguće je nanijeti hidrofilne

aditive na površinu membrane i umanjiti mogućnost potencijalnog začepljenja [18].

Drugi problem predstavlja slaba otpornost na klor, međutim uspješno je osmišljena membrana kod koje se uslijed sekundarne međupovršinske polimerizacije eliminiraju interakcije između slobodnih amino skupina i slobodnog klora [19].

Polisulfon jedan je od najznačajnijih mikroporoznih nosača za TFC membrane [20]. Obzirom da pokazuje dobru strukturalnu stabilnost u širem području pH vrijednosti, na njega se može nanijeti barijera izrađena od veoma kiselih ili lužnatih prekursora. Ipak, nedostaci takvog materijala su niska otpornost na promjene u atmosferskim uvjetima, niska otpornost na klor i sklonost pucanju. U pomoć tome može se priskočiti na dva načina. Otpornost na klor moguće je poboljšati dodatkom nanočestica i promjenom medote pripreme (primjerice sulfokloriranje metalacijom) [21].

3.2. Anorganski materijali

Općenito govoreći, anorganske membrane uključuju membrane od metalnih oksida i membrane na bazi ugljika. Anorganske membrane najčešće čine makroporozni nosač i mezo- ili mikroporozna barijera. U industriji se obično keramičke membrane koriste pri uvjetima koji su otegotni za polimere membrane. Takve membrane, sintetizirane od naprednih poroznih materijala poput ugljikovih nanocjevčica (CNT) i grafen oksida (GO), imaju velik potencijal primjene u smislu potrebe korištenja tankih filmova zbog svoje selektivnosti i učinkovitosti u procesima pročišćavanja vode [1, 22, 23].

3.2.1. Membrane od metalnih oksida

Aluminijev oksid (Al_2O_3), cirkonijev dioksid (ZrO_2), titanijev dioksid (TiO_2) i njihove mješavine sastavnice, najkomercijaliziranije su membrane metalnih oksida na tržištu. Imaju mnogo višu kemijsku stabilnost i bolja mehanička svojstva od organski pripremljenih membrana. Najčešće se priređuju sol-gel metodom gdje se u četiri koraka otopina prekursora konvertira u čvrstu membranu. Uz relativno malu promjenu veličina pora, permeabilnost kao i retencija određenih iona može se drastično promijeniti.

Cijepljenje hidrofobnim prašcima pak smanjuje hidrofilnost membrane što ima dobar efekt na odbijanje soli. Unatoč istaknutim rezultatima RO i NF membrana od metalnih oksida, nedostaci poput troškova sirovina i debljine membrane ometali su njihovu popularnost na tržištu. Ta problematika može se riješiti daljnjim smanjenjem debljine membrane ili otkrivanjem drugih jeftinih materijala koji imaju visoku kemijsku i toplinsku stabilnost [1].

3.2.2. Membrane na bazi ugljika

U proteklih nekoliko godina mezoporozne membrane privukle su pažnju i zanimanje brojnih znanstvenika na području onečišćenja i pomanjkanja vode za piće. Osobito se ističu CNT i GO membrane zbog svoje velike specifične površine i ujednačene strukture s prilagodljivom veličinom pora i jakim atomskim vezama [24, 25]. CNT imaju najviši omjer čvrstoće s obzirom na težinu materijala od bilo kojeg poznatog materijala. Inkorporacija CNT-a s polimernim i anorganskim matricama omogućava poboljšanje hidrofilnosti, strukturne stabilnosti, otpornosti na onečišćivanje i zadržavanje soli. Unatoč prednostima CNT-a, nedostaci poput visokih troškova i niske selektivnosti za određene ione (arsenat, arsen i natrij) ograničili su njihovu komercijalizaciju [26].

Grafen je ekonomičan dvodimenzionalni alotrop ugljika koji se sastoji od jednog sloja ugljikovih atoma raspoređenih u šesterokutnoj rešetki te je visoko propustan i selektivan materijal za procese pročišćavanja vode [27, 28]. Čisti grafen ima gustu strukturu koja je nepropusna za molekule plina i tekućina. Stoga, za poboljšanje propusnosti i ionske selektivnosti, defekti ili funkcionalne skupine moraju se ciljano generirati. Iako je došlo do mnogih proboja u slučaju poroznih grafenskih i GO membrana za pročišćavanje vode, specifični zahtjevi za sintezu poroznih membrana velikih površina i njihova reprodukcija na industrijskoj razini ostaju izazov koji treba prebroditi [1].

3.2.3. Membrane s kombiniranim matricama

Membrane s kombiniranim matricama (MMM) popularna su tema istraživanja, a nastaju inkorporiranjem anorganskih punila s organskim matricama. Glavna prednost ovih membrana

je kombinacija niskih proizvodnih troškova, izvrsne selektivnosti i velike gustoće pakiranja polimernih materijala sa svojstvima poželjnim za stabilan rad. MMM membrane koriste benefite kako polimernih tako i keramičkih materijala, međutim nisu jednostavne za proučavanje obzirom da granica između raznih materijala može poprimiti neželjenu strukturu pa materijali postaju netopljivi jedan u drugom [1].

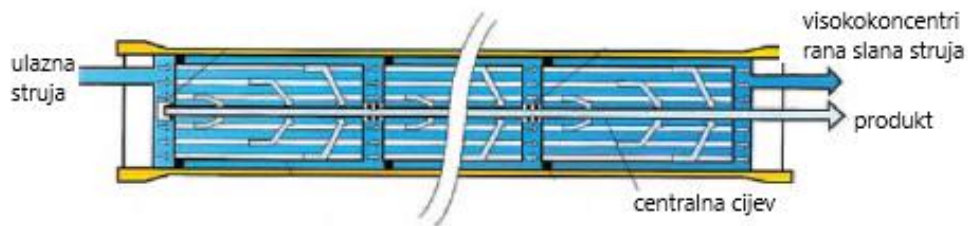
3.3. Moduli

Tipove membranskih modula možemo podijeliti na četiri vrste, a sastoje se od jedne ili više membrana i potporne građe. To su spiralni modul, modul sastavljen od šupljih vlakana, modul na principu filter preše i cijevni modul. Prva dva najčešće se koriste kod desalinacije morske vode i pročišćavanja vode, dok su druga dva rjeđe u upotrebi, a u zadnje vrijeme mogu se pronaći kod obrade eluata iz spalionica otpada. Ciljevi pri konstrukciji modula su postizanje dobrog iskorištenja aktivne membranske površine, osiguravanje visoke gustoće slaganja membrana, postizanje dobrih hidrauličkih uvjeta, mogućnost lakog čišćenja membrana, smanjenje potrebe predobrade vode i ekonomičnost procesa [9, 15].

3.3.1. Spiralni modul

Spiralni modul sastoji se od najmanje dvije membrane (dva lista membrane) razdvojene poroznim nestlačivim potpornim materijalom. Potporni materijal „štiti“ membranu od radnog tlaka i omogućuje protok permeata. Ovojnica svakog para membrana zalijepljena je duž tri ruba kako bi se spriječila kontaminacija permeata, a četvrti rub pričvršćen je za cijev za odvodnju permeata te je nekoliko parova spiralno namotano oko odvodne cijevi. Ulazna struja struji aksijalno preko membrana, a produkt prolazi i kroz porozni materijal te izlazi u cijev za odvod kao što je prikazano na slici 12. Prilikom strujanja preko membrana separatori stvaraju vrtloge zbog kojih se smanjuje koncentracijska polarizacija i poboljšava miješanje struje. Međutim postoje dvije popratne pojave na koje treba obratiti pozornost. To su neželjeno povišenje pada tlaka u pojnom kanalu zbog neadekvatnog promjera što dovodi do gubitka na kvaliteti i mogućnosti onečišćenja membrana, odnosno blokiranja pora visokokonzentriranom slanom strujom. Iz tih razloga određuju se optimalni odnosi visine kanala za ulaznu struju i

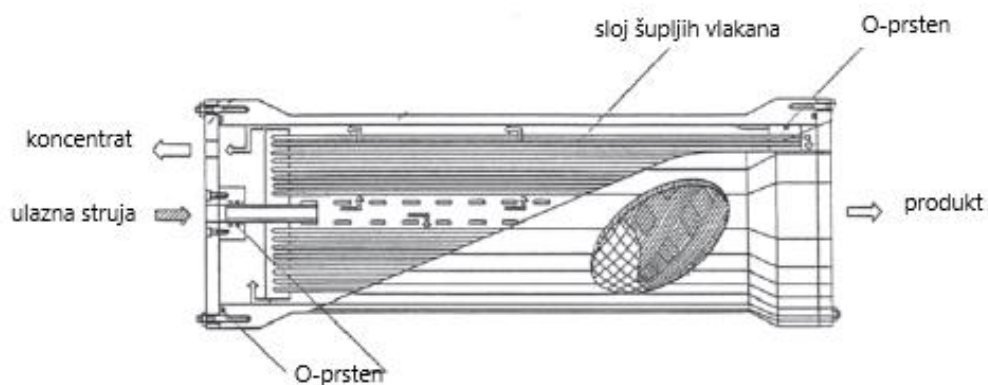
kanala permeata te se za određene tipove ulazne struje provodi predobrada [9, 15].



Slika 12. Struktura spiralnog modula i popratnih elemenata [9].

3.3.2. Modul sa šupljim vlaknima

Modul sa šupljim vlaknima svoju svrhu pronalazi kod mikro- i ultrafiltracije. Membrana je napravljena od finog materijala koji se proizvodio za tekstilnu industriju dulji period vremena tokom povijesti. Dostupni polimeri su celulozni triacetat, celulozni diacetat i aromatski poliamid. Sam modul sastoji se od šupljih vlakana, smještenih u tlačnoj posudi, čiji su krajevi učvršćeni u čelne ploče od epoksi smole. Ulazna struja izvana dolazi na snop vlakana maksimalnom brzinom, prolazi kroz vlakna, a permeat na čeonim stranama izlazi iz njih pri minimalnoj brzini. Zbog visoke gustoće pakiranja, membrane sa šupljim vlaknima osiguravaju znatno niži fluks od spiralnih i filter preše. Prednost ovih modula je visoka konverzija koja se kreće u rasponima od 75% za BW, odnosno 25 do 60% za SW što ih čini boljim od spiralnih modula. Nude veću raznolikost i fleksibilnost procesa i dugotrajno korištenje iste membrane [9, 15].



Slika 13. Struktura modula sa šupljim vlaknima [10].

4. Izazovi i metode poboljšanja procesa desalinacije

Postrojenja koja rade na desalinaciji morske vode iziskuju takav unos vode koji ima odgovarajuću kvantitetu i relativno konzistentnu kvalitetu kako bi se omogućilo dostizanje svih ciljeva proizvodnje. Iako se to čini očiglednim, postizanje odgovarajućih uvjeta ipak nije jednostavno zbog dinamike mora. Uvjeti u moru veoma su promjenjivi. Valovi mogu drastično utjecati na dubinu i temperaturu mora te čak u krajnjem slučaju oštetiti konstrukciju postrojenja. Kako se približavamo obali taj utjecaj postaje sve jači i odvija se u češćim intervalima. Morska voda može uzrokovati i operativne probleme jer djeluje korozivno dok alge, sitne čestice i mikroorganizmi u vodi mogu uzrokovati onečišćenje membrane. Iz tih razloga izgradnji postrojenja mora prethoditi pomna evaluacija okolnih uvjeta na mjestu unosa ulazne struje. Pritom se u obzir uzimaju fizikalne karakteristike, meteorološki i oceanografski podaci, biologija mora i mogućnost onečišćenja operativnih dijelova postrojenja. Prilikom procjene ulazne struje treba uzeti u obzir sve sastavnice koje mogu utjecati na rad postrojenja i rad procesa uključujući temeljit pregled baze podataka o kvaliteti vode, temperaturi, ukupnim otopljenim krutim tvarima (TDS), ukupnim suspendiranim krutim tvarima (TSS) i ukupnom organskom ugljiku (TOC). Tek onda može se odabrati dizajn ulazne struje [29].

Budući da je veza između tipa desalinacije i vrste ulazne struje iznimno bitna za učinkovitost procesa, oba faktora ključna su za kvantifikaciju koncentrata koji preostaje kao nusprodukt pročišćavanja. Općenito, konverzija je veća što je početna koncentracija soli manja, zato se s WW postiže najmanja konverzija dok s PW najveća. Ponovno u priču ulazi i tehnologija desalinacije i dobiva se širi kontekst. Iz tablice 1 vidljivo je da SW-RO ima relativno nisku konverziju u usporedbi s istom tehnologijom koja koristi BW i RW. Slično vrijedi i za ostale tehnologije u različitim kombinacijama koje su prethodno navedene. Termalne tehnologije obično postižu nižu konverziju od membranskih tehnologija, ali je ona svakako najviša kod NF, ED, EDI i EDR za sve tipove ulaznih struja.

Konverzija procesa RO definira se kao volumni udio ulazne vode iz kojeg se dobio permeat. Uzimajući u obzir tokove RO na slici ukriženog rada (14), konverzija se može izračunati na sljedeći način: $X = \frac{Q_P}{Q_F} \cdot 100\%$, gdje su Q_P i Q_F protoci ulazne struje i permeata.

U većini sustava RO, taj iznos kreće se od 50 do 85% te ovisi o karakteristikama ulazne struje, zasićenosti ulazne struje, predobradi, konfiguraciji dizajna i potrebama zbrinjavanja retentata. Veća konverzija rezultira nižim količina koncentrata koju je potrebno naknadno zbrinuti, ali na uštrb čistoće permeata [2, 4].

Iz tih činjenica proizlaze ekonomski troškovi postrojenja. Kod struja niskog saliniteta potreban je manji radni tlak. Zbog toga je potrošnja energije manja, a posljedično su investicijski troškovi niži. Ipak, visokoučinkovite membrane rijetko se koriste za pročišćavanje vode visokog saliniteta [10].

Tablica 2. Relativni iznosi konverzije različitih kombinacija ulazne struje i tehnologije za desalinaciju [10].

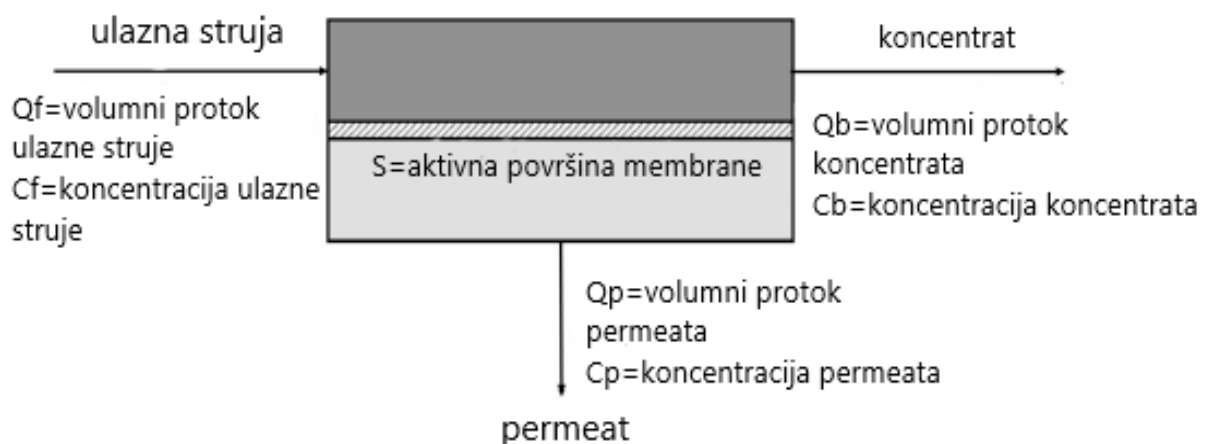
Tip ulazne struje	Tehnologija							
	RO	MSF	MED	NF	ED	EDI	EDR	Ostalo
SW	0,42	0,22	0,25	0,69	0,86	0,90	/	0,40
BW	0,65	0,33	0,34	0,83	0,90	0,97	0,90	0,60
RW	0,81	/	0,35	0,86	0,90	0,97	0,96	0,60
PW	0,86	0,35	/	0,89	0,90	0,97	0,96	0,60
BR	0,19	0,09	0,12	/	0,85	/	/	0,40
WW	0,65	0,33	0,34	0,83	0,90	0,97	/	0,60

Glavna tendencija je osmisliti sustav koji će omogućiti snižavanje radnog tlaka kod obrade BW kako bi se snizio utrošak energije. S druge strane, želi se povećati sposobnost odbijanja soli pri radu s visokim tlakovima kod obrade SW. Još 1987. godine performanse membrana za obradu BW poboljšane su uslijed razvoja kompozitne membrane aromatskog poliamida unakrsne strukture. Takva membrana postiže četiri do pet puta bolji fluks vode te pet puta bolju kvalitetu produkta od klasične celulozne membrane. Iz toga su se razvile ultra-niskotlačne membrane koje mogu raditi pri 0,75 MPa te super-ultra-niskotlačni elementi membrane koji se mogu koristiti pri 0,5-0,3 MPa, dakle mogu raditi na trećini tlaka koji bi bio potreban za niskotlačne membrane i tako štede na operativnim troškovima.

Što se tiče SW-RO postrojenja, većina ih dostiže konverziju od tek 40% obzirom da većina membrana dostupnih na tržištu nije u mogućnosti raditi pri tlakovima većim od 7 MPa. Recentniji napredak leži u korištenju visokotlačnih spiralno omotanih elemenata s dobrim odbijanjem soli, čime se, kombinirano s inovativnom rekuperacijom energije i unaprijeđenim pumpama, reduciraju troškovi investicije i rada pogona [30].

4.1. Koncentracijska polarizacija

Za vrijeme RO desalinacije dolazi do konvektivnog strujanja otopljenih tvari u vodi, iz mase fluida prema membrani. To maksimizira koncentraciju soli na površini membrane i posljednično stvara granični sloj unutar kojeg je koncentracija soli veća od one u masi fluida. To nadalje uzrokuje i povratni difuzijski transport soli dalje od membrane, međutim konvekcija ipak prevladava nad difuzijom zbog čega se molekule soli gomilaju kako u graničnom sloju tako i po površini membrane. Rezultat toga jest da je koncentracija na površini membrane uvijek veća od koncentracije soli u masi ulazne struje. Zbog takvog nakupljanja odbačenih molekula soli uz površinu membrane javlja se fenomen poznat kao koncentracijska polarizacija (CP). U praksi se često koristi ukriženi način rada gdje se iznad membrane nalaze promotori gibanja kako se otopina uz samu membranu ne bi koncentrirala. Učinci CP na izvedbu desalinizacije vrlo su nepoželjni, ali mogu se ublažiti namještanjem brzine ulazne struje, rotirajućim ili vibrirajućim modulima, pulziranjem i sl. [2].



Slika 14. Shema kontinuiranog procesa RO s ukriženim načinom rada [2].

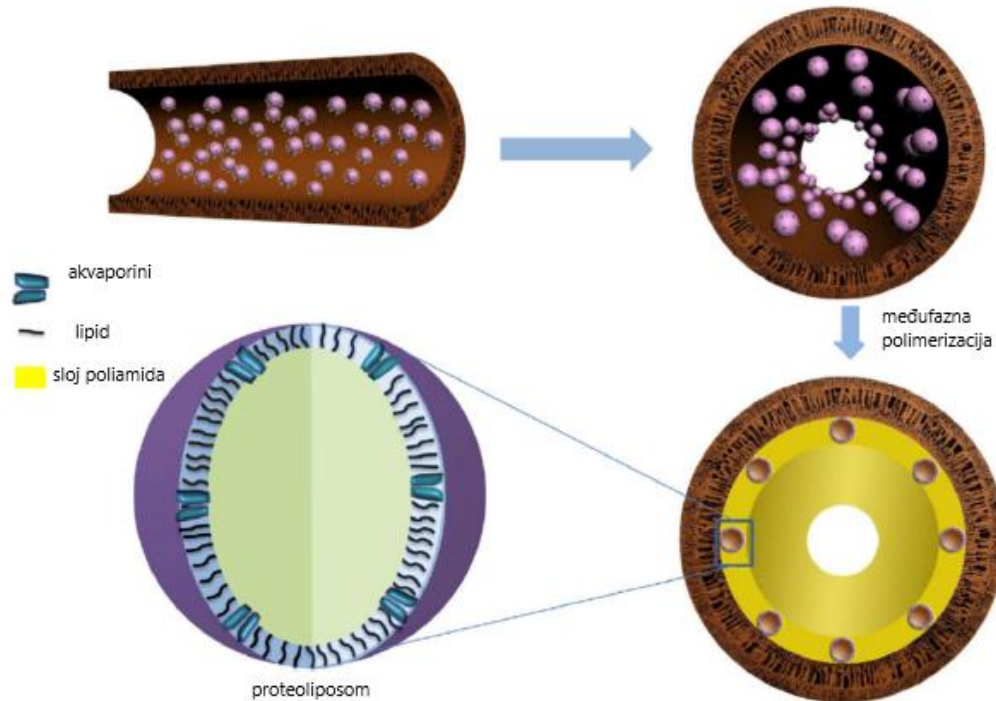
4.2. Modifikacija površine

Modifikacija površine membrane može podrazumijevati fizikalnu ili kemijsku adaptaciju membrane. Kada govorimo o fizikalnoj modifikaciji radi se o adsorpciji ili površinskim prevlakama. Stavljanje prevlake preko površine membrane relativno je jednostavan proces i upravo zato je potaknuo daljnja istraživanja pogodnih materijala. Važno je odabrati materijal koji će izbjeći pretjerano povećanje otpora koji pruža permeat što bi moglo uzrokovati smanjenje njegova fluksa. Krucijalno je da taj sloj bude tanak i okarakteriziran visokom propusnosti za vodu. Većina takvih modifikacija bazira se na oblaganju površinskog sloja koji umanjuje vjerojatnost onečišćenja i oksidacije klorom. Kemijska modifikacija podrazumijeva širok raspon postupaka poput hidrofilizacije, oplemenjivanja radikalima, plazmatske polimerizacije te iniciranog kemijskog taloženja pare (iCVD). Ti postupci osiguravaju dugotrajnu kemijsku stabilnost u usporedbi s fizikalnim postupcima jer se membrana aktivira kroz kemijske reakcije vezanjem materijala na membranu kovalentnim vezama. Iako ovakve adaptacije unaprijeđuju svojstva membrana, većina ih je i dalje u procesu laboratorijskog proučavanja zbog kompleksnosti i visokih troškova, ali to ne umanjuje njihovu vrijednost. Kao i s većinom drugih metoda koje će još biti navedene u ovome radu, u istraživanjima je potrebno više pažnje posvetiti postizanju kemijske stabilnosti membrane, osobito kada su one u čestoj prisutnosti dezinfektanata [31].

4.3. Biomimetika

Šuma mangrova primjer je biološke desalinacije koji se javlja u prirodi, a neporecivo je blizak industrijskom procesu uklanjanja soli iz vode. Biljke mangrova odvajaju molekule vode iz SW i izlučuju kristaliće soli kroz svoj korijen. Slična pojava može se vidjeti i kod nekih vrsta ptica koje velik dio vremena obitavaju daleko od obale. One pak posjeduju žlijezdu iznad kljuna koja ima sposobnost izdvajanja vode dok koncentrat izbacuju kihanjem. Stanične stijenke većine organizama zadrže specijalizirane proteinske kanaliće, akvaporine, koji velikom brzinom transportiraju vodu ili ione, selektivno preko stanične membrane. Voda se prenosi hidrofobnim kanalima dok su vodikove veze koje stupaju u interakciju s funkcionalnim skupinama na kanalićima orijentiraju molekule u kolonu unutar pora.

Ekstrahirani akvaporini mogu se ubaciti u dvoslojnu lipidnu membranu ili matricu sintetičkog polimera, dok se porozne anorganske membrane mogu modificirati tako da ispunjavaju funkciju akvaporina, što je bolja alternativa [4].



Slika 15. Shematski prikaz preparacije membrane sa šupljim vlaknima bazirane na akvaporinu [30].

4.4. Blokiranje membrane

Diljem svijeta izgrađena su postrojenja koja obrađuju otpadnu vodu kako bi ju se moglo ponovno koristiti. Kod takvih postrojenja 80% problema s kojima se suočavaju čini blokiranje membrane, a dobrim dijelom problem znaju stvarati razaranje membrane i strojne komponente. Nakon vezanja na površinu membrane, mikroorganizmi se umnožavaju i rastu hraneći se nutrijentima iz ulazne struje. U ovoj fazi, zbog metaboličke aktivnosti, ispuštaju se izvanstanične polimerne čestice koje učvršćuju nastali biofilm za membranu. Nakon što dovoljno narastu, mikroorganizmi počinju se odvajati od površine i širiti na dotada nezahvaćene dijelove membrane te se formiranje biofilma ponavlja.

Kemijsko onečišćenje, biološko onečišćenje i taloženje kamenca na membrani najčešći su uzroci blokiranja membrana. Kemijsko onečišćenje ovisi o hidrofobnim i elektrostatskim interakcijama između organskog materijala u vodi i membrani. Kada govorimo o biološkom blokiranju to može podrazumijevati adsorpciju mikroba hidrofobnim ili elektrostatskim interakcijama, propagaciju mikroba koji dobivaju hranjive tvari iz onečišćene vode te taloženje otpadnih produkata metaboličkih procesa. Adsorpcija mikroba može se spriječiti dok su druge dvije opcije nepovrativi procesi koji se ne mogu jednostavno riješiti kemijskim čišćenjem. Kroz istraživanja tvrtka Toray osmislila je RO membranu s niskim stupnjem onečišćenja za rekuperaciju otpadne vode koja ima jednaku tendenciju propuštanja čiste vode kao i konvencionalne RO membrane.

4.5. Predobrada ulazne struje

Predobrada vode važan je dio cjelokupnog procesa desalinacije jer njen izostanak može imati značajan utjecaj na blokiranje membrane. Kako bi se produljio životni vijek membrane i osigurao njezin stabilan rad potrebno je dobro poznavanje sastava ulazne struje i tipa onečišćivala koje donosi sa sobom. Predobrada vode može biti konvencionalna (koagulacija-flokulacija, filtracija, dezinfekcija, inhibicija taloženja kamenca) i nekonvencionalna (MF, UF i NF) od čega su najraširenije UF, MF te kombinacija koagulacije i flokulacije (dodatkom koagulanata poput aluminijeva sulfata, željezovog sulfata, aktivnog ugljena itd.).

Adekvatno čišćenje membrane ključan je korak u održavanju dugotrajne postojanosti membranskog sustava. Obzirom da je blokiranje membrane tijekom desalinacije SW neizbježno, rutinsko čišćenje membrane potrebno je kako bi se očuvala dobra performansa membrane, unatoč tome što još uvijek nije moguće u potpunosti riješiti taj problem. U postupcima čišćenja moguće je dodati kemijske agense, poput alkalnih tvari, otopina soli, kiselina i površinski aktivnih tvari, koji mogu reagirati s nabijenim onečišćivalima. To snižava kohezijske sile između onečišćivala i površine membrane tako da se onečišćivalo ili odvaja od površine ili mu se mijenja morfologija i površinska struktura. Obzirom da različite kemikalije ne obavljaju posao jednako efektivno ovisno o slučaju, radi se na samočišćećim membranama, primjerice presvlačenjem RO membrane sa TiO_2 [2].

4.6. Hibridni sustavi

Postotak energije koju desalinacijska postrojenja konzumiraju zauzimaju 0,4% svjetske potrošnje energije. To je mnogo veći postotak no što se na prvu možda čini. Razmatranjem utjecaja koje konzumacija struje u postrojenjima za desalinaciju ima na okoliš dolazimo do rješenja u vidu kombinacija sustava sa elektranom, drugim postrojenjem s termalnom desalinacijom te pogonima koji koriste prirodne izvore energije pri radu. Danas se čak 52% RO postrojenja koristi modulima fotonaponskih ćelija ili solarnim kolektorima obzirom reduciraju emisije u okoliš. U priobalnim područjima RO postrojenja koja koriste energiju vjetra poželjna su jer se ta energija može pretvoriti u električnu energiju za pogon pumpe dok fotonaponske ćelije štede energiju obzirom da eliminiraju potrebu za baterijama kako izmjenjuju struju s mrežom. Korištenje kinetičke i potencijalne energije mora također je čest slučaj na priobalnim područjima. Konverteri energije valova mogu generirati električnu energiju koja se može koristiti pri desalinaciji ili direktno za pogon pumpe. Hibridna postrojenja još su u ranoj fazi istraživanja, ali se očekuje da će se u budućnosti koristiti pri proizvodnji od 1000 do 3000 m^3/dan vode po cijeni 1,2 $\$/m^3$ [2].

4.7. Zbrinjavanje nusprodukta

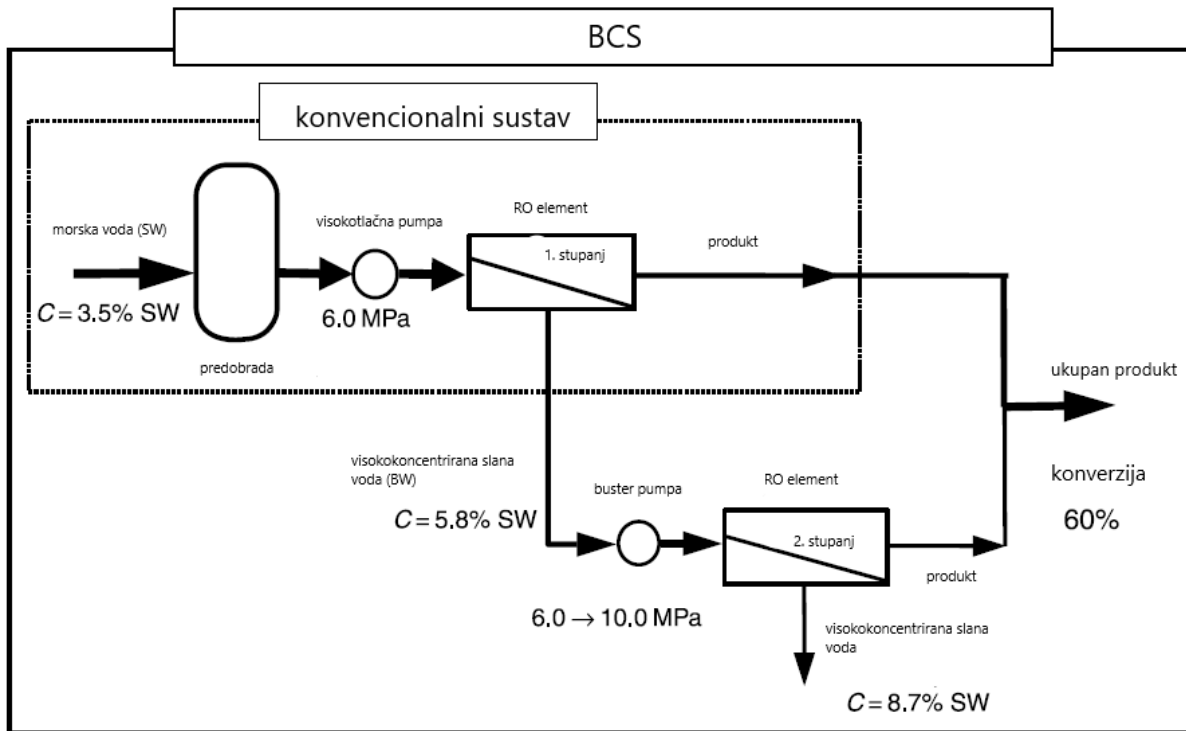
Kada govorimo o napretku membrana i tehnologije desalinacije moramo uzeti u obzir napretke i stanje vezano uz visokokoncentriranu slanu struju (retentat) koja ostaje kao nusprodukt procesa. Tradicionalno se ona direktno ispušta natrag u oceane, površinske vode ili kanalizaciju, kao što se znala i injektirati u duboke bunare te ribnjake za isparavanje. Dok postrojenja locirana blizu obale najčešće koriste direktan ispust, ona u kontinentalnim dijelovima imaju nekoliko ekonomski održivih alternativnih rješenja za njeno odbacivanje.

Kada se visokokoncentrirana slana voda kontinuirano ispušta u površinske vode, visoka vjerojatnost dospjevanja toksičnih kemikalija od predobrade te antiskalanata i sredstava za sprječavanje onečišćenja membrane pri desalinaciji, predstavlja zabrinjavajuće ekološko pitanje. Takva sredstva predstavljaju veliku prijetnju vodenim organizmima i morskom ekosistemu.

Zbog povišenja gustoće tijekom ispusta može se iscrpiti otopljeni kisik u prijemnoj vodi, što pak ima izrazit utjecaj na bentos i može izazvati lančanu reakciju kroz cijeli hranidbeni lanac. Zato se posljednja istraživanja fokusiraju na pronalazak načina za tretiranje struje nusprodukta kako bi se minimizirao te u najboljem slučaju eliminirao negativni učinak koji njeno odlaganje ima na okoliš. Takve tehnike pokrivaju širok raspon kompleksnosti i troškova. Može se raditi o miješanju retentata s alternativnim izvorima vode niske slanoće kako bi se razrijedila, zatim ugradnji mlaznica koje mogu promovirati miješanje struje sa vodom u koju se ispušta kako bi se spriječilo taloženje na dnu. Nešto zahtjevnija tehnika je elektrodijaliza s bipolarnom membranom koja može pretvoriti visokokoncentriranu slanu vodu u kiseli (HCl) i lužnati (NaOH) produkt koji se može ponovno upotrijebiti [10]. Unatoč tome što rezultati sedmogodišnjeg istraživanja utjecaja odbacivanja nusprodukta kod postrojenja u Sidneyju, gdje se dobiva 250 milijuna litara vode za piće dnevno, prikazuju pozitivan doprinos povećanju populacije riba na 300 metara od obale za 279%, takve informacije moraju se uzeti sa rezervom. Važno je razlučiti uzročno posljedične veze takvih porasta u brojkama obzirom da se radi o relativno novim istraživanjima koja se teško mogu uspoređivati zbog specifičnosti različitih lokacija [32].

Oporaba metala vrijedan je izvor oskudnih metala (npr. uranij) i značajna je za potencijalnu redukciju ekoloških utjecaja povezanih s vađenjem ruda. Visoki ekonomski i energetske troškovi tretiranja i nusprodukta i uporabe metala i dalje je barijera za širu primjenu. Moguća uporaba slane struje leži u akvakulturi s kojom se može postići rast u biomasi ribe od 300% , a poslužila je i u pokušajima kultivacije cijanobakterije *Spirulina* i navodnjavanja halofitnog bilja. Osim tretiranja struje nusprodukta, važno je razvijati metode koje bi reducirale njen volumen kako bi se poboljšao stupanj konverzije procesa. Trenutno se u svijetu proizvodi 141,5 milijuna m^3/dan visokokoncentrirane slane vode što je gotovo 50% više od ukupnog volumena desalinirane vode. Veći dio dolazi s Bliskog Istoka i sjeverne Afrike (70,3%) što indicira da u tim regijama procesi postižu nisku stopu konverzije. Usporedno, Azija proizvodi sedam puta manje, dok Europa i Sjeverna Amerika i do sedamnaest puta manje visokokoncentrirane slane vode iako imaju velik udio u proizvodnji desalinirane vode što znači da je konverzija tih procesa visoka. Već spomenuta tvrtka Toray uspješno je razvila niskobudžetni desalinacijski sistem, tzv. Brine Conversion Two-Stage (BCS) system, koji osigurava 60%-tnu konverziju svježje vode.

Uz BCS najučinkovitije se štedi energija uz istovremene niske operativne troškove za RO-SW sustave. Za takav sustav bilo je potrebno razviti elemente koji mogu trpiti grube uvjete rada, poput tlakova od 9 MPa i visoke koncentracije ulazne struje od 5,8%. Zato su u Torayu razvili visokooperativnu membranu koja može raditi upravo pri takvim uvjetima [10, 33].



Slika 16. Tipični dijagram toka za BCS sustav [33].

5. Zaključak

Unatoč popularnosti TFC membrana na tržištu, osjeća se potreba za nadogradnjom tehnologije membranske desalinacije. Razne inovativne ideje dobile su zamah, međutim sinteza i stapanje funkcionalnih materijala poput anorganskih punila, liotropskih kristala, CNT-a i akvaporina skupo je i potrebno ih je višestruko isprobati prije opsežne proizvodnje i otvaranja puta prema tržištu. Potrebni su i novi modeli koji će još bolje predviđati performanske kompozitnih membrana. Polimerne membrane većinom se modeliraju prema Nernst-Planckovoj jednadžbi koja se modificira u slučaju MMM-a. Potrebno je uvidjeti postoji li opcija smanjenje troškova proizvodnje keramičkih i polimernih membrana kako bi se mogle brže upogoniti u sustav.

Zato se trenutna istraživanja bave traženjem alternativnih anorganskih materijala načinjenih od jeftinijeg ili otpadnog materijala da bi smanjili investiciju za proizvodnju. Najreprezentativniji membranski modeli, TS40, TS80 i AD-90, koji su razvijeni prije više od 30 godina, još uvijek ne gube na važnosti zbog niskih proizvodnih troškova i dobrog odbijanja soli koje povlače sa sobom. Nova istraživanja su skupa i opsežna, ali polagano i ona napreduju. Znanstvenici su usmjereni prema poboljšanju svojstava koja će omogućiti nižu stopu onečišćenja kao i termalnu i kemijsku stabilnost kao izuzetno bitne faktore u procesu. Mikroporozne strukture pokušavaju se optimirati kako bi se povećala mehanička snaga i propusnost membrana. Unaprjeđenje tehnologije RO fokusirano je na razvoj membrana s kojima se može raditi pri visokom fluksu uz niski utrošak energije putem biomimetički inspirirane adaptacije, nanostrukturiranja i kemijskim izračunima. Očekuje se da će recentan naglasak na boljem teoretskom shvaćanju i razlučivanju ovih procesa na molekulskoj razini biti ono što će odvesti ovu tehnologiju do bolje izvedbe uz niže troškove energije.

Kako bi prikazali realno stanje na tržištu mnogi se slažu da bi volumen desalinirane vode trebalo konkretnije pratiti. Primjerice, kako bi se reprezentativno predstavila oskudnost vode za piće, nekonvencionalni izvori vode i postupci tretiranja trebali bi se uzeti u obzir pri procjeni. Ekskluzija desalinirane vode pri kvantifikaciji manjka dostupnosti vode mana je kada govorimo o ciljevima održivog razvoja, ali onemogućuje i inkorporaciju podataka za istinsku procjenu količine raspoložive vode za piće.

Uzimanje tih podataka u obzir ključan je izazov i potreba koja će postati neophodna u budućnosti. Neki čak predlažu da se počne koristiti procjena životnog ciklusa postrojenja umjesto da se troškovi prikazuju preko $\$/m^3$.

Očuvanje vode i poboljšana učinkovitost njenog korištenja ne iziskuje mnogo energije za implementaciju. Zbog toga je to najisplativija strategija za osiguravanje povećanja izvora pitke vode. Oporaba otpadne vode i desalinacija bočate vode mogu biti energetske manje zahtjevne od transporta svježije vode s velike udaljenosti. To znači da energetske potrebe za obradu vode mogu varirati tako da je najoptimalniji pristup zapravo ovisan o specifičnim uvjetima lokacije.

6. Literatura

- [1] Z. Yang, Y. Zhou, Z. Feng, X. Rui, T. Zhang, Z. Zhang, A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification, *Polymers* 11(8):1252 (2019).
- [2] M. Qasima, M. Badrelzamana, N. N. Darwishb, N. A. Darwisha, N. Hilal, Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review, *Desalination* 459 (2019) 59–104.
- [3] <https://ourworldindata.org/world-population-growth-past-future> (pristup 17.8.2020)
- [4] J. Kucera, *Desalination: Water from Water*, Scrivener Publishing, Massachusetts, 2014, str. 4-29, 157-174, 195-203, 585-615.
- [5] <https://www.grida.no/resources/5625> (pristup 17.8.2020.)
- [6] R. Weaver, M. Howells, Y. Yang, S. Lennox, H. Brown, *IDA Water Security Handbook 2019 – 2020*, Media Analytics Ltd., Oxford, 2020, 2.
- [7] K. Touati, F. Tadeo, S. H. Chae, J. H. Kim, O. Alvarez-Silva, *Pressure Retarded Osmosis: Renewable Energy Generation and Recovery*, Elsevier Inc., 2017, str. 37-48.
- [8] J. Tonner, *Barriers to Thermal Desalination in the United States*, *Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 144* (2008) 6-12.
- [9] N. Lior, *Advances in water desalination*, A John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2013, str. 3-5, 82-91, 311-323.
- [10] E. Jones, M. Qadir, M. T.H. van Vliet, V. Smakhtin, Seong-mu Kang, The state of desalination and brine production: A global outlook, *Science of the Total Environment* 657 (2019) 1343–1356.
- [11] <https://iwa-network.org/desalination-past-present-future/> (pristup 13.9.2020.)
- [12] <https://www.meticulousresearch.com/product/water-and-wastewater-treatment-market-5026/> (pristup 11.9.2020.)
- [13] <https://idadesal.org/dynamic-growth-for-desalination-and-water-reuse-in-2019/> (pristup 13.9.2020.)
- [14] <http://vodoservice.com/reverzna-osmoza-osmotski-pritisak/> (pristup 11.8.2020.)
- [15] K. Košutić, *Zbirka nastavnih tekstova: Membranske tehnologije obrade voda*.
- [16] S.H. Ye, J. Watanabe, Y. Iwasaki, K. Ishihara, In situ modification on cellulose acetate hollow fiber membrane modified with phospholipid polymer for biomedical application. *J. Membr. Sci.* 2005, 249, 133– 141.
- [17] I. Goossens, A. van Haute, The influence of mineral fillers on the membrane properties of high flux asymmetric cellulose acetate reverse osmosis membranes. *Desalination* 1976, 18,

203–214.

- [18] Y. Mansourpanah, E.M. Habili, Preparation and modification of thin film PA membranes with improved antifouling property using acrylic acid and UV irradiation. *J. Membr. Sci.* 2013, 430, 158–166.
- [19] Y. Yao, W. Zhang, Y. Du, M. Li, L. Wang, X. Zhang, Toward Enhancing the Chlorine Resistance of Reverse Osmosis Membranes: An Effective Strategy via an End-capping Technology. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 1296–1304.
- [20] K.C. Khulbe, T. Matsuura, Synthetic membrane characterisation—A review: Part I. *Membr. Technol.* 2017, 2017, 7–12.
- [21] Y. Zhao, L. Dai, Q. Zhang, S. Zhou, S. Zhang, Chlorine-resistant sulfochlorinated and sulfonated polysulfone for reverse osmosis membranes by coating method. *J. Colloid Interface Sci.* 2019, 541, 434–443.
- [22] A.W. Mohammad, Y.H. Teow, W.L. Ang, Y.T. Chung, D.L. Oatley-Radcliffe, N. Hilal, Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination* 2015, 356, 226–254.
- [23] Z. Ali, Y. Al Sunbul, F. Pacheco, W. Ogieglo, Y. Wang, G. Genduso, I. Pinnau, Defect-free highly selective polyamide thin-film composite membranes for desalination and boron removal. *J. Membr. Sci.* 2019, 578, 85–94.
- [24] H.B. Quesada, A.T.A. Baptista, L.F. Cusioli, D. Seibert, C.D. Bezerra, R. Bergamasco, Surface water pollution by pharmaceuticals and an alternative of removal by low-cost adsorbents: A review. *Chemosphere* 2019, 222, 766–780
- [25] W. Libbrecht, A. Verberckmoes, J.W. Thybaut, P. van der Voort, J. de Clercq, Soft
- [26] Y.H. Teow, A.W.Mohammad, New generation nanomaterials for water desalination: A review. *Desalination* 2019, 451, 1-14.
- [27] M. Ahmed, A. Giwa, S.W. Hasan, Challenges and Opportunities of Graphene-Based Materials in Current Desalination and Water Purification Technologies. In *Nanoscale Materials in Water Purification*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019.
- [28] C. Li, Y. Guo, L. Shen, C. Ji, N. Bao, Scalable concentration process of graphene oxide dispersions via cross-flow membrane filtration. *Chem. Eng. Sci.* 2019, 200, 127–137.
- [29] T. M. Missimer, B. Jones, R. G. Maliva, *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities: Innovations and Environmental Impacts*, Springer International Publishing, Switzerland, 2015, str. 3-19.
- [30] X. Li, S. Chou, R. Wang, L. Shi, W. Fang, G. Chaitra, C.Y. Tang, J. Torres, X. Hu, A.G. Fane, Nature gives the best solution for desalination: aquaporin-based hollow fiber composite

membrane with superior performance, *J. Membr. Sci.* 494 (2015)

[31] G.D. Kang, Y.M. Cao, Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment: a review, *Water Res.* 46 (2012) 584–600

[32] http://www.xinhuanet.com/english/2019-12/19/c_138642809.htm (pristup 11.9.2020.)

[33] N. N. Li, A. G. Fane, W. S. Winston Ho, T. Matsuura, *Advanced membrane technology and applications*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008, str. 3-43,

[34] <https://www.wwdmag.com/desalination/desalination-america> (pristup 17.8.2020.)

[35] Goh, P.S.; Ismail, A.F. A review on inorganic membranes for desalination and wastewater treatment, *Desalination* (2018), 434, 60–80.

[36] D. Vasanth, A.D. Prasad, *Ceramic Membrane: Synthesis and Application for Wastewater Treatment—A Review*, *Water Resources and Environmental Engineering II*, Springer, Singapore, 2019, str. 101–106.

[37] J. Wills, S. Moazzem, V. Jegatheesan, *Treating Car Wash Wastewater by Ceramic Ultrafiltration Membranes for Reuse Purposes*, *Water Scarcity and Ways to Reduce the Impact*; Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019, STR 63–73.

[38] J. Saikia, S. Sarmah, J.J. Bora, B. Das, B.; L.R. Goswamee, Preparation and characterization of low cost flat ceramic membranes from easily available potters clay for dye separation, *Bull. Mater. Sci.* 2019, 42, 104.

[39] P. Zhang, J.-L.Gong, G.-M.Zeng, B.Song, W.Cao, H.-Y.Liu, Huan, P. Peng, Novel “loose” GO/MoS₂ composites membranes with enhanced permeability for effective salts and dyes rejection at low pressure. *J. Membr. Sci.* 2019, 574, 112–123.

[40] M. Thomas, B. Corry, A computational assessment of the permeability and salt rejection of carbon nanotube membranes and their application to water desalination, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2016, 374, 20150020.

[41] W.-L. Chou, D.-G. Yu, M.-C. Yang, The preparation and characterization of silver-loading cellulose acetate hollow fiber membrane for water treatment. *Polym. Adv. Technol.* 2015, 16, 600–607.

[42] S. Guclu, S. Erkoc-Ilter, D.Y. Koseoglu-Imer, S. Unal, Y.Z. Menciloglu, I. Ozturk, I. Koyuncu, Interfacially polymerized thin-film composite membranes: Impact of support layer pore size on active layer polymerization and seawater desalination performance. *Sep. Purif. Technol.* 2019, 212, 438–448.

[43] I. Borisov, A. Ovcharova, D. Bakhtin, S. Bazhenov, A. Volkov, R. Ibragimov, R. Gallyamov, G. Bondarenko, R. Mozhchil, A. Bilydukevich, Development of Polysulfone Hollow Fiber Porous Supports for High Flux Composite Membranes: Air Plasma and Piranha

Etching. *Fibers* 2017, 5, 6.

[44] E.-S. Kim, Y.J. Kim, Q. Yu, B. Deng, Preparation and characterization of polyamide thin-film composite (TFC) membranes on plasma-modified polyvinylidene fluoride (PVDF). *J. Membr. Sci.* 2009, 334, 71–81.

[45] C. Yu, H. Li, X. Zhang, Z. Lü; S. Yu, M. Liu, C. Gao, Polyamide thin-film composite membrane fabricated through interfacial polymerization coupled with surface amidation for improved reverse osmosis performance. *J. Membr. Sci.* 2018, 566, 87–95.

[46] M.J.T. Raaijmakers, N.E. Benes, Current trends in interfacial polymerization chemistry. *Prog. Polym. Sci.* 2016, 63, 86–142.

[47] S.S. Shenvi, A.M. Isloor, A.F. Ismail, A review on RO membrane technology: Developments and challenges. *Desalination* 2015, 368, 10–26.

[48] P. Lu, W. Li, S. Yang, Y. Liu, Q. Wang, Y. Li, Layered double hydroxide-modified thin-film composite membranes with remarkably enhanced chlorine resistance and anti-fouling capacity. *Sep. Purif. Technol.* 2019, 220, 231–237.

[49] H.X. Gan, H. Zhou, H.J. Lee, Q. Lin, Y.W. Tong, Toward a Better Understanding of the Nature-Inspired Aquaporin Biomimetic Membrane. *Langmuir* 2019, 35, 7285–7293

[50] V. Kochkodan, N. Hilal, A comprehensive review on surface modified polymer membranes for biofouling mitigation, *Desalination* 356 (2015) 187–207

7. Dodatci

7.1. Popis slika

Slika 1. Procjena dostupnosti vode za 2011. godinu [3].

Slika 2. Globalna raspodjela operativnih postrojenja i kapaciteta za desalinizaciju ($>1000m^3/dan$) prema sektorima korisnika proizvedene vode u sektoru [7].

Slika 3. Trendovi desalinacije u svijetu: a. Prema broju i kapacitetu ukupnih i operativnih desalinacijskih postrojenja, b. Prema operativnim kapacitetima i desalinacijskim tehnologijama [7].

Slika 4. Glavne kombinacije tipa ulazne struje i tehnologije prema: a. globalnom udjelu u proizvodnji desalinirane vode(%), b. globalnom udjelu u proizvodnji slanice(%), c. ukupnom kapacitetu proizvodnje desalinirane vode i volumenu proizvedene slanice(milijun m^3/dan) [7].

Slika 5. Jednostavan shematski prikaz: a. reverzne osmoze, b. razlike osmoze i reverzne osmoze [2,3].

Slika 6. Klasifikacija membrana za pročišćavanje vode prema veličini pora i zaostalim tvarima [13].

Slika 7. Vremenska crta razvoja materijala RO membrana [10].

Slika 8. Struktura tipičnog materijala RO membrane (aromatski poliamid linearne strukture) [10].

Slika 9. Struktura tipičnog materijala RO membrane(celuloza triacetat) [10].

Slika 10. Struktura TFC kompozitne membrane [13].

Slika 11. Struktura tipičnog materijala RO membrane(aromatski poliamid unakrsne strukture) [10]

Slika 12. Struktura spiralnog modula i popratnih elemenata [10].

Slika 13. Struktura modula sa šupljim vlaknima [10].

Slika 14. Shema kontinuiranog procesa RO s ukrštenim načinom rada [1].

Slika 15. Shematski prikaz preparacije membrane sa šupljim vlaknima bazirane na akvaporinu [43].

Slika 16. Tipični dijagram toka za BCS sustav [42].

7.2. Popis tablica

Tablica 1. Predviđanje troškova desalinacije za srednja i velika postrojenja [49].

Tablica 2. Relativni znosi konverzije različitih kombinacija ulazne struje i tehnologije za desalinaciju [7].

7.3. Životopis

OSOBNI PODACI :

Ime i prezime: Marika Puškarić

████████████████████
████████████████████
██
██

OBRAZOVANJE :

- **2016.-2020.** Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, redovni preddiplomski sveučilišni studij, smjer Ekoinženjerstvo
- **2012.-2016.** VII. Gimnazija, zagreb
- **2004.-2012.** Osnovna škola Jordanovac, Zagreb

DODATNO OBRAZOVANJE :

- **2019.** stručna praksa u trajanju od 160 h na Institutu Ruđer Bošković

ZNANJA I VJEŠTINE :

- **Strani jezici :** engleski jezik (aktivno), njemački jezik (aktivno), korejski jezik (osnovno)
- **Računalne vještine :** MS Windows, MS Office (Word, Excel i PowerPoint), Matlab, Scientist