

Analiza sustava za desalinizaciju

Benazić, Bartol

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:706147>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

ANALIZA SUSTAVA ZA DESALINIZACIJU

Mentor: prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Komentor: asist. dr. sc. Marta Alvir

Rijeka, rujan 2024.

Bartol Benazić

00690887747

Rijeka, 20. ožujka 2024.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo**
Predmet: **Mehanika fluida**
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Bartol Benazić (0069088774)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Analiza sustava za desalinizaciju**

Opis zadatka:

Opisati membranske tehnologije u sustavima za desalinizaciju. Opisati postupak desalinizacije i pokazati primjenu membranskih tehnologija za desalinizaciju. Analizirati dostupne tehnologije i inovacije u području membranskih tehnologija obzirom na obnovljive izvore energije te nove vrste membrana.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2024.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

prof. dr. sc. Lado Kranjčević

izv. prof. dr. sc. Samir Žic

dr. sc. Marta Alvir (komentor)

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad naslova „Metode membranske desalinizacije“ pod vodstvom prof. dr. sc. Lade Kranjčevića i asist. dr. sc. Marte Alvir izradio samostalno, koristeći stečeno znanje tijekom prijediplomskog sveučilišnog studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te navedenu literaturu.

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Ladi Kranjčeviću i asist. dr. sc Marti Alvir na danim savjetima i pomoći pri izradi završnog rada.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. DESALINIZACIJA.....	2
2.1. Povijest desalinizacije.....	3
2.2. Toplinska desalinizacija	5
2.2.1. Višestupanjska destilacija.....	6
2.2.2. Višestruka destilacija	7
2.2.3. Parno-kompresijska destilacija	8
2.2.4. Solarna desalinizacija.....	9
2.3. Ekstrakcija.....	10
2.4. Ionska izmjena.....	11
2.5. Metoda ovlaživanja i odvlaživanja zraka.....	11
2.6. Desalinizacija zamrzavanjem.....	12
2.6.1. Kristalizacija direktnim kontaktom sredstva zamrzavanja	13
2.6.2. Kristalizacija indirektnim kontaktom sredstva zamrzavanja	14
2.6.3. Kristalizacija vakumskim zamrzavanjem	15
3. MEMBRANSKE TEHNOLOGIJE.....	16
3.1. Reverzna osmoza.....	16
3.2. Izravna osmoza.....	18
3.3. Nanofiltracija.....	19
3.4. Ultrafiltracija	19
3.5. Mikrofiltracija	20
3.6. Elektrodijaliza	20
3.7. Membrane izrađene od organskih polimera.....	21
3.7.1. Celuloza	21

3.7.2. Škrob	22
3.7.3. Hitin	22
3.8. Membrane izrađene od anorganskih materijala	23
3.8.1. Membrana izrađena od metalnih oksida	23
3.8.2. Membrane na bazi ugljika	24
3.10. Konfiguracije membranskih modula	24
3.10.1. Modul filter-ploča	25
3.10.1. Modul sastavljen od šupljih vlakana	26
3.10.2. Spiralni modul	26
4. PRIMJENA MEMBRANSKIH METODA ZA DESALINIZACIJU U SVIJETU	28
4.1. Desalinizacijska postrojenja u svijetu.....	28
4.1.1 Desalinizacijsko postrojenje „Ras Al Khair“	30
4.1.2. Desalinizacijsko postrojenje „Sorek“	31
4.1.3. Desalinizacijsko postrojenje „Ashkelon“	32
4.1.4. Desalinizacijsko postrojenje „Carlsbad“	33
5. INOVACIJE U PODRUČJU MEMBRANSKIH TEHNOLOGIJA	34
5.1. Napredni materijali za izradu membrana	34
5.1.1. Grafenski materijali	34
5.1.2. Ugljične nanocjevčice (CNT).....	34
5.1.3. Polimeri visokih performansi	35
5.1.4. Membrane s kombiniranim matricama	35
5.1.5. Metalno-organske strukture.....	35
5.2. Površinske modifikacije membrana	36
5.3. Adaptivni sistemi za čišćenje membrana	37
6. ZAKLJUČAK	38

7. LITERATURA	39
8. SAŽETAK	43
9. ABSTRACT	44

1. UVOD

Ubrzan rast populacije, urbanizacija i povećana globalna potrošnja vode od strane poljoprivrede, industrije i energetike doveli su do toga da sve veći broj zemalja suočava s nestašicom pitke vode. Usporedno s time, djelovanjem klimatskih promjena, nastaju duge i sve češće suše što utječe na sve učestalije redukcije vode. Naime, voda prekriva 71% Zemlje i lako je pomisliti da je ima u izobilju. Ipak, pitka voda je oskudna globalno, čineći samo 3,5% ukupne količine vode na Zemlji i pritom je 2/3 te količine nedostupno jer su zarobljene u ledu ili su nepristupačne. Oko 1,1 milijarda ljudi diljem svijeta nema pristup slatkoj vodi, dok oko 2,7 milijardi doživljava nestašicu barem jednom godišnje. Mnoga područja pogođena nestašicom pitke vode nalaze se blizu mora gdje desalinizacija može ponuditi rješenje. Sustavi desalinizacije imaju mogućnost pretvoriti morsku ili bočatu vodu u vodu prikladnu za ljudsku konzumaciju, poljoprivredu i industrijsku primjenu. Metode desalinizacije, koje su dugo bile smatrane energetski i ekonomski neodrživim, sve su pristupačnije zahvaljujući tehnološkim inovacijama i boljem razumijevanju hidroloških problema.

Rad je podijeljen u šest poglavlja uključujući uvod i zaključak. U drugom poglavlju opisat će se proces desalinizacije, njeni počeci i moderne tehnologije. U trećem poglavlju fokus je na membranskim metodama, materijalima membrana te konfiguracijama membranskih modula. U četvrtom poglavlju prikazat će se primjena desalinizacijskih metoda u svijetu, globalna proizvodnja desalinizirane vode i neka značajnija desalinizacijska postrojenja. U petom poglavlju rad se bavi inovacijama u području membranskih tehnologija, poput površinskih modifikacija membrana, korištenjem naprednih materijala pri izradi i uporaba adaptivnih sistema za čišćenje.

2. DESALINIZACIJA

Desalinizacija je proces kojim se djelomično ili potpuno uklanjaju bakterije i minerali iz morske ili bočate vode u svrhu dobivanja vode za danju upotrebu koja se može podijeliti na pitku vodu, tehnološku vodu, kotlovsku pojnu vodu ovisno o dozvoljenim količinama minerala/soli.[1] Slatka voda definirana je kao ona koja sadrži manje od 1000 mg/L soli ili ukupno otopljenih čvrstih tvari(TDS). Količina iznad 1000 mg/L može negativno utjecati na svojstva kao što su okus, boja, sklonost koroziji i miris. Većina zemalja je usvojilo nacionalne standarde pitke vode za specifične kontaminante, kao i za TDS (*Slika 2.1.*). [2] Navedeni standardi se razlikuju od zemlje do zemlje, pa čak i od regije do regije unutar iste zemlje. Za dobivanje pitke vode te vode za raznoliku primjenu u industriji i poljoprivredi dovoljna je djelomična desalinizacija. Dok je za pripremu kotlovske pojne vode korištene u parnim energetske postrojenjima potrebna potpuna desalinizacija. Pritom se u većem mjerilu primjenjuju termički i membranski postupci desalinizacije te ionska izmjena. Postojeće metode desalinizacije zahtijevaju znatne količine energije, uobičajeno u obliku fosilnih goriva, što u pravilu znači da je proces skuplji. Zbog tih razloga uglavnom se koristi na mjestima gdje dostupnost pitke vode nije ekonomski prihvatljivo.

TDS mg/L(ppm)	TDS g/L (ppt)	Rezultat
<600 mg/L	<0,6g/L	dobra kvaliteta
600-900 mg/L	0,6g/L - 0,9g/L	zadovoljavajuća kvaliteta
900 - 1200 mg/L	0,9g/L-1,2g/L	loša kvaliteta
> 1200 mg/L	>1,2g/L	neprihvatljivo

Slika 2.1. Ocjena kvalitete vode za piće prema TDS-u [2]

Ispitivanjem električne vodljivosti vode, odnosno svojstva tijela/tekućine da propušta električnu struju možemo odrediti količinu iona prisutnih u vodi, te tako saznajemo vrstu i količinu otopljenih minerala u tekućini. Slatka i morska voda imaju tipične vrijednosti, ali nemaju utvrđene standarde za električnu vodljivost, zbog različitih utjecaja okoline. Usprkos izostanku standarda možemo otprilike odrediti električnu vodljivost ovisno o vrsti vode (*Tablica 2.2*). [3]

Tablica 2.1. Aproximirani rasponi električne vodljivosti ovisno o tipu vode

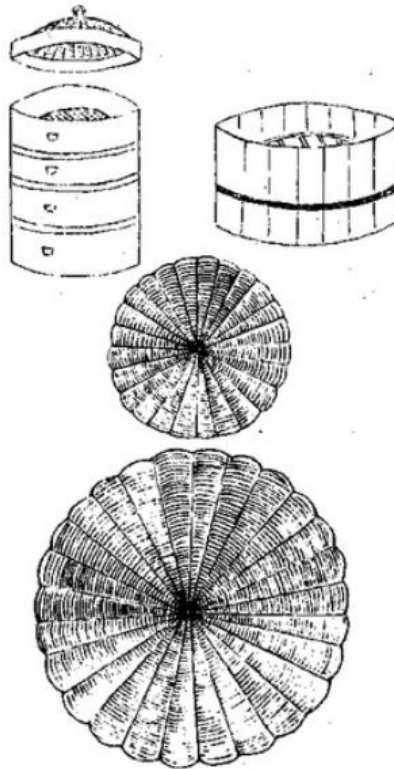
Tip vode	Raspon električne vodljivosti ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Destilirana voda	0,5-3
Otopljeni snijeg	2-42
Voda iz špine	50-800
Pitka voda	30-1500
Slatkovodni potoci	100-2000
Industrijska otpadna voda	10 000
Morska voda	55 000

Mjerenjem električne vodljivosti vode možemo također saznati je li voda postala zagađena radi utjecaja ljudskog faktora. Također je bitno spomenuti da se njenim mjerenjem ne mogu odrediti svi izvori zagađenja, kao što je nafta iz razloga jer ona ne provodi struju.

2.1. Povijest desalinizacije

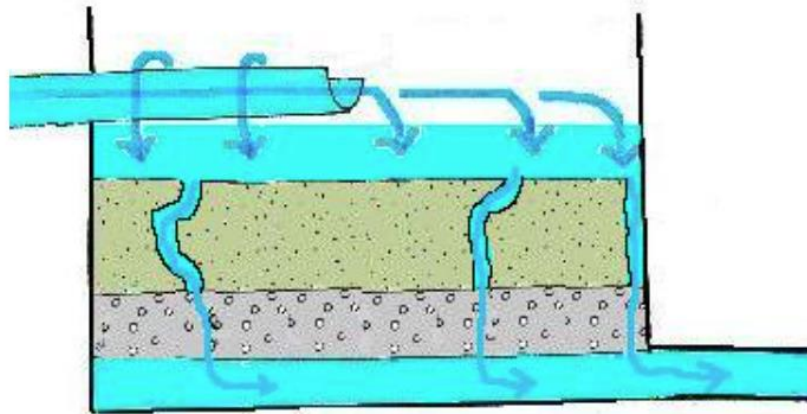
Antički Grčki filozof Aristotel je u svom radu „Meteorologija“ promatrao, da slana voda kada se pretvori u paru, postane slatka i da para nakon kondenzacije ne tvori slanu otopinu. Također je uočio da bi posuda od finog voska sadržavala pitku vodu nakon dugog uranjanja u slanoj vodi, djelujući kao membrana za filtriranje soli. Postoje i zapisi da su u istom razdoblju u Kini ljudi otkrili da bambusove prostirke namijenjene za kuhanje riže na pari, stvaraju tanki vanjski sloj

nakon duge uporabe (*Slika 2.2.*). Stvoreni tanki film imao je funkcije adsorpcije i ionske izmjene, što je moglo apsorbirati sol. [4]



Slika 2.2. Pikaz bambusovih prostirki za kuhanje riže na pari, u drevnoj Kini [4]

Leonardo da Vinci je 1452. godine proveo eksperiment u kojem je primijetio da se destilirana voda može proizvesti u velikim količinama koristeći sobu pored peći ili ognjišta. Tijekom srednjeg vijeka ova tehnika se nastavila razvijati kroz Centralnu Europu. Postoje zapisi u kojima je Sir Francis Bacon 1627. godine provodio eksperiment u kojem je voda bila pročišćena koristeći pješčani filter (*Slika 2.3.*), kojem se voda dovodila s vrha, te uz pomoć gravitacije i prolaska vode kroz pijesak dobivala desalinizirana voda Pješčani filter je inspirirao znanstvenike tog doba da nastave razvijati metode bazirane na tom principu. [4]



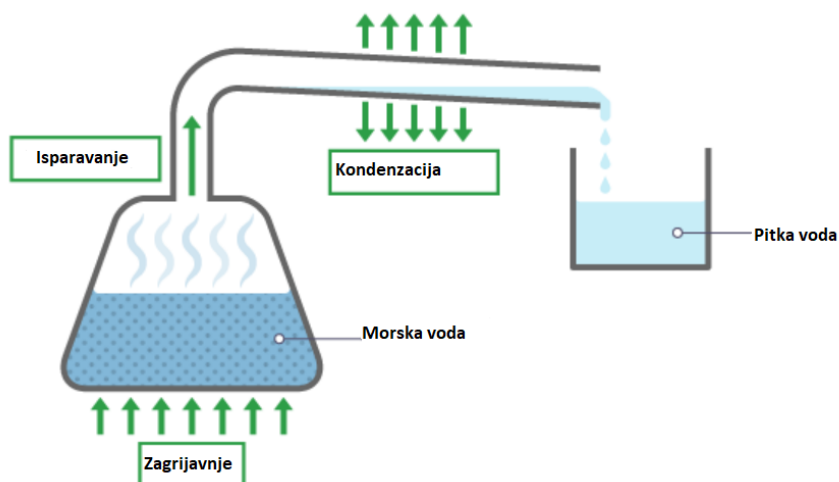
Slika 2.3. Filtracija pješčanim filterom [5]

Tek oko 1800, razvijanjem parnih motora počela se i mijenjati ranije primjenjivanja metodologija. Potreba za korištenjem tehnološke vode u pranim kotlovima porasla je napretkom termodinamičkih i parnih tehnologija. Zbog tih razvitaka, počeli su se unaprjeđivati i razvijati sistemi za destilaciju. Također širenjem kolonija na teško dostupna mjesta, kolonijalne sile su bile primorane razvijati tehnologije desalinizacije. Prvi patent za desalinizacijski proces odobren je 1869. u Engleskoj. Također je te iste godine izgrađen prvi pogon za desalinizaciju vode od strane Britanske vlade u Adenu, kako bi se mogli opskrbljivati brodovi koji bi uplovljavali u luku na Crvenom moru. Prvi veliki pogon za opskrbljivanje slatkom vodom u komercijalne svrhe izgrađen je 1930 u Arubi, blizu Venezuele. Do današnjeg dana postoje otprilike 16 000 operativnih desalinizacijskih pogona, lociranih u 177 zemalja, koje pritom proizvode 95 milijuna m³ pitke vode dnevno. [4]

2.2. Toplinska desalinizacija

Bazirana je na principu isparavanja i kondenziranja. Vodi se dovodi toplina sve dok ne dostigne temperaturu zasićenja, nakon čega dolazi do isparavanja. Sol se taloži dok se para odvodi i kondenzira u drugim izmjenjivačima topline, pri čemu se proizvodi pitka voda (*Slika 2.4.*). Toplinska energija se proizvodi u parnim generatorima, grijačima putem otpadne topline ili

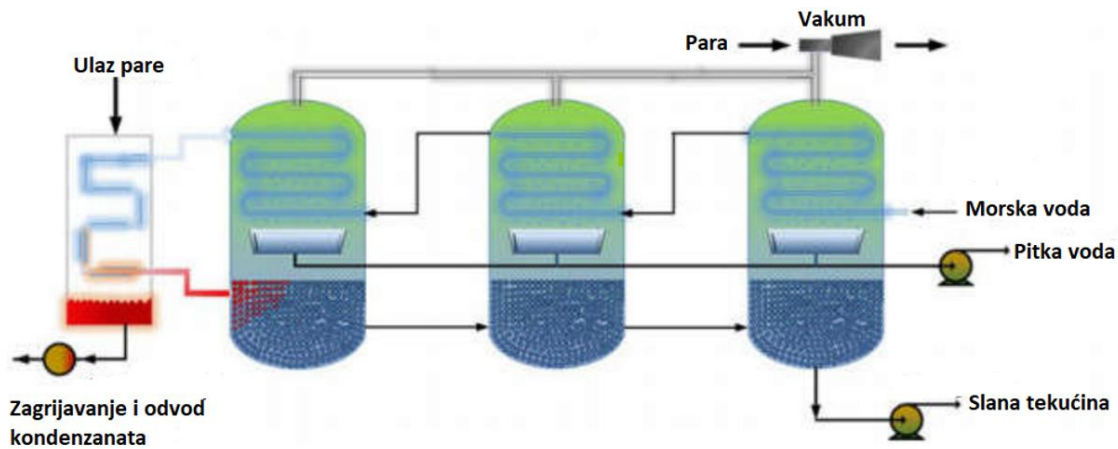
koristeći izlazni tlak iz turbina pogona. Ovisno o načinu izvođenja i iskorištavanja potrebne energije za provođenje procesa, toplinsku desalinizaciju možemo podijeliti na više vrsta. [6]



Slika 2.4. Princip termalne desalinizacije [7]

2.2.1. Višestupanjska destilacija

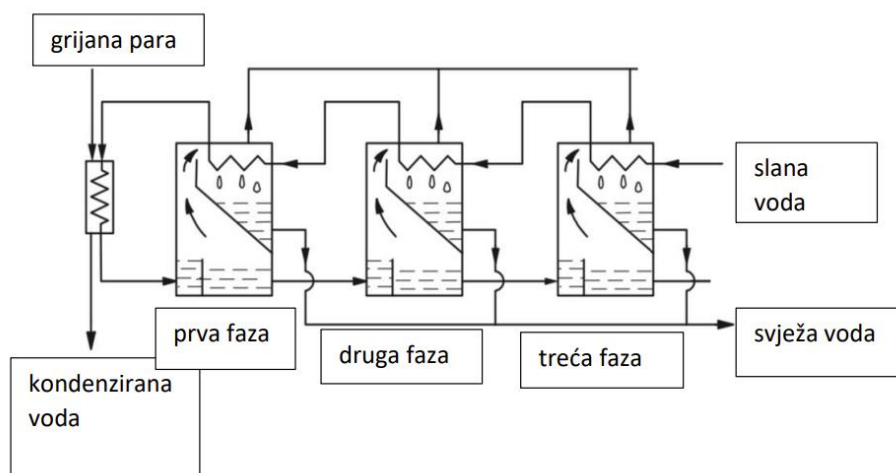
Postrojenje za višestupanjsku destilaciju se sastoji od više isparivača u nizu. Slana voda se dovodi u prvi serijski isparivač gdje se indirektno grije vodenom parom iz kotla ili drugog izvora energije. Nastala para naziva se „druga para“ te se odvodi u drugi isparivač gdje se koristi za zagrijavanje koncentrata morske vode iz prvoga stupnja. Upotrijebljena energija za isparavanje morske vode je toplina kondenzacije pare u cijevi. Postupno snižavanje tlaka kroz više stupnjeva osigurava smanjenje vrelišta desalinizirane morske vode. Stoga „druga para“ iz prethodne serije može zagrijati može zagrijati desaliniziranu morsku vodu u nadolazećoj seriji (Slika 2.5.). Nastali kondenzat nakon druge serije naziva se svježom vodom. Višestupanjskom desalinizacijom moguće je postići visoki stupanj iskorištenja topline. Jedan od glavnih nedostataka ove metode je nastajanje kamenca u kotlovima, te to zahtjeva velika ulaganja u korištenu opremu.[8]



Slika 2.5. Shema višestupanjske destilacije [9]

2.2.2. Višestruka destilacija

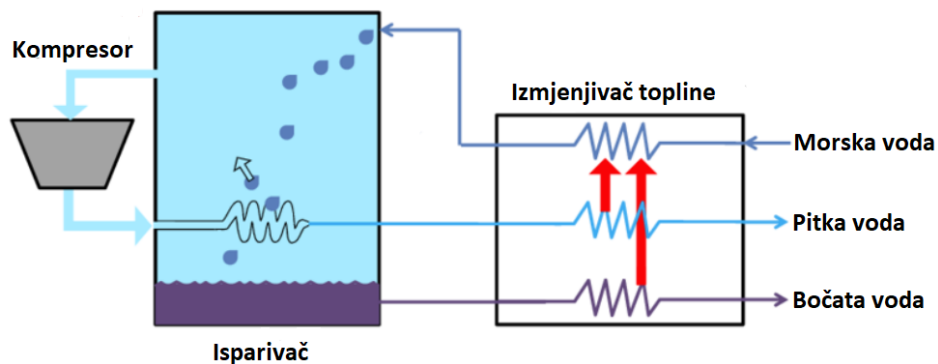
Višestruka destilacija je zbog svog jednostavnog i ekonomski prihvatljivog procesa pogodna za masovnu proizvodnju. Specifičnost ove metode je što se zagrijavanje odvojeno od isparavanja. Tradicionalno iskorištava otpadnu toplinu dobivenu iz termalnih postrojenja koja koriste fosilna goriva. S pomoću pare iz izvora topline zagrijava se morska voda u glavnom grijaču. Poslije pregrijavanja morska voda se odvodi u niskotlačni uređaj gdje započinje isparavati, te nastavlja s isparavanjem u sljedećoj fazi s nižim tlakom. Para nastala takvim procesom kondenzira se u svježju vodu izvan cijevi za pregrijavanje (Slika 2.6.). Potencijalni nedostatak ove metode je veliki cirkulacijski volumen slane vode. [10]



Slika 2.6. Shema višestruke destilacije [11]

2.2.3. Parno-kompresijska destilacija

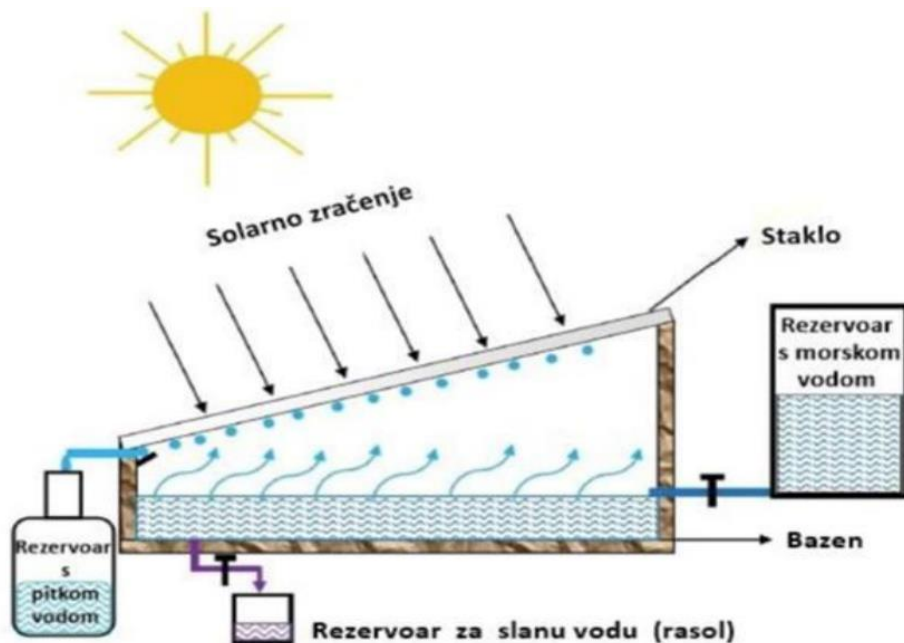
Glavno načelo parne kompresije je povrat energije iz pare proizvedene u završnoj fazi, njezinim komprimiranjem bilo mehanički u kompresoru ili toplinski preko izlaznih mlaznica pare. Odnosno, prethodno zagrijana slana voda isparava, zatim se nastala „druga para“ nakon kompresije kondenzira na plaštu kondenzatora, pri čemu se osigura energija za odvijanje procesa (Slika 2.7.). Također nedostaci ove metode su stvaranje kamenca u kotlu i velika ulaganja u opremu.[12]



Slika 2.7. Shema parno-kompresijske destilacije [13]

2.2.4. Solarna desalinizacija

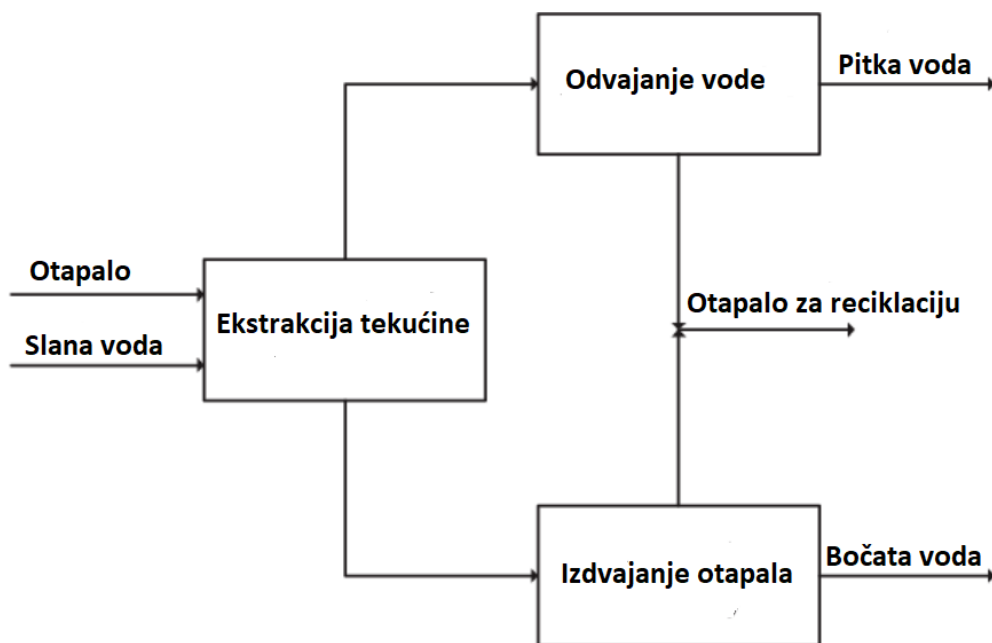
Solarna desalinizacija je metoda koja koristi sunčevu energiju za pretvaranje morske ili bočate vode u pitku vodu. Proces se može karakterizirati ovisno o načinu korištenja solarne energije. Naime, postoji direktna desalinizacija, pri čemu morska voda apsorbira sunčevu energiju te isparava, ostavljajući iza sebe soli i ostale nečistoće. Bojanjem batolita u crnu boju, povećava se učinkovitost apsorpcije topline. Tim načinom para se kondenzira u pitku vodu na plastičnim filmovima ili staklenim pločama (Slika 2.8.). S druge strane, postoji i indirektna metoda desalinizacije, kojom se putem sunčeve energije proizvodi struja, koja se kasnije koristi kao energija za korištenje drugih procesa desalinizacije. Ova metoda je ekološki prihvatljiva, ali zahtjeva velike površine. [14]



Slika 2.8. Prikaz solarne desalinizacije [14]

2.3. Ekstrakcija

Ekstrakcija je brza i učinkovita metoda razdvajanja i koncentriranja tvari. Tijekom ekstrakcije dolazi do odvajanja tvari iz homogene smjese na osnovi njene različite topljivosti u otapalima koja se ne miješaju međusobno. Najbitnija stavka je pronaći odgovarajuće otapalo. Uglavnom se koriste organska otapala koja će otopiti određenu količinu vode na niskoj temperaturi, zatim odvojiti otoplenu vodu kada poraste temperatura. Naime, kada u ekstrakcijskom tornju dođe do kontakta između otapala i morske vode, slana voda se transportira u separator prolazeći kroz regenerator i toplinski izmjenjivač. Te se na taj način dobiva pitka voda. Otapalo se potom vraća u ekstrakcijski toranj kako bi se ponovno upotrijebilo (*Slika 2.9.*). Ova metoda nema velikog utjecaja korozije na opremu koja se upotrebljava prilikom ekstrakcije i nije joj potrebna velika količina energije. [15]



Slika 2.9. Shematski prikaz ekstrakcije [15]

2.4. Ionska izmjena

Ionska izmjena predstavlja svestranu tehniku pročišćavanja koja dozvoljava ciljano odvajanje vodenih kontaminanata s pomoću selektivnih kemijskih interakcija na molekularnoj razini. To je postupak u kojem se upotrebljavaju ionski izmjenjivači (*Slika 2.10.*), koji mogu na sebe vezati ione iz otopine, a otpustiti jednaku količinu vlastitih iona. Ionski izmjenjivači sadrže različite kopolimere, vezane u čvrstu trodimenzionalnu strukturu na kojoj su pričvršćene pokretne ionske skupine. Ionske smole mogu biti anionske i kationske ovisno o naboju iona koji želimo vezati za ionsku smolu. [16]

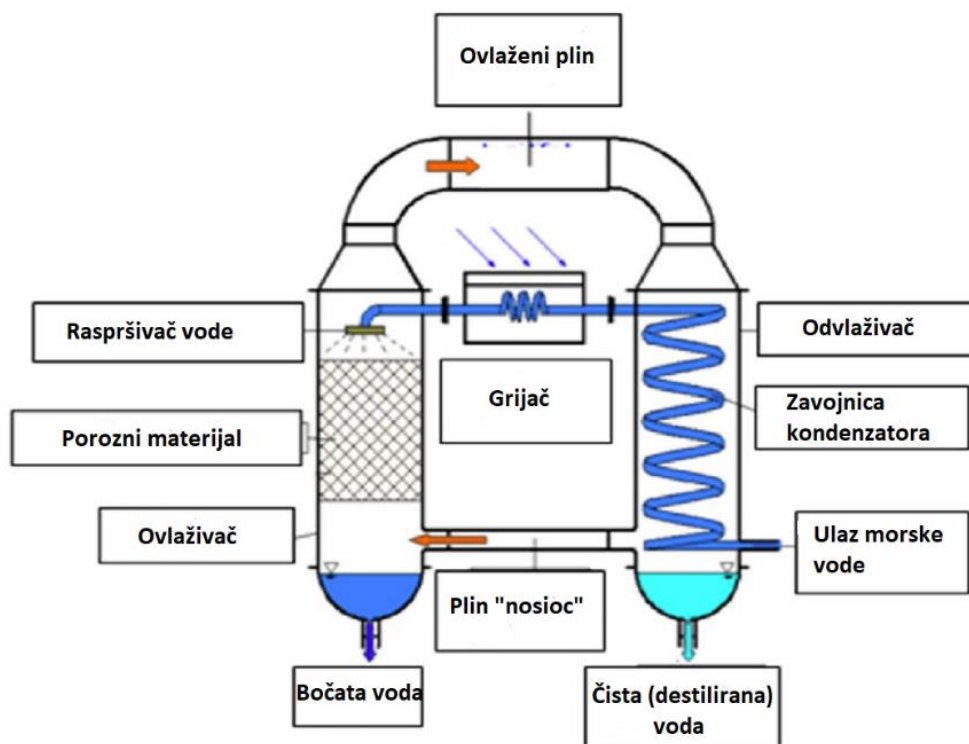


Slika 2.10. Ionski izmjenjivač ili „ionska smola“ [17]

2.5. Metoda ovlaživanja i odvlaživanja zraka

U svrhu desalinizacije morske vode, metoda ovlaživanja i odvlaživanja zraka iskorištava prirodna svojstva zraka. Prirodni zrak sadrži paru, čiji udio ovisi o temperaturi. Proces započinje dovođenjem toplinske energije morskoj vodi u kotlovima, nakon čega slana voda ulazi u ovlaživački toranj gdje dolazi do kontakta sa strujom zraka ili s drugim plinovima „nosiocima“, kao što su: argon, helij ili ugljični dioksid. Voda se dovodi s vrha ovlaživačkog tornja, gdje prolaskom kroz porozni materijal tečenjem ili raspršivanjem prenosi toplinu. Suhi zrak se u kontaktu s vodom miješa do stanja zasićenja, pri čemu se povećava vlažnost i temperatura zraka.

Vlažni zrak se zatim odvodi u odvlaživački toranj, pri čemu pomoću površinskog hladnjaka ili zavojnica kondenzatora predaje toplinu. Nakon što temperatura padne ispod temperature rosišta, kondenzacijom se dobije pitka voda (Slika 2.11.). [18]



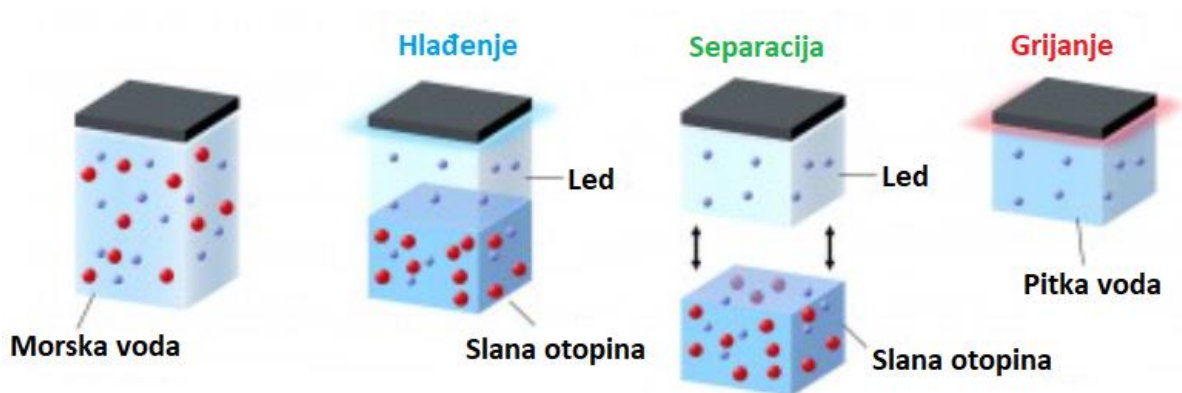
Slika 2.11. Shema metode ovlaživanja i odvlaživanja zraka [19]

Zbog bolje učinkovitosti ove metode separirani su procesi grijanja, isparavanja i kondenzacije. Proces se odvija pri niskim temperaturama i pod atmosferskim tlakom, te ga je lako kontrolirati. Za razliku od metoda koje koriste visoke temperature, ova metoda nema problema s kamencem i korozijom.

2.6. Desalinizacija zamrzavanjem

Desalinizacija postupcima zamrzavanja temelji se na činjenici da se odvođenjem topline slanoj vodi do i ispod temperature zamrzavanja, formiraju kristali koji se uglavnom sastoje od čiste vode.

Daljnjom separacijom kristala vode od slane otopine, te naknadnim zagrijavanjem istih dobiva se pitka voda (Slika 2.12.). [20]



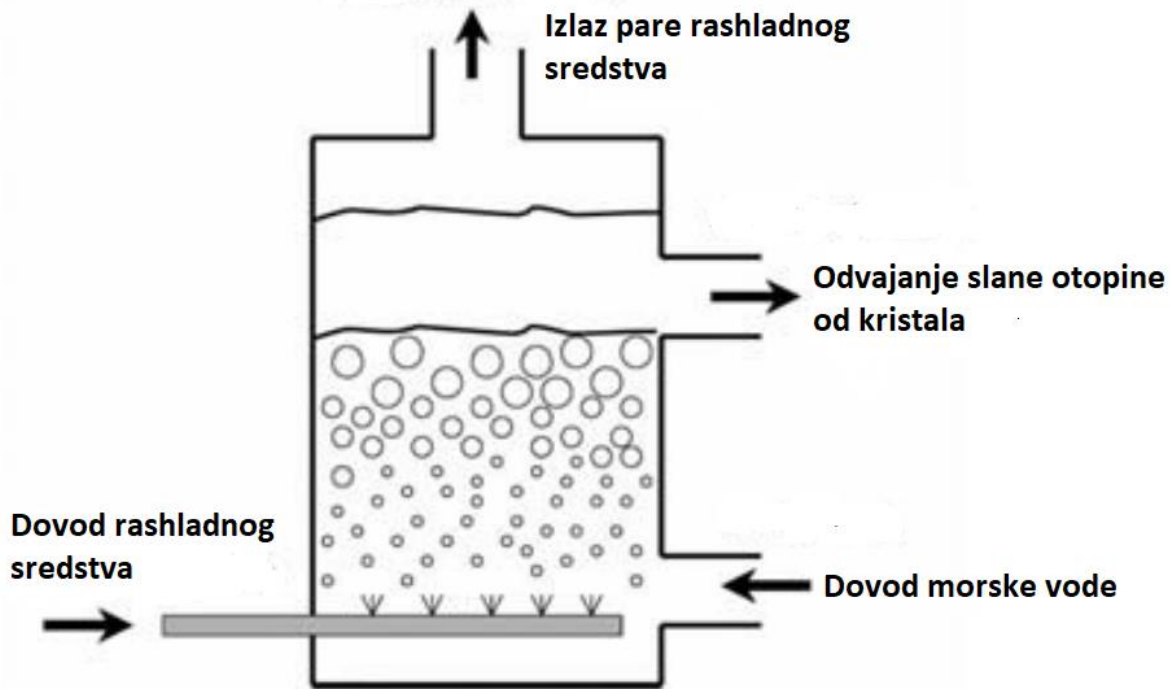
Slika 2.12. Prikaz desalinizacije zamrzavanjem [20]

Potrebna latentna toplina za zamrzavanje i isparivanje vode iznosi 330 kJ/kg i 2256 kJ/kg. Stoga metoda zamrzavanja koristi 1/7 potrebne energije za desalinizaciju baziranu na isparivanju. Korištenjem temperature ispod 0 °C u procesima za desalinizaciju, drastično se smanjuje rizik od nastanka korozije i kamenca. [21]

2.6.1. Kristalizacija direktnim kontaktom sredstva zamrzavanja

Metoda direktnim kontaktom sredstva zamrzavanja, koristi rashladno sredstvo u direktnom kontaktu s otopinom koju treba zamrznuti. Ova metoda se uglavnom odvija na temperaturi od -5 °C , što joj omogućava nisku potrošnju potrebne energije za odvijanje procesa. Velika produktivnost pri maloj potrošnji energije, kompaktnost i efektivan dizajn glavne su odlike ove metode. Međutim, ova metoda zahtjeva odgovarajuće rashladno sredstvo. Takvo sredstvo mora imati temperaturu vrenja od -4 °C ili manju, također ne smije sadržavati toksične, zapaljive i kemijski nestabilne karakteristike kao ni svojstvo miješanja s vodom. Pored svih tih zahtjeva, osnova za dobivanje čistih kristala je kvalitetno izmiješano sredstvo s otopinom. Rashladno

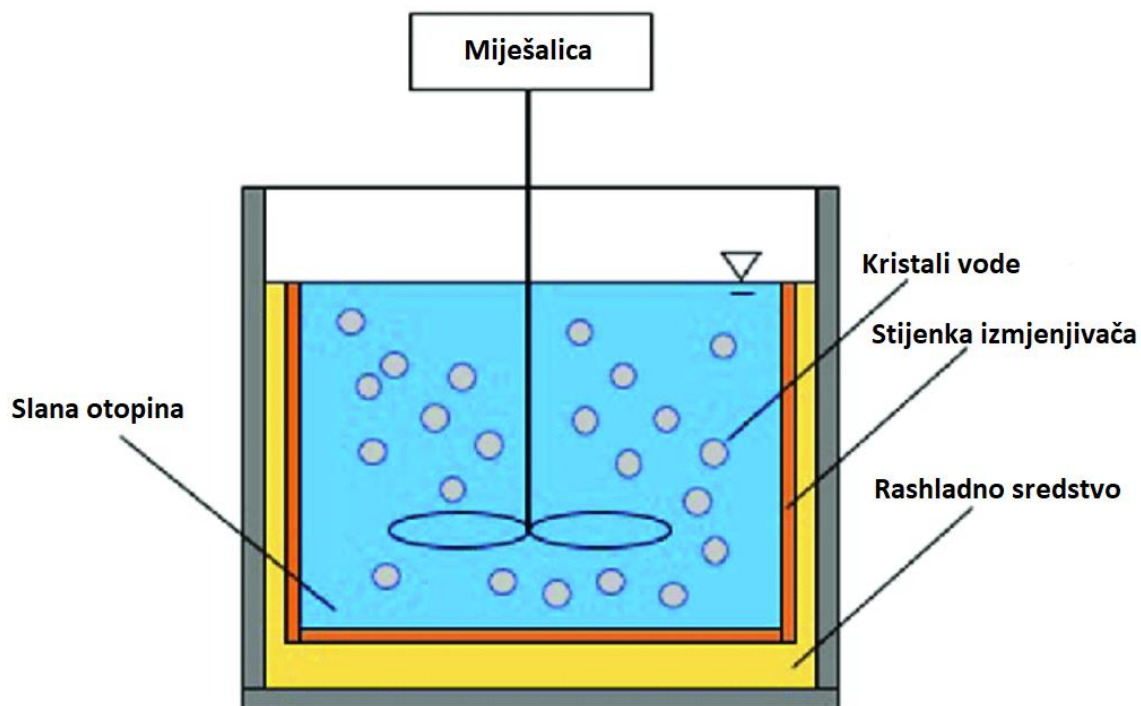
sredstvo se raspršuje kroz mlaznice u donjem djelu di ohlađuje otopinu i oslobađa se u obliku pare. Kristali i slana otopina se potom odvođe i separiraju (Slika 2.13.). [21]



Slika 2.13. Shema kristalizacije s direktnim kontaktom rashladnog sredstva i otopine [21]

2.6.2. Kristalizacija indirektnim kontaktom sredstva zamrzavanja

Ovom metodom, rashladno sredstvo nije u izravnom kontaktu s otopinom koju želimo iskristalizirati. Energija rashladnog sredstva prolazi kroz stijenku izmjenjivača topline, te se izmjenjuje s toplinom otopine. Novonastali kristali na stijenkama izmjenjivača se usitnjuju i miješaju s kristalima unutar otopine s pomoću miješalice, tvoreći slanu otopinu s velikom koncentracijom sitnih kristala vode (Slika 2.14.). [21]



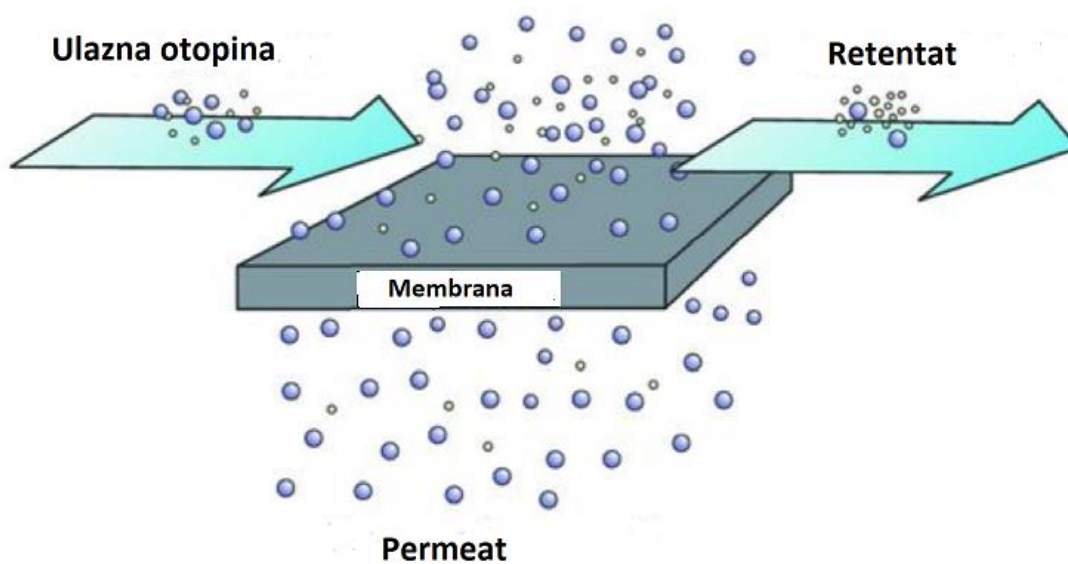
Slika 2.14. Shema kristalizacije s indirektnim kontaktom rashladnog sredstva [22]

2.6.3. Kristalizacija vakumskim zamrzavanjem

Metoda kristalizacije vakuumskim zamrzavanjem, koristi tlačeni vakuum komprimirajući otopinu kako bi dio vode ispario, time se postiže temperatura na kojoj voda počinje kristalizirati u otopini. Dodatnim procesom odvođenja topline, koncentracija kristala u otopini će se povećati. [21]

3. MEMBRANSKE TEHNOLOGIJE

Membranski procesi temelje se na korištenju polupropusnih membrana koje selektivno propuštaju ili zadržavaju određene molekule i ione. Omogućujući selektivan prijenos tvari kroz membranu pod utjecajem pogonske sile. Pokretačke sile u ovim procesima mogu biti: razlike u tlakovima, razlike u temperaturi ili razlike u naponu. Kod primjene membranskih procesa u obradi vode, glavna pokretačka sila je mahom razlika tlaka. U sustav se dovodi otopina pod tlakom, gdje se dijeli na dva dijela: permeat, koji prolazi kroz membranu i sadrži nižu koncentraciju tvari u odnosu na ulaznu otopinu, te retentat(koncentrat) koji ostaje na membrani i sadrži veću koncentraciju tvari u usporedbi s ulaznom otopinom (*Slika 3.1.*). [23]

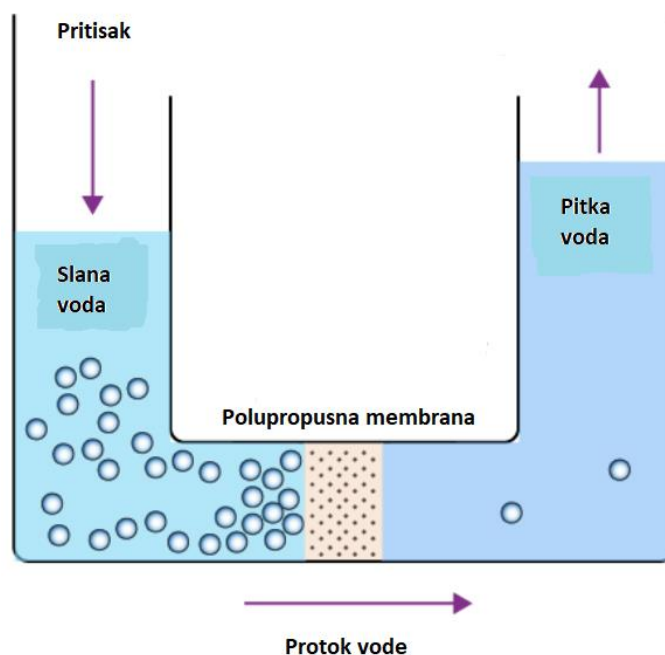


Slika 3.1. Shematski prikaz membranskog procesa [24]

3.1. Reverzna osmoza

Reverzna osmoza predstavlja proces filtracije koji se odvija pod utjecajem hidrostatskog tlaka tekućine na polupropusnu membranu. Membrana djeluje kao filter između slatke i slane vode s

ciljem odvajanja otopljenih soli iz vode. Nakon odvajanja pitke vode od morske vode kroz polupropusnu membranu, slatka voda ima tendenciju povrata na stranu slane vode. Međutim, primjenom većeg tlaka od osmotskog tlaka morske vode, koji iznosi oko 25 atm, proces se preokreće, pa čista voda prolazi natrag kroz membranu u slatku vodu reverznom osmozom (Slika 3.2.).



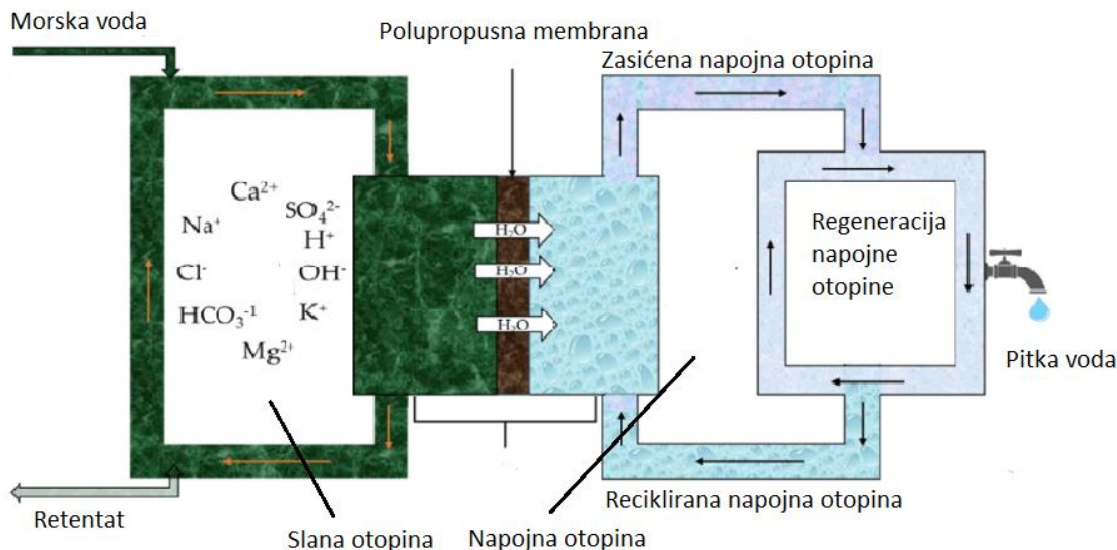
Slika 3.2. Shematski prikaz reverzne osmoze [25]

Pore polupropusnih membrana metode reverzne osmoze u pravilu imaju veličinu oko $0.0001 \mu\text{m}$, što joj omogućava odvajanje svih organskih molekula i virusa, također odvaja više manje sve minerale iz otopine. Postoje dvije vrste membrana koje imaju široku uporabu u komercijalnim svrhama, a to su: asimetrične membrane i membrane od tankoslojnog kompozita. Obje varijacije imaju poroznu podstrukturu s gustom površinskom opnom, pri čemu soli ne prolaze kroz gusti sloj na vanjskoj površini membrane, dok pernat prolazi kroz membransku podstrukturu. Glavna razlike između ovih dviju vrsta membrana je što asimetrične koriste isti polimer za površinski i porozni sloj, dok membrana od tankostjenog kompozita koristi različite polimere za vanjski i unutrašnji sloj. [23]

Metoda reverzne osmoze sačinjava 44 % ukupne godišnje proizvodnje desalinizirane vode i koristi se u 80% desalinizacijskih pogona diljem svijeta. Trenutačno se smatra vodećom i najoptimiziranijom desalinizacijskom metodom koja se bazira na korištenju membrana.

3.2. Izravna osmoza

Metoda izravne osmoze, koristi specijaliziranu polupropusnu membranu dizajniranu da dozvoljava prolaz samo molekulama vode dok blokira većinu soli i drugih kontaminanata. S jedne strane polupropusne membrane nalazi se otopina niske koncentracije, a s druge strane koncentrirana otopina. Razlika u koncentraciji tekućina, stvara razliku osmotskog tlaka tih dviju otopina. Zbog utjecaja osmotskog tlaka, voda prelazi iz otopine niže koncentracije u otopinu s većom koncentracijom, pri čemu minerali i druge čestice ne prolaze kroz membranu. Kasnijom regeneracijom zasićene napojne vode dobiva se pitka voda (Slika 3.3.). [26]



Slika 3.3. Shema izravne osmoze [26]

Ovom metodom efektivno se odvajaju minerali, organske molekule i virusi od molekula vode, pri čemu koristi nisku količinu potrebne energije za provođenje procesa, jer ne koristi vanjski tlak za pogonjenje tekućine kroz membranu. Također polupropusna membrana korištena u ovom procesu nije podložna začepljenju pora taloženjem soli i drugih nečistoća.

3.3. Nanofiltracija

Nanofiltracija je tlačno pogonjena membranska metoda slična metodi reverzne osmoze. Za razliku od reverzne osmoze, koja ima visok stupanj odbacivanja gotovo svih otopljenih tvari, ona omogućuje dobro odbacivanje multivalentnih iona i loše odbacivanje monovalentnih iona. Proces koristi organske i keramičke membrane koje mogu biti guste ili porozne. Membrane uglavnom imaju veličinu pora od 1-10 nm, koje su veće od pora na membranama reverzne osmoze. Nanofiltracijom se omogućuje uklanjanje manjih organskih molekula atomske težine od 200 do 1000 Da i odvajanje krutih čestica veličine od 0,001 μm . Mehanizam pogonjenja tekućine najviše ovisi o strukturi membrane i interakcijama između membrane i transportiranih molekula. [27]

Naime nanofiltracija ima primjetno niži nivo pročišćavanja i pokriva značajno užu spektar filtracije od reverzne osmoze, ali zahtjeva manja financijska ulaganja. Ako se ovom metodom može postići tražena kvaliteta vode, onda predstavlja kvalitetnu alternativu reverznoj osmozi.

3.4. Ultrafiltracija

Ultrafiltracija je membranska metoda filtriranja tekućina, pretežito koloidnih disperzija, odnosno heterogene smjese u kojima su tvari ravnomjerno izmiješane. Koristeći proces sličan kao i u metodama nanofiltracije i reverzne osmoze, gdje sila hidrostatskog tlaka gura tekućinu kroz polupropusnu membranu pritom odvajajući suspendirane tvari i tvari velike molekularne mase. Budući da se odvajaju samo molekule velike molekularne mase, razlika osmotskog tlaka na površini membrane ultrafiltracije je zanemariva, tako da je primjena niskog tlaka dovoljna za dosizanje visoke brzine protoka kroz polupropusnu membranu. Veličine pora na membranama za

ultrafiltraciju variraju od 0,002 do 0,1 μm , zbog čega je prikladna za odvajanje finih čestica kao što su silicijev dioksid, mulj, endotoksini, plastika i virusi.[28]

Ako dođe do povećanja tlaka u procesu, pokreće se protustrujno ispiranje ultrafiltracijskih membrana, čime se membrana pročišćava i tlak se normalizira.

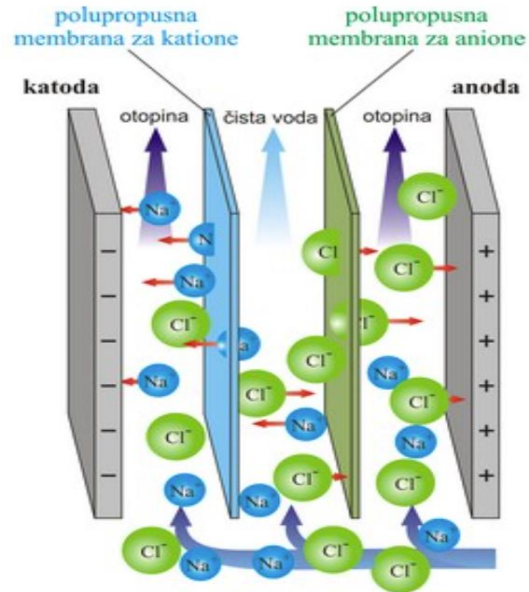
3.5. Mikrofiltracija

Metoda mikrofiltracije koristi polupropusne membrane koje imaju veličinu pora 0,1-10 μm . Zbog čega je pogodna za odvajanje grubih disperzija iz vode. Mikrofiltracijske membrane mogu biti izrađene od nehrđajućeg željeza, plastike, keramike ili tekstila. Također moraju biti dizajnirane da ne dopuste prolaz talogu, algama ili velikim bakterijama dok će molekule vode, jednovalentni ioni, otopljene organske tvari i virusi prolaziti kroz membranu. Pokretačka sila u ovom procesu je razlika između tlakova s unutrašnje i vanjske strane membrane, koja uglavnom iznosi između 0,1 i 10 bar-a. [29]

Uglavnom se koristi kao pred tretman tekućine za daljnje filtriranje koristeći druge metode kao što je metoda ultrafiltracije.

3.6. Elektrodijaliza

Elektrodijaliza je proces elektro-kemijske separacije koji se koristi za desalinizaciju slane tekućine. Temelji se na principu korištenja električnog polja kao pokretačku silu za transportiranje iona soli kroz polupropusnu membranu pri čemu soli zaostaju na membrani dok desalinizirana voda prolazi. Postupak se sastoji od dijalizatora podijeljenog u tri dijela. Tekućina koja se dijalizira prolazi kroz srednji odjeljak, između dviju polupropusnih membrana za anione i katione. Elektrode su smještene na suprotnim krajevima procesa. Utjecajem električnog polja kationi će putovati prema negativnoj elektrodi (katodi), dok će anioni ići prema pozitivnoj elektrodi (anodi). Tijekom dijalize desalinizirana voda se nakuplja uz elektrode, a između membrana ostaje slana voda (*Slika 3.4.*). [30]



Slika 3.4. Shema desalinizacije elektrodijalizom [30]

3.7. Membrane izrađene od organskih polimera

Pravilan izbor organskog polimera za konstrukciju membrane je od velike važnosti. Polimerni materijal mora biti kemijski i toplinski otporan te bi uz to trebao biti i fleksibilan. Također mora imati efektivnu veličinu pora i debljinu membrane što direktno utječe na čistoću filtrirane tekućine. Membrane izrađene od organskih polimera su biorazgradive i nisu toksične. Njihova svestranost, visoka propusnost i sposobnost prilagodbe čini ih pogodnim za širok spektar primjena, od desalinizacije i pročišćavanja otpadnih voda do industrijskih i biotehnoških procesa. Također neki organski materijali mogu se reciklirati ili dobivati iz obnovljivih izvora, što daljnje smanjuje njihov ekološki utisak. S daljnjim istraživanjem i razvojem, ove membrane imaju potencijal za daljnje unapređenje performansi i održivosti u različitim sektorima.

3.7.1. Celuloza

Celuloza je najprisutniji organski polimer na zemlji i glavni je sastojak staničnih stijenki biljaka. Prvi korak u proizvodnji celuloze je predobrada koja obuhvaća uklanjanje lignina i hemiceluloze

iz lignocelulozne biomase kako bi se izdvojila celuloza. Nakon izdvajanja podvrgava se intenzivnoj fizikalno- kemijskoj obradi s ciljem usitnjavanja celuloze na nanometarsku razinu.

U potražnji za održivim membranskim materijalima s hidrofilnim svojstvima, dobrim poroznim značajkama te dobrim mehaničkim svojstvima, celuloza se pokazala kao kvalitetan odabir organskog polimera. Značajan aspekt celuloznih materijala leži u obilju funkcionalnih skupina, kao što su hidroksilne i karboksilne skupine, koje su prisutne u nanocelulozi.

Naime celuloza je doprinijela razvoju mehanički robusnih membrana koje karakterizira izvrsna poroznost. Može se koristiti kao barijera za selektivnu filtraciju, ili kao samostojeća membrana za efikasnu nanofiltraciju ili kao podupirući sloj koji povećava strukturnu stabilnost i cjelokupnu efikasnost membrane.

3.7.2. Škrob

Škrob je polisaharid sastavljen od polimera amiloze i amilopektina. Amilozu izgrađuju jedinice D-glukoze povezane α (1-4) vezama i ona čini linearnu komponentu škroba. Razgranata komponenta je amilopektin, polimer sastavljen od jedinica D- glukoze povezanih α (1-4) vezama i u manjem postotku α (1-6) vezama. Škrob je glavni rezervni materijal u biljkama, a ovisno o biljnoj vrsti postojat će i razlike u sastavu polisaharida. Ova varijabilnost izravno utječe na funkcionalna svojstva škroba. Svojstva škroba kao što su kristalnost, sposobnost bubrenja i viskoznosti ovise o sastavu polisaharida, odnosu omjera amiloze i amilopektina u polisaharidu. Povećanjem udjela amiloze, smanjuje se kristalnost i sposobnost bubrenja. Modifikacijom takvog polisaharida, mogu se izraditi membrane koje imaju korisna svojstva kao što su biorazgradivost, fleksibilnost i biokompatibilnost.

3.7.3. Hitin

Hitin je organski polimer linearne i kristalne strukture sastavljen od jedinica N-acetilglukozamina povezanih β (1-4) vezama. Prema vrsti molekularnih lanaca postoje α -hitin, β -hitin i γ -hitin. Ovaj

polisaharid se smatra spojem visoke vrijednosti s potencijalnim svojstvima kao što su biokompatibilnost, biorazgradivost, bioaktivnost i niska toksičnost. Hitin se uobičajeno dobiva iz ljuštura rakova, beskralješnjaka, staničnih stijenki gljiva i zelenih algi. Kemijsko- fizičkim modifikacijama hitina poboljšavaju se njegova funkcionalna svojstva, kao što je povećanje njegove topljivosti u otapalima, prodiranje u stanicu i sposobnost uklanjanja zagađivača u obliku metalnih iona. Membrane od hitina nude širok spektar mogućnosti za primjene u medicini, prehrambenoj industriji i pročišćavanju vode.[31]

3.8. Membrane izrađene od anorganskih materijala

Membrane izrađene od anorganskih materijala koriste se u mnogim industrijskim i tehnološkim primjenama zbog svojih izvanrednih svojstava, uključujući kemijsku otpornost, visoku temperaturnu stabilnost i mehaničku izdržljivost. Takvi materijali obično uključuju keramičke materijale, metalne okside, silikate i druge anorganske komponente.

3.8.1. Membrana izrađena od metalnih oksida

Membrane izrađene od metalnih oksida su posebna vrsta anorganskih membrana koje se koriste u raznim aplikacijama zahvaljujući svojim jedinstvenim svojstvima, kao što su kemijska otpornost, visoka temperaturna stabilnost i odlična selektivnost. Metalni oksidi, poput aluminijevog oksida (Al_2O_3), titanovog oksida (TiO_2) i cinkovog oksida (ZnO), pretežito se koriste kao osnovni materijal za proizvodnju takvih membrana. Dodavanjem hidrofobnog praška u strukturu, smanjuje se hidrofilnost membrane, što ima pogodan utjecaj na odvajanje soli.

3.8.2. Membrane na bazi ugljika

Materijali na bazi ugljika, uglavnom sadržavaju dobru električnu vodljivost i stabilnost. Također imaju atomski glatku strukturu i zbog toga se mogu koristiti za konstrukciju membrana visokih performansi. Membrane na bazi ugljika mogu se proizvoditi od različitih oblika ugljika, uključujući ugljen, grafen i grafit. Grafen je najtanji materijal koji postoji, stoga bi atomski tanke membrane u teoriji trebale imati visok stupanj filtracije tekućine. Takve membrane često i pokazuju visoku selektivnost za određene molekule ili plinove, što ih čini pogodnima za precizne primjene odvajanja, uključujući separaciju plinova kao što su ugljikov dioksid (CO_2), kisik (O_2) i dušik (N_2). [32]

3.9. Kompozitne membrane

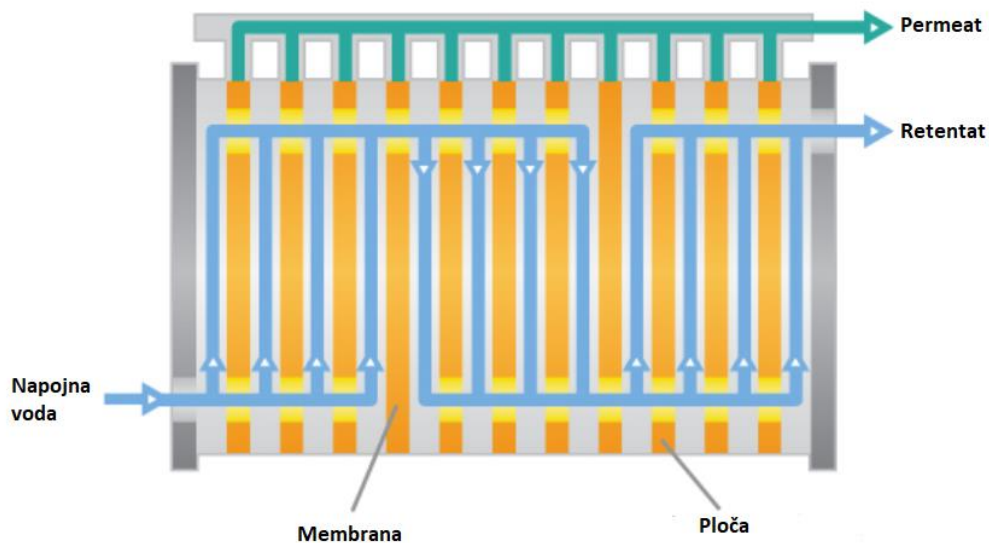
Kompozitne membrane su vrsta membrana koje se sastoje od dva ili više različitih materijala, kombinirajući prednosti svakog od njih kako bi se postigle poboljšane performanse u procesima filtracije i separacije. Mogu se sastojati od anorganskih i organskih materijala, te od njihovih kombinacija.

3.10. Konfiguracije membranskih modula

Membranski moduli su ključni elementi u sustavima za filtraciju i separaciju koji koriste membrane za različite procese, uključujući pročišćavanje vode, desalinizaciju, separaciju plinova i mnoge druge industrijske primjene. Pri konstrukciji modula treba težiti dobrom iskorištenju aktivne membranske površine, osiguranju visoke gustoće slaganja membrana, postizanju dobrih hidrauličkih uvjeta, mogućnosti lakog čišćenja membrana i ekonomičnosti procesa. Maksimalnim iskorištavanjem aktivne membranske površine, poboljšava se učinkovitost i mogućnosti sustava.

3.10.1. Modul filter-ploča

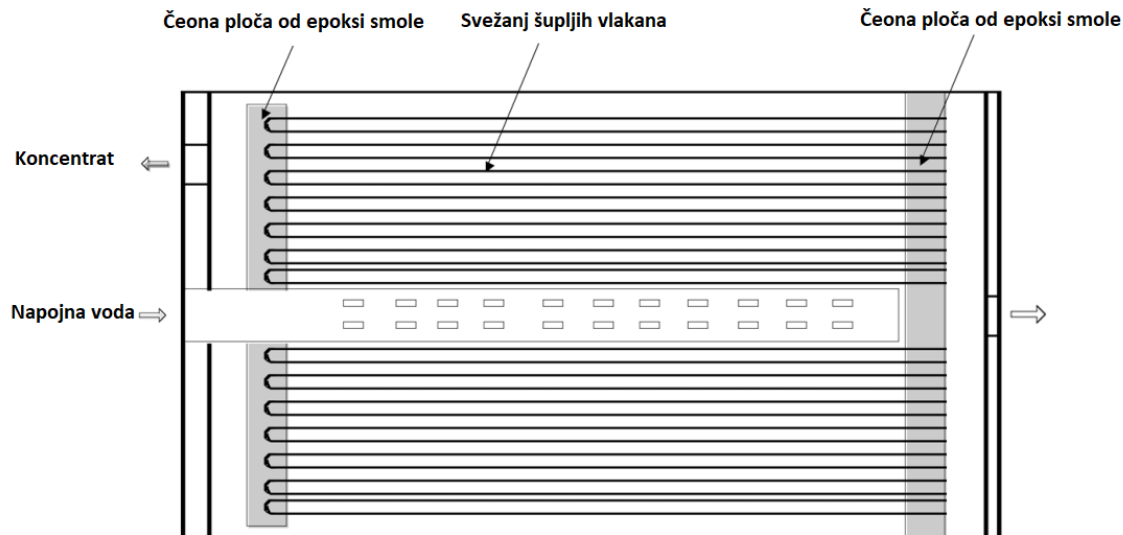
U ovakvoj membranskoj konfiguraciji, membrane i razvodnici u obliku ploča su naizmjenično složeni poput sendviča, obuhvaćeni zajedno u okviru. Napojna voda, odnosno voda koju želimo desalinizirati, dovodi se u sustav, gdje prolazi kroz filter-ploče, filtriranjem te vode nagomilavaju se krute čestice na površini membrana. Nagomilavanjem krutih čestica, stvara se sloj, koji smanjuje efektivnu veličinu otvora pora membrane, pri čemu pomaže daljnjoj filtraciji napojne vode (Slika 3.5.). Gustoća pakiranja u ovom modulu je manja nego kod drugih modula, kao što je spiralni modul ili modul sastavljen od šupljih vlakana, čime se smanjuje mogućnost separacije. Usprkos tome, modul filter-ploča se i dalje koristi u različitim primjenama obrade voda, pogotovo tamo gdje otpadne vode sadržavaju velike količine kontaminanata i/ili imaju visoke viskoznosti. Najčešću primjenu ima u procesu izravne osmoze. [33]



Slika 3.5. Shema modula „filter-ploča“ [33]

3.10.1. Modul sastavljen od šupljih vlakana

Modul sastavljen od šupljih vlakana koristi polupropusnu membranu u obliku šupljih vlakna koji su dobiveni iz celuloze ili nekih drugih materijala. Vlakno ima asimetričnu strukturu i debljinu od 40 do 80 μm . Velike količine tih vlakana se povežu u „svežanj“, pa potom presavi. Svežanj šupljih vlakana se zamota i učvrsti na čeonim ploče od epoksi smole. Ulazna struja dolazi izvana prolazeći kroz vlakna, dok permeat izlazi na čeonim stranama (*Slika 3.6.*). Zbog visoke gustoće pakiranja, ovakav modul osigurava znatno niži fluks od spiralnih i filter preše modula. [33]

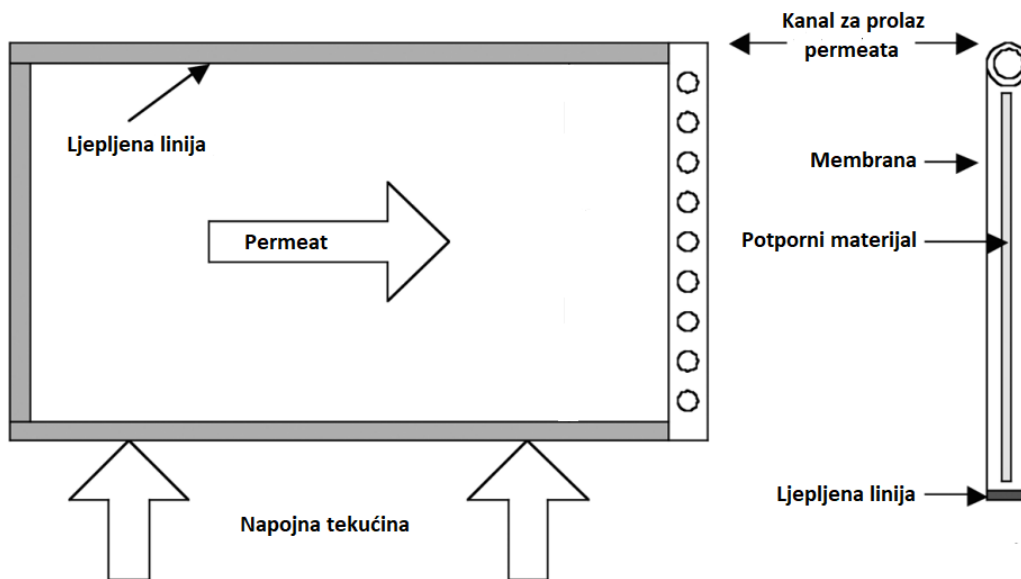


Slika 3.6. Shema modula sa šupljim vlaknima [33]

3.10.2. Spiralni modul

Spiralni modul je specifičan tip membranskog modula koji se koristi za filtraciju, odvajanje i pročišćavanje tekućina i plinova. Ovaj dizajn sastoji se od membrana koje su namotane u spiralni oblik, omogućavajući efikasno iskorištavanje površine membrane u kompaktnoj konstrukciji. Takav modul sastoji se od najmanje dva lista membrana razdvojenim kanalom za protok permeata.

Ovojnica svakog para membrana zalijepljena je duž tri ruba kako bi se spriječila kontaminacija permeata, a četvrti rub je pričvršćen na cijev za odvodnju permeata (*Slika 3.7.*). [33]



Slika 3.7. Shema spiralnog modula [33]

4. PRIMJENA MEMBRANSKIH METODA ZA DESALINIZACIJU U SVIJETU

Membranske tehnologije za desalinizaciju koriste se širom svijeta kako bi se osigurala opskrba pitkom vodom u regijama s ograničenim resursima vode ili gdje je slana voda lako dostupna. Najpopularnija membranska tehnologija za desalinizaciju je reverzna osmoza, ali široku upotrebu imaju i metode nanofiltracije i elektrodijalize. Jedna od najistaknutijih prednosti ovih metoda je njihova sposobnost djelovanja pri relativno niskim temperaturama, što značajno smanjuje potrošnju energije u usporedbi s tradicionalnim termalnim metodama desalinizacije. Energetska učinkovitost membranskih metoda doprinosi održivijem pristupu u zadovoljavanju sve većih globalnih potreba za pitkom vodom.

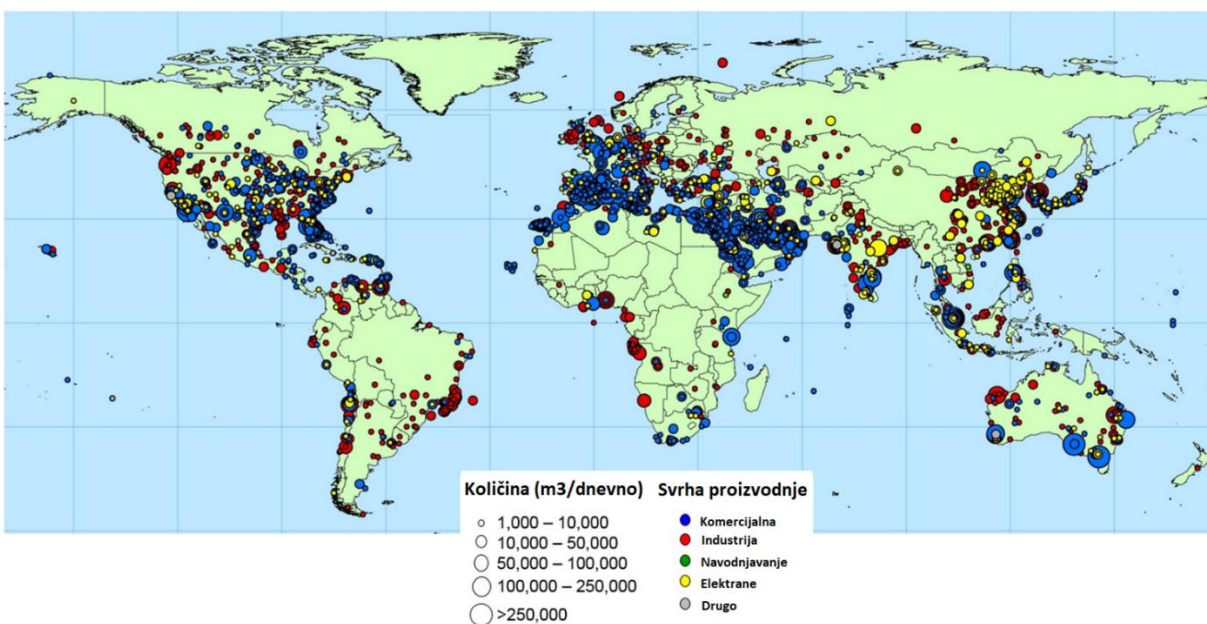
Nadalje, sustavi desalinizacije s membranama, poput reverzne osmoze, poznati su ne samo po svojoj učinkovitosti već i po izuzetnoj sposobnosti proizvodnje visokokvalitetne pitke vode. Membranske metode mogu postići izvanrednu razinu uklanjanja soli, osiguravajući da krajnji proizvod zadovoljava stroge standarde kvalitete vode. Kako napreduje razvoj membranskih materijala i dizajna, membranske metode postaju sve pouzdanije i ekonomski isplativije, otvarajući put održivim upravljanjem resursima pitke vode u budućnosti.

4.1. Desalinizacijska postrojenja u svijetu

Gotovo polovina globalnih desalinizacijskih postrojenja i kapaciteta nalazi se na područjima Bliskog istoka i Sjeverne Afrike (48 %), pri čemu su Saudijska Arabija (15,5 %), Ujedinjeni Arapski Emirati (10,1 %) i Kuvajt (3,7 %) glavni proizvođači desalinizirane vode u svijetu. Regije Istočne Azije, Pacifika i Sjeverne Amerike proizvode 18,4% i 11,9 % globalne desalinizirane vode, prvenstveno zbog velikih kapaciteta u Kini (7,5 %) i SAD-u (11,2 %). U Europi najrasprostranjeniju uporabu desalinizacijskih postrojenja ima Španjolska (5,7 %) čineći više od polovine ukupne desalinizirane vode u Zapadnoj Europi (9,2 %). Najmanji količinski globalni udio desalinizirane vode imaju regije Južne Azije (3,1 %), Istočna Europe i Centralne Azije (2,4 %) te

Podsaharske Afrike (1,9 %), gdje se desalinizacija prvenstveno koristi za mala postrojenja u privatne i industrijske svrhe (Slika 4.1.).

Većina postrojenja za desalinizaciju nalaze se u zemljama s visokim prihodima (67 %), proizvodeći najveću količinu globalno desalinizirane vode (71 %). Nasuprot tome, vrlo malo postrojenja za desalinizaciju nalazi se u zemljama niskih prihoda, doprinoseći mali udio u globalnoj proizvodnji desalinizirane vode (<0,1 %). [34]



Slika 4.1. Prikaz dnevne globalne proizvodnje desalinizirane vode i svrha proizvodnje [34]

Iako skoro polovina ukupnog broja postrojenja za desalinizaciju proizvodi tehnološku vodu za industrijski sektor, komunalni sektor je najveći korisnik desalinizirane vode po količini. Naime, 62,3 % desalinizirane vode proizvodi se za ljudsku upotrebu, u usporedbi sa 30,2 % za industrijsku primjenu. Industrijska postrojenja imaju manje kapacitete za proizvodnju desalinizirane vode, proizvodeći u prosjeku 3712 m³/ dan, dok postrojenja za desalinizaciju u komunalne svrhe prosječno proizvode 12126 m³/dan. Iako komunalni i industrijski sektori čine većinu količinske globalne proizvodnje desalinizirane vode, bitno je spomenuti i sektore za energetiku i navodnjavanje koji proizvode 4,8 % i 1,8 % ukupne godišnje količine desalinizirane vode.

Od tehnologija desalinizacije, reverzna osmoza je daleko najdominantniji proces, sa udjelom od 84 % ukupnog broja operativnih postrojenja za desalinizaciju, pri čemu proizvodi 69 % (65,5 milijuna m³/dan) ukupne globalne desalinizirane vode. [34]

4.1.1 Desalinizacijsko postrojenje „Ras Al Khair“

Postrojenje Ras Al Khair (*Slika 4.2*) smješteno na obali Perzijskog zaljeva u Saudijskoj Arabiji, jedno je od najvećih i najnaprednijih desalinizacijskih postrojenja u svijetu. Otvoreno 2014. godine, ovo postrojenje predstavlja ključni dio saudijske infrastrukture za vodosnabdijevanje i energetiku. [35]



Slika 4.2 Desalinizacijsko postrojenje „Ras Al Khair“, Saudijska Arabija [35]

„Ras Al Khair“ koristi kombinaciju višestupne bljeskalice i reverzne osmoze, omogućujući mu da maksimizira efikasnost proizvodnje pitke vode.

Postrojenje ima ogromne proizvodne kapacitete, sposobne da generiraju oko 1.025.000 m³ dnevno. To ga čini jednim od najvećih desalinizacijskih postrojenja s integriranom proizvodnjom energije.

4.1.2. Desalinizacijsko postrojenje „Sorek“

Postrojenje za desalinizaciju „Sorek“ (*Slika 4.3.*), koje se nalazi u Izraelu, jedno je od najvećih i tehnološki najnaprednijih postrojenja za desalinizaciju u svijetu koja koriste metodu reverzne osmoze. „Sorek“ igra ključnu ulogu u Izraelskom sistemu vodosnabdijevanja, omogućujući zemlji da nadmaši izazove koje donosi suha klima.



Slika 4.3. Desalinizacijsko postrojenje „Sorek“, Izrael [36]

S kapacitetom proizvodnje od oko 624.000 kubnih metara desalinizirane vode dnevno, značajno doprinosi Izraelu sposobnost da zadovolji svoje potrebe pitke vode. [36]

„Sorek“ koristi tehnologiju reverzne osmoze s inovativnim horizontalnim membranskim modulima. Takav pristup omogućava efikasno i ekonomično uklanjanje soli iz morske vode.

4.1.3. Desalinizacijsko postrojenje „Ashkelon“

„Ashkelon“ desalinizacijsko postrojenje koje se nalazi u Izraelu jedno je od pionirskih i najvećih postrojenja za desalinizaciju koristeći tehnologiju reverzne osmoze u svijetu (*Slika 4.4.*). Otvoreno 2005. godine, „Ashkelon“ je bio jedan od prvih velikih komercijalnih pogona te vrste i postavio je standarde za buduće projekte u svrhu desalinizacije.



Slika 4.4. Desalinizacijsko postrojenje „Ashkelon“, Izrael [37]

U vrijeme otvaranja „Ashkelon“ je bio jedno od najvećih postrojenja za desalinizaciju u svijetu, s kapacitetom od oko 330.000 m³ pitke vode dnevno. [37]

Uz desalinizacijsko postrojenje „Sorek“, „Ashkelon“ čini ključni dio proizvodnje desalinizirane vode za dugoročno vodosnabdijevanje Izraela.

4.1.4. Desalinizacijsko postrojenje „Carlsbad“

Postrojenje za desalinizaciju „Carlsbad,“ smješteno u blizini San Diega u Kaliforniji, jedno je od najvećih i najznačajnijih postrojenja za desalinizaciju u Sjedinjenim Američkim Državama (*Slika 4.5.*). Otvoreno 2015. godine, predstavlja ključnu komponentu regionalne strategije za osiguranje stabilnog snabdijevanja vodom u području koje često pati od nedostatka pitke vode zbog učestalih suša.



Slika 4.5. Desalinizacijsko postrojenje „Carlsbad“, SAD, Kalifornija [38]

„Carlsbad“ desalinizacijsko postrojenje ima mogućnost proizvodnje od oko 189.000 kubnih metara pitke vode dnevno, što je dovoljno da zadovolji potrebe 400.000 stanovnika San Diega.

Postrojenje „Carlsbad“ koristi metodu reverzne osmoze i dizajnirano je s posebnim ekološkim mjerama kako ne bi se smanjio utjecaj na lokalni ekosistem, uključujući korištenje najnovijih tehnologija kako bi se smanjila potrošnja energije i emisija ugljikovog dioksida.

5. INOVACIJE U PODRUČJU MEMBRANSKIH TEHNOLOGIJA

Membranske tehnologije, posebno u kontekstu desalinizacije vode, doživjele su značajne inovacije tijekom proteklih godina. Inovacije su usmjerene na poboljšanje efikasnosti, smanjenju troškova i minimizaciji štetnog utjecaja na okoliš.

5.1. Napredni materijali za izradu membrana

Napredni materijali za membrane predstavljaju ključnu inovaciju u svrhu filtracije i desalinizacije, značajno poboljšavajući efikasnost, trajnost i selektivnost membranskih sistema

5.1.1. Grafenski materijali

Grafen i njegovi derivati postali su veoma popularan izbor za konstrukciju membrana zbog svojih izvanrednih svojstava. Grafen je jednoslojna forma ugljika s debljinom od jednog atoma, poznata po svojoj izuzetnoj čvrstoći, fleksibilnosti i elektro provodljivosti. Koristeći ga u membranama daje nam mnoštvo prednosti kao što su visoka propusnost vode, izuzetna čvrstoća i fleksibilnost, selektivno zadržavanje molekula, otpornost na začepljenje membrane, kemijska stabilnost i fleksibilnost u izradi. Ove karakteristike čine grafenske materijale izuzetno atraktivnim za niz aplikacija, uključujući desalinizaciju, pročišćavanje otpadnih voda i primjeni u industriji hrane te farmaceutskoj industriji. [39]

5.1.2. Ugljične nanocjevčice (CNT)

Ugljične nanocjevčice su cilindrične nanostrukture sastavljene od ugljikovih atoma, poznate po svojim jedinstvenim svojstvima kao što su visoka mehanička izdržljivost, izuzetna toplinska i

električna provodljivost, kemijska stabilnost, visoka permeabilnost, selektivna filtracija i otpornost na začepljenje organskim materijalima, čine ih veoma korisnim u razvoju naprednih membranskih tehnologija. [40]

5.1.3. Polimeri visokih performansi

Polimeri visokih performansi kao što su poliamid, polietersulfon, poliviniliden fluorid, polifenilen sulfid, polien ureter keton i teflon omogućavaju razvoj membranskih sistema koji mogu podnositi teške fizičke i kemijske uvjete, bez komprimiranja performansi ili dugotrajnosti. Njihova primjena se širi od ekoloških načina pročišćavanja vode do kompleksnih industrijskih procesa separacije i filtracije.

5.1.4. Membrane s kombiniranim matricama

Membrane s kombiniranim matricama su inovativni materijali koji kombiniraju tradicionalnu organsku polimernu matricu s anorganskim dodacima kao što su zeoliti, metalno-organske strukture, nanočestice ili neke druge strukture. Ove membrane su dizajnirane da poboljšaju performanse klasičnih polimernih membrana povećavajući selektivnost, stabilnost i propusnost.

Implementacija membrana s kombiniranim matricama poboljšava svojstva membrana koje su često ograničene u klasičnim polimernim sistemima. [41]

5.1.5. Metalno-organske strukture

Metalno-organske strukture su napredni materijali sastavljeni od metalnih iona ili klastera povezanih organskim ligandima kako bi formirali strukture s visoko poroznim svojstvima. Ove strukture su podosta istražene zbog svoje izuzetne prilagodljivosti, što ih čini idealnim za primjenu u membranskim metodama.

5.2. Površinske modifikacije membrana

Modifikacija površine membrana je ključno područje inovacija u tehnologiji filtracije i separacije, usmjereno ka poboljšanju performansi membrana i smanjenju rizika od začepljenja njihovih pora.

Nanočestice i nanostrukturirani materijali integriraju se u površinske slojeve membrana kako bi se poboljšala njihova otpornost na nakupljanje mikroorganizama i algi na površinama membrana. To uključuje upotrebu srebrenih nanočestica, titana, cinkovog oksida i sličnih materijala poznatim po svojim antimikrobnim svojstvima.

Povećanjem hidrofilnosti ili hidrofobnosti, membrane mogu biti bolje prilagođene za specifične primjene. Hidrofilne membrane se često koriste kako bi se smanjila interakcija s organskim materijalima i spriječilo začepljenje, dok hidrofobne membrane mogu biti bolje za filtraciju ulja i otapala

Taloženjem tankih slojeva specifičnih polimera ili kopolimera, može se kontrolirati selektivnost i otpornost na zaprljane membrana. Slojevi mogu uključivati i materijale koje se termalno i kemijski dobro prilagođavaju promjenama u sustavu.

Uključivanjem funkcionalnih grupa koje odbijaju proteine, bakterije ili druge neželjene spojeve, mogu se značajno smanjiti problemi začepljivanja. To može uključivati i adsorpciju molekula poput polietilen glikola na površini membrane.

Tretmanom površine membrana pomoću UV svjetla ili plazme moguće je promijeniti površinske energetske karakteristike i pri tome stvoriti funkcionalne grupe koje poboljšavaju protočnost i stvaranje naslaga na površinama membrana.

Nove generacije membrana koriste premaze koji mogu automatski popraviti oštećenja ili degradaciju, čime se produžava životni vijek membrane i održava efikasnost. [42]

5.3. Adaptivni sistemi za čišćenje membrana

Adaptivni sistemi za čišćenje membrana predstavljaju inovativan pristup za održavanje efikasnosti i produljenje životnog vijeka membranskih procesa, posebno u procesima kao što su desalinizacija i pročišćavanje otpadnih voda. Ovi sistemi koriste senzore, automatizaciju i inteligentnu kontrolu kako bi optimizirali proces čišćenja.

Korištenjem naprednih senzora, sistemi mogu pratiti različite parametre kao što su protok, pritisak i zamućenost vode kako bi sustav mogao detektirati nagomilavanje nečistoća i odrediti ako je potrebno čišćenje.

Adaptivni sistemi automatski prilagođavaju cikluse čišćenja na osnovi trenutnih potreba, smanjujući time potrošnju kemikalija za čišćenje membrana i potrebne energije u usporedbi sa standardnim, odnosno određenim rasporedom čišćenja.

Korištenjem softverskih platformi koje objedinjuju sve kontrole sistema, omogućava se centralizirano praćenje i upravljanje procesima čišćenja, što pomaže operaterima da brzo reagiraju na probleme.

Takvim inovacijama smanjuju se troškovi održavanja, produžava se životni vijek membrana i poboljšava se ukupna efikasnost upravljanja postrojenjem. Adaptivni sistemi za čišćenje predstavljaju značajan korak u razvoju „pametnijih“ i ekološki održivijih tehnologija obrada voda.

[43]

6. ZAKLJUČAK

Membranske metode desalinizacije, s naglaskom na procese poput reverzne osmoze, postale su temeljna tehnologija u globalnom naporu za rješavanje izazova povezanih s nestašicom pitke vode. Ove metode ne samo da omogućuju učinkovito uklanjanje soli i drugih nečistoća iz morske ili bočate vode, već pružaju i fleksibilnost primjene koja zadovoljava različite potrebe urbanih i ruralnih područja. Prednosti membranskih metoda, uključujući nižu energetska potrošnju i manji ekološki utisak u usporedbi s tradicionalnim termalnim metodama, istaknule su ih kao održivo rješenje u brojnim dijelovima svijeta, Bliskog Istoka do Kalifornije. Unatoč tehničkim i ekološkim izazovima, kao što su ispuštanje slanog otpada i trajnost membrana, napredak u materijalima i tehnologiji obećava rješenja koja mogu smanjiti troškove i optimizirati učinkovitost. Poseban potencijal leži u kombinaciji ovih metoda s obnovljivim izvorima energije, što može dodatno smanjiti operativne troškove i pridonijeti smanjenju ugljičnog otiska desalinizacijskih postrojenja. Dalje, kako klimatske promjene i rast stanovništva dodatno pritisnu raspoložive resurse, uloga membranskih metoda bit će sve značajnija. Integracija tehnologija pametnih mreža, naprednih senzora i digitalizacija procesa mogu dodatno poboljšati učinkovitost i održivost desalinizacijskih sustava. U konačnici, globalna suradnja, ulaganje u istraživanje i razvoj te razmjena znanja između zemalja bit će presudni za optimizaciju i širenje ovih tehnologija. Kroz takve napore, membranske metode desalinizacije mogu postati ključni element globalne strategije za osiguranje sigurnih, održivih i dostupnih vodenih resursa za buduće generacije.

7. LITERATURA

- [1] „Hrvatska enciklopedija“, S interneta, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/desalinizacija>, 20.08.2024.
- [2] „Hanna instruments“, S interneta, <https://blog.hannaservice.eu/hr/salinitet-i-pitka-voda/>, 20.08.2024.
- [3] „AtlasScientific“, S interneta, <https://atlas-scientific.com/blog/water-conductivity-range/>, 20.08.2024.
- [4] „MDPI“, S interneta, https://www.mdpi.com/2073-4441/13/16/2222?utm_campaign=releaseissue_waterutm_medium=emailutm_source=releaseissueutm_term=doilink3, 20.08.2024.
- [5] „Watermecc“, S interneta, https://water.mecc.edu/courses/ENV110/Lesson6_print.htm, 20.08.2024.
- [6] „Sciencedirect“, S interneta, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermal-desalination>, 20.08.2024.
- [7] „BBC“, S interneta, <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zvxvgdm/revision/5>, 20.08.2024.
- [8] Aminian, Ali: „Sciencedirect“, S interneta, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894710005152>, 20.08.2024.
- [9] „ResearchGate“, S interneta, https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-Multi-Stage-Flash-Distillation-process-MSF-Source_fig2_348881740, 20.08.2024.
- [10] „VEOLIA“, S interneta, <https://www.veoliawatertechnologies.com/en/technologies/multiple-effect-distillation-med>, 20.08.2024.
- [11] „ResearchGate“, S interneta, https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-a-multi-effect-distillation-MED-process-Source-22_fig2_319397429, 20.08.2024.

- [12] „ResearchGate“, S interneta, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vapor-compression>, 21.08.2024.
- [13] „ResearchGate“, S interneta, https://www.researchgate.net/figure/Single-effect-mechanical-vapor-compression-process-MVC-with-spray-evaporation_fig14_283620228, 21.08.2024.
- [14] „Intechopen“, S interneta, <https://www.intechopen.com/chapters/61215>, 21.08.2024.
- [15] „Sciencedirect“, S interneta, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389420316228>, 21.08.2024.
- [16] „Nature communications“, S interneta, <https://www.nature.com/articles/s41467-020-20706-y>, 21.08.2024.
- [17] „wikipedia“, S interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Ionska_smola, 22.08.2024.
- [18] „Scholarly Community Encyclopedia“, S interneta, <https://encyclopedia.pub/entry/18111>, 22.08.2024.
- [19] „ResearchGate“, S interneta, https://www.researchgate.net/figure/A-simple-humidification-dehumidification-HDH-process_fig3_273742906, 22.08.2024.
- [20] „KTH“, S interneta, <https://www.kth.se/blogs/water/2019/02/cryo-desalination-a-nature-inspired-solution-to-obtain-freshwater/>, 22.08.2024.
- [21] „ResearchGate“, S interneta, https://www.researchgate.net/profile/Khadije-El-Kadi/publication/321867932_Desalination_by_Freeze_Crystallization_An_Overview/links/5a36719e0f7e9b10d8483162/Desalination-by-Freeze-Crystallization-An-Overview.pdf, 23.08.2024.
- [22] „ResearchGate“, S interneta, https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-suspension-freeze-concentration-process-The-method-produces-many-small_fig3_360036927, 23.08.2024.
- [23] „National Library of Medicine“, S interneta, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9922933/>, 23.08.2024.
- [24] „ResearchGate“, S interneta, https://www.researchgate.net/figure/Principles-of-pervaporation-liquid-feed-liquid-retentate-depleted-solution-diffusion_fig7_26620729, 24.08.2024.

- [25] „BYJU`S“, S interneta, <https://byjus.com/chemistry/reverse-osmosis/> 25.08.2024.
- [26] „MDPI“, S interneta, <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/8/901>, 25.08.2024.
- [27] „Carbotecnia“, S interneta, <https://www.carbotecnia.info/learning-center/filtration-methods/what-is-nanofiltration/?lang=en>, 25.08.2024.
- [28] „SDWF“, S interneta, <https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/ultrafiltrationnanoandro>, 25.08.2024.
- [29] „Filtrox“, S interneta, <https://www.filtrox.com/filtration-services/filtration-knowledge/microfiltration/>, 25.08.2024.
- [30] „Kemijski rječnik“, S interneta, <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=elektrodijaliza>, 26.08.2024.
- [31] „National Library od Medicine“, S interneta, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10383737/>, 26.08.2024.
- [32] „Royal socitey of chemistry“, S interneta, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/en/d2en00545j>, 27.08.2024.
- [33] „Desalination Publications“, S interneta, <https://www.desline.com/WilfBookIcomplete.pdf>, 27.08.2024.
- [34] Jones, Edward; Qadir Manzoor: „Science of the Total Environment“, Canada, 2019.
- [35] „Saudi Gazette“, S interneta, <https://saudigazette.com.sa/article/618385> , 28.08.2024.
- [36] „IDE Technologies“, S interneta, <https://ide-tech.com/en/project/sorek-desalination-plant/> , 28.08.2024.
- [37] „Water Technology“, S interneta, <https://www.water-technology.net/projects/israel/> , 28.08.2024.
- [38] „IDE Technologies“, S interneta, <https://ide-tech.com/en/project/carlsbad-desalination-plant/> , 28.08.2024.
- [39] „Nature“, S interneta, <https://www.nature.com/articles/am2017135> , 30.08.2024.

[40] „Publishing“, S interneta, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ra/c7ra08570b> , 30.08.2024.

[41] „MDPI“, S interneta, <https://www.mdpi.com/2077-0375/9/11/149> , 31.08.2024.

[42] „MDPI“, S interneta, <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/11/877> , 1.09.2024.

[43] Karimanzira Divas; Went, Joachim; Neumann, Frank: „Cleaning Strategies and Cost Modelling of Experimental Membrane-based Desalination Plants“, Njemačka, 2021.

8. SAŽETAK

Ovaj završni rad predstavlja analizu desalinizacijskih sustava, s posebnom pažnjom posvećenom membranskim metodama. Pregledava povijest desalinizacije, različite metode, uključujući toplinske, membranske i druge. Rad također istražuje primjenu ovih tehnologija u različitim regijama svijeta, ističući uporabu postrojenja za desalinizaciju u Saudijskoj Arabiji, Izraelu i Sjedinjenim Američkim Državama. Na posljetku, rad raspravlja o inovacijama u području membranske desalinizacije, kao što su napredni materijali za membrane, površinske modifikacije membrana i adaptivni sustavi čišćenja.

Ključne riječi: desalinizacija, membranske tehnologije, toplinska desalinizacija, desalinizacijska postrojenja

9. ABSTRACT

This thesis presents an analysis of desalination systems, with particular focus on membrane methods. It reviews the history of desalination, various methods, including thermal, membrane, and others. The thesis also explores the application of these technologies in different regions around the world, highlighting the use of desalination plants in Saudi Arabia, Israel, and United States. Finally, the paper discusses innovations in the field of membrane desalination, such as advanced membrane materials, surface modifications of membranes and adaptive cleaning systems.

Keywords: desalination, membrane technologies, thermal desalination, desalination plants