

Metode desalinizacije

Devčić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:339419>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Preddiplomski studij geološkog inženjerstva

METODE DESALINIZACIJE

Završni rad

Ivan Devčić

G2198

Zagreb, 2022.



KLASA: 602-01/22-01/109
URBROJ: 251-70-15-22-2
U Zagrebu, 16. 9. 2022.

Ivan Devčić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/109, URBROJ: 251-70-15-22-1 od 1. 5. 2022. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

METODE DESALINIZACIJE

Za mentoricu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Doc. dr. sc. Gordana Bilić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

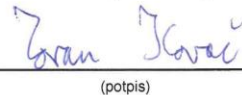


(potpis)

Doc. dr. sc. Gordana Bilić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:



(potpis)

Doc. dr. sc. Zoran Kovač

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

METODE DESALINIZACIJE

Ivan Devčić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za kemiju
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Visoka cijena pitke vode direktna je posljedica njezine nejednolike raspodjele u različitim dijelovima svijeta te velikog industrijskog onečišćenja. Osim toga, na Zemlji su vrlo male količine pitke vode koje su zadovoljavajuće kvalitete za ljudsku upotrebu. Zbog toga su danas razvijene različite metode desalinizacije kojima se dobiva voda za piće, tehnološka voda te voda za prehrambenu industriju. Termalni i membranski procesi su dva glavna načina dobivanja pitke vode, a vode koje se obrađuju su: morska voda, rijeke, slana jezera ili slane podzemne vode. U ovom radu opisane su različite metode desalinizacije morske vode i njihova potrošnja energije. Poseban naglasak stavljen je na metode koje upotrebljavaju solarnu energiju i energiju vjetra, a vrlo često se primjenjuju na udaljenim mjestima kao što su otoci. Svaka od opisanih metoda ima svoje prednosti i nedostatke, a njihov daljnji razvoj i upotreba usmjereni su na povećanje iskorištenja i smanjenje troškova proizvodnje.

Ključne riječi: pitka voda, salinitet, morska voda, metode desalinizacije

Završni rad sadrži: 21 stranicu, 4 tablice, 15 slika, 1 prilog i 11 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentorica: Dr.sc. Gordana Bilić, docentica RGNF

Pomagala pri izradi: Dr.sc. Gabrijela Ljubek, poslijedoktorantica RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Gordana Bilić, docentica RGNF
Dr.sc. Frankica Kapor, redovita profesorica RGNF
Dr.sc. Zoran Kovač, docent RGNF

Sadržaj

| | |
|---|-----|
| POPIS SLIKA | I |
| POPIS TABLICA | II |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA | III |
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Sastav i svojstva morske vode | 2 |
| 3. Metode desalinizacije morske vode | 3 |
| 3.1. Destilacija | 4 |
| 3.1.1. Destilacija u vertikalnim segmentima | 4 |
| 3.1.2. Parno kompresijska destilacija | 5 |
| 3.1.3. Višestruka destilacija | 6 |
| 3.1.4. Solarna destilacija | 7 |
| 3.2. Metoda zamrzavanja | 8 |
| 3.2.1. Vakuumska kompresija smrznute pare | 8 |
| 3.2.2. Vakuumska apsorpcija smrznute pare | 9 |
| 3.2.3. Izravno smrzavanje rashladnog sredstva | 10 |
| 3.3. Elektrodijaliza | 10 |
| 3.4. Reverzna osmoza | 11 |
| 3.5. Ekstrakcija | 12 |
| 3.6. Hidratna metoda | 12 |
| 3.7 Ionska izmjena | 13 |
| 3.8. Apsorpcija | 14 |
| 3.9. Metode ovlaživanja i odvlaživanja zraka | 15 |
| 3.10. Membranska destilacija | 16 |
| 3.11. Osmoza | 17 |
| 3.12. Metode koje koriste solarnu energiju i energiju vjetra | 18 |
| 4. Zaključak | 20 |
| 5. Popis literature | 21 |
| Internetski izvori: | 21 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 3-1. Shematski prikaz osnovnih metoda desalinizacije..... | 4 |
| Slika 3-2. Shematski prikaz destilacijskog postrojenja u vertikalnim segmentima..... | 5 |
| Slika 3-3. Shematski prikaz destilacijskog postrojenja s toplinskom kompresijom pare..... | 6 |
| Slika 3-4. Shematski prikaz višestruke destilacije..... | 7 |
| Slika 3-5. Shematski prikaz solarne desalinizacije..... | 8 |
| Slika 3-6. Shematski prikaz aparature za vakuumsku kompresiju smrznutom parom..... | 9 |
| Slika 3-7. Shematski prikaz aparature za vakuumsku apsorpciju smrznutom parom..... | 9 |
| Slika 3-8. Shematski prikaz desalinizacijskog postrojenja koje koristi elektrodijalizu..... | 11 |
| Slika 3-9. Shematski prikaz rada desalinizacijskog postrojenja uporabom reverzne osmoze..... | 12 |
| Slika 3-10. Shematski prikaz aparature za hidratnu metodu..... | 13 |
| Slika 3-11. Shematski prikaz ionske izmjene..... | 14 |
| Slika 3-12. Shematski prikaz aparature za apsorpciju | 15 |
| Slika 3-13. Shematski prikaz metode ovlaživanja i odvlaživanja zraka..... | 16 |
| Slika 3-14. Shematski prikaz membranske destilacije..... | 17 |
| Slika 3-15. Vjetroturbine s horizontalnom i vertikalnom osi..... | 19 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|---|
| Tablica 1-1. Količina skladištenja različitih vrsta vodnih resursa..... | 1 |
| Tablica 1-2. Rasprostranjenost i stanje kvalitete vodnih resursa..... | 2 |
| Tablica 2-1. Kemijska svojstva vode..... | 3 |
| Tablica 2-2. Fizikalna svojstva vode (25 °C, 1 atm) | 3 |

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------|--|----------------------|
| Π | Pa | osmotski tlak |
| ρ | kg m^{-3} | gustoća |
| p | Pa | tlak |
| V | m^3 | volumen |
| t | $^{\circ}\text{C}$ | temperatura |
| μ | $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ | dinamička viskoznost |
| ΔQ | $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}$ | specifična toplina |
| Cl | - | klorinitet |
| S | - | salinitet |

1.Uvod

Voda je jedna od osnovnih tvari potrebnih ljudskom društvu za opstanak i razvoj. Iako je Zemlja bogata vodenim resursima, više od 97 % ukupne količine vode čini slana voda. Takva voda se zbog visokog saliniteta (*S*) ne može upotrebljavati izravno za piće ili navodnjavanje. Preostalih 3 % vode dijeli se na led (2 %) i kopnene vode (1 %), te je neravnomjerno raspodijeljena.

U tablici 1-1. prikazana je količina skladištenja različitih vrsta vodnih resursa na Zemlji dok je u tablici 1-2. prikazana rasprostranjenost i stanje kvalitete vodnih resursa na Zemlji (Dessouky i Ettouney, 2002).

Tablica 1-1. Količina skladištenja različitih vrsta vodnih resursa

| Pohrana vode | Ukupni volumen / km³ | Postotak ukupne količine vode / % | Postotak svježe vode / % |
|---------------------|--|--|---------------------------------|
| Atmosfera | 12 900 | 0,001 | 0,01 |
| Glečer | 24 064 000 | 1,72 | 68,7 |
| Površinska voda | 300 000 | 0,021 | 0,006 |
| Rijeke | 2 120 | 0,0002 | 0,006 |
| Jezera | 176 400 | 0,013 | 0,26 |
| Podzemno tlo | 16 500 | 0,0012 | 0,05 |
| Polovi | 10 530 000 | 0,75 | 30,1 |
| Litosfera | 23 400 000 | 1,68 | - |
| Ocean | 138 000 000 | 95,18 | - |
| Ukupna količina | 1 396 513 390 | - | - |

Tablica 1-2. Rasprostranjenost i stanje kvalitete vodnih resursa

| Raspodjela | Volumen / 10 ⁹ m ³ | Postotak / % | Kvaliteta vode / salinitet/ppm |
|---------------------------------|---|-----------------|-----------------------------------|
| Para u atmosferi | 12 900 | 0,001 | 100 - 500 |
| Površinska voda; rijeke, jezera | 230 000 | 0,017 | |
| Glečeri | 29 120 000 | 2,157 | |
| Ocean | 1 318 720 000 | 97,2 | 28 000 – 35 000 |
| Podzemna voda | 8 616 600 | 0,625 | 300 – 10 000 |
| Ukupna količina | 1 356 699 500 | 100 | - |

Porastom ljudske populacije potrebna je sve veća količina pitke vode, koje ionako nema dovoljno, a uz to nije jednako dostupna u svim dijelovima svijeta. Brzim razvojem moderne industrije nastaju industrijske otpadne vode koje sve više zagađuju pitku vodu. Upravo zbog tih razloga danas su razvijene brojne metode desalinizacije najčešće morske vode. Ovaj postupak je za udaljene regije, koje često imaju velikih poteškoća s opskrbom vode, jeftiniji od same dopreme vode. Desalinizacija je postupak uklanjanja minerala iz vode (obično morske vode) za dobivanje pitke vode, tehnološke vode ili vode za navodnjavanje. Najčešće metode desalinizacije su višestruka destilacija, kompresija pare, reverzna osmoza i elektrodijaliza.

Morske vode ima u izobilju, ali se ne može izravno koristiti zbog visokog saliniteta. S ciljem proizvodnje svježije vode koja će se prvenstveno upotrebljavati za piće danas su osmišljene različite metode desalinizacije.

2. Sastav i svojstva morske vode

Morska voda je nezasićena homogena otopina koja se sastoji od vode kao otapala (96,5 %) i otopljenih soli (3,5 %) te manjih količina partikularne tvari, otopljenih plinova i organskih sastojaka. Ispitivanjem zastupljenosti soli u moru utvrđeno je da samo šest elemenata i spojeva čini oko 99 % otopljenih soli u moru, a to su ioni: klor (Cl⁻), natrija (Na⁺), sulfatni (SO₄²⁻), magnezija (Mg²⁺), kalcija (Ca²⁺) i kalija (K⁺) (KTF-Split, 2022.). Prosječni salinitet morske vode je 34,85 ‰ (tablica 2-1.). Salinitet je količina anorganskih soli izražena u gramima, a otopljena je u 1 kg morske vode. Izražava se u dijelovima na

tisuću (ppt) ili u promilima (‰). U morskoj vodi otopljeni su svi atmosferski plinovi, međutim najzastupljeniji su CO₂, N₂ i O₂. Kemijska i fizikalna svojstva morske vode detaljno su prikazana u tablicama 2-1. i 2-2. (Junhe, 1978).

Tablica 2-1. Kemijska svojstva vode

| | | | |
|-----------|----------------|---------------|-------------------------|
| pH | Klorinitet / ‰ | Salinitet / ‰ | Ukupan sadržaj soli / ‰ |
| 7,5 – 8,4 | ~ 19,38 | ~ 34,85 | ~ 35,07 |

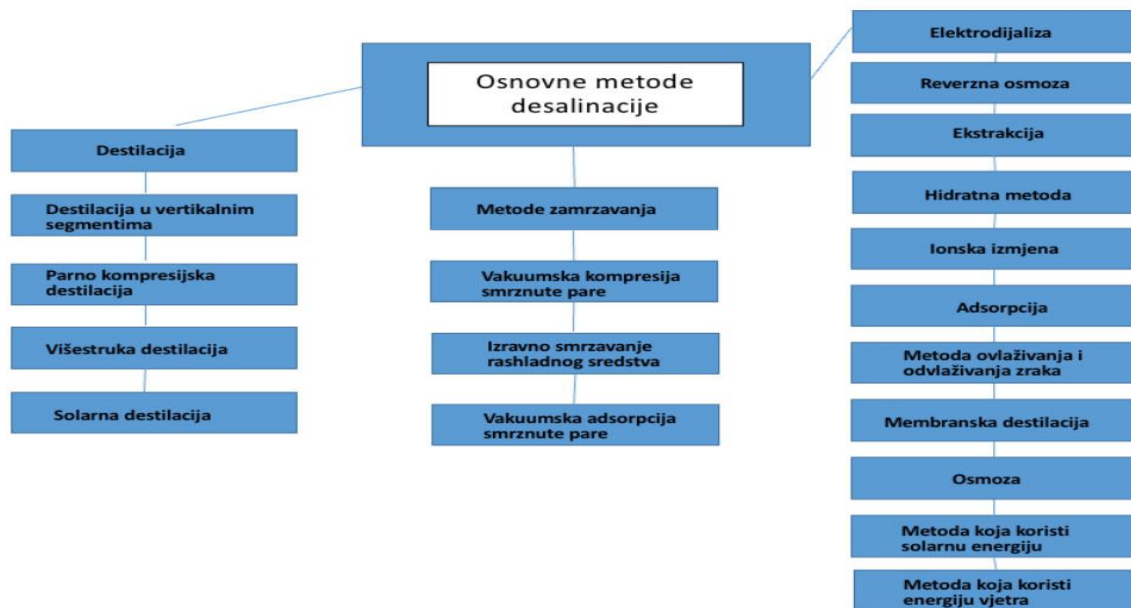
Tablica 2-2. Fizikalna svojstva vode (25 °C, 1 atm)

| | | | | | | | |
|---------------------------------|---|---|-----------------|------------------|-------------------|-----------------------|---|
| Gustoća / kg m ⁻³ | Specifična toplina / kJ kg ⁻¹ °C | Toplina isparavanja / kJ kg ⁻¹ | Ledište / °C | Vrelište / °C | Tlak para / Pa | Osmotski tlak / Pa | Dinamička viskoznost / kg m ⁻¹ s ⁻¹ |
| 1023,4 | 3,90 | 2436,3 | - 1,91 | 100,56 | 0,9812 | - 0,084 | 0,96 x 10 ⁻³ |

3. Metode desalinizacije morske vode

Općenito, desalinizacija je proces kojim se iz vodene otopine soli dobiva voda pri čemu produkt ne mora biti potpuno čista voda, nego i pitka voda s relativno niskom koncentracijom soli (> 500 mg/l). Desalinizacija se može izvesti izdvajanjem svježe vode ili odvajanjem soli iz morske vode.

Metode desalinizacije koje se koriste pri izdvajanju svježe vode se mogu podijeliti u nekoliko podskupina (Slika 3-1.). Prva podskupina su metode destilacije i to: destilacija u vertikalnim segmentima, parno kompresijska destilacija, višestruka destilacija i solarna destilacija. Druga podskupina odnosi se na metode zamrzavanja, a to su: vakuumska kompresija smrznute pare, vakuumska adsorpcija smrznute pare i izravno smrzavanje rashladnog sredstva. Treću podskupinu čine: hidratna metoda, reverzna osmoza, ekstrakcija, adsorpcija, metoda odvlaživanja i ovlaživanja zraka, membranska destilacija, osmoza, metode koje koriste solarnu energiju i energiju vjetra, te elektrodijaliza i ionska izmjena.



Slika 3-1. Shematski prikaz osnovnih metoda desalinizacije

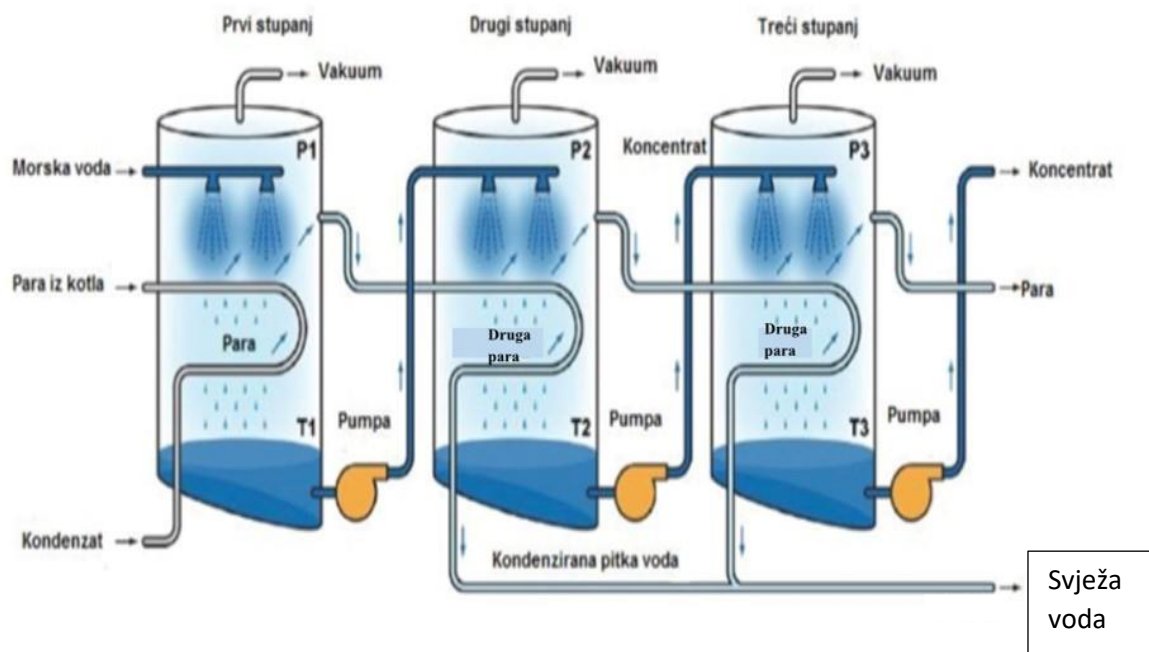
3.1. Destilacija

Destilacija je postupak kojim se odjeljuju sastojci smjese na temelju različitog vrelišta. Usljed zagrijavanja, isparavanja i kondenzacije, iz morske vode se dobiva svježja voda. Destilacijski postupci karakterizirani su mnogostrukim iskorištenjem privedene energije (ponavljanjem ciklusa isparavanje - kondenzacija) i visokom toplinom isparavanja, što znači da se prilikom destilacije izmjenjuju velike količine topline. Destilacijska postrojenja u pravilu se grade uz termoelektrane (rashladni spremnik) gdje su dio ekonomičnog dvonamjenskog sustava. (Kunst, 1998)

3.1.1. Destilacija u vertikalnim segmentima

Postrojenje za destilaciju u vertikalnim segmentima sastoji se od više isparivača u nizu kako je prikazano na slici 3-2. Morska voda se dovodi u prvi serijski isparivač gdje se neizravno grije vodenom parom iz kotla ili nekog drugog izvora energije. Novonastala para naziva se „druga para“ i odvodi se u drugi isparivač gdje služi za zagrijavanje koncentrata morske vode iz prvog stupnja. Energija upotrijebljena za isparavanje slane vode je toplina kondenzacije para u cijevi. Postepenim snižavanjem tlaka kroz nekoliko stupnjeva osigurava se smanjenje vrelišta desalinizirane morske vode tako da „druga para“ iz prethodne serije

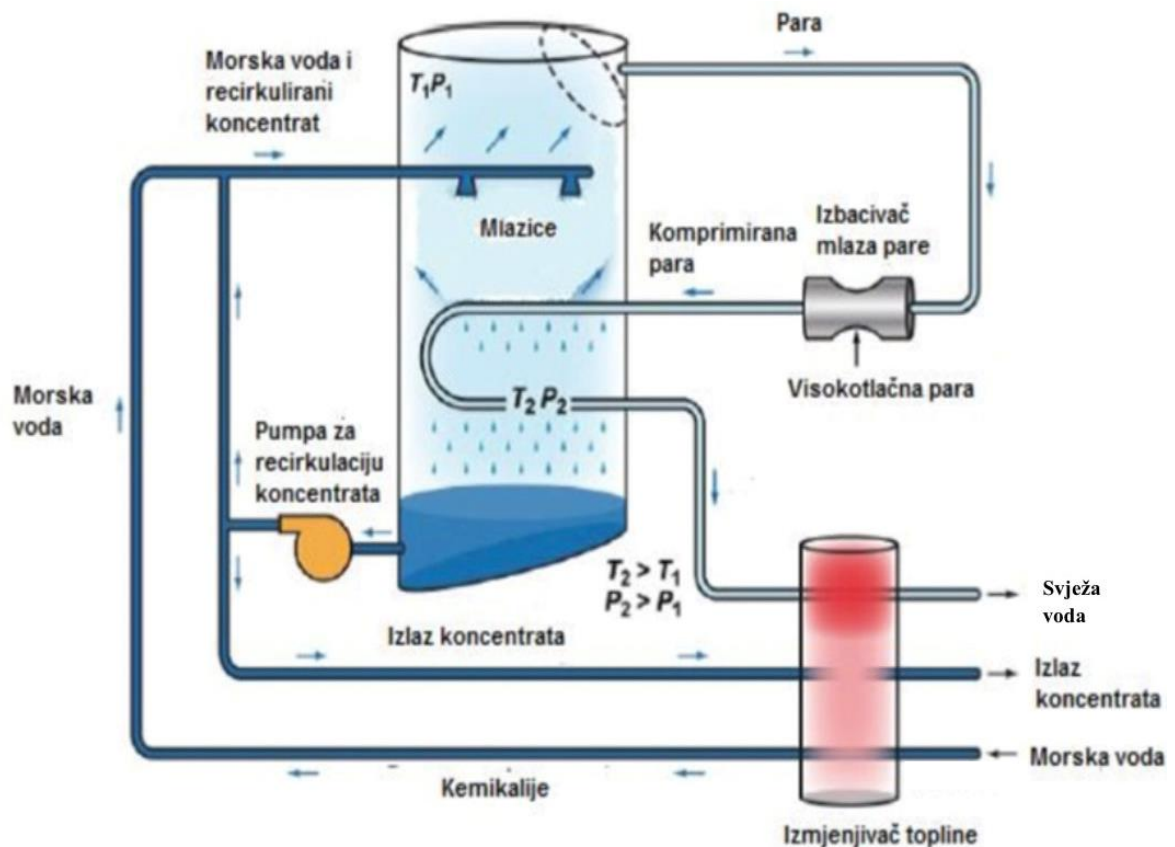
može zagrijati desaliniziranu morsku vodu u sljedećoj seriji. Kondenzat koji nastaje nakon druge serije naziva se svježom vodom. Prednost destilacije u vertikalnim segmentima je visoki stupanj iskorištavanja topline. Njezin glavni nedostatak je nastajanje kamenca u kotlu zbog čega su potrebna velika ulaganja u opremu.



Slika 3-2. Shematski prikaz destilacijskog postrojenja u vertikalnim segmentima (Al-Karaghoul i dr., 2008)

3.1.2. Parno kompresijska destilacija

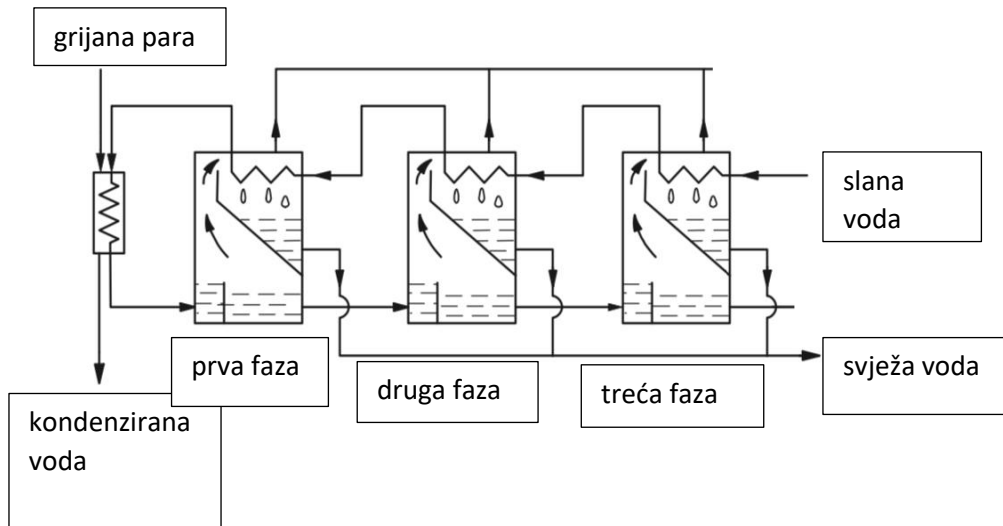
Parno kompresijska metoda destilacije pogodna je za područja s velikom proizvodnjom električne energije, jer se osim pomoćne topline potrebne za početni pogon iskorištava vanjski izvor topline. Naime, prethodno zagrijana morska voda isprava, a nastala „druga para“ se nakon kompresije kondenzira u plaštu isparivača, što osigurava energiju za odvijanje procesa (Slika 3-3.). Nedostaci ove metode su također stvaranje kamenca u kotlu i velika ulaganja u opremu.



Slika 3-3. Shematski prikaz destilacijskog postrojenja s toplinskom kompresijom pare (Al-Karaghoul i dr., 2008)

3.1.3. Višestruka destilacija

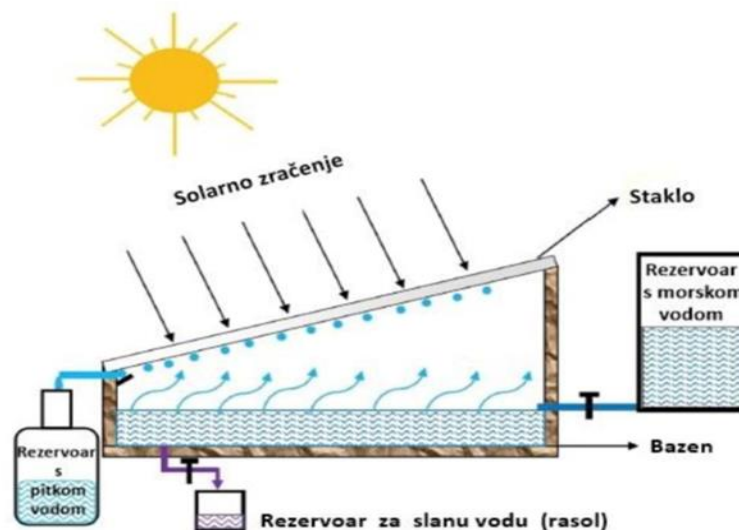
Višestruka destilacija je pogodna za masovnu proizvodnju vode zbog jednostavnog i jeftinog procesa. Posebnost ove metode je u tome što je zagrijavanje odvojeno od isparavanja. U glavnom grijaču se pomoću pare iz izvora topline zagrijava morska voda. Nakon pregrijavanja morska voda odlazi u niskotlačni uređaj gdje počinje isparavati, a nastavlja s isparavanjem u sljedećoj fazi s nižim tlakom. Tako stvorena para kondenzira se u svježu vodu izvan cijevi za pregrijavanje (Slika 3-4.). Mogući nedostatak višestruke destilacije je veliki cirkulacijski volumen slane vode.



Slika 3-4. Shematski prikaz višestruke destilacije (Zeng, 2017)

3.1.4. Solarna destilacija

Solarna destilacija je najstarija i najjednostavnija metoda desalinizacije. Moguće je dobiti visoku čistoću svježe vode, te je prikladna za primjenu u područjima s nedostatkom vode, visokom temperaturom i dugim sunčanim vremenom. Međutim, uređaj za solarnu destilaciju zauzima velik dio prostora, a ima malu učinkovitost i produktivnost koji ovise o klimatskim uvjetima. Desalinizacija se vrši korištenjem sunčeve topline kako je prikazano na slici 3-5. Bojanjem batolita u crno povećava se učinkovitost apsorpcije topline. Na taj način para se kondenzira u svježu vodu s visokom solarnom propusnošću na staklenim pločama ili plastičnim filmovima.



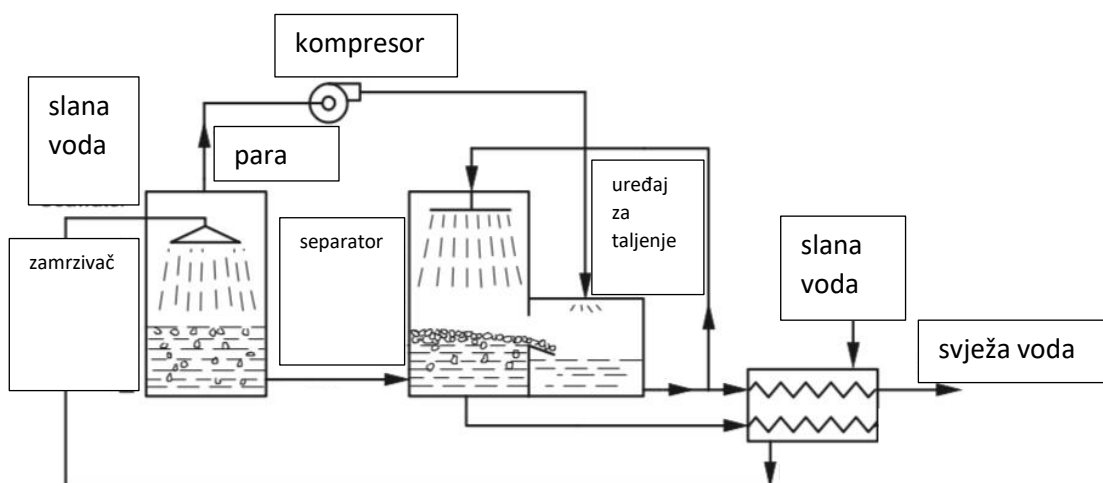
Slika 3-5. Shematski prikaz solarne desalinizacije (Morović, 2016)

3.2. Metoda zamrzavanja

Metodom zamrzavanja postiže se taloženje čiste vode i soli u različito vrijeme. Zamrzavanjem morske vode čista voda se taloži u obliku kristala leda te se svježja voda dobiva otapanjem tog leda. S obzirom na relevantne postupke obrade i različite rashladne tvari ova metoda dijeli se na: metodu izravnim smrzavanjem rashladnog sredstva, vakuumsku adsorpciju smrznute pare i vakuumsku kompresiju smrznute pare.

3.2.1. Vakuumska kompresija smrznute pare

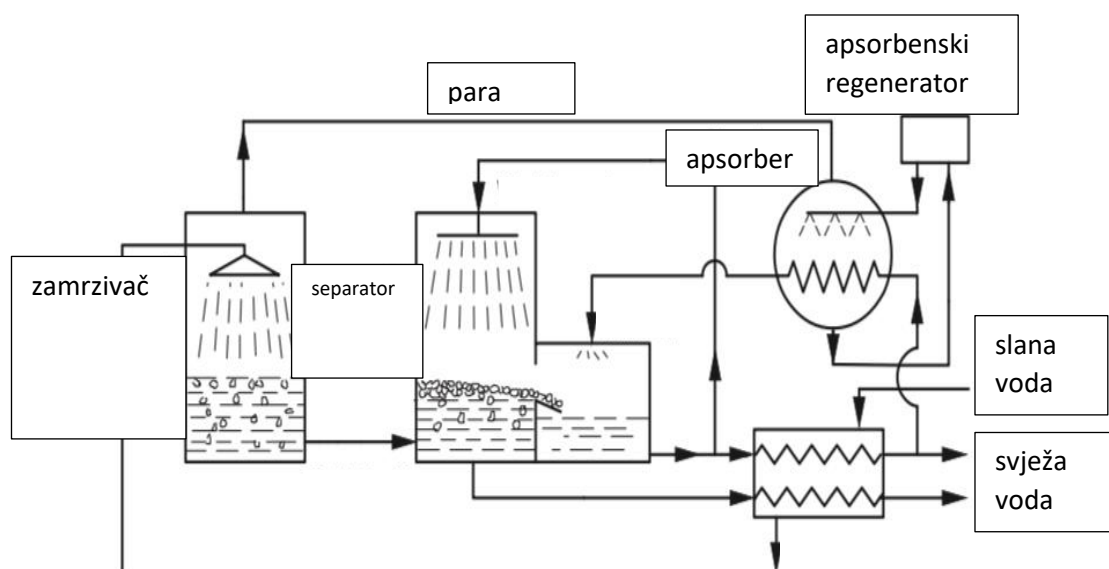
Metodom vakuumske kompresije morska voda se hladi na temperaturu približnu 0 °C, a zatim se raspršuje u zamrzivaču s visokim vakuumom. Dio vode isparavanjem apsorbira toplinu, a preostali dio morske vode proizvodi kristale leda zbog smrzavanja. Sama voda može se koristiti kao rashladno sredstvo. Odvajanjem soli koja se nalazi na površini i unutar kristala leda, smjesa morske vode i krutog i tekućeg kristala otapaju se u slatkoj vodi. Ulaskom komprimirane pare u uređaj za taljenje dolazi do kondenzacije. Jedan dio svježje vode ispušta se kao proizvod dok se drugi dio vode vraća u separator radi ispiranja smjesa (Slika 3-6.).



Slika 3-6. Shematski prikaz aparature za vakuumsku kompresiju smrznutom parom (Zeng, 2017)

3.2.2. Vakuumska apsorpcija smrznute pare

Vakuumska apsorpcija je vrlo slična prethodno opisanoj metodi vakuumske kompresije. Razlika je u tome što je kompresor zamijenjen apsorpcijskim sustavom. Pomoću pare nastale u zamrzivaču morska voda kontinuirano isparava i zamrzava se. Razrijeđeni apsorber se regenerira u koncentratu za apsorberno regeneriranje (Slika 3-7.).



Slika 3-7. Shematski prikaz aparature za vakuumsku apsorpciju smrznutom parom (Zeng, 2017)

3.2.3. Izravno smrzavanje rashladnog sredstva

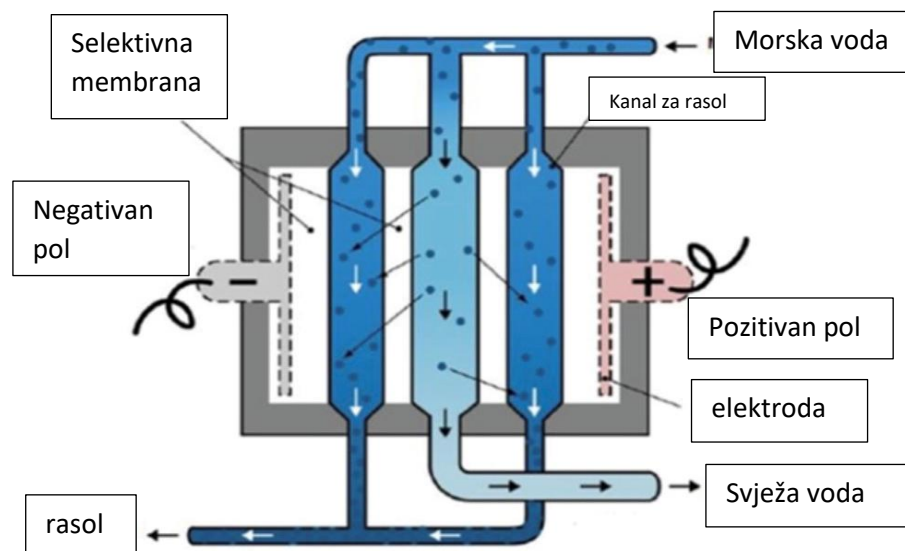
Kod metode izravnog smrzavanja rashladnog sredstva primjenjuje se n-butan. To je jako zapaljiv, bezbojan plin koji se lako pretvara u tekućinu, a nije topiv u vodi. Osim toga velika je razlika u gustoćama n-butana i vode. Za desalinizaciju vode potrebna je temperatura od ~ 3 °C i tlak niži od atmosferskog. Na taj način n-butan apsorbira toplinu i isparava, a morska voda se smrzava. Komprimiranjem para n-butana s tlakom većim od 1 atm i dovođenjem u izravan kontakt s ledom, n-butan prelazi u tekućinu. Voda i n-butan se odvajaju zbog razlika u gustoći. Voda se oslobađa kao proizvod dok se n-butan koristi za daljnje recikliranje.

Prednosti ove metode su niska radna temperatura, zanemarivo onečišćenje i zanemarivi stupanj korozije. Nedostaci su to što se svježa voda troši za djelomični proizvod, poteškoće pri ispiranju kristala te visok standard operativne tehnike za prenošenje i odvajanje suspenzije kristala leda.

3.3. Elektrodijaliza

Elektrodijaliza je elektrokemijski postupak izdvajanja soli iz vode, koji koristi električnu struju za prijelaz iona soli kroz selektivnu membranu, ostavljajući iza sebe svježiu vodu. Primjenjuje se pad potencijala između elektroda i ionskih sastojaka u vodi koji migriraju kroz polupropusne membrane. Jedinica za elektrokemijsku desalinizaciju vode sastoji se od niza komora u alternaciji anion-propusnih i kation-propusnih membrana zajedno s inertnim krajnjim predjelima (slika 3-8.). Voda koja ulazi u sustav demineralizira se protjecanjem istosmjerne struje. Nastali napon uzrokuje kretanje aniona prema inertnoj anodi i iz ćelija s anion-propusnih membrana na stranu anode. Nakon toga anioni se zadržavaju u susjednoj ćeliji koja posjeduje kation-propusnu (anion-nepropusnu) membranu. Alternirajući predjeli zadržavaju anione i katione, tako da anioni koji migriraju prema anodi gube i katione prema katodi (Gulić, 2003). Potrebno je isključiti jedinice određeno vrijeme iz pogona, kako bi se izdvojena tvar zadržana na membranama mogla odstraniti.

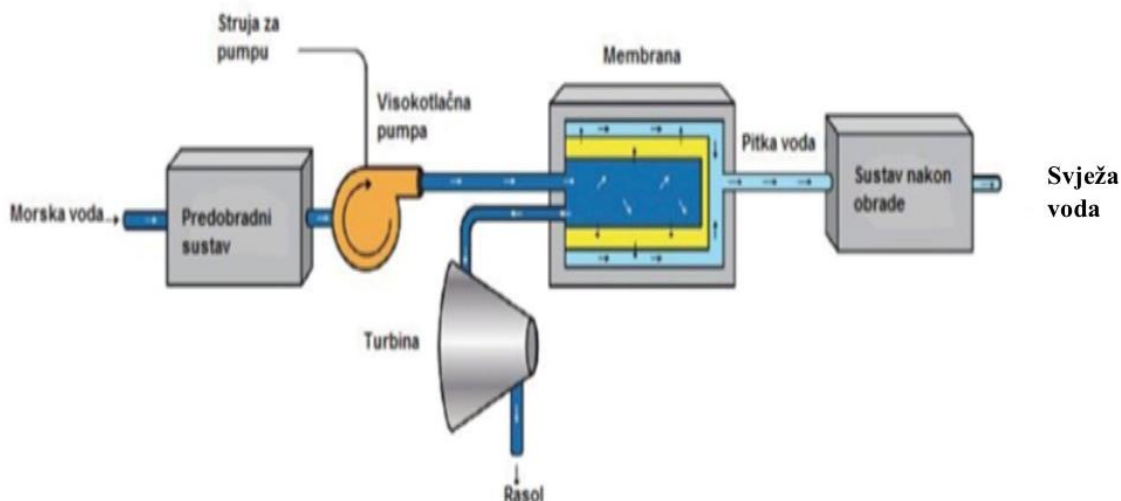
Ova metoda je ekonomičnija od drugih kada se primjeni na desalinizaciju slane vode sa salinitetom manjim od 5000 ppm. Visoko temperaturna elektrodijaliza ima nisku potrošnju energije. Za elektrodijalizu je ključna membrana ionske izmjene kako bi anionska membrana propuštala samo anione, a kationska membrana samo katione.



Slika 3-8. Shematski prikaz desalinizacijskog postrojenja koje koristi elektrodijalizu (Al-Karaghoul i dr., 2011)

3.4. Reverzna osmoza

Reverzna osmoza je oblik filtriranja uslijed djelovanja hidrostatskog tlaka na polupropusnu membranu, koja ima ulogu filtera između slatke i slane vode, sa svrhom odvajanja otopljenih soli iz vode. Na slici 3-9. nalazi se detaljan prikaz postrojenja. Kada je slatka voda odvojena od morske vode polupropusnom membranom slatka voda će prijeći na stranu morske vode. Ako se primjeni tlak veći od osmotskog tlaka morske vode, koji je približno 25 atm, tada će čista voda otići u slatku vodu reverznom osmozom. U postupku desalinizacije upotrebljavaju se celulozne acetatne membrane osjetljive na pH i temperaturu, te poliamidne membrane osjetljive na klor. Učinkovitost desalinizacije ovisi o građi membrane stoga se razlikuju membrane za veliki protok i malu učinkovitost, te za mali protok i veliku učinkovitost (Gulić, 2003). Međutim, zbog osjetljivosti polupropusne membrane na onečišćenja potreban je predtretman pojne vode. Također, postoje ograničenja rada pod visokim tlakom zbog čega su potrebna dodatna poboljšanja ove metode s ciljem smanjenja operativnih troškova postrojenja.



Slika 3-9. Shematski prikaz rada desalinizacijskog postrojenja uporabom reverzne osmoze (Al-Karaghoul i dr., 2011)

3.5. Ekstrakcija

Ekstrakcija je brza i učinkovita metoda razdvajanja i koncentriranja tvari. Prilikom ekstrakcije dolazi do izdvajanja tvari iz homogene smjese na temelju njene različite topljivosti u otapalima koja se međusobno ne miješaju (KTF-Split, 2022.). Pri tome je najbitnije pronaći pogodno otapalo. Najčešće se primjenjuju organska otapala koja će otopiti određenu količinu vode pri niskoj temperaturi, te odvojiti otopljenu vodu kada temperatura poraste. Nakon što dođe do kontakta između morske vode i otapala u ekstrakcijskom tornju morska voda se transportira u separator kroz regenerator i izmjenjivač topline i na taj način se dobije svježja voda. Otapalo se vraća nazad u ekstrakcijski toranj za ponovnu upotrebu.

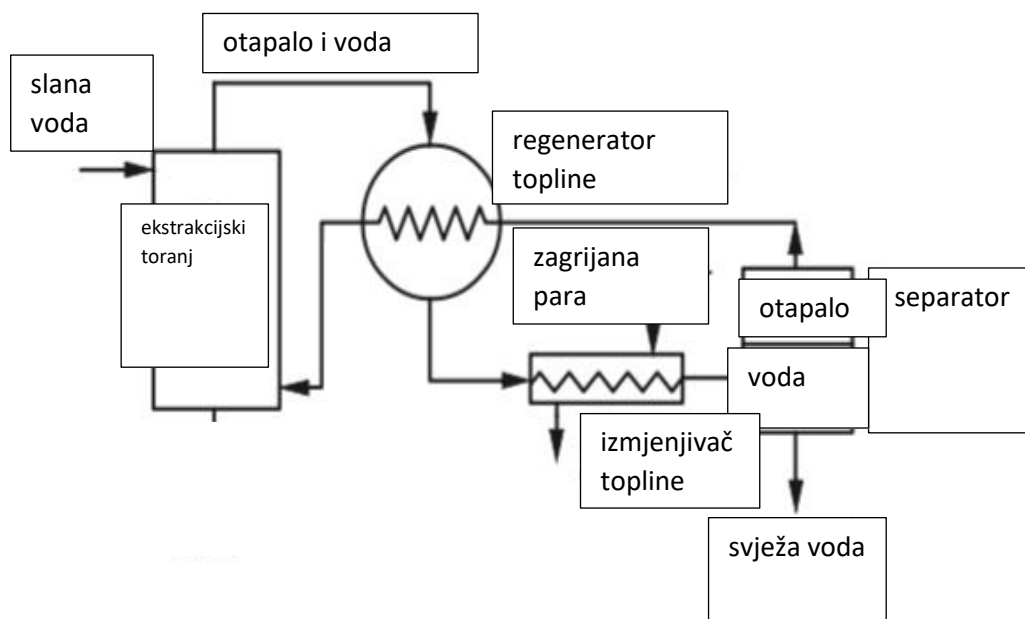
Ovoj metodi nije potrebna visoka potrošnja energije, a dodatna prednost ove metode je što nema velikog utjecaja korozije na uređaje koji se upotrebljavaju prilikom ekstrakcije.

3.6. Hidratna metoda

Hidratna metoda primjenjuje svojstvo nekih plinovitih spojeva, poput propana, koji iako se ne miješaju s vodom, mogu s njom pri niskoj temperaturi formirati višemolekularne hidratne kristale (npr. $C_3H_8 \cdot 17H_2O$). Nakon što su stvoreni uvjeti za stvaranje hidrata, u kanalu za kristalizaciju prethodno ohlađena morska voda i tekući propan tvore slanu kruto-

tekuću smjesu koja sadrži 10-15 % kristala hidrata. Zatim slijede procesi odvajanja, pranja i taljenja nakon kojih se dobiva svježa voda (Slika 3-10.). Propan se reciklira za daljnju upotrebu.

Ovom metodom dobiva se loša kvaliteta vode, a potrošnja vode prilikom postupaka pranja je velika. Osim toga, dolazi do poteškoća prilikom odvajanja i pranja zbog sitnih čestica kristala pa ova metoda nije najpogodnija za desalinizaciju morske vode.

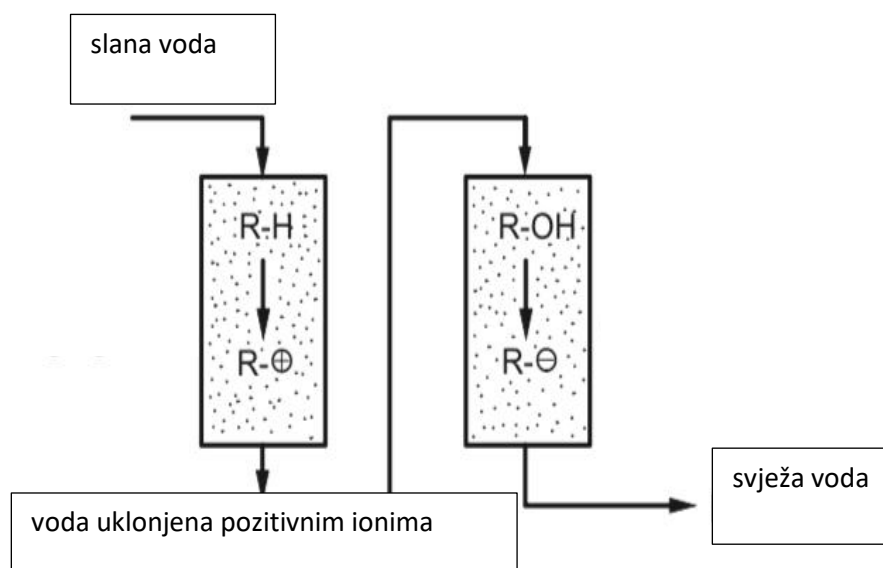


Slika 3-10. Shematski prikaz aparature za hidratnu metodu (Zeng, 2017)

3.7 Ionska izmjena

Ionska izmjena je postupak u kojem se upotrebljavaju ionski izmjenjivači (ionske smole) koji mogu vezati ione iz otopine, a otpuštati ekvivalentnu količinu vlastitih iona. Ionske smole sadrže različite kopolimere, čvrsto vezane u trodimenzionalnu strukturu na koju su pričvršćene pokretne ionske skupine. Ionski izmjenjivači mogu biti kationski i anionski. Kation se u smoli kationske izmjenjivačke smole zamjenjuje s ionom vodika (H^+), a anion se supstituira s hidroksidnim ionom (OH^-). Vezanjem H^+ i OH^- iona nastaje voda, a sol se naknadno uklanja. Ionska izmjena se provodi u koloni napunjenoj ionskim izmjenjivačem. Nakon zasićenja aktivnih grupa izmjenjivača ionima iz otopine, provodi se regeneracija ionskog izmjenjivača sredstvom za eluciju. Na ovaj se način izmjenjivač ponovno prevodi

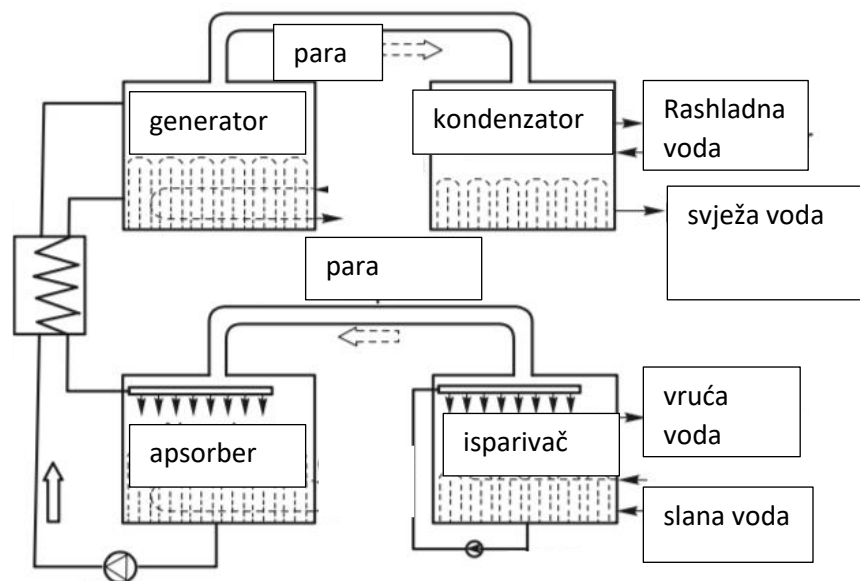
u početni ionski oblik (Mijatović i Matošić, 2020). Može se primijeniti anorganska smola koja nakon miješanja s morskom vodom formira talog s glavnim ionima kao što su Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} i Na^+ . Nakon toga svježa voda može se odvojiti (Slika 3-11.). Osim anorganskih smola primjenjuju se i prirodni organski izmjenjivači poput ugljena i celuloze. Njihove porozne strukture omogućuju brzu izmjenu iona. Ova metoda nije primjenjiva na morsku vodu s velikom koncentracijom soli jer je tada veći trošak regeneracije smole.



Slika 3-11. Shematski prikaz ionske izmjene (Zeng, 2017)

3.8. Apsorpcija

Metodom apsorpcije moguće je riješiti problem recikliranja energije pare niske temperature. Neke otopine metalnih soli ili krute tvari poroznog materijala imaju nizak parcijalni tlak na površini što omogućuje apsorpciju pare. Kada temperatura poraste do određenog stupnja oni mogu dati svježju vodu. Apsorber, generator, kondenzator i isparivač osnovni su dijelovi apsorpcijskog desalinizacijskog sustava. Apsorber uzima paru niske temperature iz isparivača kako bi intenzivirao posljednju fazu procesa hlađenja. Razrijeđena otopina u apsorberu šalje se u generator i zagrijava se do vrenja. Oslobođena vruća para transportira se u kondenzator za hlađenje te se proizvodi svježa voda (Slika 3-12.).

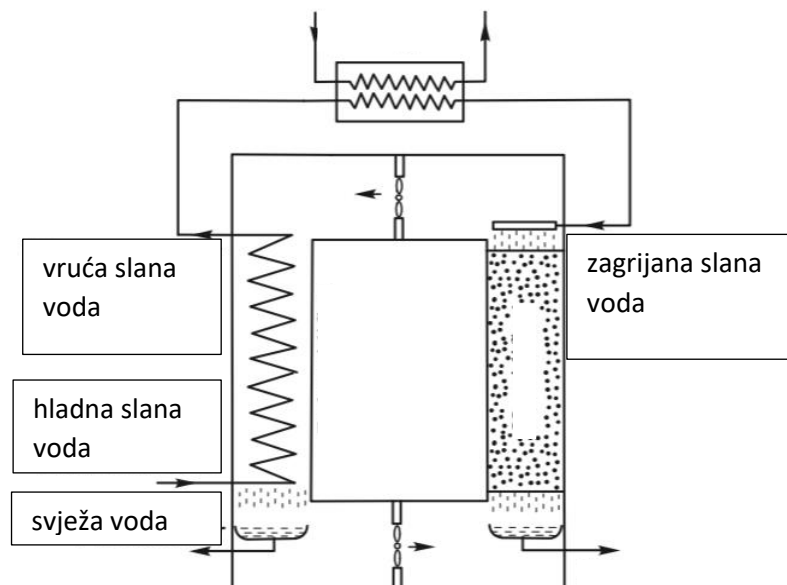


Slika 3-12. Shematski prikaz aparature za apsorpciju (Zeng, 2017)

3.9. Metode ovlaživanja i odvlaživanja zraka

Metoda ovlaživanja i odvlaživanja zraka u svrhu desalinizacije morske vode iskorištava svojstva prirodnog zraka. Naime, prirodni zrak sadrži paru, a njen udio ovisi o temperaturi. Proces započinje zagrijavanjem morske vode, nakon čega voda ulazi u sustav s vrha ovlaživača gdje prolaskom kroz porozni materijal tečenjem ili raspršivanjem prenosi toplinu. To se događa zato što suhi zrak struji prema gore te na taj način povećava temperaturu i vlažnost zraka. Zatim topli i vlažni zrak odlaze u odvlaživač. Pomoću površinskog hladnjaka zraka ili cijevi zavojnice kondenzatora prenosi se toplina. Temperatura zraka pada ispod točke rosišta, a svježa voda dobiva se kondenzacijom (Slika 3-13.).

Ovom metodom odvojeni su procesi grijanja, isparavanja i kondenzacije kako bi svaki proces imao bolju učinkovitost. Metoda se odvija na niskim temperaturama, pod atmosferskim tlakom i lako ju je kontrolirati, a kamenac i korozija nisu velik problem kao problemi koji se događaju u metodama koje koriste visoke temperature.



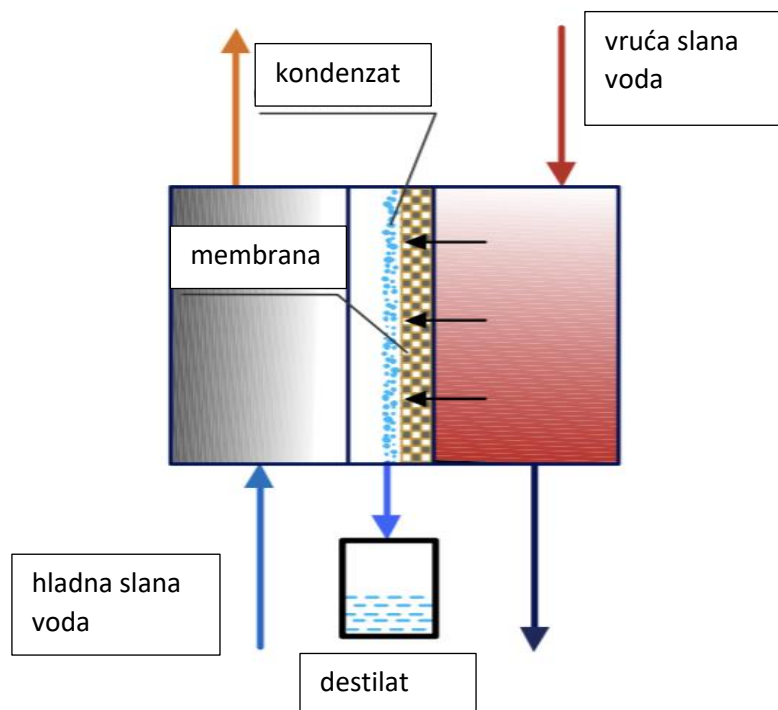
Slika 3-13. Shematski prikaz metode ovlaživanja i odvlaživanja zraka (Zeng, 2017)

3.10. Membranska destilacija

Metoda membranske destilacije temelji se na tome da samo pare mogu proći kroz poroznu hidrofobnu membranu u procesu odvajanja. Pokretačka sila procesa je razlika parcijalnog tlaka otopine s jedne strane porozne hidrofobne membrane i parcijalnog tlaka s druge strane membrane. Ova razlika tlakova rezultat je temperaturne razlike između dviju graničnih površina (Damjanović, 2015). Membrana sadrži velik broj pora koje se ne mogu natopiti dovodnom otopinom. Jedna strana membrane je u izravnom kontakt s vrućom slanom vodom dok je druga strana u izrovanom kontaktu sa slatkom hladnom vodom. Na taj način formira se vruća i hladna strana sustava. Nastala para koja prolazi kroz membranu kondenzira se na hladnoj strani te na taj način nastaje destilat (Slika 3-14.).

Četiri su osnovne tehnike membranske destilacije: membranska destilacija izravnim kontaktom, membranska destilacija zračnim rasporom, plinska destilacija i vakuumska membranska destilacija. Membrane koje se koriste moraju biti visoko porozne i visoko hidrofobne, a toplinska vodljivost mora biti mala. Povećanjem veličine pora i smanjenjem debljine membrane povećava se protok. Debljina membrane je u rasponu od 30 do 60 μm , a veličina pora je u rasponu od 0,1 do 0,4 μm . Na destilat utječu temperatura napojne vode, debljina membrane, toplinska vodljivost membrane, poroznost, zavojitost, debljina zračnog raspora i brzina protoka.

U odnosu na metodu reverzne osmoze, metoda membranske destilacije ima više prednosti. Zbog nepostojanja visokog tlaka cjevovodi su tanji, moguće je tretirati vodu visokog saliniteta te nije potrebno napraviti predtretman napojne vode. Osim toga, učinkovitost metode ne ovisi o salinitetu napojne vode.



Slika 3-14. Shematski prikaz membranske destilacije (Zeng, 2017)

3.11. Osmoza

Osmoza je proces difuzije vode kroz selektivnu polupropusnu membranu iz područja manje koncentracije u područje veće koncentracije otopine, u nastojanju izjednačavanja koncentracija. Smjer kretanja molekula vode je u ovom slučaju suprotan od smjera kretanja kod reverzne osmoze. Naime, kod osmoze se upotrebljava gradijent osmotskog tlaka, a kod obrnute osmoze koristi se gradijent hidrauličkog tlaka. Slatka i slana voda s niskim kemijskim potencijalom odvojene su polupropusnom membranom, a molekule slatke vode spontano se kreću kroz polupropusnu membranu na stranu slane vode. Razina slane vode biti će povišena sve dok razlika tlaka s obje strane tekućina ne bude jednaka razlici osmotskog tlaka. Kada bi vodu zamijenili s otopinom za povlačenje koja ima niži kemijski potencijal, molekule vode spontano bi počele prelaziti kroz polupropusnu membranu na

stranu otopine za povlačenje. Pokretačka sila procesa koja nastaje razlikom kemijskih potencijala, a ne djelovanjem vanjske sile je glavna značajka osmoze.

Membrana koja se koristi pri metodi reverzne osmoze nije prikladna za metodu obične osmoze jer dolazi do veće unutarnje koncentracijske polarizacije uzrokovane većom koncentracijom otopine za izvlačenje. Usporedbom metode osmoze i reverzne osmoze može se zaključiti kako metoda osmoze ima više prednosti. Potrošnja energije je manja jer se ne koristi hidraulički tlak. Metoda osmoze koristi hidrofilnu membranu stoga je onečišćenje membrane smanjeno. Oprema je jednostavnija i primjenjuje se niska radna temperatura pogodna za upotrebu sunčeve energije.

3.12. Metode koje koriste solarnu energiju i energiju vjetra

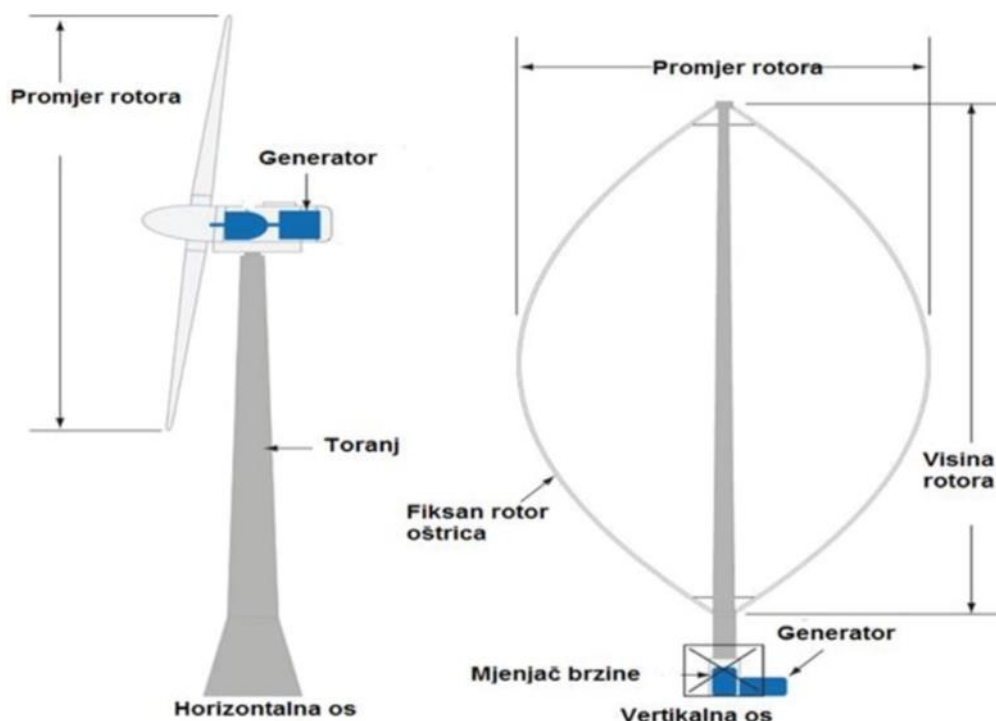
Uporaba metoda koje koriste solarnu energiju i energiju vjetra ovisi o nizu faktora kao što su potrebna količina vode, potrošnja, salinitet pojne vode, lokalna klima, udaljenost i vodni resursi. Solarna toplinska energija može se iskoristiti izravno i neizravno.

Izravna solarna termalna desalinizacija može biti bazenskog stila, nagnutog fitiljnog solarnog stila, nagnutog stila s više ladica i koncentrirajućeg zrcalnog stila. Ove metode imaju malu učinkovitost i produktivnost vode zbog isprekidane dostupnosti solarnog zračenja. Bazenski stil ima učinkovitost ~45 %. Ispod bazena se postavlja toplinska izolacija kako bi se smanjio gubitak topline. Za nagnuto fitiljni stil koristi se kapilarno djelovanje vlakana. Na taj način se pojna voda distribuira po cijeloj površini fitilja u tankom sloju. Nagnuti stil s više ladica je kompliciran za izgradnju i uključuje komponente skuplje od bazenskih stilova. Koncentrirajući zrcalni stil podrazumijeva visoke troškove gradnje i troškove održavanja, a metoda se odvija na način da se koristi parabolično zrcalo koje fokusira sunčevu svjetlost prema isparivačkoj posudi.

Neizravna solarna termalna desalinizacija uključuje metode ovlaživanja i odvlaživanja, membransku destilaciju, reverznu osmozu i elektrodijalizu koje su već prije opisane te ribnjak za desalinizaciju. Ribnjaci se koriste kao kolektori topline ili kao prostori za skladištenje topline. Solarni ribnjak sastoji se od tri sloja. Gornji ili površinski sloj zove se gornja zona konvekcije, drugi sloj naziva se srednji sloj, što ga čini područjem bez zone konvekcije te treći sloj nazvan zona pohrane ili niži sloj koji se zove niža zona konvekcije. Salinitet se povećava s dubinom, od površinske čiste vode do dna, gdje su soli u stanju ili blizu zasićenja. Slanost je relativno konstantna u gornjoj i donjoj zoni konvekcije i povećava

se s dubinom. Slana voda je gušća od svježje vode stoga je u vodi dno jezera gušće nego površina vode. Solarni ribnjak može pohraniti toplinu. Iako solarna energija može prodrijeti u cijelu dubinu ribnjaka, ne može otići iz zone za pohranu (Filipović, 2015).

Energiju vjetra također je moguće upotrijebiti za pokretanje desalinizacijskog postrojenja za proizvodnju pitke vode. Ova metoda se najčešće koristi na udaljenijim mjestima kao što su otoci, jer su troškovi prijevoza svježje pitke vode na otok veći od troškova proizvodnje svježje pitke vode na otoku. Energija vjetra koristi se kao pokretačka sila za metode reverzne osmoze, elektrodijalize i kompresije pare. Vjetroturbine i sustav za desalinizaciju mogu biti izravno povezani ili pomoću električne mreže, a vjetroturbine su najčešće napravljene od vertikalne i horizontalne osi (Slika 3-15.). Od navedenih metoda koje koriste energiju vjetra najpogodnija je metoda reverzne osmoze. Naime, potrošnja energije nije velika i sam proces se odvija pri temperaturi okoline. Električna energija upotrebljava se jedino za pumpanje vode na relativno visok radni tlak. Radni tlak potreban za rad s bočatom vodom je između 10 i 25 bar, a za rad s morskom vodom između 50 i 80 bar. Efikasnost s bočatom vodom može biti 90 %, a s morskom vodom od 35 do 50 %.



Slika 3-15. Vjetroturbine s horizontalnom i vertikalnom osi (Al-Karaghoul i dr., 2008)

4. Zaključak

U ovom radu opisane su različite tehnologije desalinizacije kojima je moguće obraditi morsku vodu za zadovoljavanje potreba opskrbom pitke, tehnološke vode, napojne vode za kotlovska postrojenja, te vode za prehrambena postrojenja. Instalacija pogona za desalinizaciju uglavnom je skupa investicija. Međutim, s obzirom na današnje sve veće zahtjeve za svježom vodom, nastale kao posljedica naglog porasta stanovništva i razvoja moderne industrije, ulaganje u postupke desalinizacije predstavlja alternativno i dugoročno rješenje za dobivanje vode. Ovo je od osobitog značaja za područja u kojima je pitka voda teško dostupna poput krajeva uz more i otoke.

Dvije su osnovne kategorije procesa kojima je moguće postići desalinizaciju morske vode: termalni procesi poput destilacije i membranski procesi u koje spada reverzna osmoza, ionska izmjena i membranska destilacija. Destilacija predstavlja tradicionalni postupak odslanjivanja vode. Međutim, za postupke višestruke destilacije i kompresije para potrebne su velike količine pitke vode i velika količina energije. Membranski procesi, osobito reverzna osmoza, se danas najčešće upotrebljavaju pri desalinizaciji. Gotovo polovica svjetskih kapaciteta za desalinizaciju radi na principu reverzne osmoze jer je moguće postići efekt desalinizacije od gotovo 99 %. Reverznom osmozom uklanjaju se neorganski minerali, soli i ostale nečistoće kako bi se dobila voda za piće visoke kvalitete. Glavni nedostatak ove metode je veliki utrošak energije s obzirom da su potrebne višetlačne pumpe, što znatno poskupljuje proces.

Osim navedenih metoda danas se poseban naglasak stavlja na metode koje upotrebljavaju solarnu i vjetro energiju. Neizravna solarna desalinizacija je vrlo pogodna metoda jer upotrebljava obnovljivu i ekonomičnu solarnu energiju, a pomoću nje se izvodi metoda višestruke destilacije. Trenutno su financijska ulaganja u procese koji primjenjuju obnovljive izvore energije vrlo visoka. Međutim, potrebno je njihovo dodatno iskorištavanje jer je utjecaj klimatskih promjena u proteklih nekoliko godina postao sve izraženiji.

5. Popis literature

1. AL-KARAGHOULI, A., RENNE, D., KAZMERSKI, L.L., 2008. *Renewable and Sustainable Energy* . Reviews: Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions, Elsevier
2. AL- KARAGHOULI, A., KAZMERSKI, L.L., 2011. *Renewable Energy Opportunities in Water Desalination*, Desalination, Trends and Technologies, Rijeka: InTech
3. DAMJANOVIĆ, A., 2015. *Obrada RO/NF retentata*. Završni rad. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
4. DESSOUKY, E.L., ETTOUNEY, H. T., 2002. *Fundamentals of salt water desalination*. New York: Elsevier Science.
5. FILIPOVIĆ, I., 2015. *Tehnologija desalinacije korištenjem solarne i vjetro energije*. Završni rad. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
6. JUNHE, W. 1978. *Seawater desalination (in Chinese)*. Beijing: Science Press
7. KUNST, B. 1998. *Mjesto desalinacijskih postupaka u vodoopskrbi naših otoka – teze za raspravu*. Zbornik radova. Hvar: HRVATSKO HIDROLOŠKO DRUŠTVO
8. MIJATOVIĆ, I., MATOŠIĆ, M., 2020. *Tehnologija vode*. Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
9. MOROVIĆ, S., 2016. *Desalinacija sa solarnom energijom*. Završni rad. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
10. ZENG, H., 2017. *Solar Energy Desalination Technology*. Beijing, Beijing Institute of Technology

Internetski izvori:

1. KTF-SPLIT 2022. Englesko-hrvatski kemijski riječnik & glosar URL: <http://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=ekstrakcija> (12.9.2022.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad pod naslovom „Metode desalinizacije“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



Ivan Devčić