

# Desalinacija sa solarnom energijom

---

**Morović, Silvia**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:720285>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Silvia Morović

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Silvia Morović

## **Desalinacija sa solarnom energijom**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Krešimir Košutić

Članovi ispitne komisije:

prof. dr. sc. Krešimir Košutić

doc.dr.sc. Davor Dolar

izv.prof.dr.sc. Dragana Mutavdžić Pavlović

Zagreb, rujan 2016.

*Zahvaljujem prof. dr. sc. Krešimiru Košutiću na uloženom trudu, savjetima i pomoći pri izradi ovog rada.*

*Od srca zahvaljujem svojim roditeljima na bezuvjetnoj podršci i strpljenju bez kojih sve ovo ne bi bilo moguće.*

*Također, zahvaljujem prijateljima i kolegama koji mi uvelike uveseljavaju fakultetske dane.*

## Sažetak

Voda predstavlja najvažniji resurs čovjekova preživljavanja. Svakodnevnom upotrebom, porastom standarda te industrijalizacijom, potreba za vodom enormno raste. Posebno veliki problem predstavljaju područja koja ne obiluju prirodnim izvorima pitke vode. Jedno od mogućih rješenja je razvoj desalinijskih postrojenja koji velike količine slane vode, kojom Zemlja obiluje, pretvaraju u koristan oblik, čistu pitku vodu.

U ovom radu prikazane su različite desalinacijske tehnike povezane s obnovljivim izvorima energije, točnije solarnim tehnologijama. Navedene su prednosti i nedostaci vezani za procese desalinacije. Također, objašnjene su novije metode i ideje solarnih desalinacijskih postrojenja. Solarnim desalinacijskim postrojenjima cilj je smanjenje emisija stakleničkih plinova, osobito  $CO_2$ , smanjenje troškova proizvodnje pitke vode, te rad postrojenja u skladu s očuvanjem prirode i okoliša u kojem živimo.

**Ključne riječi:** desalinacija, solarna energija, zaštita okoliša, membranski procesi, termalni procesi

## **Abstract**

Water is the most important resource of human survival. Daily usage, growth of human standard and industrialization have all contributed to greater needs for water. Major problems are the areas that are not rich in natural sources of drinking water. A large area of the Earth's surface is covered with saline water so development of desalination plants where large amounts of salt water can be converted into a potable water appears as a very good solution. In this review, different desalination units integrated with renewable energy with special emphasis given to solar energy are discussed. The paper presents both advantages and disadvantages related to the process of desalination. It also explains the novel methods and ideas for desalination solar plant. Solar desalination plants have the purpose of reducing greenhouse gas emissions, particularly  $CO_2$ , reducing the production cost of drinking water and plant operation while protecting nature and environment in which we live in.

**Keywords:** desalination, solar energy, environment protection, membrane processis, thermal processis

## Sadržaj

1. UVOD.....	2
2. OPĆI DIO.....	3
Izravne metode solarne desalinacije .....	3
Solarni kotao .....	3
Solarna desalinacija humidifikacijom i dehumidifikacijom.....	4
Desalinacija solarnim dimnjakom.....	6
Neizravne metode solarne desalinacije.....	8
Nemembranske metode.....	8
Višefazna (frakcijska) destilacija (MSF) .....	8
Višestruka destilacija (MED).....	10
Kompresija pare (VC).....	11
Prirodna vakuum desalinacija .....	14
Desalinacija smrzavanjem .....	16
Direktna desalinacija smrzavanjem.....	16
Indirektna desalinacija smrzavanjem .....	16
Vakuum desalinacija smrzavanjem.....	17
Desalinacija adsorpcijom.....	18
Membranske metode.....	20
Desalinacija reverznom osmozom .....	20
Desalinacija reverznom osmozom na solarno napajanje.....	20
Desalinacija reverznom osmozom uz fotonaponske ćelije (PV) .....	21
Desalinacija reverznom osmozom uz solarni toplinski pogon .....	22
Solarna desalinacija elektrodijalizom .....	24
Solarna desalinacija membranskom destilacijom (MD) .....	27
Solarna desalinacija naprednom osmozom (NO).....	31
RASPRAVA .....	34
Korozija i taloženje kamenca .....	34
Blokiranje membrana .....	35
Troškovi proizvodnje vode.....	35
Desalinacija i okoliš.....	36
Osvrt na solarne desalinacijske jedinice .....	37
Zaključak.....	38
Simboli i skraćenice .....	39
Literatura.....	41
Životopis.....	45

## 1. UVOD

Poznato je da život na Zemlji nije moguć bez vode. Tekućina bez boje, okusa i mirisa znači život kako za ljude, tako i za biljni i životinjski svijet. Nedostatak pitke vode predstavlja veliki problem u sušnim i pustinjanskim predjelima poput Bliskog Istoka i Sjeverne Afrike gdje vrijednost vode raste iz dana u dan. Za takva područja karakteristične su neredovite padaline te povećana slanost podzemnih voda. Upravo činjenica da područja u kojima manjka pitke vode, posjeduju podzemne zalihe slane vode, dovodi do ideje za razvojem metoda desalinacije. Desalinacija je jedan od prvih postupaka obrade voda. U prirodi, solarna desalinacija uzrokuje pojavu kiše. Mora i oceani zagrijavaju se pod utjecajem sunčeva zračenja prilikom čega dolazi do isparavanja površinske vode. Vjetar podiže vodenu paru, a jednom kad se para ohladi, vodena para kondenzira i vraća se na Zemlju u tekućem obliku. Upravo ovaj proces odgovoran je za kružni ciklus vode u prirodi i čini temelj desalinacije. Postupak desalinacije iziskuje velike količine energije kako bi se uspjela odvojiti određena količina pitke vode. Pojna voda ( morska ili bočata ) koja ulazi u postupak desalinacije sadrži dvije izlazne struje. Izlazna struja čiste, pitke vode te izlazna struja ugušćene smjese soli i vode. Prosječno, za proizvodnju  $1000 \text{ m}^3/\text{d}$  pitke vode potrebno je 10000 tona nafte godišnje. Iz priloženog možemo primjetiti kako se radi o velikoj količini potrošnje konvencionalnih izvora energije. Ovakav način obrade slane vode, uz pomoć neobnovljivih izvora energije, priliči bogatijim zemljama ili zemljama koje obiluju prirodnim ležištima nafte i plina. U zemljama koje ne obiluju neobnovljivim izvorima energije, a ujedno su i ekonomski slabe, javlja se ideja korištenja prirodnih izvora energije. Naime, većina zemalja koje oskudijevaju pitkom vodom broji najviše sunčevih sati godišnje. Stoga, kao logičan slijed, započinje iskorištavanje sunčeva zračenja. Korištenjem obnovljivih izvora energije, smanjuju se emisije ispušnih plinova u atmosferu te se čuvaju fosilna goriva. No, korištenje solarne energije za desalinaciju izaziva mnoge probleme. Najveći problem iskorištavanja elektromagnetnog zračenja sunca je njegova difuzna priroda čime se uzrokuje lošija produktivnost velikih desalinacijskih postrojenja, mala efikasnost samog procesa, a uz to postrojenja zahtijevaju velike površine. Bez obzira na produktivnost, sama po sebi, solarna energija je besplatni, obnovljivi izvor te ju valja iskoristiti. Povezivanjem obnovljivih izvora poput solarne energije s postupkom desalinacije, predstavlja velik potencijal u povećavanju zaliha pitke vode. U ovom radu prikazat će se kombinacije različitih solarnih tehnologija s desalinacijskim tehnologijama, postupak rada, prednosti i ograničenja.



## 2. OPĆI DIO

Solarne desalinacijske tehnike dijele se na izravne i neizravne metode. Izravne metode uzrokuju nastajanje destilata direktno u solarnim kolektorima. Neizravne metode apsorbiraju elektromagnetno zračenje preko različitih solarnih kolektora. Zračenje se prenosi do određenog radnog medija poput vode, ulja ili pare. Radni medij služi za prijenos topline do određene jedinice za desalinaciju ili može služiti kao skladište solarne energije u izoliranim spremnicima. Elektromagnetno zračenje, unutar solarnih kolektora, može se izravno pretvarati u električnu struju koja se dalje koristi u jedinicama za desalinaciju i pritom se električna energija može i skladištiti.

### 2.1. Izravne metode solarne desalinacije

Izravne metode solarne desalinacije dijele se na :

1. Solarni kotao- jednostavna solarna destilacija
2. Solarna desalinacija humidifikacijom i dehumidifikacijom
3. Solarni dimnjak

#### 2.1.1. Solarna posuda ili solarni " kotao"

Solarni kotao je tamna posuda koja je pokrivena staklom te ispunjena bočatom ili morskom vodom do određene razine. Pokrovno staklo je najčešće postavljeno pod nekim kutom kako bi se pospješio upad sunčevih zraka i odvod kondenzata. Sunčevo elektromagnetno zračenje apsorbira se na crnoj posudi te uzrokuje stvaranje topline.

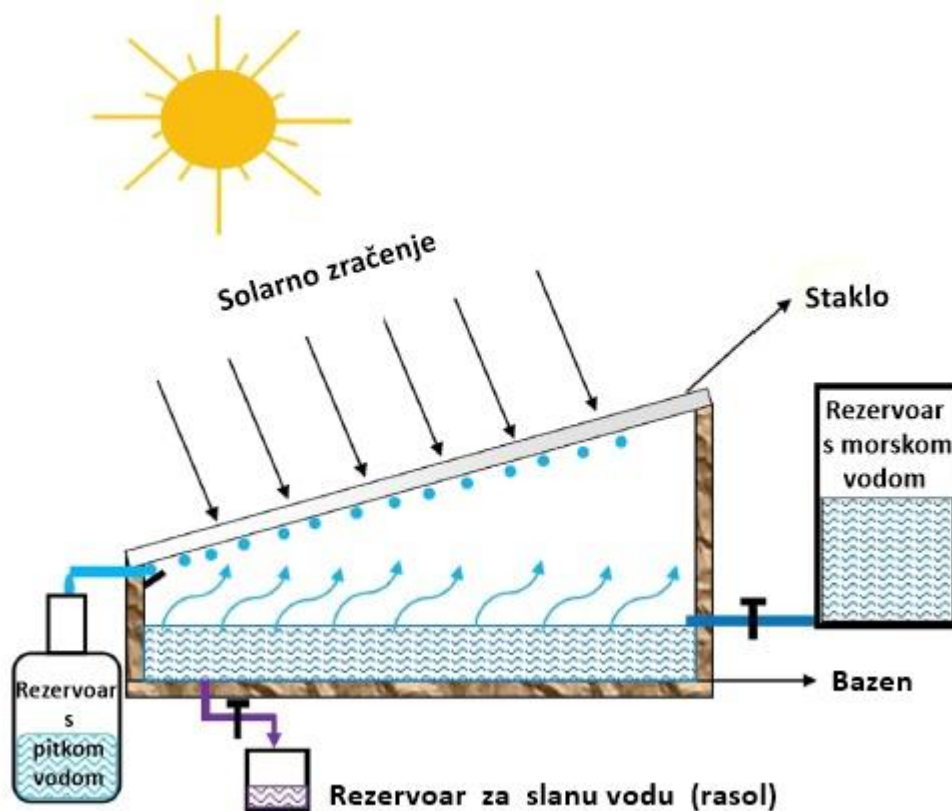
Otpuštena toplina zagrijava morsku ili bočatu vodu i uzrokuje isparavanje vode. Zbog razlika u parcijalnom tlaku i temperaturi, vodena para u dodiru sa staklenom stjenkom kondenzira. Kondenzat se sakuplja na dnu nagnutog stakla. Skupljeni kondenzat jest zapravo vrlo dobre kvalitete no male kvantitete. Maksimalno sakupljen kondenzat ovom metodom iznosi 2-3 L/m<sup>2</sup> dnevno. Koeficijent nastajanja kondenzata može se povećati spajanjem solarnog kotla s ravnim (pločastim) kolektorom, cijevnim-vakumskim kolektorom, kolektorima s koncentrirajućim tanjurom, solarnim bazenima, itd. Isto tako, iskorištavanjem latentne topline kondenzata višefaznom destilacijom, također povećavamo koeficijent nastajanja destilata.

Biranjem odgovarajućih materijala pokrova (stakla) i postavljanje pod određenim kutom, visina pojne smjese i apsorpcijska podloga također utječu na veličinu koeficijenta. Koeficijent destilata za jednostavni solarni kotao izračunava se po formuli:

$$m_d^{\square} = \frac{q_{ew}^{\square} * A_w}{h_{fg}} \quad (1)$$

gdje je  $m_d^{\square}$  -maseni protok destilata,  $q_{ew}^{\square}$ -brzina prijenosa topline isparavanja,  $h_{fg}$ -latentna toplina isparavanja i  $A_w$ - površina.

Nađeno je da jednonagibni i uređaji piramidalnog oblika daju najveće maksimalne koeficijente nastajanja destilata, a njihova cijena jest 0,0135 \$/L ,odnosno 0,031 \$/L.

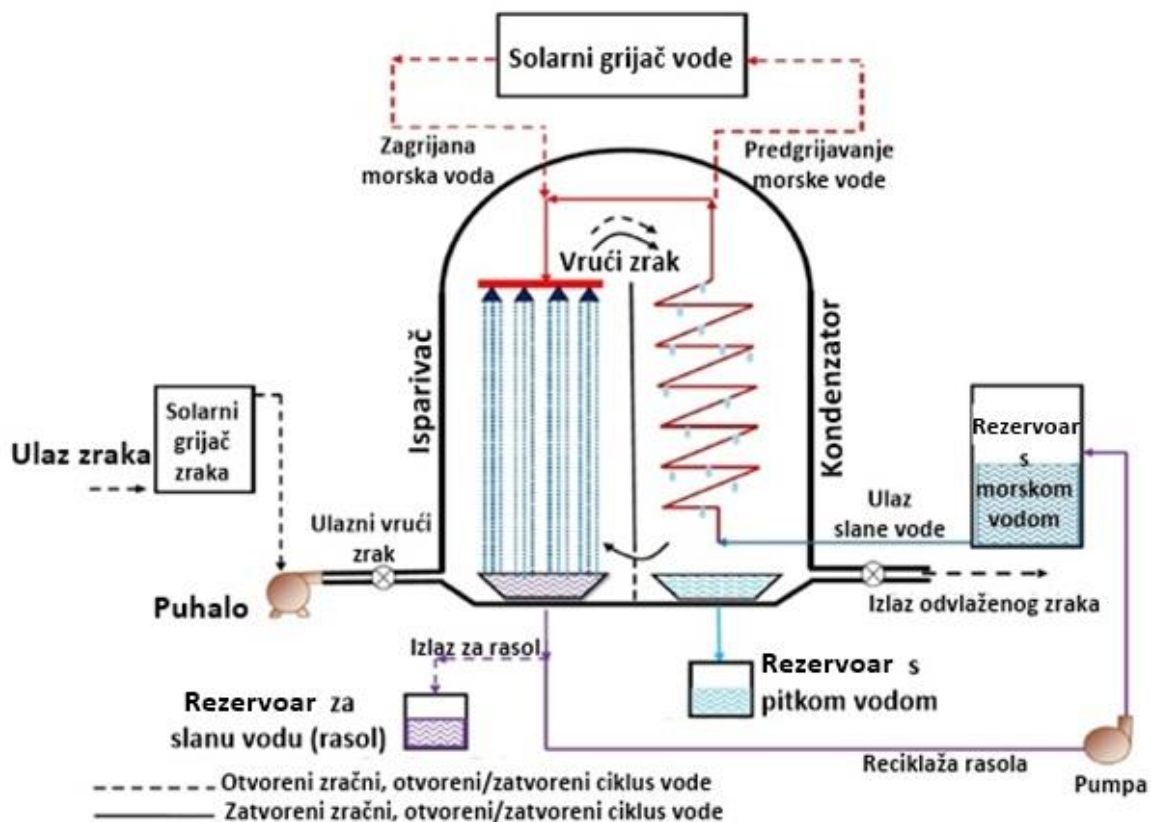


Slika 2.1. Jednostavni solarni kotao

### 2.1.2. Solarna desalinacija humidifikacijom i dehumidifikacijom

Glavna ideja ove metode leži u mogućnosti zraka da sadrži određenu količinu vodene pare. Povećanjem temperature, povećava se kapacitet zraka prema vodenoj pari. Suhi zrak zagrijava se preko solarnih kolektora i dolazi u kontakt s prethodno zagrijanom morskom

vodom. Voda isparava i miješa se sa suhim zrakom prilikom čega zrak može preuzeti dio vodene pare. Vlažni zrak odvodi se u kondenzator te hlađenjem smjese zraka i vodene pare dobivamo čistu vodu. Postoji više vrsta humidifikacije-dehumidifikacije; uz zatvoreni ciklus zraka i otvoreni vodeni ciklus, zatim zatvoreni zračni i zatvoreni vodeni ciklus, otvoreni zračni i otvoreni vodeni ciklus te otvoreni zračni i zatvoreni vodeni ciklus. U zatvorenom vodenom ciklusu, ugušćena smjesa soli i vode miješa se s novom pojnjom vodom, dok se u otvorenom vodenom ciklusu nakon svake separacije ugušćena smjesa izdvaja izvan procesne jedinice. Zatvoreni zračni i otvoreni vodeni ciklus ima najveću efikasnost, a troškovi vode proizvedene na taj način iznose od 3-7  $\$/m^3$ . Dnevna stopa proizvodnje vode ovisi o masenom protoku i temperaturi pojne vode, o otvoru za dovod zraka i temperaturnom toplinskom toku. Dnevna stopa proizvodnje vode može se povećati zagrijavanjem zraka i pojne vode. Recikliranjem ugušćene smjese soli i vode može se smanjiti specifična potrošnja toplinske energije te se pritom povećava proizvodnja vode. Ekonomska analiza ukazuje kako je ovaj tip obrade slane vode prikladniji i isplativiji prilikom proizvodnje manjih količina vode.



**Slika 2.2.** Desalinacija solarnom humidifikacijom-dehumidifikacijom

### 2.1.3. Desalinacija solarnim dimnjakom

Solarni dimnjak pretvara sunčevo zračenje u kinetičku energiju koja se potom pretvara u električnu energiju pomoću turbogeneratora. Glavni dijelovi solarnog dimnjaka su solarni kolektori velikog promjera, turbine, generator i dugi dimnjak. Solarni kolektori, najčešće od stakla ili plastične folije, ponašaju se kao staklenici. Hvataju sunčeve zrake te zagrijavaju unutrašnjost tj. povećava se temperatura zraka u unutrašnjosti za razliku od okolnog zraka, što uzrokuje gibanje zraka kroz dimnjak. Kinetička energija zraka koristi se kao pokretač turbina, niže u dimnjaku. Okretanjem turbina proizvodi se električna energija. Jednadžba kojom možemo opisati snagu solarnog dimnjaka glasi:

$$P_{out} = \frac{2}{3} * \eta_t * \eta_{coll} * \frac{g}{C_{pa} * T_a} * H_{ch} * A_{coll} * I \quad (2)$$

u kojoj je  $\eta_t$ -efikasnost turbine,  $\eta_{coll}$ -efikasnost kolektora,  $C_{pa}$ -specifični toplinski kapacitet zraka,  $T_a$ -temperatura okoline,  $H_{ch}$ -težina dimnjaka,  $A_{coll}$  –površina kolektora,  $I$ -solarna radijacija. Nagnuti solarni dimnjaci su puno efikasniji i daju veću izlaznu snagu.

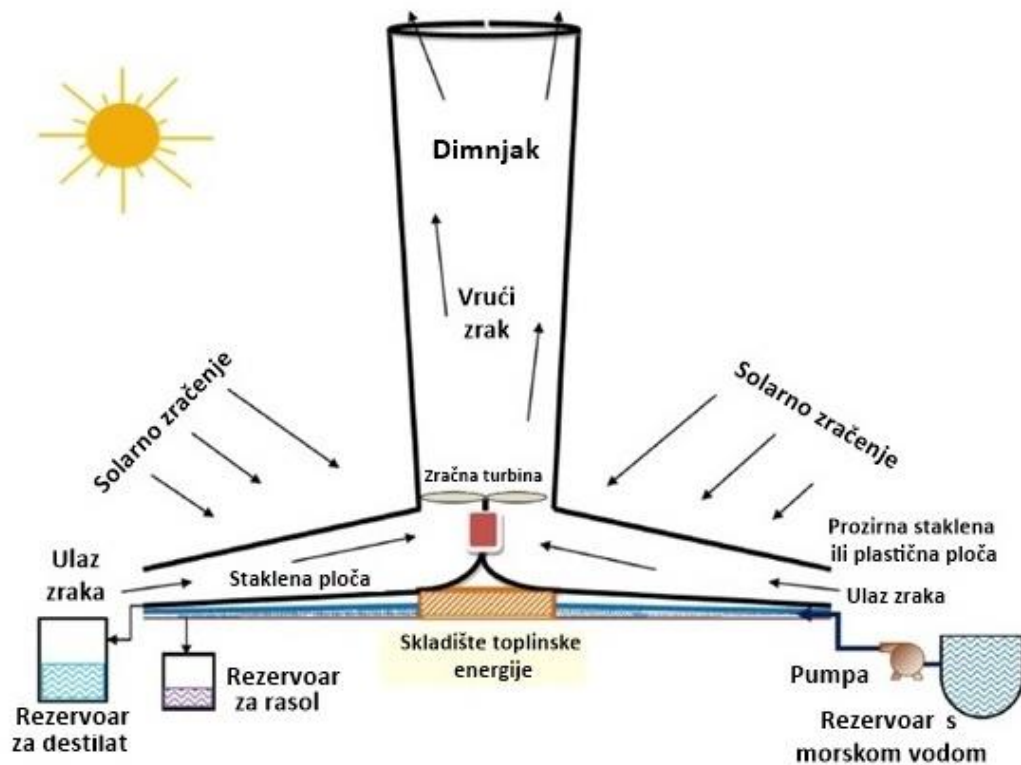
Integracija procesa desalinacije i solarnog dimnjaka izvodi se na način da se tamna posuda za pohranu slane vode koja je pokrivena staklom, postavljenim pod određenim kutom, nalazi ispod solarnog dimnjaka. Sunčeve zrake zagrijavaju zrak u konstrukciji solarnog dimnjaka te također prolaze kroz stakleni pokrov sustava za desalinaciju. U sustavu za desalinaciju, dolazi do isparavanja vode pri čemu nastaje destilat. U sustavu solarnog dimnjaka, zagrijavanjem zraka uzrokuje se gibanje zraka koje okreće turbine te pritom stvara električnu struju u generatoru. Ako bi ovakvo postrojenje radilo 8 h dnevno, cijena proizvodnje vode iznosila bi 2,23 \$/m<sup>3</sup>. Koeficijent nastajanja destilata u jednome satu iznosi:

$$\dot{m}_d = \frac{q_{ew}^{\square} * 3600}{h_{fg}} \quad (3)$$

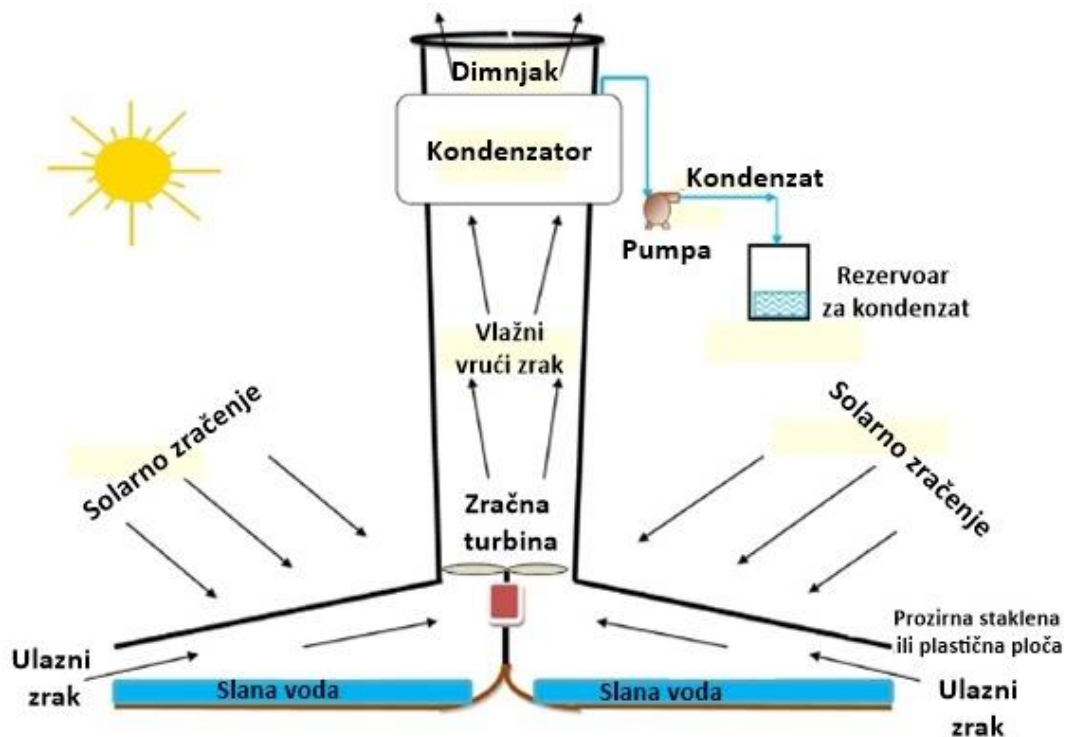
gdje je  $q_{ew}^{\square}$ - brzina prijenosa topline isparavanja,  $h_{fg}$ - latentna toplina isparavanja,  $\dot{m}_d$ - maseni protok destilata.

Postoji izravna kombinacija postupka desalinacije sa solarnim dimnjakom. Kod takve kombinacije desalinacija se odvija unutar samog solarnog dimnjaka. Na posudi za pohranu slane vode ne nalazi se pokrovno staklo. Sunčevo zračenje zagrijava zrak unutar solarnog dimnjaka i slanu vodu prilikom čega dolazi do isparavanja vode. Zagrijani vlažni zrak uzrokuje pokretanje turbine te nastanak električne energije u generatoru. Izlazna snaga

ovakvog postrojenja mnogo je manja budući da se ne radi o suhom zraku, već vlažnom zraku čime se smanjuje pokretačka sila sustava. Vlažni zrak dalje se giba kroz solarni dimnjak do kondenzatora, gdje se smjesa zraka i vodene pare hladi te pritom dobivamo čistu vodu.



Slika 2.3. Integracija solarnog dimnjaka i procesa desalinacije



Slika 2.4. Izravna kombinacija postupka desalinacije sa solarnim dimnjakom

## **2.2. Neizravne metode solarne desalinacije**

Neizravne metode dijele se na membranske i nemembranske metode.

Membranske metode dijele se na:

1. Elektrodijalizu (ED)
2. Membransku destilaciju (MD)
3. Naprednu osmozu (FO)
4. Reverznu osmozu (RO)

Nemembranske metode dijele se na:

1. Višefaznu (frakcijsku) destilaciju (MSF)
2. Višestruku destilaciju (MED)
3. Desalinaciju kompresijom pare (VC)
4. Desalinaciju smrzavanjem (FD)
5. Desalinaciju adsorpcijom (AD)
6. Prirodnu vakuum desalinaciju

### **2.2.1. Nemembranske metode**

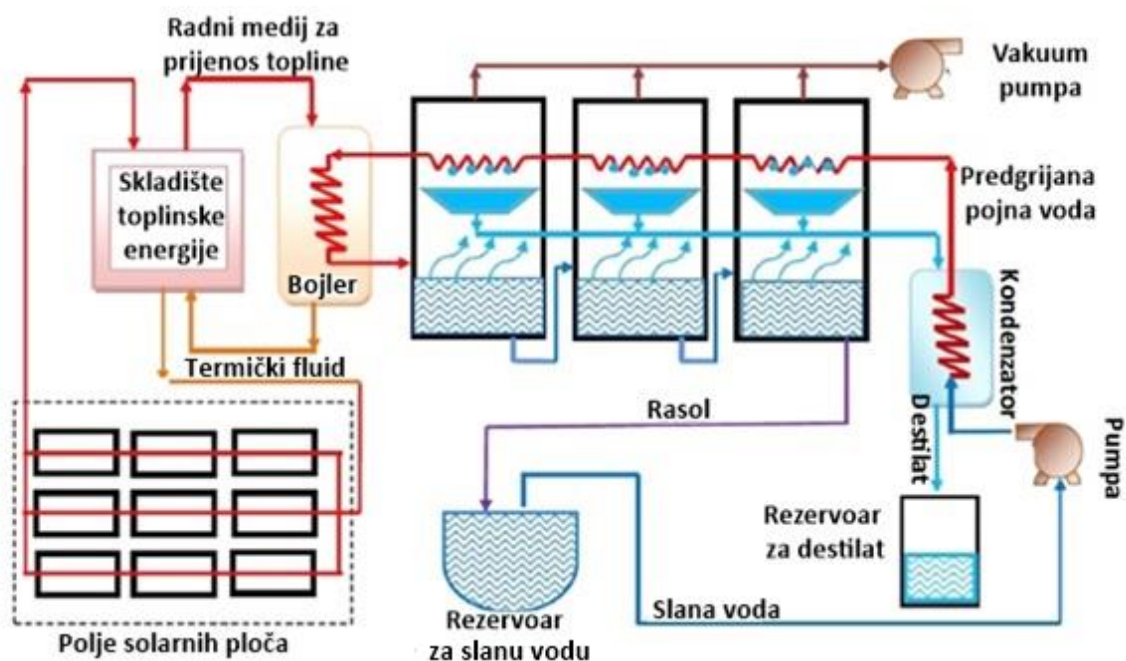
U nemembranskim metodama pojna voda ulazi u destilacijske jedinice gdje se zagrijava te dolazi do isparavanja vode. Vodena para hladi se u kondenzatoru te nastaje destila - čista voda. Proizvedeni destilat je visoke kvalitete. U ovakvim procesima veliku ulogu igraju temperatura pojne vode, površina kondenzatora i tlak. Brzina destilacije može se povećati u uvjetima vakuuma.

#### **2.2.1.1. Višefazna (frakcijska) destilacija (MSF)**

Solarni kolektori apsorbiraju sunčevo zračenje te zagrijavaju radni medij. Preko radnog medija toplina se prenosi do spremnika za desalinaciju gdje služi za dodatno zagrijavanje pojne vode do točke vrelišta. Kod višefazne (frakcijske) destilacije zagrijava pojna voda ulazi u spremnik u kojem se dodatno zagrijava do temperature vrelišta. Voda isparava i ulazi u

kondenzator. Destilat se sakuplja te se cijevima prenosi do posude za sakupljanje. Preostala slana voda iz prvog spremnika odvodi se u drugi spremnik. U drugom spremniku, uz pomoć vakuum pumpe, snižava se tlak te dolazi do isparavanja vode na nižim temperaturama. Postupak se ponavlja u ovisnosti o broju spremnika. Ovakav postupak moguće je kombinirati s više solarnih tehnologija. Meksiko i Njemačka su zajedno konstruirali jedno takvo postrojenje 1974. Postrojenje sadrži cijevne (vakumske) kolektore, parabolične kanalne reflektore, spremnike za skladištenje toplinske energije sunca i naravno jedinicu za višefaznu destilaciju. Troškovi proizvodnje vode iznosili su  $7,9 \text{ \$/m}^3$ . Sličan projekt razvijen je u Švicarskoj, a potom testiran u Kuvajtu gdje se pokazao kao jako dobro rješenje [1]. Troškovi proizvodnje vode smanjeni su povezivanjem jedinice za višefaznu destilaciju sa solarnim bazenom koja je u mogućnosti i sakupiti i pohraniti sunčevu energiju [2]. Cijena je iznosila  $5,48 \text{ \$/m}^3$ . U usporedbi sa solarnim kotlom, produktivnost višefazne destilacije je tri puta veća, a za postizanje istog kapaciteta proizvodnje vode, cijena i početni troškovi su manji. Koeficijent proizvodnje vode se može povisiti povećanjem temperaturne razlike između slane, ugušćene vode unutar spremnika i slane vode na ulazu. Također, neke od analiza potvrdile su da za povećanje koeficijenta pogoduje voda, kao radni medij u solarnim kolektorima, te povećanje broja spremnika tj. ukupnog volumena. Sumarno, koeficijent proizvodnje destilata s MSF ovisi o temperaturi ugušćene slane vode unutar spremnika, broju spremnika, slanosti pojne vode na ulazu te otpornosti samog grijača na oštećenja. Dodatnim hlađenjem ulazne slane vode održavamo potrebnu temperaturnu razliku koja povećava koeficijent proizvodnje destilata, a time izbjegavamo dodatno zagrijavanje ugušćene smjese soli i vode. Eksurgija procesa se može povećati iskorištavanjem topline vruće vodene pare za zagrijavanje drugih termalnih jedinica.

U budućnosti cijena obnovljivih izvora će rasti, a cijena nekih od načina korištenja obnovljivih izvora kao npr. paraboličnih kanalnih reflektora će padati, stoga će proizvodnja ovakvih postrojenja biti ekonomičnija i prikladnija. Idealan oblik ovakve tehnike bio bi kada bi se višefazna destilacija povezala sa solarnim bazenom i sustavom za rekuperaciju ugušćene smjese soli. Iz smjese bi se dobivala čista sol koja bi se mogla koristiti u solarnom bazenu za održavanje saliniteta. Kombinacija višefazne destilacije i solarnog bazena uz vrlo malo korištenje komercijalne električne energije je mnogo ekonomičnija od ostalih tehnika solarne desalinacije.



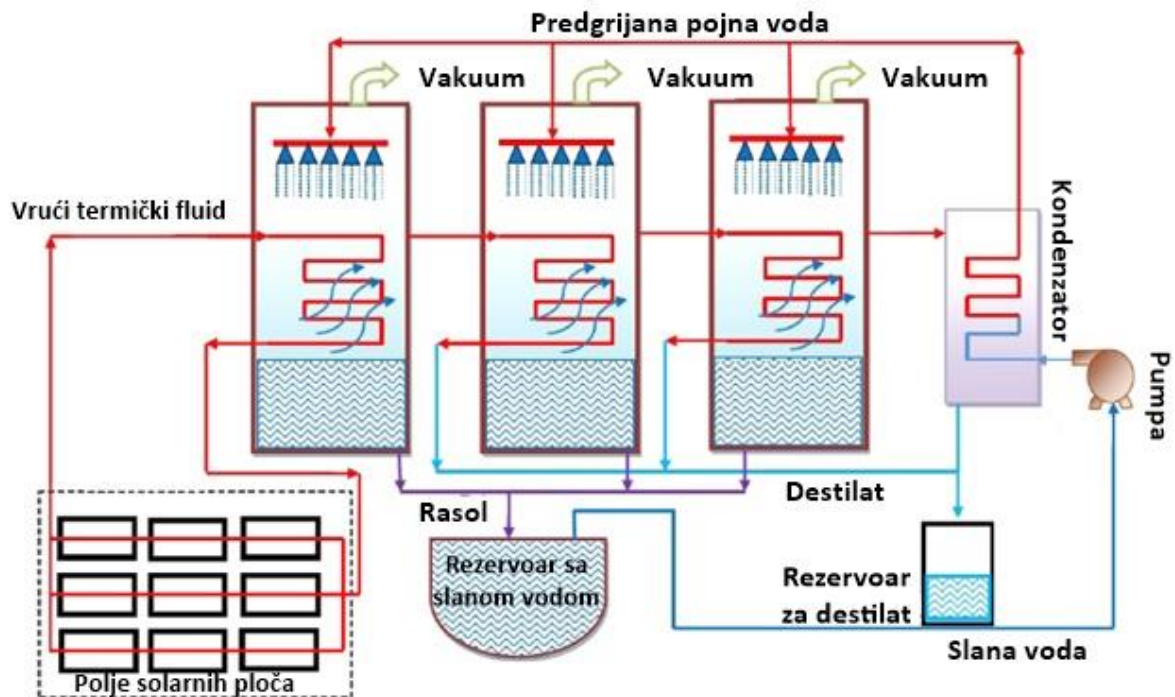
Slika 2.5. Solarna desalinacija višefaznom destilacijom

### 2.2.1.2. Višestruka destilacija (MED)

Višestruka destilacija (MED) sastoji se od više spremnika gdje se učinak odvija uzastopno uz smanjenje tlaka u svakom spremniku. Toplina potrebna za isparavanje vode u prvom spremniku dolazi iz solarnih kolektora. Latentna toplina isparavanja vode iz prvog spremnika koristi se za zagrijavanje pojne vode u drugom spremniku. Kada zagrijana vodena para preda toplinu pojnoj vodi dolazi do hlađenja pare koja kondenzira te nastaje čista voda koja se zatim odvodi cijevima u spremnik za prikupljanje destilata. Isto tako, slana voda koja zaostaje u prvom spremniku, prebacuje se u drugi spremnik gdje postaje pojna voda [4]. Kada bi se MED povezao sa solarnim bazenom veličine 30 000- 40 000  $m^2$ , moglo bi se proizvesti 100 000 tona pitke vode godišnje što konkuruje konvencionalnim metodama desalinacije. Troškovi se mogu smanjiti povećanjem površine solarnog bazena, no to iziskuje veće troškove ulaganja. Također, neka istraživanja ukazuju na veliko smanjenje troškova kombinacijom toplinskih pumpa sa procesom MED. Korištenjem toplinskih pumpa, postupak hlađenja pare može se izbjeći jer se hlađenje pare postiže unutar kondenzatora pumpe. Ovakva kombinacija dovodi do uštede od 50 % za razliku od konvencionalnih MED metoda, no zahtjeva veće početno ulaganje. Tlak i temperatura u prvom spremniku imaju veći utjecaj na koeficijent proizvodnje destilata nego u ostalim spremnicima. MED postrojenje koje uključuje Rankineov ciklus, kojim se toplina pretvara u mehanički rad, je efikasnije od MED



postrojenja u kojem se kao radni medij koristi vodena para. Integriranjem organskog Rankinova ciklusa sa MED možemo proizvoditi i energiju i vodu. Ovakav postupak zahtjeva veliku površinu solarnih kolektora. Također, ovim postupkom možemo obrađivati vodu visoke koncentracije soli i to s efikasnošću od 40%.

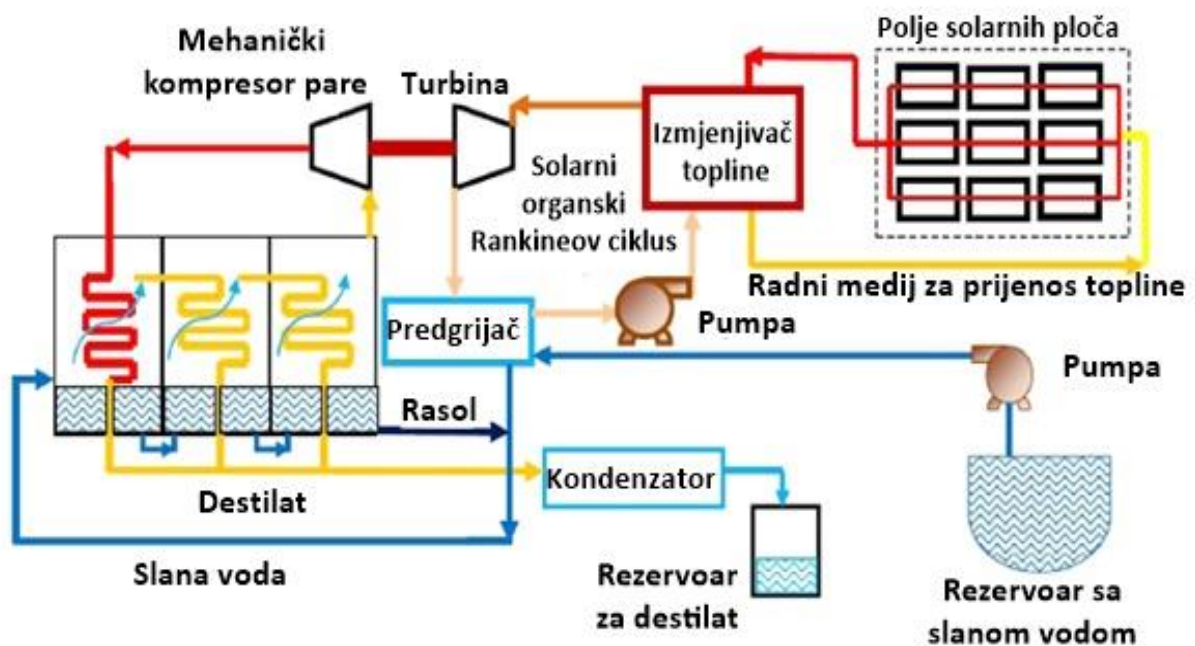


Slika 2.6. Solarna desalinacija višefaznom destilacijom

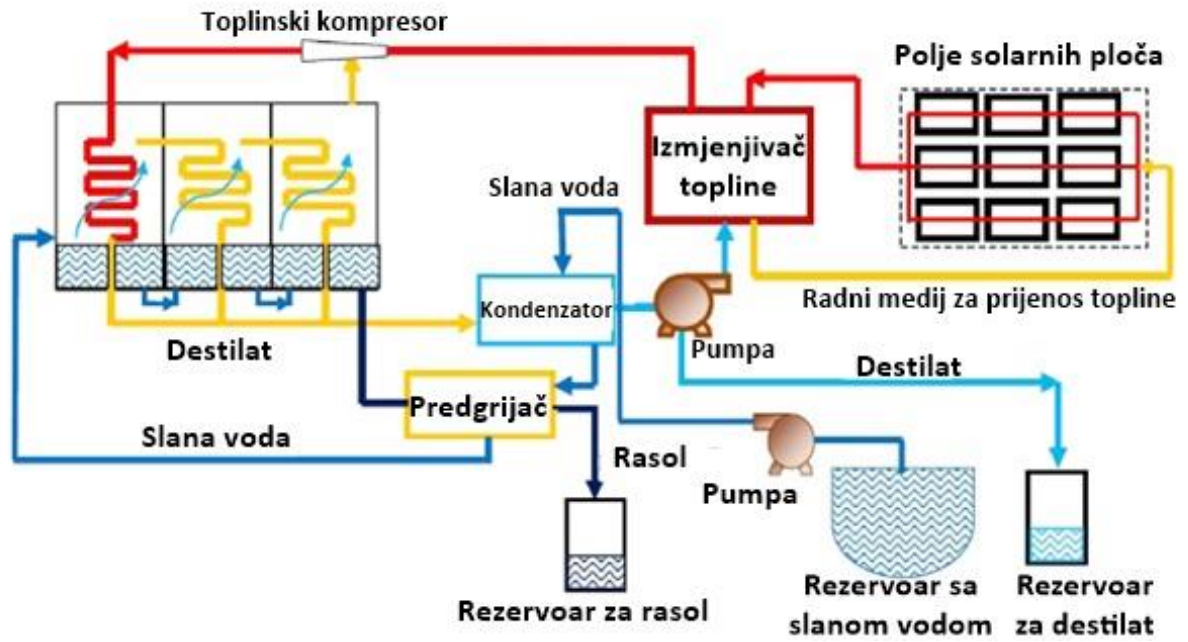
### 2.2.1.3. Kompresija pare (VC)

Kod destilacije kompresijom pare (VC), radni medij zagrijava se vanjskim izvorom topline. Prolazi kroz izmjenjivač topline gdje dolazi do isparavanja medija. Nadalje, medij, najčešće vodena para, odvodi se ili u mehanički ili u toplinski kompresor pare. Kompresorom se povećava tlak i toplina te se takva para koristi za zagrijavanje pojne vode, iste ili druge faze unutar jedne procesne jedinice. Destilacijska jedinica koja sadrži mehanički kompresor pare (MCV), kapaciteta  $120 \text{ m}^3/\text{d}$ , pokreće se na sustav hibridnih fotonaponskih čelija (PV), bez baterije, spojenih na diesel generatore [5]. Ovakav hibridni sustav omogućuje smanjenje emisije  $\text{CO}_2$  u iznosu od 179 tona godišnje no povećava troškove proizvodnje vode. Povećanjem kapaciteta ovakvog postrojenja troškovi postaju prihvatljiviji. Destilacijska

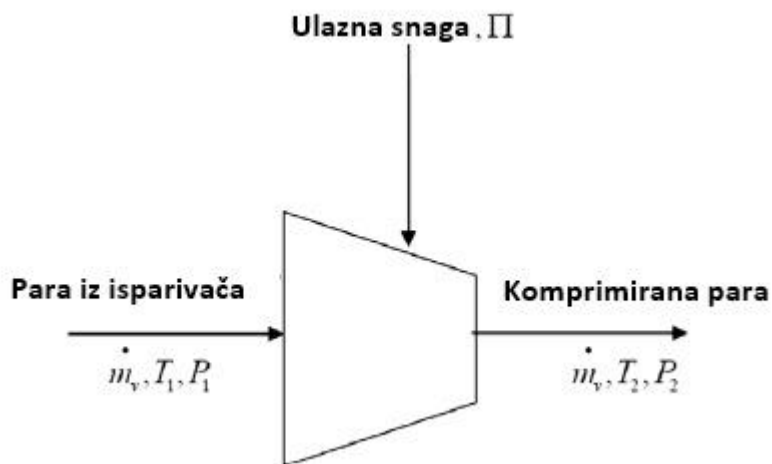
jedinica s mehaničkim kompresorom pare (MCV) može za pogon koristiti hibridne fotonaponske ćelije i vjetar. Takvo postrojenje sadrži MCV, PV, vjetroturbine i spremnike za pohranu. Snaga potrebna za postupak desalinacije dolazi iz hibridnog uređaja, a u slučaju manjka električne energije, sustav dobiva električnu energiju sa vanjske električne mreže. U slučaju viška električne energije, dio energije se skladišti, a dio odvodi u vanjsku električnu mrežu. Ovakav sustav proučavan je na tri lokacije u Maroku. Pogoni kapaciteta većeg od  $120 \text{ m}^3/\text{d}$  definitivno konkuriraju cijenama konvencionalne proizvodnje vode [6]. Specifična potrošnja energije, protok pare, i ukupna cijena proizvodnje vode sustava paralelne višestruke destilacije u kombinaciji s toplinskim kompresorom pare (MED-PF-TVC) manja je od sustava paralelne višestruke destilacije u kombinaciji s mehaničkim kompresorom pare (MED-PF-MVC). GOR (toplinska energije potrebna za dobivanje destilata) je kod MED-PF-TVC veća što znači da je potrebno dovoditi manje količine toplinske energije dakle, potrebni su manji operacijski troškovi. MED-PF-MCV mu konkurira ako sadrži više od 12 faza [7].



Slika 2.7. Kombinacija MED i MCV



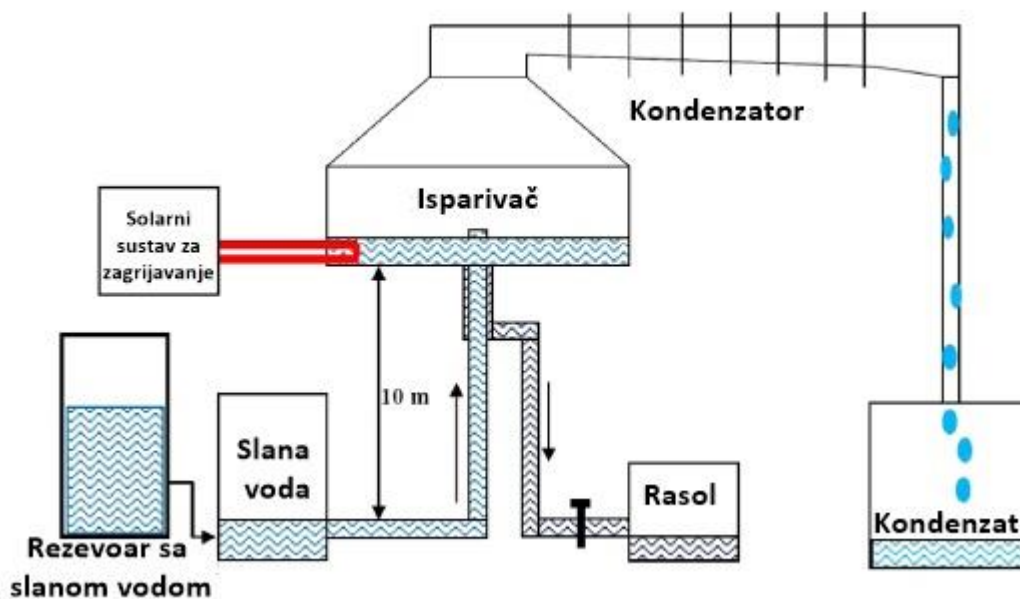
Slika 2.8. Kombinacija MED i TVM



Slika2.9. Bilanca za MCV

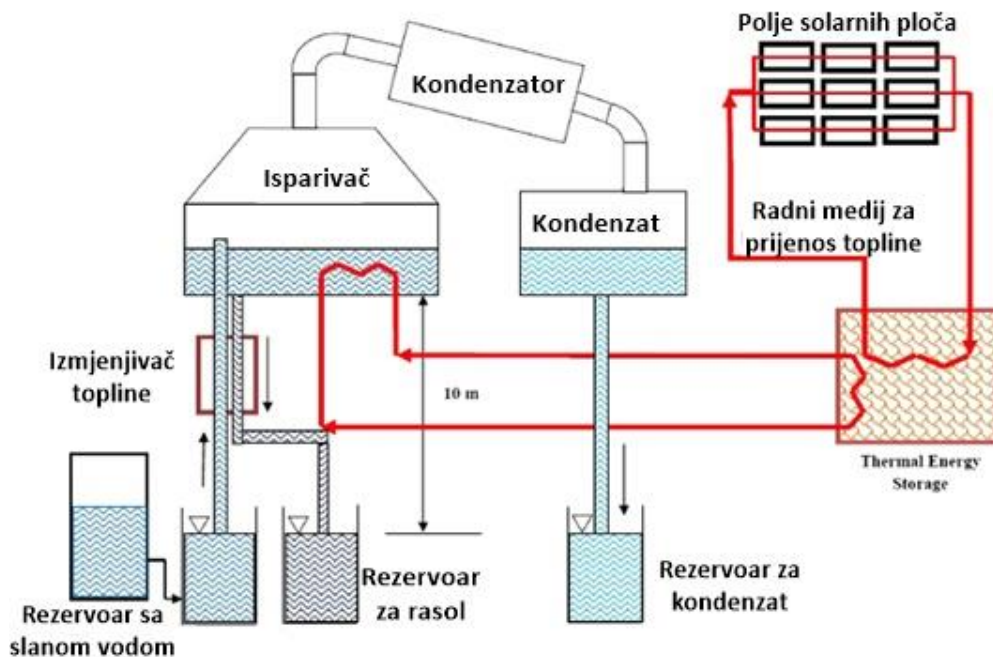
#### 2.2.1.4. Prirodna vakuum desalinacija

Procesi desalinacije mogu se provoditi na manjim temperaturama snižavanjem tlaka. Tlak se snižava vakuum pumpama, čime troškovi proizvodnje vode rastu zbog velike potrošnje energije. Prevelika potrošnja električne energije potrebne za rad pumpi može se smanjiti stvaranjem vakuuma uz pomoć neutralnih sredstava poput gravitacijske energije. Voda pada pod utjecajem gravitacije s više visine na manju, pri čemu se u gornjem prostoru stvara vakuum. Ovakav princip desalinacije prikladan je za manja postrojenja. Al- Karabsheh i Goswami [8] su iznijeli studiju vakumskog sustava za desalinaciju u kojem se vakuum stvara na način da voda pada pod utjecajem gravitacije, a toplina potrebna za sam proces se dobiva iz pločastih kolektora. Sustav se ispiru u intervalima kako bi se uklonili zaostali, nekondenzirajući plinovi. Koeficijent proizvodnje destilata iznosi  $6,5 \text{ kg/m}^3$  u danu.



Slika 2.10. Prirodna vakuum destilacija prema Al- Karabshehu i Goswamiu

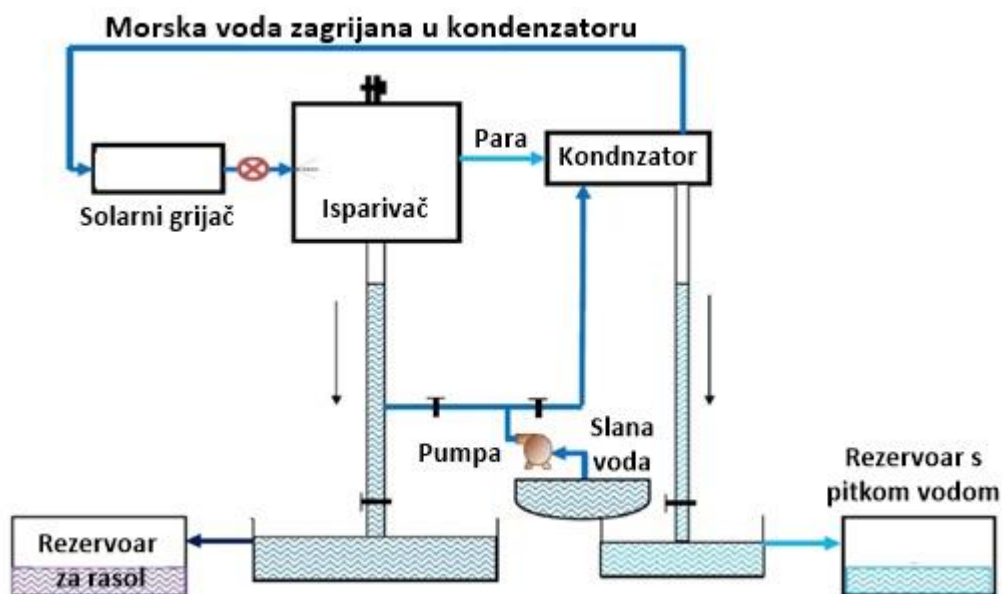
Ovakvim sustavom, ugradnjom spremnika za skladištenje toplinske energije u iznosu  $3 \text{ m}^3$  i solarnih kolektora površine  $18 \text{ m}^2$ , moguće je proizvoditi  $100 \text{ L/d}$  destilata.



**Slika 2.11.** Prirodna vakuum destilacija s ugrađenim spremnikom za pohranu toplinske energije

Maroo i Goswami [9] istraživali su 2 oblika solarne prirodne vakuum desalinacije. Kod jednofazne destilacije nastala para se odvodi u kondenzator gdje se hladi i nastaje destilat.

U slučaju dvofaznog postupka ugušćena smjesa vode i soli iz prve faze odvodi se u drugu fazu gdje se stvara dodatni destilat. Za solarni kolektor površine  $1\text{ m}^2$  ovakav sustav proizvodi 5,54 kg odnosno, 8,66 kg destilata .



**Slika 2.12.** Jednofazna prirodna vakuum destilacija

Kod dvofazne prirodne vakuum destilacije u prvom stupnju para ulazi u izmjenjivač topline, gdje predaje toplinu hladnijem mediju te se kondenzira. Predana toplina koristi se za zagrijavanje pojne vode u drugoj fazi. Para koja nastaje u drugoj fazi također se kondenzira. Troškovi ovakvog postupka iznose 3  $\$/m^3$ . Potrebna toplinska i mehanička energija iznosi oko 1500 MJ/ $m^3$  odnosno, 1 kWh/ $m^3$ [10].

#### **2.2.1.5. Desalinacija smrzavanjem**

Desalinacija smrzavanjem je tehnika u kojoj se slana voda hladi ispod točke smrzavanja, prilikom čega dolazi do stvaranja kristala leda čiste vode, koji plutaju na površini. Postoje izravne i neizravne desalinacije smrzavanjem.

##### **2.2.1.5.1. Izravna desalinacija smrzavanjem**

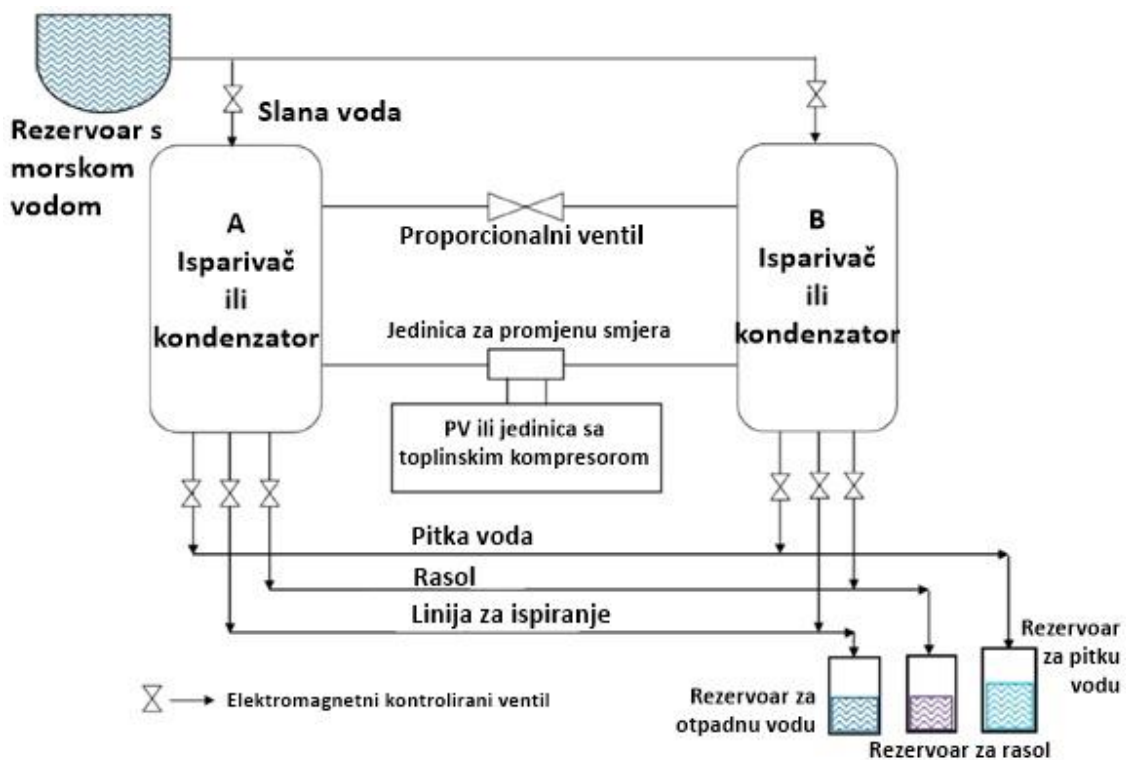
Kada govorimo o izravnoj desalinaciji smrzavanjem, misli se na izravno miješanje rashladne procesne tekućine (najčešće n-butan) s morskom vodom u hladnjaku. Toplina se prenosi sa slane vode na rashladni sustav. Temperatura pada ispod točke leđišta te nastaju kristali leda. Kristali se odvajaju i pročišćavaju kako bi voda bila pitka. Ovakav oblik desalinacije zahtijeva niže tlakove. Korištenje običnih kompresora nije ekonomično za definirane zahvate, što dovodi do razvoja hidrauličkog rashladnog kompresora. Ovakvi kompresori ne koriste ulje za podmazivanje, čime se sprječava onečišćenje kristala leda. Smanjenje veličine postrojenja omogućeno je smanjenjem kvalitete vode, tj. proizvodnjom vode s određenim zaostatom soli. Ovakva voda može se koristiti za navodnjavanje sušnih područja.

##### **2.2.1.5.2. Neizravna desalinacija smrzavanjem**

U neizravnoj desalinaciji smrzavanjem rashladno sredstvo i slana voda nisu pomiješani, tj. razdvojeni su unutar kristalizatora uz pomoć površine za prijenos topline. Kristali leda, koji nastaju unutar kristalizatora, predstavljaju veliki problem. Naime, gotovo ih je nemoguće izdvojiti iz kristalizatora. Stoga je predložena nova metoda neizravne desalinacije kondenzacijom [11] uz pomoć automatske reverzne kompresijske toplinske pumpe koja radi sa R-22 (klordifluormetan -freon 22). Sustav se sastoji od dva spremnika (A i B), ventila za



punjenje spremnika slanom vodom i toplinske pumpe. U prvom ciklusu spremnik A se puni slanom vodom. Toplinska pumpa koristi slanu vodu u spremniku A kao sredstvo za zagrijavanje, a slanu vodu u spremniku B kao sredstvo za hlađenje. U spremniku A nastaje smjesa leda i ugušćene soli. Ugušćena smjesa soli izvodi se iz spremnika otvaranjem ventila. U drugom ciklusu toplinska pumpa koristi slanu vodu u spremniku B kao izvor topline, a led u spremniku A kao sredstvo za hlađenje. U spremniku B tada nastaje također smjesa leda i ugušćene soli. U spremniku A se topi led te ciklus ponovo kreće iznova. Za rad pumpe koristi se solarna energija.

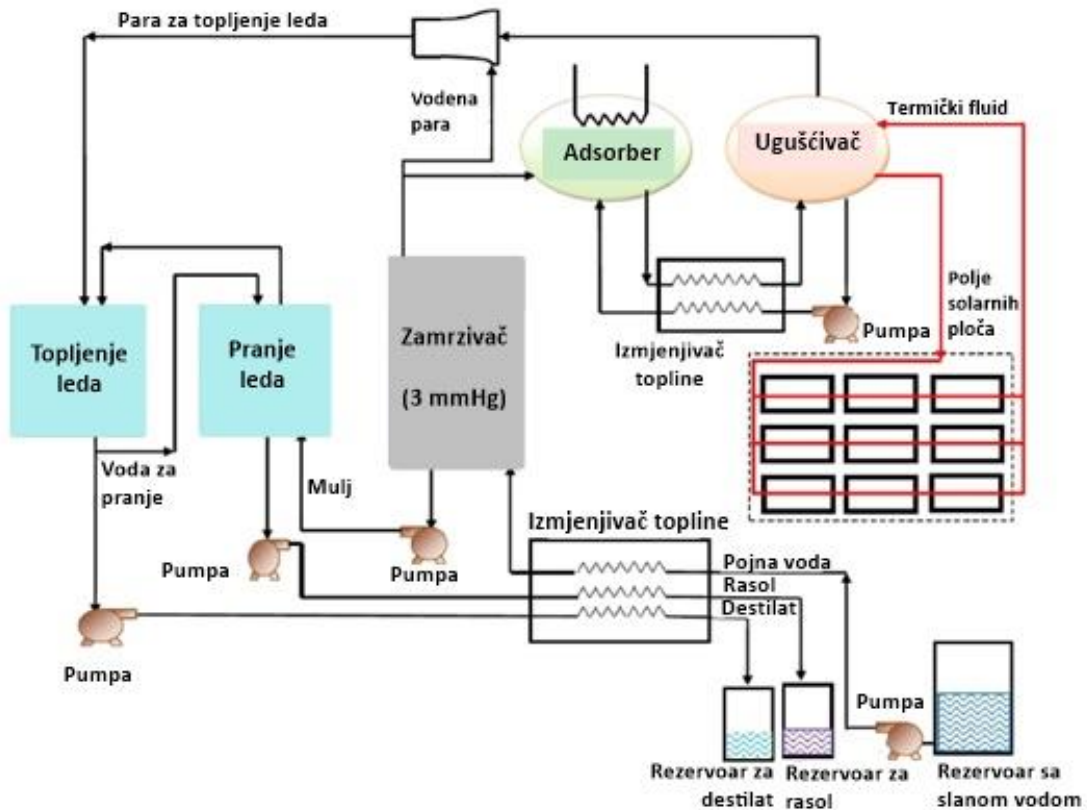


**Slika 2.13.** Indirektna desalinacija smrzavanjem

### 2.2.1.5.3. Vakuum desalinacija smrzavanjem

Prilikom izvođenja vakuum desalinacije smrzavanjem ulazna slana voda se hladi na temperaturu trojne točke (pri sniženom tlaku) kako bi se proizveli kristali leda i vodena para. Vodena para, koja se generira u sustavu, se komprimira i kondenzira u smrznutoj komori, a kristali leda koji nastaju se odvođe iz sustava. Ovakva metoda zahtijeva velike kompresore i veliki volumen vodene pare. Nedostaci ovog procesa mogu se nadoknaditi dodavanjem postupka adsorpcije [12]. Vodena para koja nastaje prolazi kroz adsorber. U adsorberu se kao

adsorbens koristi otopina NaOH. Vodena para veže se za adsorbens, a može se i otpustiti zagrijavanjem otopine. Para koja se otpušta može se koristiti kao pokretačka sila za odvođenje i odleđivanje nastalog leda. Kristali leda ispiru se te se tope istovremeno u odgovarajućim posudama. Početni troškovi uvelike su određeni salinitetom i temperaturom. Također, troškovi ovakvog pogona mogu se umanjiti korištenjem cijevnih (vakumskih) kolektora umjesto pločastih kolektora.



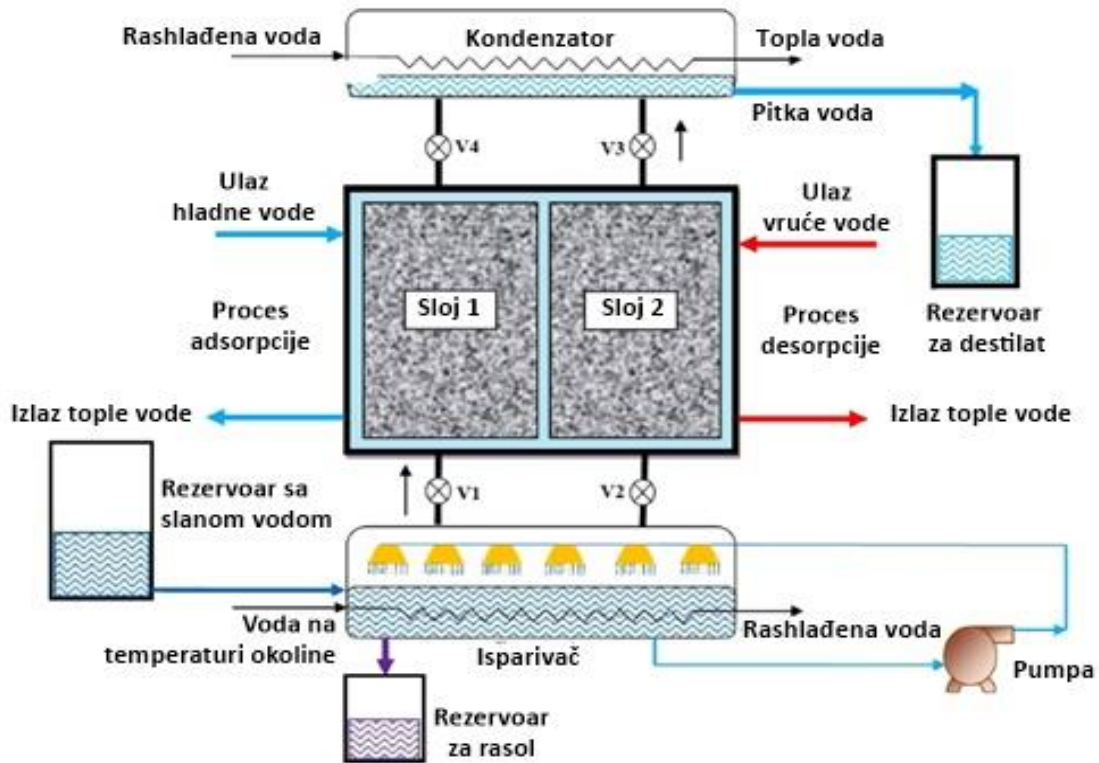
Slika 2.14. Vakuum desalinacija smrzavanjem

### 2.2.1.6. Desalinacija adsorpcijom

Sustav desalinacije adsorpcijom sastoji se od isparivača, adsorpcijskog sloja (silikagel ili cirkonij) i kondenzatora. Ovisno o potrebi, adsorpcijski sloj je ispunjen vrućom ili hladnom vodom. Slana voda zagrijava se i isparava u isparivaču. Vodena para se adsorbira na adsorpcijskom sloju pri nižoj temperaturi koja se postiže cirkulacijom hladne vode. Uхваćena vodena para regenerira se tj. oslobađa propuštanjem vruće vode unutar adsorpcijskog sloja. Potom vodena para odlazi u kondenzator gdje se kondenzira. Dobiva se voda vrlo visoke



kvalitete zbog provođenja dvostruke destilacije. Kod sustava desalinacije s dvostrukim adsorpcijskim slojem, istovremeno se odvija adsorpcija u jednom, a desorpcija u drugom adsorpcijskom sloju.



Slika 2.15. Desalinacija adsorpcijom

Temperatura rashladne i vruće vode te silikagel, koji se koristi za adsorpciju, vrlo su bitni faktori kod određivanja koeficijenta proizvodnje vode.

Ova metoda može se kombinirati zajedno sa solarnim metodama te višestrukom destilacijom (MED) [13]. Sustav se sastoji od dva adsorpcijska sloja, koji sadrže zeolit kao adsorbens. Toplina potrebna za rad adsorpcijskog sloja dolazi iz paraboličnih kolektora. Tijekom prvog ciklusa temperatura prvog adsorpcijskog sloja iznosi 120 °C, a temperatura drugog 195 °C. Prilikom provođenja drugog ciklusa temperature oba adsorpcijskog sloja bit će zamijenjene promjenom smjera toka vruće vode. Vodena para, unutar adsorpcijskog sustava, adsorbira se u adsorbensu (zeolitu) niže temperature, a otpušta se desorpcijom u drugom adsorpcijskom sloju. Adsorpcija i desorpcija omogućene su propuštanjem radnog medija različitih temperatura. Adsorpcija se odvija uz hladniji radni medij, a desorpcija uz pomoć vrućeg radnog medija. Vodena para, koja se oslobađa u procesu desorpcije, koristi se

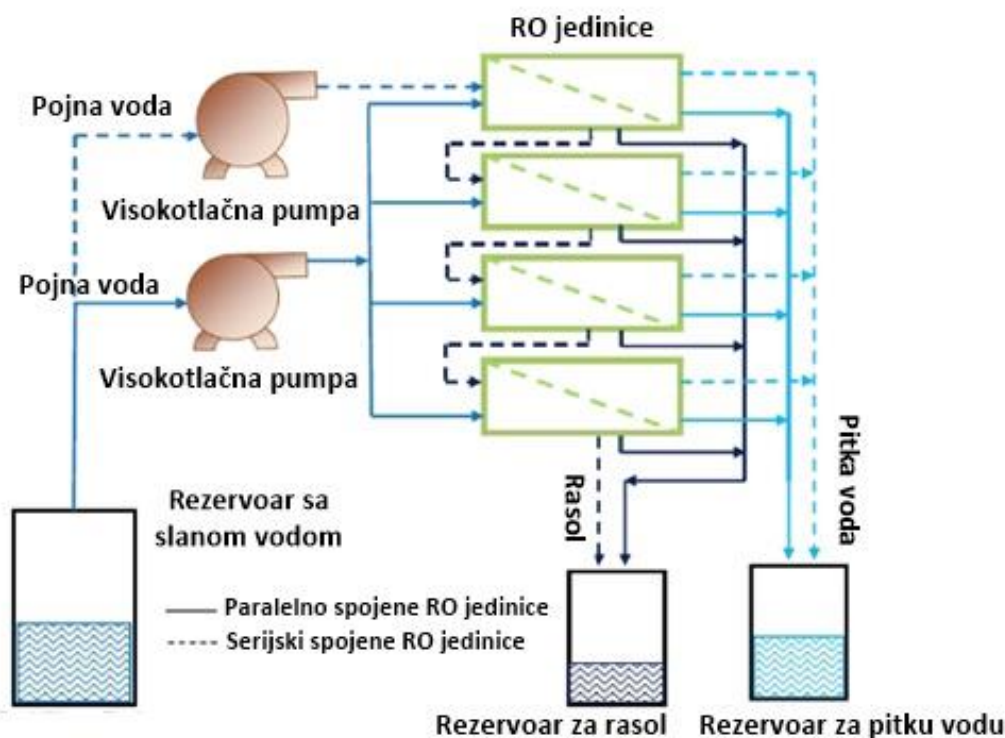
za zagrijavanje sustava za višestruku destilaciju, u ovom slučaju trostruku destilaciju. Slana voda na ulazu u sustav za destilaciju je pregrijana i temperatura joj iznosi oko 70 °C. Pregrijava se uz pomoć radnog medija koji dolazi iz paraboličnih kolektora. Unutar sustava za višestruku destilaciju prikuplja se kondenzat tj. proizvedena pitka voda.

### **2.2.2. Membranske metode**

U membranskim procesima, pitka voda se dobiva iz slane vode prijelazom molekula vode (slučaj reverzne osmoze) ili iona (slučaj elektrodijalize) kroz membrane uz pomoć visokog tlaka, većeg od osmotskog, ili uz pomoć električnog potencijala. Salinitet vode predstavlja veliku ulogu kod ovakvih procesa. U nastavku su opisane različite vrste membrana na solarno napajanje.

#### **2.2.2.1. Desalinacija reverznom osmozom na solarno napajanje**

Reverzna osmoza (RO) je postupak desalinacije uz pomoć visokog tlaka kojim se omogućuje prolazak molekula vode kroz različite membrane. Potrebni su tlakovi veći od osmotskog tlaka kako bi cijeli postupak bio moguć. Pitka voda se sakuplja, a zaostala ugušćena slana voda (koncentrat, retentat) se ispušta u prijemnik. Konverzija morske vode u pitku kreće se od 25 do 45%, rijetko do 60%. Ako se radi o manje slanoj vodi (bočatoj), tada je moguće dobiti 80% pitke vode od ulazne količine slane vode. Potrebna energija za postizanje visokih tlakova te energija za samo provođenje postupka reverzne osmoze ovisi o tipu membrana i salinitetu pojne smjese. RO jedinice mogu biti povezane serijski ili paralelno (sl. 2.16.). Glavne komponente sustava za RO desalinaciju su membrane, visokotlačne pumpe, izvor energije i sustav za rekuperaciju energije.



Slika 2.16. Serijsko i paralelno spajanje RO jedinica

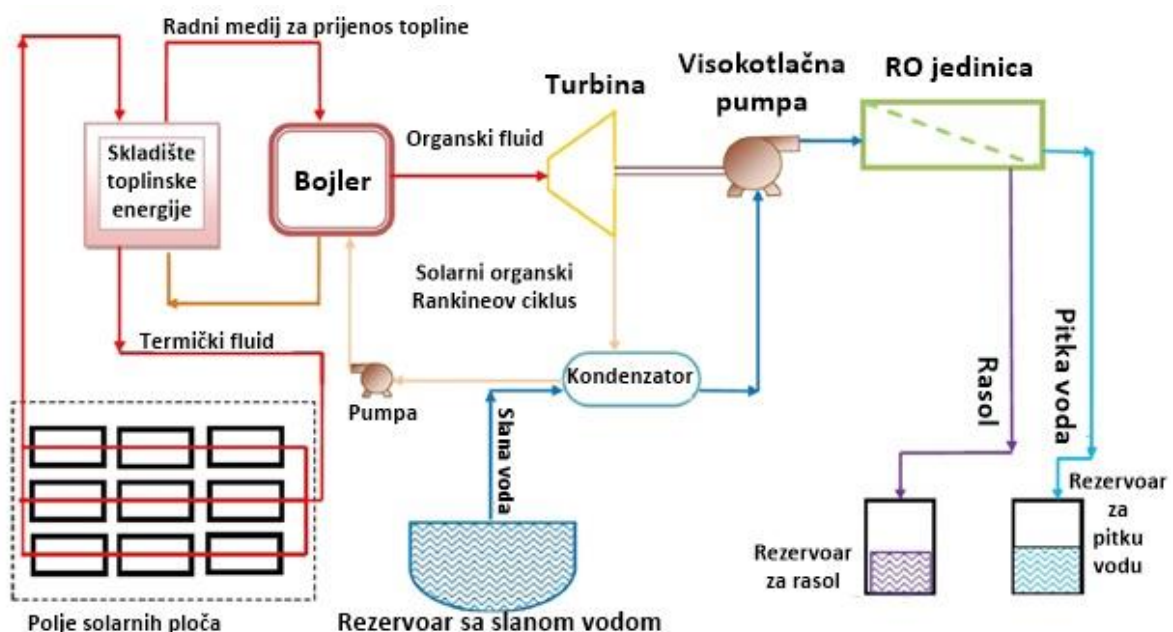
### 2.2.2.1.1. Desalinacija RO uz fotonaponske ćelije (PV)

Energija potrebna za provođenje RO desalinacije dolazi od fotonaponskih ćelija. Sustav može funkcionirati s baterijama ili bez njih. Također, ovakav sustav ima bolje socio-ekonomske i ekološke prednosti u odnosu na prethodno korišteni diesel generator. Unutar fotonaponskih ćelija istosmjerna struja odlazi u pretvarač u kojem nastaje izmjenična struja koja se koristi za pogon pumpi. Postoje i izvedbe u kojima se fotonaponske ćelije povezuju s motorom koji radi na istosmjernu struju te pokreće niskotlačne pumpe. Baterije se dodaju sustavu kako bi se mogla skladištiti energija proizvedena iz fotonaponskih ćelija tijekom noći. Peterson je već 1979. demonstrirao rad postrojenja za desalinaciju solarnom energijom povezanog sa fotonaponskim ćelijama kapaciteta  $1,5 \text{ m}^3/\text{d}$  u sjevernom djelu Meksika [14]. Proizvodnja pitke vode ovisi o salinitetu pojne smjese i može se povećati povećanjem radnog tlaka. Procijenjeno je da se otprilike  $55 \text{ mil. m}^3$  prirodnog plina može sačuvati ako se postrojenja za višefaznu destilaciju, koja se pogone konvencionalnim izvorima energije, zamijene ovim načinom. Prema nekim istraživanjima na Srednjem istoku, znanstvenici su utvrdili da je RO desalinacija povezana s fotonaponskim ćelijama, kapaciteta  $5 \text{ m}^3/\text{d}$  s životnim ciklusom od 20 godina, ekonomski isplativija od postrojenja u kojima se tlakovi kod

RO procesa potiču iz diesel motora [15]. Troškovi proizvodnje pitke vode za postrojenja koja koriste konvencionalne izvore iznosili su 8,68 \$ te 6,52 \$ za postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije. Možemo primijetiti da isplativost takvih postrojenja uvelike ovisi o klimatskim uvjetima određenih prostora te već spomenutom salinitetu pojne smjese. Kod RO desalinacije sa PV ćelijama potrošnja električne energije i troškovi proizvodnje vode ovise o vrsti membrana koje se koriste, a efikasnost čitavog sustava ovisi i o salinitetu vode. Sama efikasnost ovakvih postrojenja ovisi i o efikasnosti procesne opreme koja se koristi. Troškovi se mogu sniziti korištenjem visoko učinkovitih PV ćelija, membrana dugog životnog vijeka te ostalih dijelova. Iako su se cijene PV ćelija znatno snizile, investicijski troškovi su i dalje visoki te su ujedno potrebne velike površine. Sumarno, ovakva postrojenja najisplativija su za male proizvodnje pitke vode.

### 2.2.2.1.2. RO desalinacija uz solarni toplinski pogon

Organski Rankineov ciklus (ili Clausius-Rankineov proces) je termodinamički kružni proces koji ulaznu toplinu pretvara u mehanički rad, a pritom kao radni medij koristi neki organski fluid. Dobiveni rad se direktno koristi za pokretanje visokotlačne pumpe.



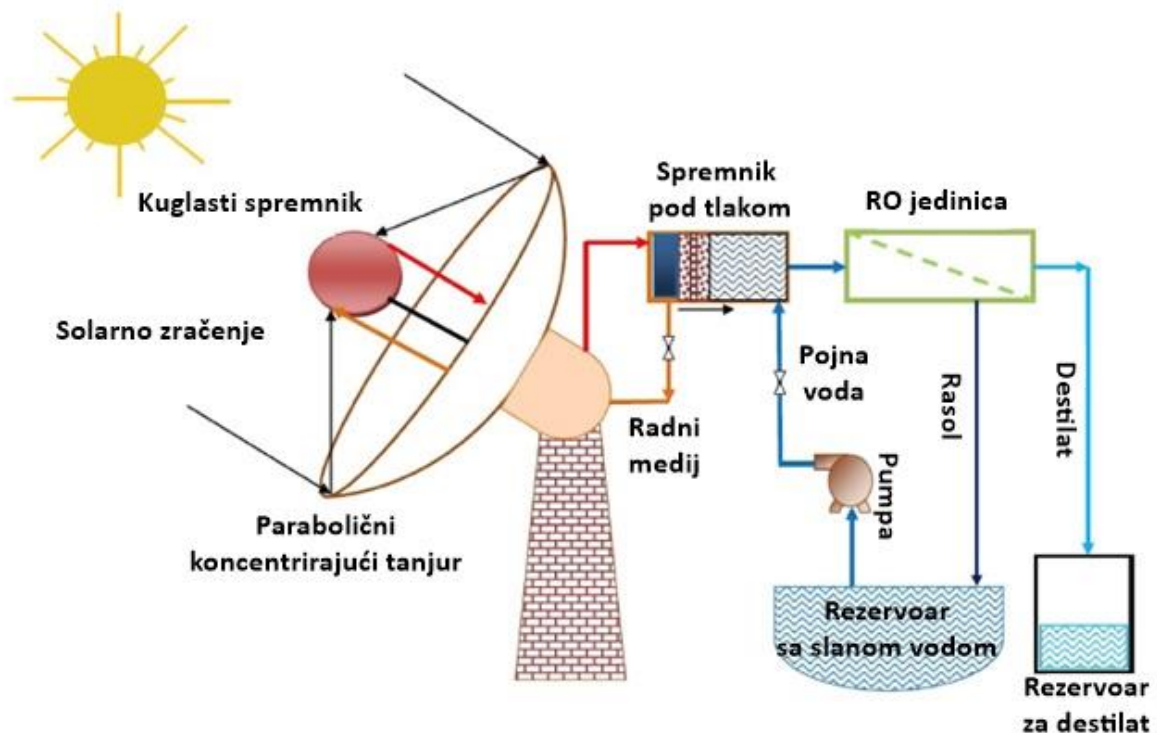
Slika 2.17. Solarni organski Rankineov ciklus za pokretanje RO jedinica

Spajanjem RO jedinica sa Rankineovim ciklusom znatno se reduciraju emisije  $CO_2$  u okoliš. Postoje izvedbe Rankineova ciklusa uz razne radne medije. Niskotemperaturni solarni Rankineov ciklus koristi R-134a (1,1,1,2-tetrafluoretan). Tim procesom možemo proizvesti oko  $1012 m^3/\text{god}$  pitke vode uz specifičnu energetska potrošnju u iznosu od  $2,5 \text{ kWh}/m^3$  [16]. Teoretska razmatranja uzimaju u obzir i pregrijavanje pojne smjese. Pregrijavanje uzrokuje samo malo povećanje faktora proizvodnje pitke vode kada se kao radni medij koristi toluen. Korištenjem oktametilciklotetrasiloksana (D4) ili heksametildisiloksana, faktor proizvodnje pitke vode povećava se još neznatnije [17]. Nadalje, faktor proizvodnje može se povećati izvedbom kaskada solarnog organskog Rankineovog ciklusa uz RO. Sustav je analiziran za radne fluide toluen i heksametildisiloksan kao radne medije gornjeg ciklusa i izopentan kao radni medij donjeg ciklusa. Rad koji se dobiva u gornjem ciklusu koristi se za pokretanje visokotlačnih pumpi, a rad u donjem ciklusu za pomoćna sredstva. Također, toplina odbačena u donjem ciklusu koristi se za pregrijavanje pojne smjese.

Najveća učinkovitost može se uočiti kod radnih medija s visokim kritičnim temperaturama. Što se tiče kolektora, parabolični kolektori unutar ovog sustava daju najbolje rezultate. Troškovi RO sustava s PV viši su od sustava RO sa solarnim Rankineovim ciklusom. Uvođenjem rekuperacijske jedinice kao npr. Pelton turbine ili izmjenjivača tlaka, troškovi proizvodnje pitke vode umanjeni su za čak 24-24,2% za razliku od sustava bez rekuperacije. Povećanje faktora proizvodnje pregrijavanjem, odbačenom toplinom iz kondenzatora ili Rankineova ciklusa, neznatno je, 2%. Na otoku Halki korišteni su parabolični kolektori i radni medij R-134a. PV se koristi za dobivanje električne energije koja se koristi za pokretanje pumpa koje pokreću radni medij. Rad proizveden turbinom se koristi za pokretanje visokotlačnih pumpi za RO. U takvom pogonu proizvede se  $83\,000 m^3/\text{god}$  pitke vode. Troškovi proizvodnje iznose  $13,63 \text{ \$/m}^3$ , a mogu se smanjiti subvencijom do  $8,74 \text{ \$/m}^3$  [19].

Različite izvedbe RO-ORC sustava zapravo se razlikuju po odabiru radnog medija (butan, heksan, toluen..), odabiru solarne metode (spoj paraboličnih kolektora, pločasti kolektori..). Prilikom proučavanja, u svrhu usporedbe učinkovitosti sve varijante testirane su pod istim okolnostima (pregrijani medij, zasićenost..) i uspoređene su s rezultatima procesa vode kao radnog medija. Parabolični kolektori pokazali su se prikladnijima od pločastih za ORC. Najbolje dobivena snaga zabilježena je za toluen i vodu uz istovremene niže troškove. Površine solarnih ploča potrebne za kaskade RO-ORC 23% su veće od površina potrebnih za RO-ORC s regeneracijom i pregrijavanjem. Proces spajanja RO-ORC pokazao se povoljnijim od višestruke destilacija (MED) povezane s paraboličnim reflektorima.

Postoji Rankineov ciklus koji koristi dva klipa povezana ručicom. Para ekspandira, gura klip koji zatim uzrokuje pomak drugog klipa. Drugi klip zapravo istiskuje vodu kroz membranu, dok ugušćena smjesa soli zaostaje. Iz vode saliniteta 5000 ppm, moguća je proizvodnja pitke vode u iznosu od 620 L/(dan  $m^2$ ) uz parabolični kolektor te 350 L/(dan  $m^2$ ) uz pločasti kolektor [21]. Kombinacija RO s koncentrirajućim tanjurom sadrži sferičan spremnik čije je žarište povezano s tlačnim spremnikom dalje spojenim na RO jedinicu. Koncentrirajućim tanjur usmjerava sunčevo elektromagnetno zračenje na sferičan spremnik, gdje dolazi do isparavanja radnog medija. Dolazi do povećanja tlaka na ulazu u tlačni spremnik. Povećanjem tlaka, pomiče se klip unutar tlačnog spremnika koji uzrokuje prolazak vode kroz membrane te nastanak pitke vode.



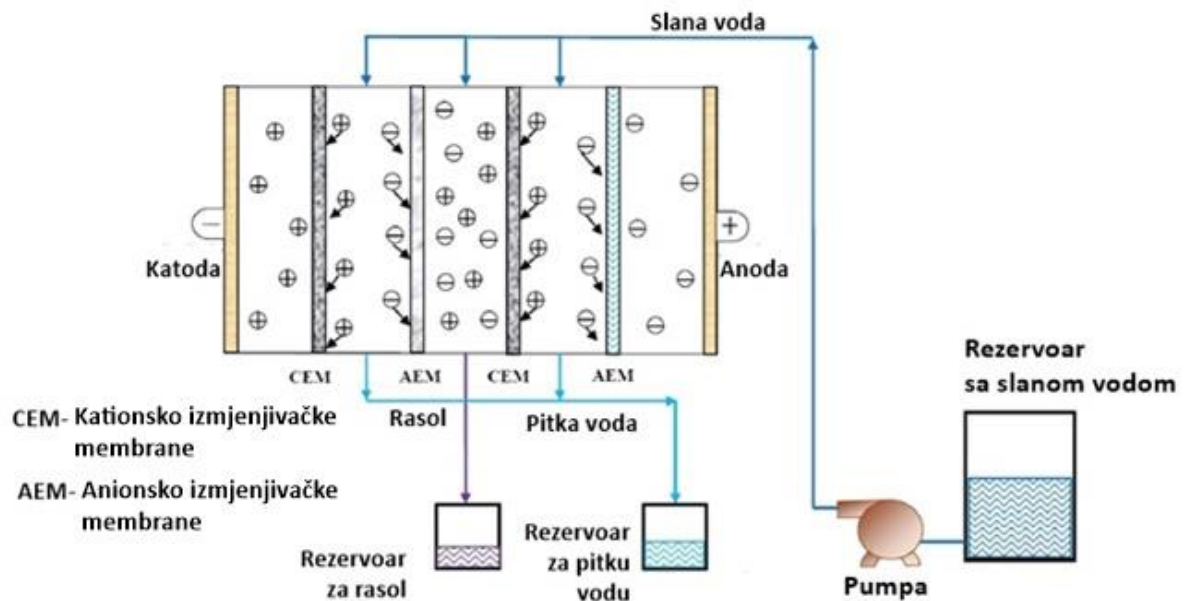
**Slika 2.18.** RO u kombinaciji sa koncentrirajućim tanjurom

Solarni ORC-RO ima potencijal za zamjenu MED jedinice.

### 2.2.2.2. Solarna desalinacija elektrodijalizom

Elektrodijaliza (ED) je proces uklanjanja iona iz slane vode. ED jedinice sadrže veliki broj odjeljaka ispunjenih slanom vodom. Proces uklanjanja iona odvija se uz pomoć

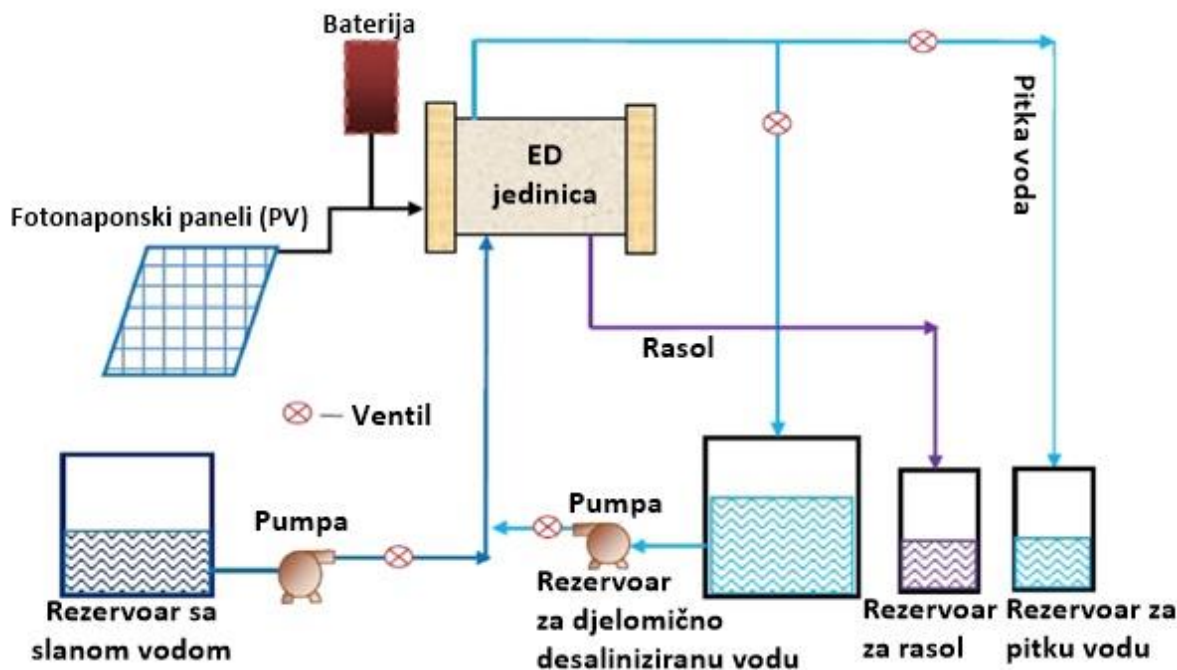
kationskih i anionskih izmjenjivačkih membrana. Istosmjerna struja se propušta kroz anodu i katodu pri čemu negativni ioni prolaze kroz anionsku izmjenjivačku membranu, a pozitivni ioni kroz kationsku izmjenjivačku membranu te se akumuliraju u posebnom odjeljku u obliku ugušćene pojne smjese i prazne van. Promjena smjera istosmjerne struje provodi se svakih 20 min kako bi se spriječilo razlaganje soli unutar membrana. ED se često koristi u RO postrojenjima za zbrinjavanje ugušćene pojne smjese [22] [23]. Faktor uklanjanja soli za podzemne vode uz ED iznosi oko 95-99%.



**Slika 2.19.** Desalinacija elektrodijalizom

Jedan od načina povezivanja ovakve metode s solarnim metodom je ED u kombinaciji sa PV. Za vrijeme jake solarne radijacije, velike količine oslobođene električne energije koriste se za djelomičnu desalinaciju morske vode. Djelomično desalinirana voda se, za vrijeme slabije solarne radijacije, desalinira u pitku vodu. Ovakvim sustavom znatno se reduciraju kapaciteti baterija.

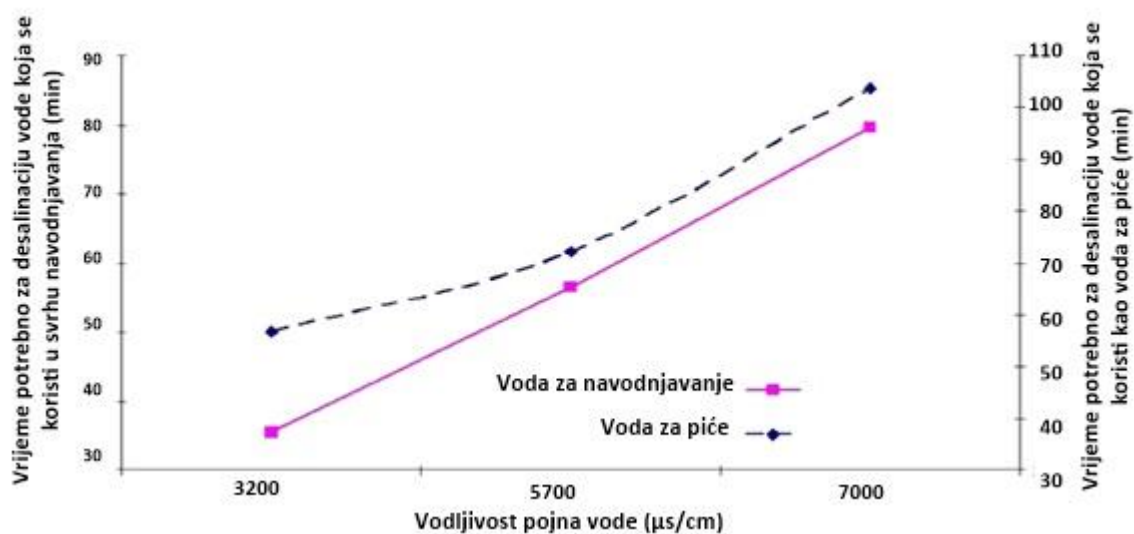




Slika 2.20. Sustav PV-ED

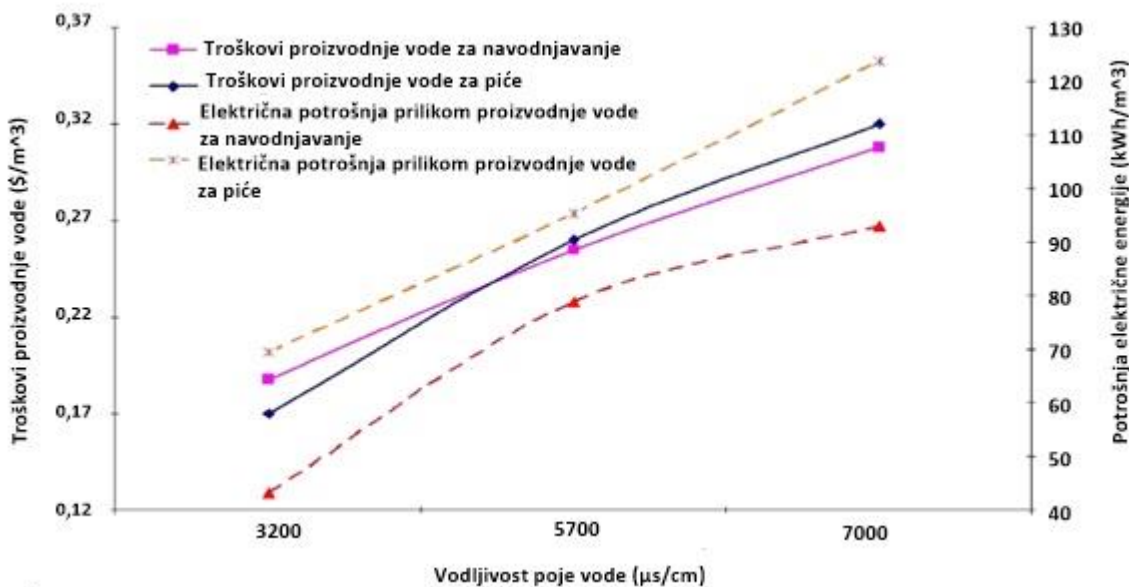
PV-ED desalinacijski sustavi bez baterija testirani su u Indiji, Thar Desert i pokazali su se pogodnima za ruralna i udaljena područja. Ovim sustavom proizvodila se pitka voda za lokalno stanovništvo [24].

Kao i kod drugih metoda, salinitet pojne smjese utječe na vrijeme potrebno za desalinaciju, proizvodnju pitke vode, troškove i potrebnu električnu energiju što se jasno može iščitati iz grafova na slikama 2.21. i 2.22. [25].



Slika 2.21. Ovisnost saliniteta ( vodljivost) o vremenu proizvodnje vode za navodnjavanje i vode za piće

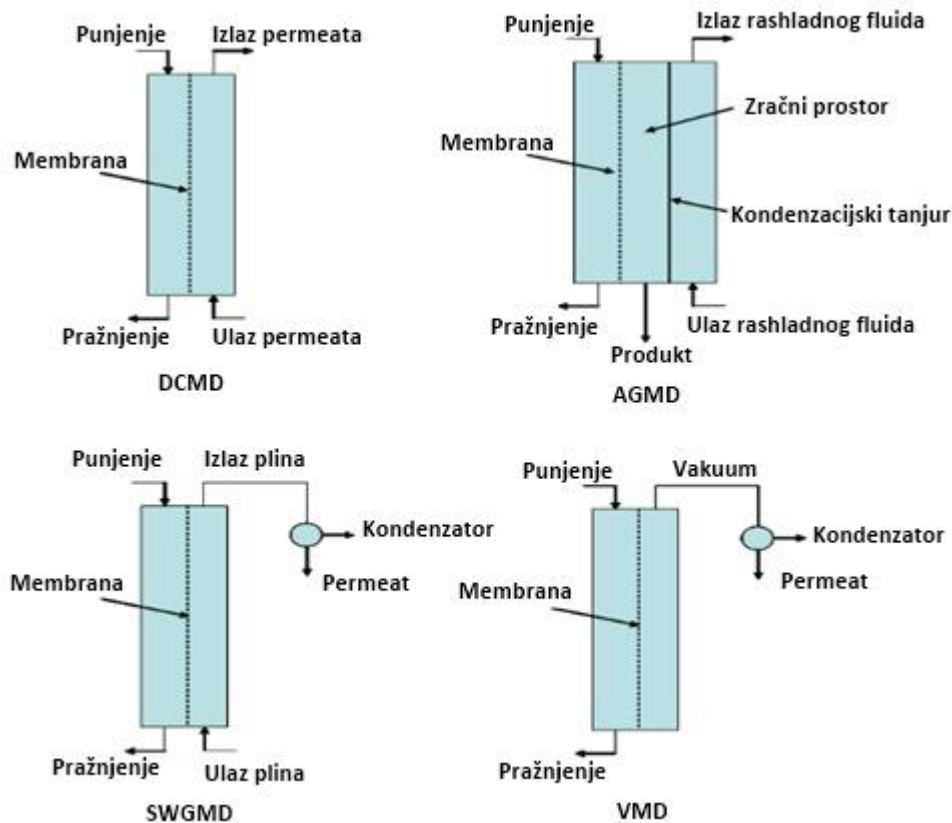




**Slika 2.22.** Ovisnost saliniteta (vodljivosti) o troškovima proizvodnje i potrebnoj količini električne energije

### 2.2.2.3. Solarna desalinacija membranskom destilacijom (MD)

Membranska destilacija je proces separacije u kojem samo vodena para može proći kroz poroznu hidrofobnu membranu. Separacija je moguća zbog razlike u tlakovima s obje strane membrane. Postoje 4 tipa membranske destilacije: MD uz zračni prostor (AGMD), MD uz plin za ispiranje (SWGMD), destilacija izravnim kontaktom s membranom (DCMD), vakuumska membranska destilacija (VMD). U svim navedenim metodama MD, vruća pojna smjesa je u direktnom dodiru s membranom. Kod DCMD, vruća pojna smjesa i permeat su u direktnom dodiru s membranom. Kondenzacija vodene pare odvija se unutar membrane. Dolazi do gubitaka topline kondukcijom. Kod AGMD postoji zračni prostor između kondenzata i membrane. Kondenzacija se odvija na kondenzacijskom tanjuru nakon što vodena para prijeđe zračni prostor. Ovakvim načinom smanjuje se gubitak topline kondukcijom, no dolazi do povećanja otpora prijenosa tvari zbog prisustva zraka. Kod SWGMD se koristi dodatni plin koji služi za čišćenje pare sa strane membrane gdje se nalazi permeat. Kondenzacija se odvija izvan membrane. Smanjeni su gubici kondukcijom te je poboljšán prijenos tvari. Kod VMD stvara se vakuum na strani membrane gdje se nalazi permeat. Također, kondenzacija se odvija izvan membrane. Neznatni su gubici topline kondukcijom. Na slici 2.23. prikazana su sva 4 načina MD.



Slika 2.23. Vrste MD

Membrane koje se koriste za MD moraju biti hidrofobne, visoko porozne te moraju imati nisku toplinsku vodljivost. Tok permeata povećava se povećanjem veličine pora i smanjenjem debljine membrane. Radni parametri kao temperatura pojne smjese, protok, debljina zračnog prostora, debljina membrane, toplinska vodljivost, poroznost, zakrivljenost utječu na količinu nastanka destilata [26]. Membranska poroznost se računa prema:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_M}{\rho_{pol}} (\rho_M - \rho_{pol}) \quad (4)$$

gdje je  $\rho_M$  – gustoća membrane  $\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_{pol}$  – gustoća polimernog materijala ( $\text{kg/m}^3$ ). Zavojitost membrane dana je izrazom:

$$\tau = \frac{(2-\varepsilon)^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

gdje je  $\varepsilon$ - poroznost membrane.

Maseni tok kod DCMD glasi:

$$J_w = \frac{1}{P_{air}} * \frac{\varepsilon}{\tau * \delta} * \frac{DPM_w}{RT} * \Delta P \quad (6)$$

gdje je  $P_{air}$  - tlak zraka unutar pora membrana (Pa) , P- ukupni tlak (Pa), D- koeficijent difuzije ( $m^2/s$ ) ,  $\delta$ - debljina membrane (m) ,  $M_w$ - molekularna težina vodene pare (kg/mol kg).

Maseni tok kod AGMD glasi:

$$J_w = \frac{PM_w}{RT P^*} \left( \frac{D}{\left( \frac{\delta}{\varepsilon^{3,6}} \right) + 1} \right) * \Delta P \quad (7)$$

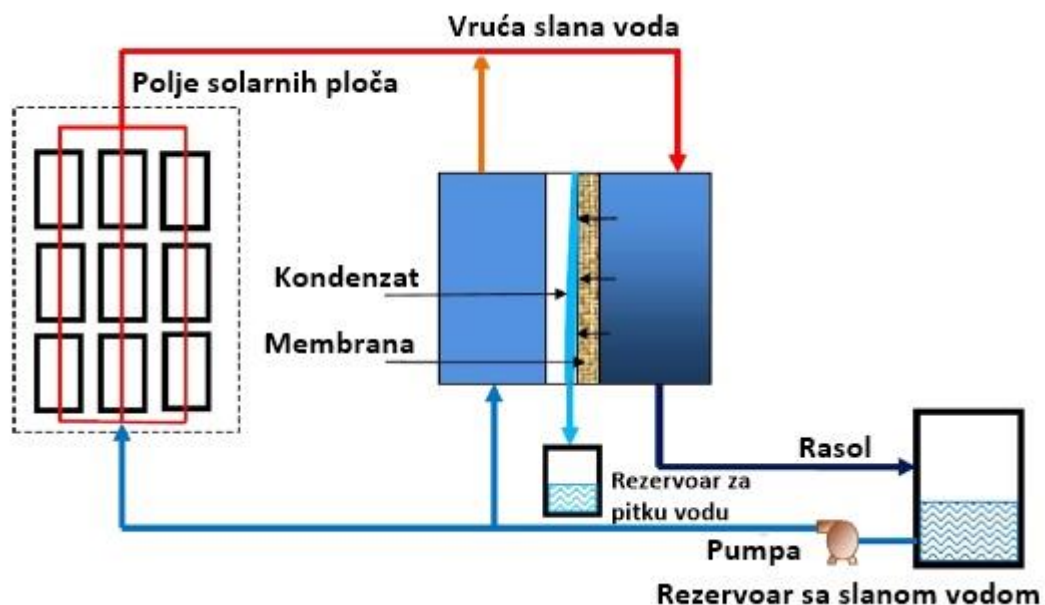
gdje je  $P^*$  - parcijalni tlak vode (Pa).

Maseni tok kod VMD glasi

$$J_w = \frac{\pi}{RT\tau\delta} * \left[ \frac{2}{3} * \left( \frac{8RT}{\pi M_w} \right)^{\frac{1}{2}} * r^3 + \frac{r^4}{8\mu} * P_{avg} \right] * \Delta P \quad (8)$$

gdje je r- radijus pore (m) ,  $\mu$ - dinamička viskoznost vodene pare ( $Ns/m^2$ ) ,  $P_{avg}$ - prosječni tlak u porama (Pa). Maseni tok za SGMD može se izračunati iz formule za DCMD.

Postoje brojna eksperimentalna i numerička istraživanja o povezivanju membranske destilacije sa solarnim metodama.



**Slika 2.24.** Kombinacija solarnih metoda i MD

Povećanjem efektivne površine membrane, uz konstantni protok te konstantnu temperaturu pojne smjese, povećava se koeficijent proizvodnje pitke vode i rekuperacija topline [27]. Uspoređujući troškove MD može se uočiti da proizvodnja pitke vode različitim solarnim metodama povezanim s DCMD zahtjeva najmanje troškove, zatim proizvodnja uz VMD, a

najveće troškove iziskuje proizvodnja pitke vode uz AGMD. Cijene su redom iznosile 12,7  $\$/m^3$ , 16,02  $\$/m^3$  te 18,26  $\$/m^3$  [28]. Višefazna destilacija, povećanje duljine efektivne membrane, smanjenje širine zračnog prostora i dubine dovodnog kanala, može podosta smanjiti troškove AGMD procesa.

U membranskim procesima koriste se različite vrste membranskih modula; membranski moduli na principu filter preše, membranski moduli sa šupljikavim vlakancima, tzv. "hollow fiber", cijevni, te spiralni membranski moduli. Slijedi tablica s karakteristikama pojedinog membranskog modula (Tablica 2.1.).

Membranski moduli	Izgled	Gustoća pakiranja	Održavanje	Sklonost začepljivanju
Princip filter preše	načinjen je od dvije ravne membrane i prikladnog razdjelnika (obično od tvrde plastike) koji se u obliku ploče slažu kao sendvič	mala	lako čistiti i održavati	-
" hollow fiber "	sastoji se od šupljih vlakana smještenih u tlačnoj posudi, pojna voda prolazi kroz snop vlakana, a permeat izlazi na čeonim stranama tlačne posude	vrlo velika	teško čistiti i održavati	velika
cijevni	cjevaste membrane umetnute između dvije cilindrične komore	mala	lako za čišćenje	mala
spiralni	sastoji se od ravnih membrana međusobno odvojenih poroznim nestlačivim materijalom; obično je po nekoliko parova membrana spiralno namotano oko centralne cijevi (cijevi za odvod permeata)	velika	-	prosječna

**Tablica 2.1.** Vrste membrana kod MD

Jedan od načina povezivanja solarnih metoda s membranskom destilacijom jest povezivanje solarne posude s MD. Moguće vrste membranskih modula u ovom slučaju su moduli sastavljeni od šupljih vlakana ili cijevni moduli. Zagrijana, ugušćena smjesa iz solarne posude se koristi kao kao pojna voda u MD jedinici. Koeficijent proizvodnje pitke vode se povećava ukoliko povećavamo temperaturu i protok pojne vode.

Potrošnja energije i troškovi proizvodnje pitke vode za različite metode MD variraju između 1-9000 kWh/ $m^3$ , a troškovi od 0,3- 130  $\$/m^3$ . Još uvijek su troškovi predtretmana

vode i zamjene membrana veliki. Troškovi proizvodnje pitke vode uz MD mogu se sniziti korištenjem solarne energije. Solarna desalinacija uz MD još uvijek je neusporediva s ostalim toplinskim desalinijskim tehnologijama. Može se koristiti u kombinaciji s ostalim tehnologijama za desalinaciju ugušćene smjese. Tako je predložena membranska višestruka destilacija povezana s visoko koncentracijskim fotonaponskim ćelijama. Ovakvim načinom smanjuju se gubitci topline. Toplina se prenosi na rashladnu vodu i pritom održava potrebite uvjete, dok istovremeno omogućava rekuperaciju topline. Uz rekuperaciju, troškovi ovakvog sustava opadaju. Koeficijent proizvodnje vode može se povećati povećanjem efektivne površine membrana ili smanjenjem protoka.

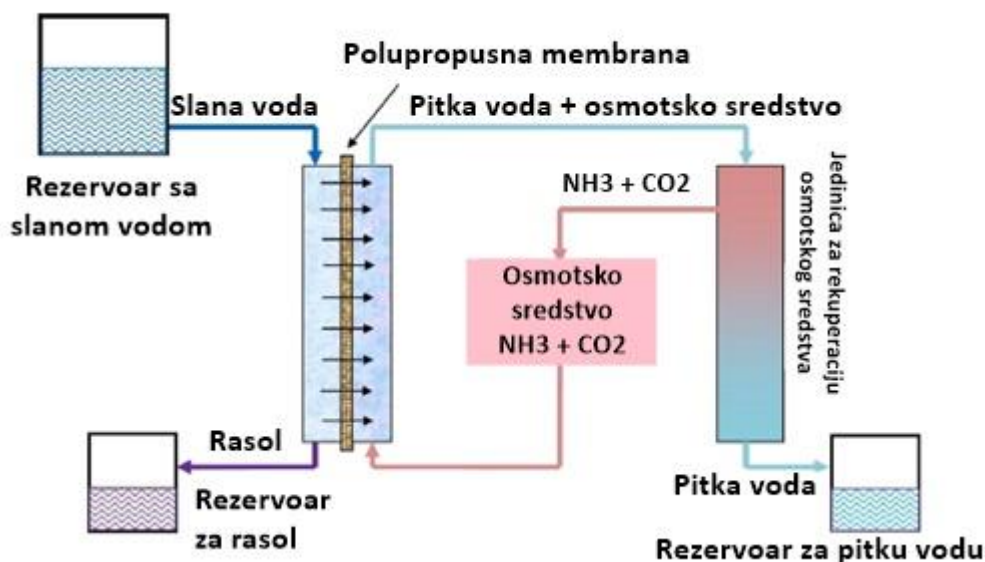
#### 2.2.2.4. Solarna desalinacija naprednom osmozom (NO)

Napredna osmoza (NO) je proces u kojem molekule vode, iz slane vode, prolaze kroz polupropusnu membranu prema osmotskom sredstvu. Osmotsko sredstvo koristi se kako bismo održali koncentracijski gradijent, tj. osmotski tlak. Drugim riječima, ono se koristi kako bi se održala viša koncentracije s druge strane membrane od koncentracije u pojnoj kapljevini. Upravo iz tog razloga nije potrebno koristiti tlačne pumpe. Napredna osmoza se široko proučava baš za postupak desalinacije. Maseni protok može se izračunati iz:

$$J_w = A * (\sigma_D * \pi_D - \sigma_F * \pi_F) \quad (9)$$

gdje je  $A$ - površina membrane ( $m^2$ ),  $\sigma_D$ - koeficijent refleksije osmotskog sredstva,  $\pi_D$ - osmotski tlak osmotskog sredstva (Pa),  $\sigma_F$ - koeficijent pojne kapljive,  $\pi_F$ - osmotski tlak pojne kapljive (Pa) [31].

U čamcima za spašavanje se za desalinaciju morske vode, kao osmotsko sredstvo, često koristi hipertonična otopina glukoze. Postoje noviji postupci u kojima se kao osmotsko sredstvo koristi  $NH_3-CO_2$ . Korištenjem ovog sredstva, dobiven je veliki maseni protok vode. Ujedno, uočeno je kako membrane koje se koriste za RO nisu pogodne za FO jer su takve membrane rađene za visoke tlakove.



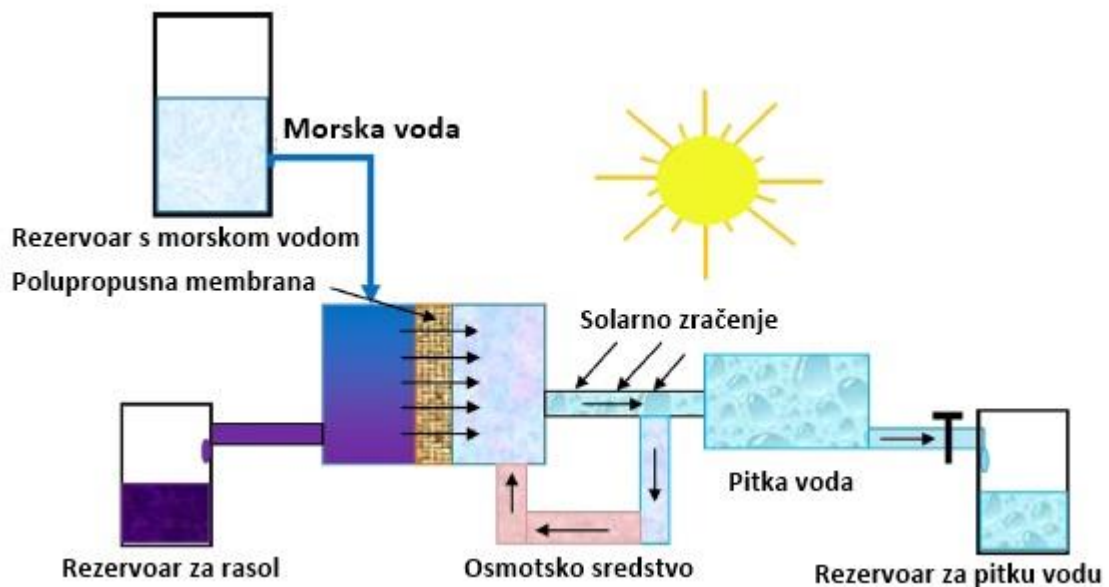
**Slika 2.25.** Napredna osmoza s osmotskim sredstvom  $NH_3-CO_2$

Usporedno, provedena jest desalinacija bočate vode saliniteta 3970 mg/l uz pomoć napredne osmoze-nanofiltracije (NO-NF), nanofiltracije (NF) i reverzne osmoze (RO). Membrane koje su korištene u ovom postupku za desalinaciju uz NO-NF jest NF270 (poliamid TFC), za NF i RO se koristila membrana BW30LE (poliamid TFC). Rezultati u pokazali kako NF nije pogodna za obradu bočate vode te da su za RO potrebni vrlo visoki tlakovi od 30 bara. NO se pokazala kao najbolja metoda za obradu bočate vode uz osmotsko sredstvo 1,5 M  $Na_2SO_4$ . Molekule vode iz pojne kapljevine difundiraju prema osmotskom sredstvu. Nakon razdvajanja, osmotsko sredstvo uklanja se nanofiltracijom [32]. Također, uočeno je da se povećanjem koncentracije osmotskog sredstva i njegove temperature povećava tok vode. Kao primjer uzeto je osmotsko sredstvo KCl (koncentracija varira od 0,5-3,0 M). Temperatura osmotskog sredstva i pojne kapljevine mijenjala se od 25 do 45 °C. Rezultati su pokazali kako povećanje koncentracije osmotskog sredstva povećava maseni tok vode. Isto tako, povećavana je temperatura i osmotskom sredstvu i pojnoj kapljevini te je uočeno kako je zagrijavanje osmotskog sredstva do 45 °C uzrokovalo povećanje masenog toka vode za 21%, a povećanje temperature pojne kapljevine 15% [33].

Kompozitni polimerni hidrogel se izrađuje povezivanjem ugljičnih čestica do veličine od 100-200  $\mu m$  ili 500-700  $\mu m$ . Ovako pripravljeni hidrogel stavlja se na polupropusnu membranu. Uzima se da je pojna kapljevina otopina NaCl. Molekule vode prolaze kroz polupropusnu membranu i apsorbiraju se na hidrogelu koji bubri. Vanjskom sunčevom radijacijom voda se rekuperira. Povećanjem hidrogela i koncentracije pojne kapljevine, povećava se maseni tok vode. Izvedba FO membrane CTA (spoj celuloze i acetatnih skupina)

predstavlja puno bolje rješenje od poliamidnih RO membrana koje su hidrofobni i povećane debljine.

U postrojenju za desalinaciju osmozom, koja koristi kao osmotsko sredstvo dietil eter (100 ml/L), koristi se sunčeva energija za razdvajanje osmotskog sredstva i pitke vode. Također, u tom postrojenju koriste se RO membrane RE-1812-LP i pojna kapljevina iz Aralskog mora. Energetska potrošnja postrojenja iznosi 0,5 kWh/m<sup>3</sup> za razliku od RO postrojena čija energetska potrošnja iznosi 2-5 kWh/m<sup>3</sup> ili MSF i MED postrojenja 2-4 kWh/m<sup>3</sup>. Postrojenje ima uvelike kraći životni vijek zbog oštećenja membrana [34]. Energetska potrošnja kod FO manja je od potrošnje kod RO za postrojenja istog kapaciteta.



Slika 2.26. Desalinacija solarnom naprednom osmozom



### 3. RASPRAVA

U općem djelu opisani su različiti načini solarne desalinacije, njihove prednosti i mane. Potrebno je uzeti u obzir različite probleme koji su vezani za desalinacijska postrojenja.

#### 3.1. Korozija i taloženje kamenca

U solarnim desalinacijskim postrojenjima veliki troškovi javljaju se zbog nužnosti korištenja posebnih materijala. Materijali koji su otporni na koroziju povećavaju pouzdanost sustava i životni vijek što je od krajnje nužnosti za udaljena, ruralna područja. Nekondenzirajući plinovi, koji se otpuštaju tijekom isparavanja u termalnim desalinacijskim sustavima, izazivaju koroziju površina kojima se prenosi toplina, čime se onečišćuje destilat s Cu ili Ni ionima. U ugljični čelik dodaju se legure bakra i nikla (kombinacije 10% Ni i 90% Cu te 30% Ni i 70% Cu) čime se sprječava onečišćenje destilata metalnim ionima i smanjuje se težina pojedinih jedinica. Pojava korozije kod RO jedinica uzrokuje blokiranje membranskih pora, a ovakva pojava može se izbjeći ako se koriste materijali poput nehrđajućeg čelika ili dupleks čelika. Životni ciklus desalinacijskih pogona može se podići do 50 godina u slučaju da se koriste već spomenuti materijali kao nehrđajući čelik, dupleks čelik ili titan. Također, korištenje "fiberglass" tzv. stakloplastike za izradu cijevi, može se spriječiti korozija na usisnom i isisnom vodu morske vode i destilata. Ovi materijali mogu izdržati do 50 bara i 110 °C.

Kamenac nastaje taloženjem  $CaCO_3$  i  $Mg(OH)_2$ , koji su prisutni u morskoj vodi, na površini isparivača ili kondenzatora u obliku višeslojnih nakupina i mogu biti različitog sastava. Korozija se u tehnici često javlja istodobno ili uzastopno s mehaničkim oblicima smanjivanja upotrebne vrijednosti metalnih izradaka. Nastaje uz trenje koje uzrokuje abraziju i eroziju materijala, ili na materijalima na kojima je došlo do zamora i puzavosti. U kondenzatorima pod utjecajem korozije nastaju sitne rupe koji uništavaju materijal. Također, korozija se javlja i na obodnim površinama kondenzatora.



### 3.2. Blokiranje membrana

Blokiranje membrana uzrokuje smanjenje protoka vode kroz membranu te smanjenje kvalitete permeata. Blokiranje je uzrokovano različitim tvarima kao npr. anorganskim spojevima, organskim spojevima i bakterijama te određenim tvarima. Sklonost blokiranju može se smanjiti uz postizanje veće turbulencije, postizanjem uvjeta u kojima pad tlaka neće biti previsok, obratom toka, modifikacijom membranske polimerne strukture, modificiranjem membranske konfiguracije i radnih uvjeta, predtretmanom pojne kapljevine i ispravnim čišćenjem membrana. Najčešće do anorganskog blokiranja dolazi zbog taloženja  $CaCO_3$  i  $CaSO_4$ , čime se efikasnost membrane smanjuje za 50%. Također, učestalost blokiranja se može smanjiti povećanjem protoka pojne kapljevine, smanjenjem temperature pojne kapljevine, parcijalnim čišćenjem nakupljenog sloja na membrani (cjelokupno uklanjanje nakupljenog sloja može uzrokovati namakanje hidrofobnog sloja membrane i može uzrokovati nastanak kamenca na porama membrane). Nakupljeni sloj na membrani može biti porozan (uzrokuje smanjenje masenog protoka) i neporozan (povećan je otpor masenom protoku koji vodi do prestanka toka permeata). Zbog izostanka visokih tlakova kod NO za razliku od RO, nakupljeni slojevi na membrani nisu gusto pakirani i mogu se jednostavno čistiti. Nakupljanje na membranama kod NO se može smanjiti odabirom odgovarajućih osmotskih sredstava i povećanjem brzine protoka iznad membrane.

### 3.3. Troškovi proizvodnje vode

Troškovi proizvodnje vode ovise o investicijskim troškovima (troškovi opreme, zemljišta, instalacijski troškovi) te troškovima izvođenja (troškovi energije, troškovi održavanja i troškovi zamjene). Troškovi potrebne energije i investicijski troškovi zauzimaju 81% cijene proizvodnje vode kod konvencionalnih RO postrojenja. Troškovi proizvodnje vode kod MD jedinica manji su nego kod RO jedinica ako je dostupna rekuperacija topline. U slučaju MSF i MED postrojenja, troškovi kondenzatora i isparivača čine 50% cijene proizvodnje vode. Kod jedinica sa kompresijom pare (VC), troškovi su viši i mogu se poistovjetiti sa troškovima proizvodnje pitke vode kod MED ili MSF. Npr. bočata voda, saliniteta 2000 ppm, može se tretirati uz pomoć PV povezanih s ED, pri čemu su troškovi manji nego kod RO jedinica. Troškovi energije desalinacijskih jedinica mogu se smanjiti povezivanjem desalinacijskih jedinica s obnovljivim izvorima energije. Troškovi proizvodnje

vode solarnom MD iznose od 10,5 do 19,5  $\$/m^3$ . Nadalje, za solarnu posudu 1,2-6,5  $\$/m^3$ . Povezivanjem solarog bazena s RO troškovi proizvodnje iznose 0,66-0,77  $\$/m^3$ , solarni bazen s MED 0,71-0,89  $\$/m^3$ , PV s ED 10,4-11,7  $\$/m^3$ . CSP je metoda koja se sastoji od niza zrcala koja koncentriraju sunčevu energiju i zagrijavaju vodu čime se proizvodi vodena para koja se koristi za pokretanje parnih turbina. Ovakav sustav vezan je na generator te proizvodi električnu energiju. Troškovi proizvodnje vode povezivanjem CSP i MED iznose 2,4-2,8  $\$/m^3$ . Povezivanjem PV s RO troškovi iznose 6,5-9,1  $\$/m^3$ .

### **3.4. Desalinacija i okoliš**

Iako desalinacijska postrojenja igraju veliku ulogu u opskrbi vodom velikog broja ljudske populacije, ona također ostavljaju neke negativne posljedice na okoliš. Potrošnja različiti energenata uzrokuje oslobađanje velikih količina stakleničkih plinova. Nadalje, ugušćena pojna smjesa nakon obrade te predtretiranja slane vode, otpuštanjem u okoliš uzrokuju poremećaj u morskom i vodenom ekosustavu. Velike temperature i velika gustoća ugušćene pojne smjese (koncentrata) utječe na niz biljnih i životinjski zajednica poput zajednica koralja, morskih trava te populacija riba i beskralješnjaka. Također, propuštanjem slane morske vode kroz cijevi nastaju oštećenja u cjevovodima. Kako bi se smanjile količine ispuštenih stakleničkih plinova, desalinacijska postrojenja povezuju se s obnovljivim izvorima energije ili koriste različite instrumente za rekuperaciju energije kao u slučaju RO i MED jedinica. Postoje načini za iskorištavanja ugušćene pojne smjese na kraju procesa. Smanjenjem saliniteta može se koristiti za navodnjavanje otpornih usjeva.

Analizom svih metoda možemo primijetiti kako su energetske zahtjevi membranskih procesa manji od ostalih, osobito NO iza kojeg slijedi ED te RO. Poboljšavaju se izvedbe termalnih postrojenja poboljšavanjem učinka (iskorištavanjem latentne topline kondenzacije-MED), kogeneracijom (kao npr. u solarnom dimnjaku). Energetske zahtjevi kod solarnih posuda veliki su zbog velikih gubitaka topline prilikom kondenzacije.

### 3.5. Osvrt na solarne desalinacijske jedinice

Prilikom proizvodnje pitke vode solarne posude predstavljaju vrlo jeftino rješenje, no zahtijevaju velike površine te su pogodne za proizvodnju malih količina vode. Vrlo atraktivna je proizvodnja pitke vode i električne energije unutar solarnih dimnjaka, no također zahtjeva velike površine ili obalna područja. Metode kao što su MSF, MED i VC povezane sa solarnim tehnologijama pogodna su za veliku proizvodnju vode. Prirodna solarna vakuum desalinacija može se integrirati s visokim zgradama ili čak planinama u udaljenim područjima kako bi se smanjili troškovi energetske energije te iskoristila besplatna gravitacijska energija. Što se tiče adsorpcijske desalinacije, kojom se proizvodi i pitka voda i rashladni efekt, pogodnija je za prostore koji zahtijevaju oba produkta. Moguće je povezivanje sa solarnim metodama i po novijim testovima vrlo isplativo. Teoretski je pokazano da je kod desalinacije smrzavanjem potrebna najmanja količina energije, no investicijski troškovi ove metode u kombinaciji sa solarnim metodama iznimno su visoki. Za proizvodnju velikih količina vode uz solarnu humidifikaciju i dehumidifikaciju potreban je veliki broj faza, čime se povećavaju i investicijski troškovi, stoga je sustav pogodniji za manju proizvodnju vode. RO postrojenja su jako dobro razvijena te se vrlo jednostavno mogu povezati sa PV. Potrebno je raditi na dužem životnom vijeku membrana kako bi se smanjili troškovi ovakvih postrojenja. Solarni ORC-RO učinkovitiji je od solarnog MED postrojenja te je pogodan za velike proizvodnje vode. MD i FO jako dobro funkcioniraju iskorištavanjem otpadne topline ili povezivanjem sa solarnim tehnologijama u obradi odbačene ugušćene pojne smjese. Također, potreban je daljni razvoj različitih membrana i osmotskih sredstva u svrhu sniženja troškova. Uporabom antikorozivnih materijala (legure) povećava se životni vijek postrojenjima te uzrokuje smanjenje proizvodnih troškova.

#### **4. Zaključak**

Solarna postrojenja za desalinaciju uvelike mogu smanjiti emisije ugljikova dioksida te omogućiti proizvodnju pitke vode na za okoliš najprihvatljiviji način. Također, izvrstan su izvor pitke vode za udaljena ruralna područja gdje električna energija nije dostupna i gdje nije moguće ugraditi sustav za dovod vode. Trenutno, solarna desalinacijska postrojenja mogu obrađivati samo bočatu i morsku vodu. Za obradu otpadnih voda potrebija su kompliciranija postrojenja. Za dugoročan i siguran rad ovakvih postrojenja potreban je daljnji razvoj antikorozivnih materijala i membrana dužeg životnog vijeka. Također, veliki problem predstavljaju ostatci ugušćene pojne smjese (koncentrata), što iziskuje pronalaženje novih načina zbrinjavanja i iskorištavanja ovakve vrste otpada. Potrebno je iskoristiti minerale iz smjese te iskoristiti u svrhu navodnjavanja. Solarna energija može desalinacijsku industriju učiniti mnogo "zelenijom" te bilo kakvi napretci u razvoju kolektora ili panela (PV) uvelike će pridonijeti desalinacijskoj industriji.

## 5. Skraćenice i simboli

### Skraćenice

ED	elektrodijaliza
MD	membranska destilacija
NO	napredna osmoza
RO	reverzna osmoza
MSF	višefazna (frakcijska) destilacija
MED	višestruka destilacija
VC	kompresija pare
FD	desalinacija smrzavanjem
AD	desalinacija adsorpcijom
ORC	organski Rankineov ciklus
MCV	mehanički kompresor pare
PV	fotonaponske ćelije
AGMD	membranska destilacija uz zračni prostor
SWGMD	membranska destilacija uz plin za ispiranje
DCMD	destilacija izravnim kontaktom s membranom
VMD	vakuumska membranska destilacija
NF	nanofiltracija

## Simboli

$m_d^{\square}$	maseni protok destilata
$q_{ew}^{\square}$	brzina prijenosa topline isparavanja
$h_{fg}$	latentna toplina isparavanja
$A_w$	površina
$\eta_t$	efikasnost turbine
$\eta_{coll}$	efikasnost kolektora
$C_{pa}$	specifični toplinski kapacitet zraka
$T_a$	temperatura okoline
$H_{ch}$	težina dimnjaka
$A_{coll}$	površina kolektora
$I$	solarna radijacija
$\rho_M$	gustoća membrane
$\rho_{pol}$	gustoća polimernog materijala
$\varepsilon$	poroznost membrane
$P_{air}$	tlak zraka unutar pora membrana
$P$	ukupni tlak
$D$	koeficijent difuzije
$\delta$	debljina membrane
$M_w$	molekularna težina vodene pare
$P^*$	parcijalni tlak vode
$r$	radijus pore
$\mu$	dinamička viskoznost vodene
$P_{avg}$	srednji tlak u porama
$A$	površina membrane
$\sigma_D$	koeficijent refleksije osmotskog sredstva
$\pi_D$	osmotski tlak osmotskog sredstva
$\sigma_F$	koeficijent pojne kapljevine
$\pi_F$	osmotski tlak pojne kapljevine

## 6. Literatura

- [1] R. Kriesi, Design and operation experience with solar powered multistage desalination plants, *Desalination* 31 (1981) 545-554.
- [2] T. Szacsuvay, P. Hofer-Noser, M. Posnansky, Technical and economic aspects of small-scale solar pond-powered seawater desalination systems, *Desalination* 122 (1999) 185-193.
- [3] M.J. Safi , Performance of a flash desalination unit intended to be coupled to a solar pond, *Renew Energy* 14 (1998) 339-343.
- [4] J. Jiang, He Tian, M. Cui, L. Liu, Proof-of-concept study of an integrated solar desalination system, *Renew Energy* 34 (2009) 2798-2802.
- [5] A.M. Helal , S.A. Al-Malek, Design of a solar-assisted mechanical vapor compression (MVC) desalination unit for remote areas in the UAE, *Desalination* 197 (2006) 273-300.
- [6] D. Zejli , A. Ouammi, R. Sacile, H. Dagdougui, A. Elmidaoui, An optimization model for a mechanical vapor compression desalination plant driven by a wind/PV hybrid system, *Appl energy* 88 (2011) 4042-4054.
- [7] M.A. Sharaf , A.S. Nafey, L. García-Rodríguez, Thermo-economic analysis of solar thermal power cycles assisted MED-VC (multi effect distillation-vapor compression) desalination processes, *Energy* 36 (2011) 2753-2764.
- [8] S. Al-Kharabsheh, D.Y. Goswami, Analysis of an innovative water desalination system using low-grade solar heat, *Desalination* 156 (2003) 323-332.
- [9] S.C. Maroo, D.Y. Goswami, Theoretical analysis of a single-stage and two-stage solar driven flash desalination system based on passive vacuum generation, *Desalination* 249 (2009) 635-646.
- [10] V.G. Gude, N. Nirmalakhandan, S. Deng, A. Maganti, Feasibility study of a new two-stage low temperature desalination process, *Appl Energy* 91 (1) (2012) 466-474.
- [11] A.A.A. Attia , New proposed system for freeze water desalination using auto reversed R-22 vapor compression heat pump, *Desalination* 254 (2010) 179-184.

- [12] A.M. El-Nashar, Solar desalination using the vacuum freezing ejector absorption (VFEA) process, *Desalination* 49 (1984) 293-319.
- [13] D. Zejli, R. Benchrifa, A. Bennouna, O.K. Bouhelal, A solar adsorption desalination device: first simulation results, *Desalination* 168 (2004) 127-135.
- [14] G. Peterson, S. Fries, J. Mohn, A. Muller, Wind and solar powered reverse osmosis desalination units- description of two demonstration projects, *Desalination* 31 (1979) 501-509.
- [15] Z. Al-Suleimani, V.R. Nair, Desalination by solar-powered reverse osmosis in a remote area of the Sultanate of Oman, *Appl Energy* 65 (2000) 367-380.
- [16] D. Manolacos, G. Papadakis, E.S. Mohamed, S. Kyritsis, K. Bouzianas, Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination, *Desalination* 183 (2005) 73-80.
- [17] A.M. Delgado-Torres, L. Garcia- Rodriguez, V.J. Romero-Ternero, Preliminary design of a solar thermal-powered seawater reverse osmosis system, *Desalination* 216 (2007) 292-305.
- [18] A.M. Delgado-Torres, L. Garcia- Rodriguez, Double cascade organic Rankine cycle for solar-driven reverse osmosis desalination, *Desalination* 216 (2007) 306-313.
- [19] S. Karellas, K. Terzis, D. Manolacos, Investigation of an autonomous hybrid solar thermal ORC-PV RO desalination system. The Chalki island case, *Renew Energy* 36 (2011) 583-590.
- [20] A.S. Nafey, M.A. Sharaf, Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process :energy, exergy and cost evaluations, *Renew Energy* 35 (2011) 2571-2580.
- [21] P.A. Davies, A solar-powered reverse osmosis system for high recovery of freshwater from saline groundwater, *Desalination* 271 (2011) 72-79.
- [22] C. Charcosset, A review of membrane processes and renewable energies for desalination, *Desalination* 245 (2009) 214-231.



- [23] H.M.N. AlMadani, Water desalination by solar powered electro dialysis process, *Renew Energy* 28 (2003) 1915-1924.
- [24] R. Mahabala, M.R. Adiga, S.K. Adhikary, P.K. Narayanan, W.P. Harkare, S.D. Gomkale, et al., Performance analysis of photovoltaic electro dialysis desalination plant at Tanote in Thar Desert, *Desalination* 67 (1987) 59-66.
- [25] J.M. Ortiz, E. Exposito, F. Gallud, V. Garcia-Garcia, V. Montiel, A. Aldaz, Desalination of underground brackish waters using an electro dialysis system powered directly by photovoltaic energy, *Sol Energy Mater Sol Cells* 92 (2008) 1677-1688.
- [26] A. Alkudhiri, N. Darwish, N. Hilal, Membrane distillation: a comprehensive review, *Desalination* 287 (2012) 2-18.
- [27] P.A. Hogan, Sudjito, A.G. Fane, G.L. Morrison, Desalination by solar heated membrane distillation, *Desalination* 81(1991) 81-90.
- [28] R.B. Saffarini, E.K. Summers, H.A. Arafat, V.J.H. Lienhard, Economic evaluation of stand-alone solar powered membrane distillation systems, *Desalination* 299 (2012) 55-62.
- [29] F. Banat, R. Jumah, Garaibeh, Exploitation of solar energy collected by solar stills for desalination by membrane distillation, *Renew Energy* 25 (2) (2002) 293-305.
- [30] C.L. Ong, W. Escher, S. Paredes, A.S.G. Khalil, B. Michel, A novel concept energy reuse from high concentration photovoltaic thermal (HCPVT) system for desalination, *Desalination* 295 (2012) 70-81.
- [31] T.Z. Cath, A.E. Childress, M. Elimelech, Forward osmosis: principles, applications and recent developments, *J Membr Sci* 281 (1-2) (2006) 70-87.
- [32] S. Zhao, L. Zou, D. Mulcahy, Brackish water desalination by hybrid forward osmosis-nanofiltration system using divalent draw solute, *Desalination* 284 (2012) 175-181.
- [33] S. Phuntsho, S. Vigneswaran, J. Kandasamy, S. Hong, S. Lee, H.K. Shon, Influence of temperature and temperature difference in the difference in the performance of forward osmosis desalination process, *J. Membr. Sci* 415–416 (2012) 734–744.

[34] R.A. Khaydarov, R.R. Khaydarov, Solar powered direct osmosis desalination, Desalination 217 (1-3) (2007) 225-232.

## 7. Životopis

Silvia Morović rođena je 26. Kolovoza 1994. godine u Zadru. Osnovnu školu završava u OŠ Krune Krstića, Zadar te potom Gimnaziju Jurja Barakovića u Zadru. 2013. godine upisuje preddiplomski studij Ekoinženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije. Od 2015. Sudjeluje u udruzi BEST (*Board of European Students of Technology*) u organizaciji natjecanja AIBG (*Artificial Intelligence BattleGround*) i EBEC Zagreb – Dani inženjera.