

# Poboljšanja energetske efikasnosti u postrojenjima obrnute osmoze

---

**Mušić, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Dubrovnik / Sveučilište u Dubrovniku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:155:272758>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-25**



**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**  
UNIVERSITY OF DUBROVNIK

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Dubrovnik](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU

POMORSKI ODJEL

**Antonio Mušić**

**POBOLJŠANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI U  
POSTROJENJIMA OBRNUTE OSMOZE**

**Završni rad**

Dubrovnik, 2017.

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU

POMORSKI ODJEL

BRODOSTROJARSKI STUDIJ

**POBOLJŠANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI U  
POSTROJENJIMA OBRNUTE OSMOZE**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

**doc. dr. sc. ŽARKO KOBOEVIĆ**

Pristupnik:

**ANTONIO MUŠIĆ**

Dubrovnik, 2017.

Republika Hrvatska  
**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**  
**POMORSKI ODJEL**  
**Preddiplomski sveučilišni studij brodstrojarstva**

Ur.broj:

Dubrovnik, 25. rujna 2017.

Kolegij:

Mentor: doc. dr. sc. ŽARKO KOBOEVIĆ

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Pristupnik: **ANTONIO MUŠIĆ**, ak. 2016./2017. god.

### **Zadatak: POBOLJŠANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI U POSTROJENJIMA OBRNUTE OSMOZE**

Zadatak treba sadržavati:

1. Opis sustava obrnute osmoze
2. Tehnička rješenja za poboljšanja energetske efikasnosti
3. Usporedba tehničkih rješenja

Osnovna literatura:

1. S. Meyer-Steele, A.von Gottberg, J. L. Talavera: Seawater Reverse Osmosis Plants in the Caribbean Recover Energy and Brine and Reduce Costs
2. B. Penate, J. A. de la Fuente, M. Barreto: Operation of the RO Kinetic energy recovery system: Description and real experiences, 25.November 2009.

Zadatak uručen pristupniku:

Rok za predaju završnog rada:

Mentor:

**doc. dr. sc. ŽARKO KOBOEVIĆ**

Pročelnik Pomorskog odjela:

**doc. dr. sc. MATKO BUPIĆ**

## SADRŽAJ

<b>SAŽETAK.....</b>	<b>5</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>6</b>
<b>2. RO Postrojenje.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Konvencionalno postrojenje reverzne osmoze slane vode.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Višestupanjska konfiguracija.....</b>	<b>8</b>
<b>3. Elektrodijaliza i preokretanje elektrodijalize.....</b>	<b>12</b>
<b>4. Tehnička rješenja za poboljšanja energetske efikasnosti.....</b>	<b>14</b>
<b>4.1. Uređaji za povrat energije.....</b>	<b>14</b>
<b>4.2. Centrifugalni uređaji za povrat energije.....</b>	<b>15</b>
<b>4.3. Izobarni uređaji za povrat energije.....</b>	<b>19</b>
<b>4.3.1. Izmjenjivač rada.....</b>	<b>20</b>
<b>4.4. RO kinetic.....</b>	<b>22</b>
<b>5. Usporedba tehničkih rješenja.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1. Usporedba uređaja za obnovu energije.....</b>	<b>27</b>
<b>5.2. Ušteda energije – numerički primjer.....</b>	<b>29</b>
<b>5.3. RO kinetic prednosti.....</b>	<b>31</b>
<b>5.4. Mogućnosti implementacije.....</b>	<b>34</b>
<b>5.4.1. Funkcija hidrauličnog upravljanja energijom.....</b>	<b>36</b>

<b>5.4.2. Kontrola hidrauličnog upravljanja energijom.....</b>	<b>37</b>
<b>6. Energetski zahtjev za procese desalinizacije.....</b>	<b>40</b>
<b>6.1. Minimalni energetski zahtjev za desalinizaciju.....</b>	<b>40</b>
<b>6.2. Zahtjev stvarne energije glavnih procesa desalinizacije.....</b>	<b>40</b>
<b>7. Potrošnja energije u RO procesu.....</b>	<b>41</b>
<b>7.1. Ekonomičnost membranskog procesa.....</b>	<b>41</b>
<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>44</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>45</b>

## SAŽETAK

Tema ovog rada je princip procesa obrnute osmoze, problem energetskeg utroška tijekom rada samog procesa i rješavanje tog problema pomoću uređaja za povrat energije. Najkorišteniji uređaji za obnovu energije su pelton kolo, turbopunjač i izmjenjivač rada. Turbopunjač se uspješno koristi za očuvanje energije u sustavima obrnute osmoze od 1989. On djeluje kao obrnuto gonjena pumpa, gdje se koncentrat obrnute osmoze koristi za okretanje turbine, koja je sa svojim impelerom na osovini turbine spojena s pumpnim dijelom. Mlazni ventil usmjerava visokotlačni mlaz koncentrata na lopatice pelton kola, što potiče kolo da se okreće. Kinetička energija mlaza je pretvorena u rotirajuću mehaničku energiju. Spajanjem osovine pelton kola na motor ili pumpu, ta energija se može koristiti za smanjenje potrebe za električnom energijom potrebne za tlačenje napojne vode. Izmjenjivači rada koriste sustav klipova i ventila za prijenos tlaka iz koncentrata obrnute osmoze do napojnih dijelova.

**Ključne riječi:** uređaj za povrat energije, sustav obrnute osmoze,

## ABSTRACT

The subject of this paper is reverse osmosis, the problem of the amount of energy being used during the process and the solution to this issue with the help of energy recovering devices. The most commonly used devices for recovering energy are the pelton wheel, turbocharger and the work exchanger. The turbocharger is successfully being used to recover energy in reverse osmosis systems since 1989. It acts like a reverse driven pump, where the concentrate of reverse osmosis is being used to turn a turbine, which is connected to its impeller at the axle of the turbine by its pump part. A jet valve is used to guide the high pressure stream to the blades of the pelton wheel, which makes the wheel turn. The kinetic energy of the stream is converted into rotational mechanical energy. By connecting the axle of the pelton wheel to an engine or a pump, this energy can be used to reduce the need of electrical energy needed to supply the feed water. The work exchanger uses a piston and valve system to take the pressure from the concentrates of reverse osmosis to feed areas.

**Key words:** energy recovery device, reverse osmosis system

## 1. UVOD

Sustav obrnute osmoze na brodovima se koristi zbog nužne potrebe osiguravanja uvjeta za život posade i putnika kao što su: voda za piće, kuhanje, pranje te voda za sanitarne uređaje. To su sustavi u kojima se slatka voda dobiva iz morske.

Moderni sustavi obrnute osmoze su kompleksni inženjerski sustavi koji uključuju niz ventila, cijevi, pumpe i membrana potrebnih za temeljni proces obrnute osmoze, kao i senzore, izvršne elemente i uređaje za kontrolu samog procesa.[1]

Ovaj rad opisuje jedan od ključnih problema procesa obrnute osmoze, a to je gubitak energije pri samom radu i reduciranje iste.

Potrošnja energije dramatično se smanjila u posljednjih 40 godina od oko 10-15 kWh/m<sup>3</sup> do 2-3 kWh/m<sup>3</sup>. To se pripisuje unapređenju membranske tehnologije i razvoju visoko učinkovitih uređaja. Međutim, većina postojećih postrojenja obrnute osmoze i dalje su sklona većoj potrošnji energije kada je riječ o desalinizaciji slane vode malih razmjera zbog relativno manjih komponenti, npr. pumpe i odsutnosti uređaja visoke učinkovitosti. Stoga, poboljšanje energetske učinkovitosti desalinizacije slane vode, povećanje proizvodnje vode po površini zemljišta, smanjenje količine ispuštene slane vode i konačno smanjenje troškova su neke od poželjnih svojstava pri izradi sustava obrnute osmoze slane vode. U tu svrhu je razvijeno nekoliko različitih pristupa, uključujući upotrebu visoko propusnih membranskih materijala, korištenje uređaja visoke učinkovitosti za oporavak energetskih gubitaka tlaka te primjena obnovljivih izvora energije za subvencioniranje potrošnje električne energije.[2]

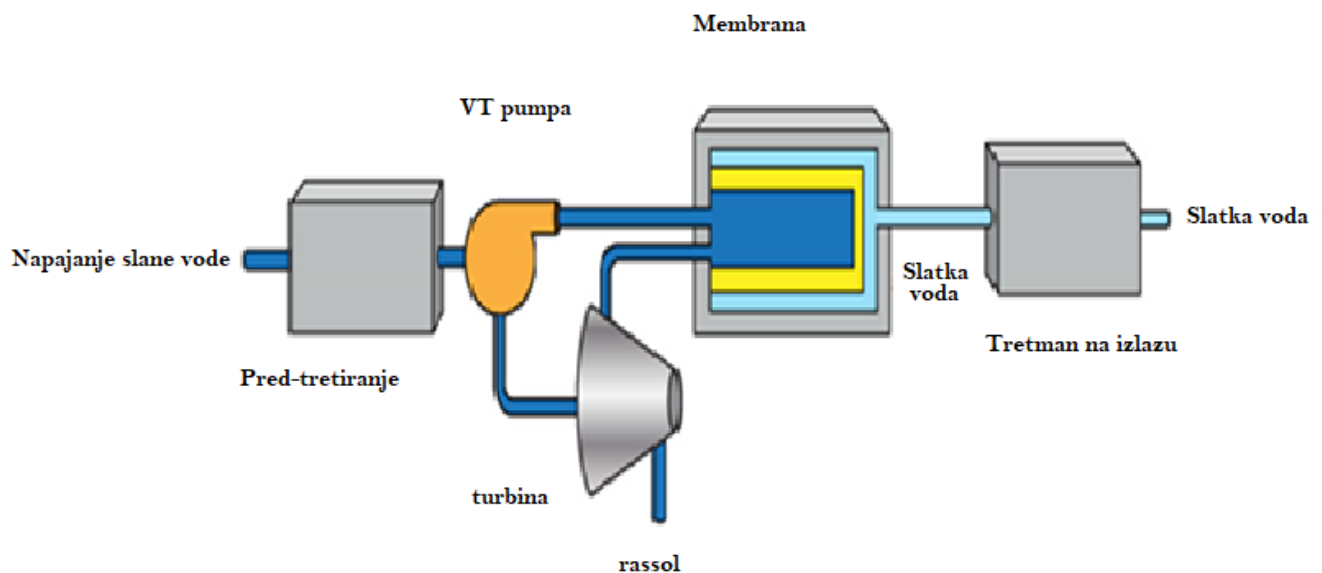


## 2. RO POSTROJENJE

Obrnuta osmoza temelji se na tlačnoj filtraciji u kojoj je filter polu-propusna membrana koja dozvoljava protok vode, ali ne i soli. Ovo dozvoljava slatkoj vodi da prođe, dok koncentrat ostaje na tlačnoj strani visoko tlačne pumpe. Sastoji se od 4 podsistema: (1) pred tretiranje, (2) visoko tlačnu pumpa, (3) membrana i (4) tretiranje na izlazu.

Pred tretiranje napojne vode uključuje filtraciju, sterilizaciju i dodavanje kemikalija protiv stvaranja naslaga i obraštanja. Visoko tlačna pumpa generira tlak potreban da potjera vodu kroz membranu, te je za pogon pumpe potrebna električna energija. Tlak potreban za desalinizaciju kreće se između 17 i 27 bara za boćatu vodu i od 55 do 82 bara za morsku vodu. Membrane su dizajnirane da dopuste protok vode oko otprilike 500 ppm i napravljene su u različitim konfiguracijama, a nekoliko različitih tipova membrana je dostupno na tržištu. Tretman na izlazu eliminira plinove kao što su vodikov sulfid i prilagodava pH.

Slika 4. je shematski prikaz sistema obrnute osmoze, stare tehnologije koja je najčesće korištena tehnika pri desalinizaciji, čiji se kapacitet kreće između 0.1 m<sup>3</sup>/dan ( pomorske svrhe) i 395000 m<sup>3</sup>/na dan.[3]



Slika 1. Shematski prikaz RO procesa[3]

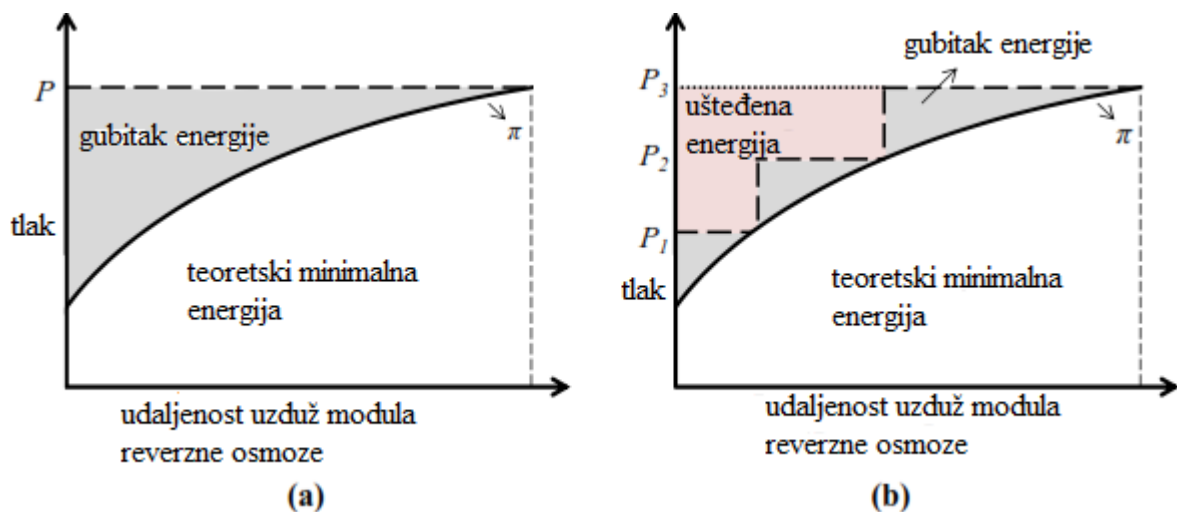
## 2.1. KONVENCIONALNO POSTROJENJE REVERZNE OSMOZE SLANE VODE

Uobičajeno, uređaji reverzne osmoze za desalinizaciju primjenjuju osnovnu konfiguraciju od jednog stupnja, a membranski modul može sadržavati jedan ili više elemenata reverzne osmoze u seriji.[2]

## 2.2. VIŠESTUPANJSKA KONFIGURACIJA

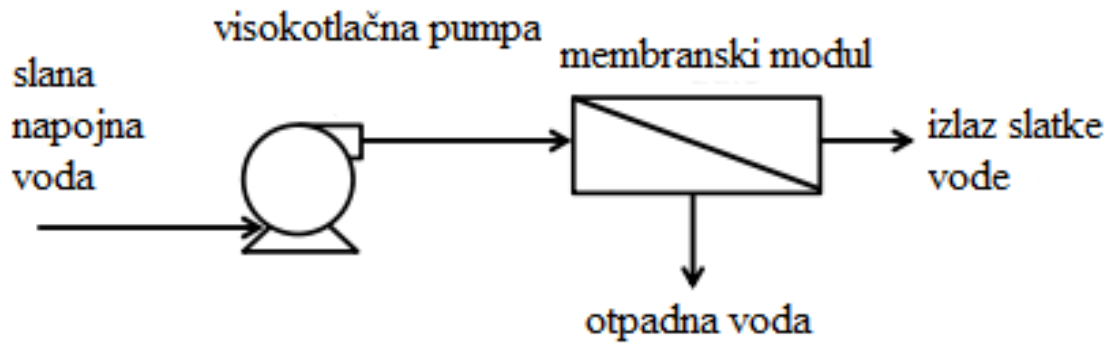
Za sustav reverzne osmoze, serijski raspored elemenata membrane reverzne osmoze je energetski učinkovitiji od paralelnog. U procesu desalinizacije, slatka se voda postupno uklanja iz membranskog modula, a koncentracija soli duž kanala povećava se na ulazu do gotovo dvostruke (za morsku vodu) ili trostruke (za slanu vodu) vrijednosti. Za održavanje toka vode preko cijelog kanala za napajanje potrebno je osigurati radni tlak, koji se određuje koncentracijom soli na izlazu umjesto na ulaznom otvoru, kao što je prikazano na slici 2. Dio energije napajanja izgubljen je zbog uzdužnog gradijenta koncentracije soli.

Jedan primjer dizajna sustava koji može eliminirati ovaj gubitak energije je konfiguracija u više stupnjeva. Ovaj dizajn usvaja nekoliko stupnjeva u nizu zajedno s nekoliko potisnih pumpi. Prvi stupanj djeluje pri nižem tlaku zbog nižeg saliniteta vode, nakon čega se koncentrat iz prvog stupnja dovodi u drugi stupanj, gdje salinitet postaje veći. Međufazna pumpa osigurava odgovarajući tlak, čime se izbjegava potreba da pumpa prvog stupnja daje dodatni tlak. Gubitak energije povezan s povećanom uzdužnom koncentracijom može se svesti na minimum. Slika 2. daje izravnu ilustraciju uštede energije postignute trostrukim sustavom reverzna osmoze s tri pumpe koje pružaju tlak  $P_1$ ,  $P_2$  i  $P_3$ . [2]

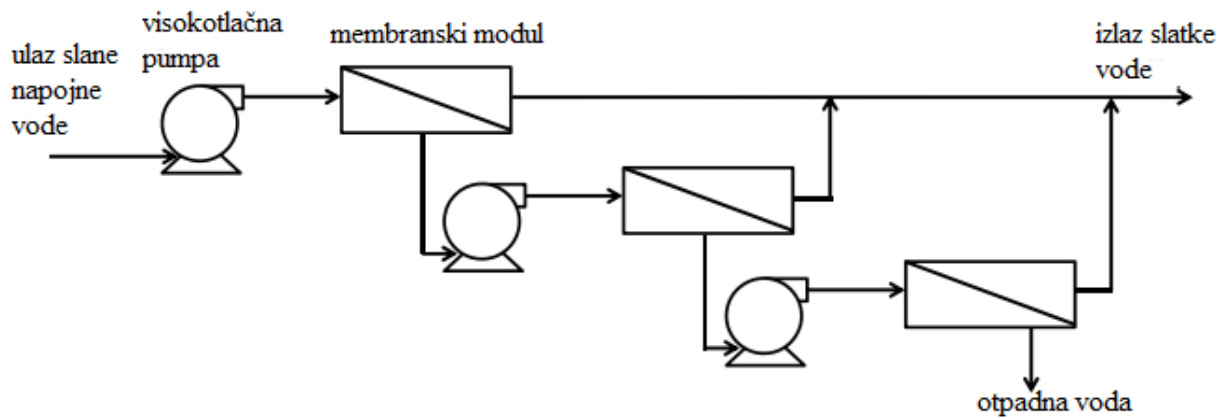


Slika 2: Korištenje energije sustava reverzne osmoze (RO) i učinak uzdužnog gradijenta koncentracije.[2]

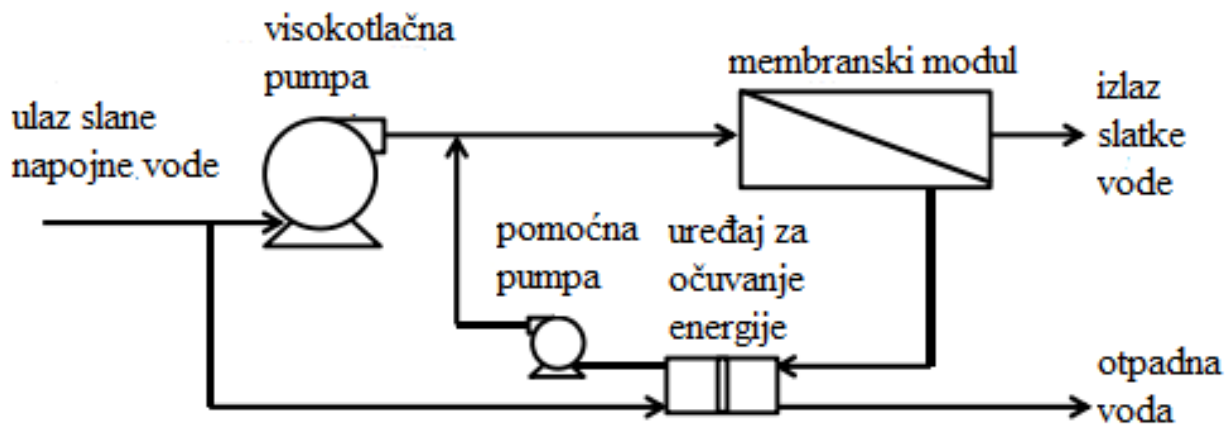
Teoretska minimalna energija potrebna za desalinizaciju, koju predstavlja područje ispod krivulje osmotskog tlaka, jednaka je energiji koja je potrebna da bi se slanu vodu dovela do maksimalnog osmotskog tlaka u odgovarajućem modulu. Za jednostupanjski sustav (a), radni tlak  $P$  mora biti barem jednak osmotskom tlaku otopine na izlazu membranskog modula. Područje ispod isprekidane linije predstavlja primijenjenu energiju, pri čemu je razlika između ova dva područja (sivo područje) osigurana dodatna energija, tj. gubitak energije. Za trostupanjski sustav (b) je osiguran odgovarajući tlak za svaku fazu. Gubitak energije (sivo područje) se smanjuje, a dio dodatne energije se očuva. Konfiguracije jednostupanjskih i višestupanjskih sustava reverzne osmoze, sa ili bez uređaja za očuvanje energije, prikazane su na slikama 3-6. Višestupanjski sustavi s modulima povezanim s otpadnom vodom pomoćnim pumpama u načelu mogu smanjiti potrošnju električne energije. Isto tako je preporučeni dizajn za nisku koncentraciju napojne vode (oko 3000 mg/L) trostupanjski sustav s uređajem za očuvanje energije. U praksi su jednostavni jednostupanjski sustavi često bili favorizirani zbog nižih troškova investicije, usprkos njihovoj relativno slaboj energetskej učinkovitosti. Stoga je pri izboru jednostupanjske ili višestupanjske konfiguracije potrebno obratiti dodatnu pozornost i sagledati proces s različitih strana.[2]



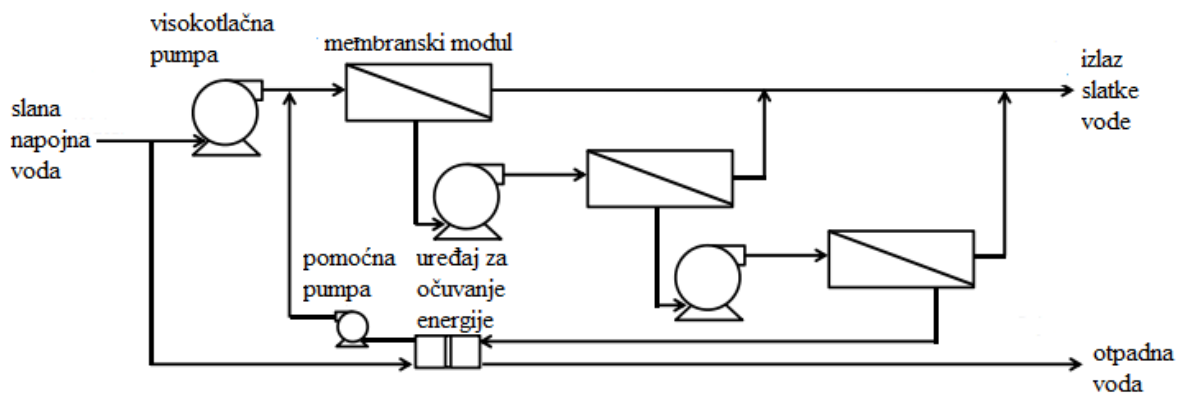
Slika 3: Jednostupanjski sustav [2]



Slika 4: Trostupanjski sustav s međustupanjskim pomoćnim pumpama[2]



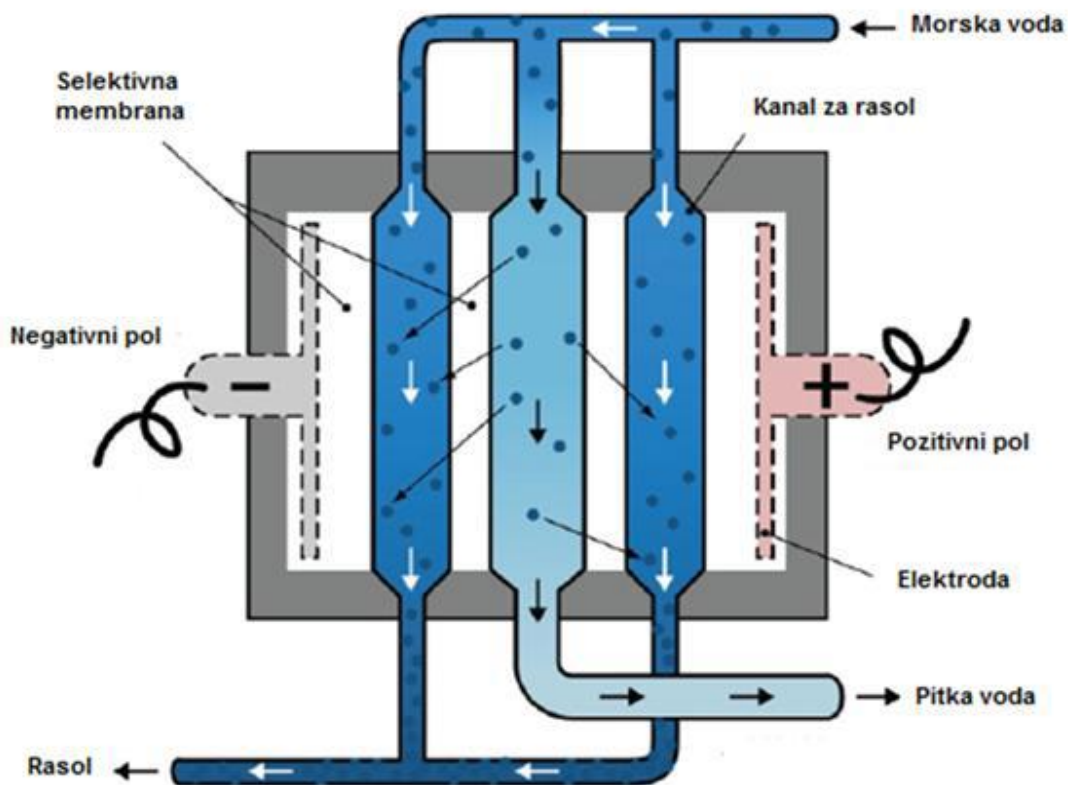
Slika 5: Jednostupanjski sustav s uređajem za očuvanje energije [2]



Slika 6: Višestupanjski sustav s uređajem za očuvanje energije [2]

### 3. ELEKTRODIJALIZA I PREOKRETANJE ELEKTRODIJALIZE

Elektrodijaliza je elektrokemijski proces separacije koji radi na atmosferskom tlaku i koristi električnu struju za prijenos iona soli kroz membranu, ostavljajući slatku vodu. Elektrodijalizna jedinica se sastoji od sljedećih komponenti: sistem predtretiranja, membrane, nisko tlačna cirkulacijska pumpa, napajanje struje i sistem tretiranja na izlazu. Princip rada elektrodijalize je sljedeći: ploče od titana s premazom spojene su na vanjski izvor struje u spremniku slane vode koji sadrži membrane koje propuštaju ione spojene na paralelno formirane kanale. Kada boćata voda protiče kroz te kanale struja puni elektrode, pozitivni ioni soli putuju kroz katiodnu propusnu membranu prema negativnim elektrodama, a negativni ioni soli putuju do anoidno propusne membrane do pozitivne elektrode, što rezultira otklanjanjem soli iz vode. Ovo tvori izmjenične kanale – koncentrirani kanali za zasacenu otopinu soli i razrijeđeni kanali za slatku vodu. Kapacitet pogona elektrodijalize kreće se od 2 do 145 000 m<sup>3</sup>/na dan. Slika 7. Prikazuje shematski prikaz elektrodijalizne jedinice. U preokrenutoj elektrodijalizi, pol elektroda se periodično prebacuje. Koncentrirana para se tada pretvara u napojnu paru i napojna para postaje koncentrirana para. Okretanje protoka produžuje rok elektroda i pomaže pri čišćenju membrana. Ako membrane cijelo vrijeme rade u jednom smjeru, može se pojaviti talog na koncentriranoj strani.[3]



Slika 7: Shematski prikaz jedinice elektrodijalize [3]

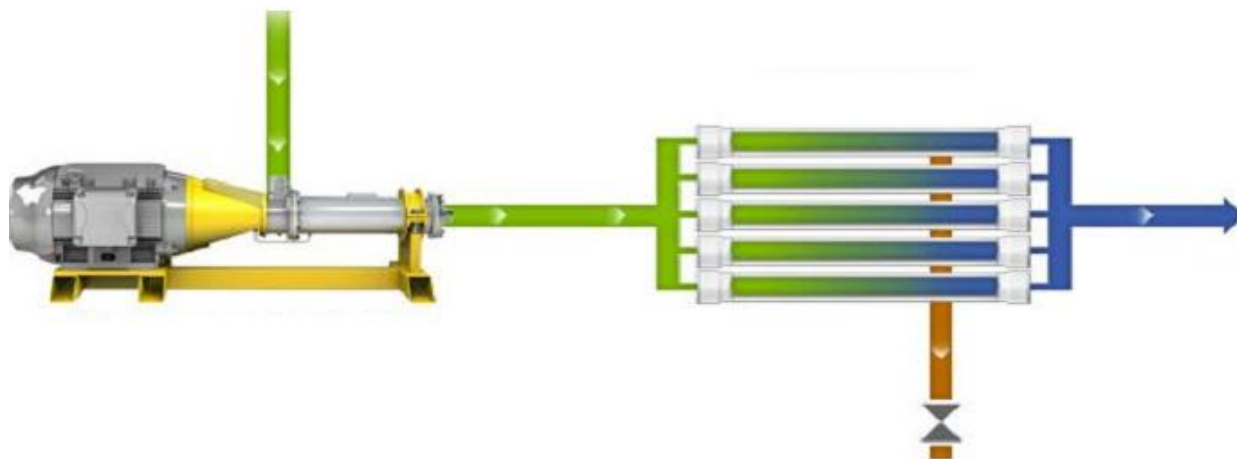
Struja je jedina energija koja se koristi u elektrodijaliznom procesu. Istosmjerna struja se koristi za elektrodijalizne elektrode, a izmjenična ili istosmjerna struja se koristi za pogon pumpe. Za niski salinitet potrošnja struja elektrodijalizne jedinice kreće se od 0.7 do 2.5 i 2.64 do 5.5 kW h/m<sup>3</sup> za salinitet između 23 i 25 ppm.[3]

## 4. TEHNIČKA RJEŠENJA ZA POBOLJŠANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI

### 4.1. UREĐAJI ZA POVRAT ENERGIJE

Trenutno su uređaji za oporavak energije ograničeni na vraćanje koncentriranog pritiska prilikom prijenosa hidrauličke energije za proizvodnju električne energije - hidraulička energija na mehaničku te opet na hidrauličku, ili prijenos hidrauličke na hidrauličku energiju.[4]

Postoji niz dostupnih komercijalnih uređaja koji su sposobni smanjiti potrebu za snagom pojedine jedinice obrnute osmoze. Ovo je primarno postignuto smanjivanjem potrošnje energije visokotlačne pumpe preko povrata energije iz pare koncentrata (koja je prije razvoja uređaja za povrat energije bila otpadna energija). Za tipičnu jednoprolaznu jednostupanjsku desalinizaciju morske vode, tlak koncentrata može biti od 55 do 65 bara. Tri od najuspješnijih uređaja za povrat energije su turbopunjač, Pelton kolo, i rad izmjenjivača pritiska.[5]



Slika 8: RO proces bez uređaja za povrat energije [4]

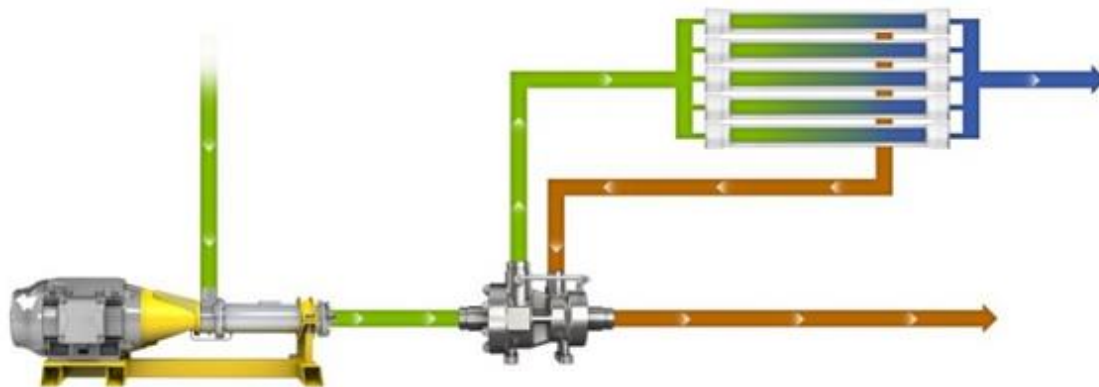


Ovaj tradicionalni pristup ostavlja kontrolni koncentrični ventil odgovoran za propuštanje tlaka iz sustava. Kako bi proces bio pogodniji za količinu korištene energije, prijenos preostale hidraulične energije u koncentriranom protoku mora se pretvoriti u korisno sredstvo energije, bilo električne energije koja se vraća natrag u električnu mrežu, ili hidrauličke energije koja se prenosi u sirovi protok vodotoka. Glavnina uređaja za oporavak energije su bili usmjereni na drugu opciju zbog njene potencijalne učinkovitosti i izravnog utjecaja na dugoročnost korištenih membrana. Kao takav, ključni element za poboljšanje opreme uključuje uređaje za oporavak energije (Eng. Energy Recovery Device) i visokotlačne pumpe. Povezivanje ta dva elementa u zajednički rad dovodi do oporavka od 10 do 50 posto ukupne crpne energije potrebne za proces desalinizacije u više objekata.

Uređaji za povrat energije su strojevi dizajnirani za oporavak hidraulične energije od protoka vode pod tlakom, što je u ovom slučaju koncentrirani protok. Proces oporavka energije će varirati ovisno o vrsti prijenosa energije koju tehnologija koristi. U nastavku ovog odjeljka će biti objašnjene najkorištenije tehnologije uređaja za povrat energije na tržištu danas: centrifugalni i izobarni uređaji.[4]

## 4.2. CENTRIFUGALNI UREĐAJI ZA POVRAT ENERGIJE

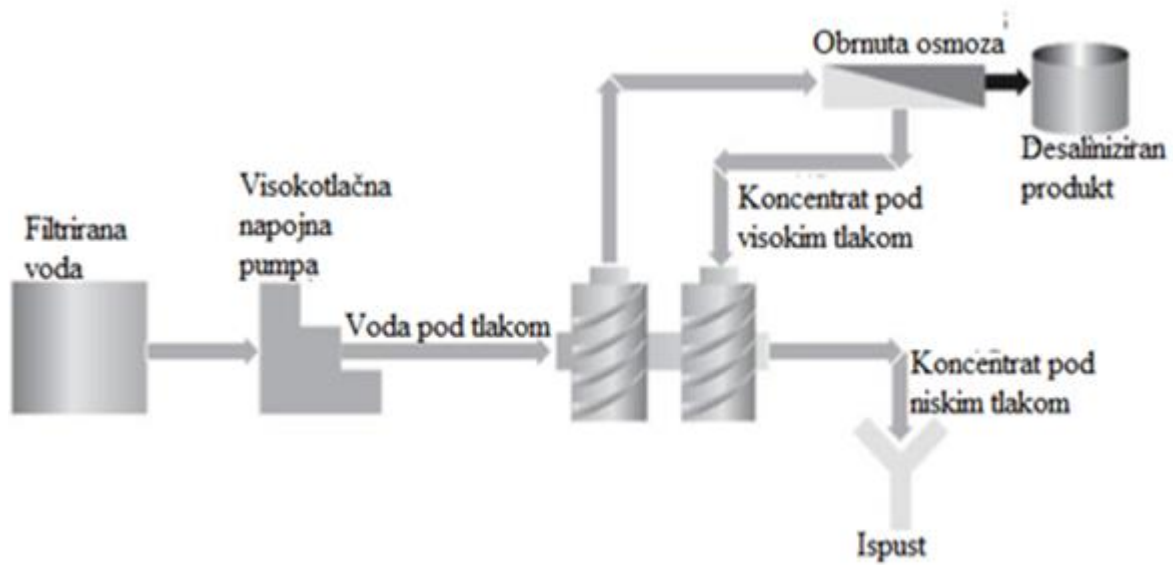
Centrifugalni ERD uređaji koriste hidrauličnu energiju od membranskog koncentriranog protoka kako bi se potpomogao pogon visokotlačne pumpe ili u kombinaciji sa Peltonovom turbinom kako bi se povećao tlak u povezanom toku. Ovi elementi koriste turbinu u pretvorbi hidrauličke energije iz koncentriranog toka u mehaničku energiju osovine koja se okreće, koja se zatim prenosi na hidrauličku energiju pomoću rotora pumpe (vidi sliku 10. Peltonova turbina - shematski ispod), ili drugi Peltonov krug (vidi sliku 9. Hidraulični turbopunjač - shematski prikazan uređaj u nastavku). To su dva najviše korištena centrifugalna ERD (Eng. Energy Recovery Device) uređaja korištena u desalinizaciji.[4]



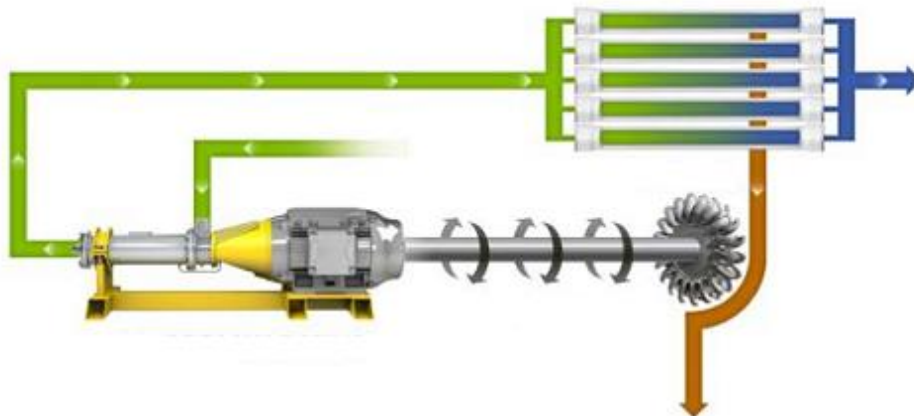
Slika 9: Hidraulični turbopunjač [4]

Hidraulični turbopunjač koristi mehaničku energiju osovine Peltonove turbine za okretanje druge Peltonove turbine na suprotnom kraju mehaničke osovine. Spajanje oba hidraulična turbopunjača i pumpe visokog pritiska smanjuje ukupnu pomaknutu glavu visokotlačne pumpe te na kraju smanjuje ukupnu potrošnju energije sustava. Učinkovitost hidrauličnog turbopunjača u prijenosu koncentrirane energije u struji za napajanje je blizu 81%. [4]

Turbopunjač se uspješno koristi za očuvanje energije u sustavima obrnute osmoze od 1989. Deluje kao obrnuto gonjena pumpa, gdje se koncentrat obrnute osmoze koristi za okretanje turbina spojena s pumpnim dijelom preko impelera na osovini turbine. Prijenos energije sa koncentrata obrnute osmoze do dobave obrnute osmoze kroz turbopunjač povećava pritisak dobave obrnute osmoze i tako smanjuje zahtjeve za vanjskom energijom. Slika 10 pokazuje shemu sustava obrnute osmoze koji koristi turbopunjač za obnovu energije. Budući da je turbopunjač brzo rotirajući stroj zahtjeva malo održavanja te je kompaktan u veličini i težini. Otpadni mlaz je pod pritiskom pa se može odstraniti bez potrebe za prepumpavanjem. Nominalna efikasnost uređaja ipak je niska. Gubici nastaju zbog porasta viskoznosti u uređaju te odstupanja u toku od dizajnirane veličine. Razlike u temperaturi ili razlika u povratu vode ima značajan utjecaj na izvedbu. Turbopunjač se uglavnom koristi na manjim jedinicama. [5]



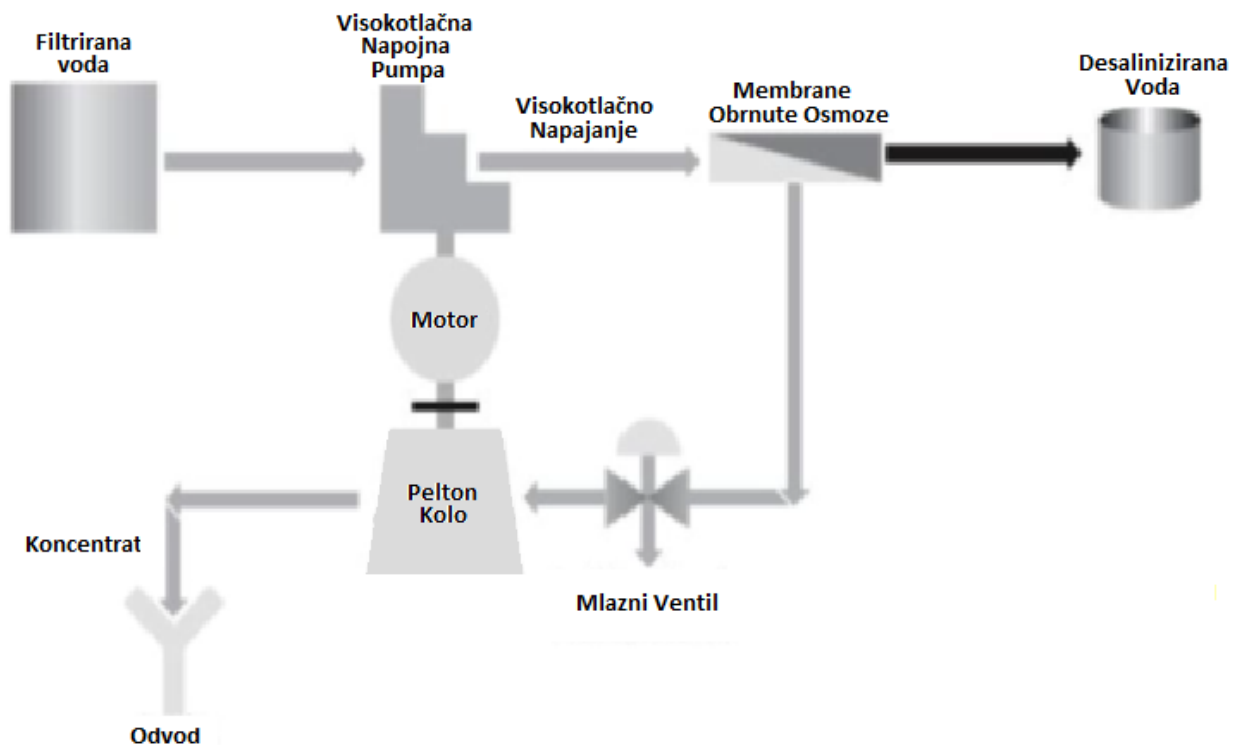
Slika 10: shema obrnute osmoze s turbopunjačem[5]



Slika 11: Peltonova turbina [4]

Jedinica Peltonove turbine koristi mehaničku energiju osovine turbine za povećanje energije dobivene od motora pumpe visokog pritiska sirove vode. Kroz ovu primjenu, dodajući snagu motora, učinkovitost prijenosa energije odnosno postotak oporavljene hidrauličke energije je blizu 78%.[4]

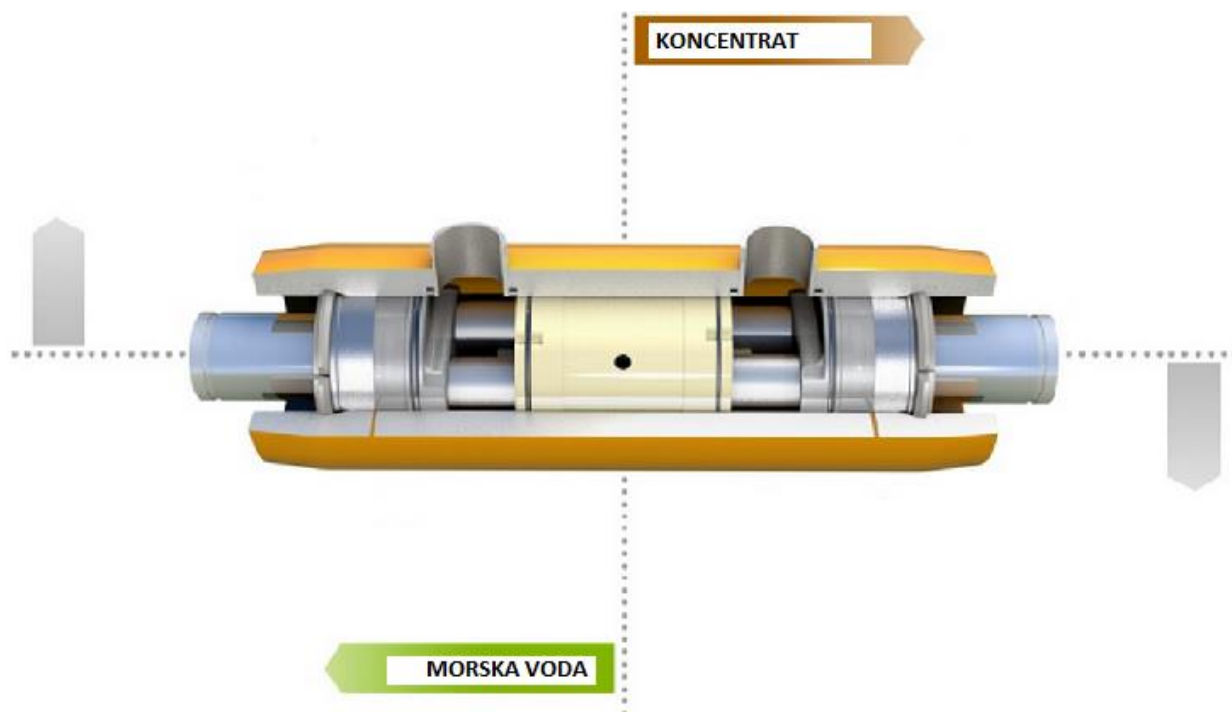
Tehnologija pelton kola je prvo procijenjena prije 20 godina, a prvi prototip stroja je baziran na standardnoj hidraulici hidroelektrične turbine. Razvoj ove tehnologije tokom zadnja dva desetljeća doveo je do šire upotrebe pelton kola u sistemima obrnute osmoze, zastupajući oko 80% uređaja za obnovu energije za postrojenja preko 1 mgd. Mlazni ventil se koristi za usmjeravanje visokotlačnog mlaza koncentrata na lopatice pelton kola, što okreće kolo. Kinetička energija mlaza je pretvorena u rotirajuću mehaničku energiju. Spajanjem osovine pelton kola na motor ili pumpu, ova energija se može koristiti da se smanji potreba za električnom energijom potrebnom za pumpanje napojne vode. Pelton kola su sigurna i jednostavna za održavanje. Obični uređaj ima efikasnost koja seže od 84% do 90%. Kako je ispušt pelton kola na atmosferskom tlaku, ili se preostala voda mora moći ispustiti gravitacijom, ili se mora prepumpati.[5]



Slika 12: dijagram toka- pelton kolo[5]

### 4.3. IZOBARNI UREĐAJI ZA POVRAT ENERGIJE

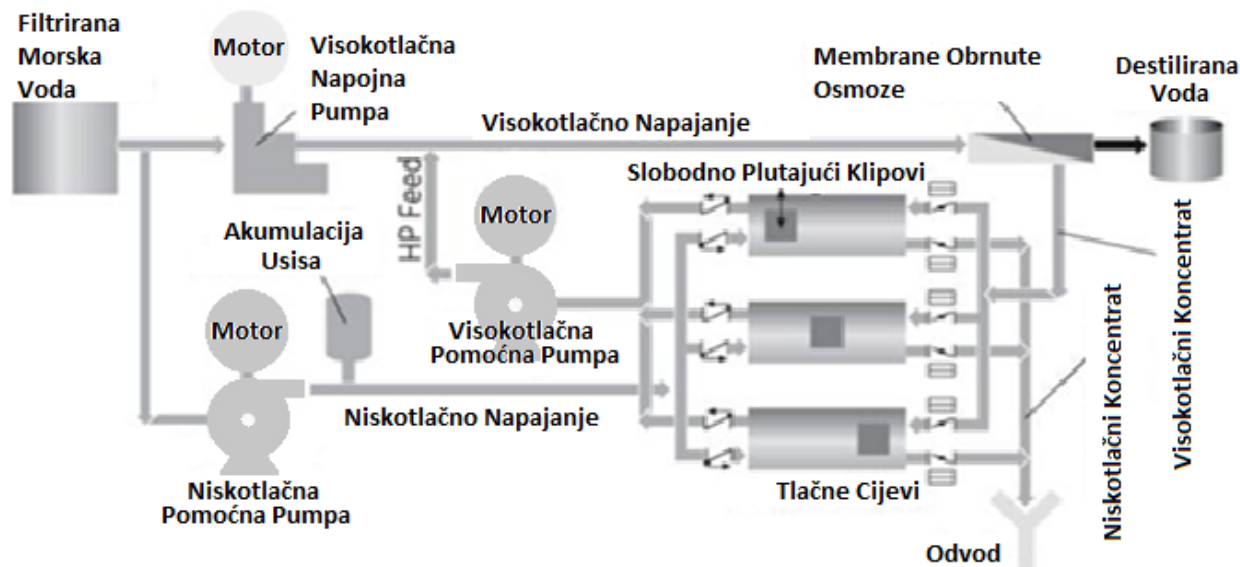
Razumijevanjem ograničenja iskoristivosti centrifugalnih sustava, nova generacija uređaja je posvećena izravnijem prijenosu energije, koji eliminira većinu gubitka učinkovitosti kroz prijenos. Ovi izobarni uređaji su u funkciji, što znači da izjednačavaju tlak. Jednostavno, ovaj sustav funkcionira s keramičkim klipom ili klipom statičke vode koja razdvaja dvije struje toka u stalno oscilirajuće komore. Pomoću koncentrata koji pritišće jednu stranu komore, klip se istim tlakom navodi u suprotni kraj komore, gdje je sirovi vodotok. Budući da je ovaj program izravniji prijenos energije od koncentriranog potoka na sirovi tok vode, izobarni uređaji uglavnom rade na višim stupnjevima hidrauličke učinkovitosti. U RO sustavu opremljenim izobarnim uređajima za povrat energije, visokotlačna pumpa umjesto cijele količine toka treba pritiskati samo količinu vode koja napušta sistem kao propusna.[4]



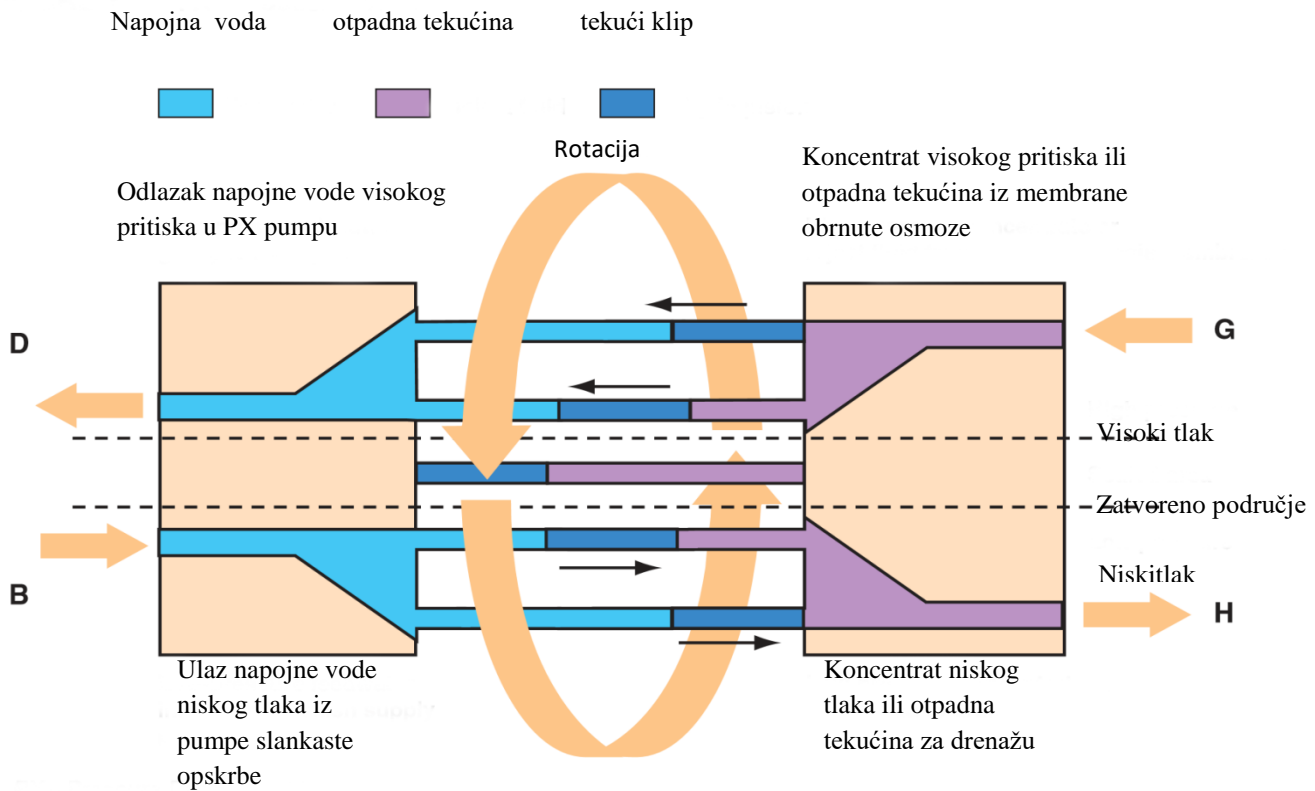
Slika 13: Izobarni ERD uređaj pokazuje visokotlačni i niskotlačni protok [4]

### 4.3.1. IZMJENJIVAČ RADA

Originalni izmjenjivači rada su napravljeni za vladu SAD-a u 1980. Postoji niz sličnih proizvoda na tržištu. Autorska kompanija promovira svoju verziju izmjenjivača rada pod imenom "dyprex". Izmjenjivači rada koriste sustav klipova i ventila da bi prenijela pritisak iz koncentrata obrnute osmoze do napojnih dijelova. Rad i vrijeme klipova kontrolira niz kontrolnih ventila koji se pokreću pomoću hidrauličnih ventila i namjenskog sustava elektronske kontrole. Visokotlačna buster pumpa onda pumpa ovu tlačenu napojnu vodu do određenih napojnih pritisaka obrnute osmoze. Preostala dobava se pumpa preko visokotlačne pumpe. Slika 14 prikazuje dijagram tipičnog sustava obrnute osmoze koji koristi izmjenjivač rada za povrat energije. Kako izmjenjivač rada radije direktno prenosi energiju s koncentrata na dobavu umjesto kroz rotirajući stroj, ima veću efikasnost u usporedbi sa pelton kolom i turbopunjačem. Ipak, izmjenjivač rada je ograničen u veličini pa iako dodavanjem jedinica u paralelni rad može povećati kapacitet, glavni trošak je veći za veća postrojenja. Izmjenjivači rada također mogu imati veći broj pokretnih dijelova koji se mogu istrošiti. Slika 18. prikazuje fotografiju izmjenjivača rada na 26400 l/dan.[5]



Slika 14: dijagram procesa-izmjenjivač rada[5]



Slika 15: Izmjenjivač tlaka[8]

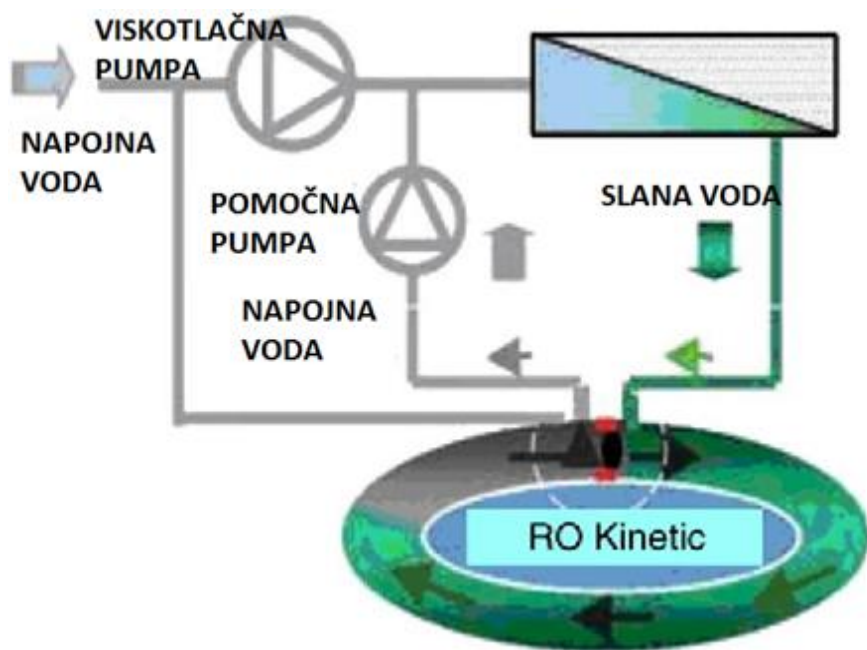
### Način rada izmjenjivača tlaka

Tlačni izmjenjivač koristi princip stalnog istiskivanja za tlačenje filtrirane napojne vode direktnim kontaktom s visokotlačnim protokom otpadne tekućine iz sistema obrnute osmoze. Prebacivanje pritiska događa se u uzdužnim cijevima keramičkog rotora koji se vrti unutar keramičke košuljice. Sklop košuljice rotora je učvršćen između dva keramička krajnja poklopca. U bilo kojem trenutku, jedna polovica cijevi je izložena visokom, a druga niskom tlaku. Kako se rotor vrti, cijevi prolaze zabrtvljenu površinu koja odvaja visokotlačnu stranu od niskotlačne. Ovaj proces je ilustriran na Slici 15. Napojna voda pumpana od opskrbe slankaste vode pod niskim tlakom protiče u cijevi na lijevoj strani slike. Ovaj protok istiskuje smjesu iz cijevi na desnoj strani. Nakon što se rotor okrene pored zabrtvljene površine, visokotlačna smjesa protiče u desnu stranu cijevnog sustava, tlačeći napojnu vodu, te ista protječe u visokotlačnu napojnu liniju koja ide u pumpu tlačnog izmjenjivača. Ovaj proces izmjenjivanja tlakova se ponavlja svakim

okretom rotora, kao i naizmjenično dopunjavanje cijevnih sustava. Brzinom od 1200 o/min jedan okretaj je završen svaku 1/20-inu sekunde.[8]

#### 4.4.RO KINETIC

Napojna voda akumulirana u jednom od izmjenjivača tlaka se tlači pomoću visokotlačne pumpe. Ovaj korak se postiže stvaranjem jednog zatvorenog kruga između izlaza membrane i ulaza modula za reverznu osmozu, gdje se na liniju ugrađuje spremnik vode (izmjenjivač tlaka) i pomoćna pumpa (Sl. 16). Izlaz slane vode iz linije obrnute osmoze i ulaz slane vode u membrane su na istom statičkom tlaku koji osigurava visokotlačna pumpa. Slana voda se mora dovesti u izmjenjivač tlaka i istisnuti dostavnu vodu koja se nalazi u komori, prisiljavajući ju u ulaz modula. Kako bi se to postiglo, potrebno je svladati diferencijalni tlak  $dP$  uzrokovan padom tlaka koji se odvija u membranama i izmjenjivačima tlaka. Pad tlaka u membranama je 1-2 bara.[6]



Slika 16: izmjenjivač tlaka stvara zatvoreni krug između izlaza membrane i ulaza RO modula[6]



Gubitak tlaka koji se javlja u sustavu tijekom cirkulacije morske vode u petlji je oko 1 bar, zbog čega pomoćna pumpa mora svladati taj pad tlaka od oko 3 bara. Membrane ne samo da će se napajati vodom iz visokotlačne pumpe, one se također napajaju količinom vode koja je jednaka volumenu odbačenog, u ovom slučaju crpljene pomoću pomoćne pumpe što zahtijeva samo minimalnu količinu energije. Kućište sadrži sve potrebne ventile (sl. 17) i druge mehanizme u vrlo malom prostoru. Sastoji se od dva tijela sa servo upravljanim ventilima, odvojenima s dva inercijska ventila.

Blokovi ventila sekvencijalno distribuiraju ulaz morske vode i izlaz slane vode iz izmjenjivača tlaka (Sl. 18). Dizajn ovih ventila sprječava kavitaciju, turbulenciju i prekomjerni pad tlaka.

RO Kinetic izmjenjivači tlaka su u obliku prstena ili zatvorene petlje (Sl. 19), pri čemu je voda koja ulazi ili izlazi iz njih, a koja mora biti pod tlakom ili bez tlaka, uvijek u stalnom pokretu kako bi se izbjegla nepotrebna potrošnja kinetičke energije do koje dolazi zbog zaustavljanja u radu (Sl. 21). Osim toga, dizajnirani su tako da omjer između dužine i promjera smanjuje šanse prekomjernog pada tlaka ili miješanja. Inercijski ventili su produljenje do izmjenjivača tlaka. Prolaz vode iz jedne komore u drugu provodi se gotovo bez prekida zbog brzine kojom se ventili aktiviraju po redu kako bi održali stalni kinetički ciklus. Osim toga, instalacija RO Kinetic opremljena je ekspanzijskim mjehurima koji djeluju kao prigušivači za udarce vode koji se mogu pojaviti za vrijeme malog zaustavljanja koje se odvija tijekom rada ventila, dok se komore pune.[6]



Slika 17: RO Kinetic tijelo ventila. Izvor: Sisahen SLU[6]



Slika 18: Pogled na RO Kinetik® tijelo ventila. Unutarnji protoci su: 1. ulaz slane vode u HP, 2. izlaz morske vode u HP, 3. izlaz morske vode u LP, 4. izlaz slane vode u LP. (HP: visoko-tlačni, LP: nisko-tlačni) Izvor: M. Barreto.[6]



Slika 19: RO KinetiC® petlje. Izvor: M. Barreto.[6]

## 5. USPOREDBA TEHNIČKIH RIJEŠENJA

### 5.1. USPOREDBA UREĐAJA ZA OBNOVU ENERGIJE

Pri odabiru najprikladnijeg uređaja za zadanu primjenu, treba uzeti u obzir nekoliko faktora uključujući trošak energije, očekivane oscilacije uvjeta prilikom upravljanja postrojenjem, troškove održavanja i troškove rada. Tablica 1 uspoređuje značajke tri uređaja za obnovu energije čije su karakteristike prezentirane u ovom radu. Glavni troškovi se odnose samo na troškove uređaja u određenoj primjeni, a svakako treba uzeti u obzir i sveukupni trošak pumpi, uređaja za obnovu energije i VFD kako bi se odredio optimum za dani slučaj. Nedavni inovativni pristup uključuje kombiniranje turbopunjača i pelton kola kako bi se minimalizirala potrošnja energije te što je efikasnije moguće obnovila energija preko širokog spektra operacijskih uvjeta.[5]

Tablica 1: usporedba uređaja za obnovu energije.[5]

UREĐAJ	TURBOPUNJAČ	PELTONOV KOTAČ	IZMJENJIV AČ RADA
Cijena	Niska	Srednja	Visoka
Efikasnost	Niska (55%-60%)	Srednja (84%-90%)	Visoka (>90%)
Krivuljaefikasnosti	Opadapremadoljekodmalih protoka	Varira	Ravno
Curenja	Manje u središtu	Povezanisamotorom	Niska (<3%)
Otporpremanapoju	Klizniležaj	Nije problem	
Raspon_kapaciteta	<2.5 mgd	Do višegmgd	<2.5 mgd
Pouzdanost	Brzohodni_rotacijski uređajilakizaodržavati	Brzohodnirotacijskiuređajilakiza održavati	Više ventila I drugih dijelova sklonih trošenju
Ispusni_tlak	Pod tlakom	Atmosferski	Pod tlakom
Efektdevijacijeizradbenog pogleda	Širok_operativni_raspon	Širok_operativni_raspon	Umjereni utjecaj_na učinak

Dva najvažnija uređaja za obnovu energije su Pelton kolo i Izmjenjivač tlaka. Glavna razlika između ta dva uređaja je protok koji tlači visokotlačna pumpa. U Pelton kolu visokotlačne pumpe tlače cijeli dostavni protok, dok u izmjenjivaču tlaka visokotlačne pumpe tlače samo dio dostavnog protoka, koji je jednak proizvodnom protoku. To znači da će se gubici normalne pumpe i motora primjenjivati samo na dio dostavnog protoka. Ovo je prvi element uštede energije koji se dodjeljuju grupi izmjenjivača tlaka.

Posebnost postupka obrnute osmoze za desalinizaciju leži u činjenici da rasolina koja dolazi iz membrana gubi vrlo malo dostavnog tlaka i taj protok rasoline sadrži gotovo 50% energije potrebne za desalinizaciju. To je razlog zašto je učinkovitost kojom se energija sadržana u tlaku rasoline prenosi na tlačenje dostavne vode kritična.

Oblik prijenosa energije u grupi izmjenjivača tlaka izravan je od rasoline na dostavnu vodu (kao u parnom stroju), što izmjenjivače tlaka istovremeno čini visokotlačnim pumpama za protok gotovo jednakom protoku rasoline. To je razlog zbog čega visokotlačna pumpa mora tlačiti samo dio dostavnog protoka jednakog tlaka. Gubici prijenosa su mali, a razliku tlaka između rasoline i dostavnog protoka (3-4 bara) isporučuje cirkulacijska pumpa.

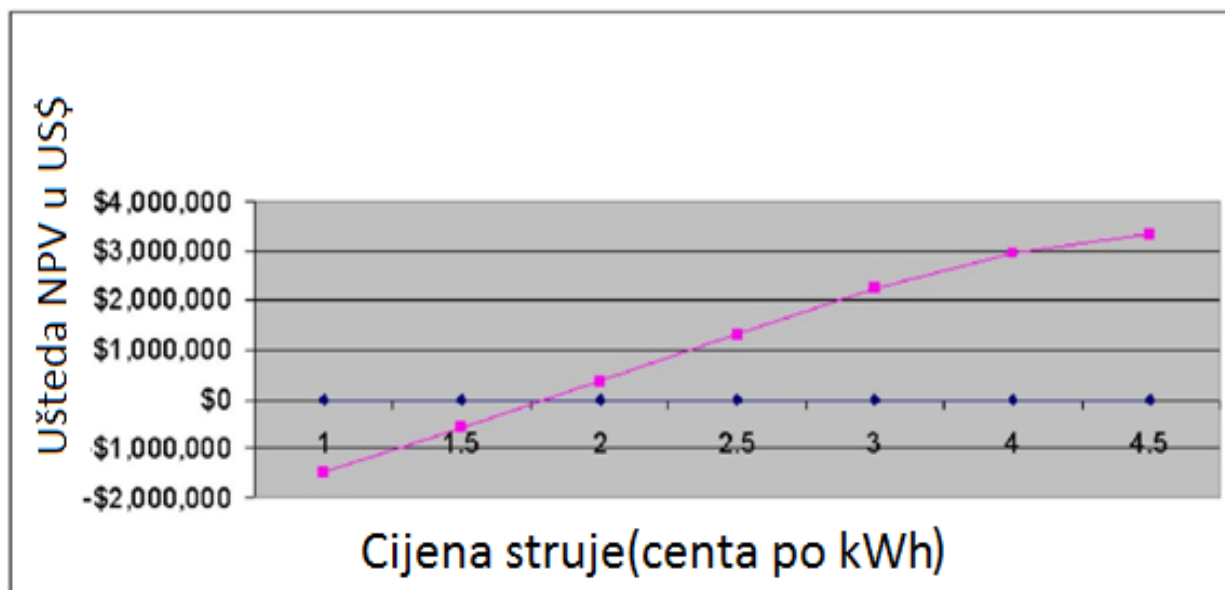
Učinkovitost povrata energije u skupini izmjenjivača tlaka iznosi oko 96 %.

Prijenos energije u Peltonovoj grupi je neizravan, pri čemu mlaz rasoline udara lopatice turbine. Učinkovitost same Peltonove turbine iznosi oko 87 posto. Energija se prenosi na osovinu i od osovine na pumpu.

Dobra učinkovitost pumpe je 85 posto, a na kraju lanca za retransmisiju, od 100 kWh energije u rasolini, samo 74kWh može se ponovno prenijeti na dostavni protok.[7]

## 5.2. UŠTEDA ENERGIJE – NUMERIČKI PRIMJER

Pretpostavimo da se postrojenje za desalinizaciju od 3943 m<sup>3</sup>/h može izgraditi jednim od dva tehnološka pristupa - Peltonova turbina ili izmjenjivač tlaka - prikazano na tablici 2. Troškovi opreme i održavanja u grupi izmjenjivača tlaka su veći nego u Peltonovoj grupi. Zasluge provedbe jedne ili druge skupine ovisi o nekoliko čimbenika kao što su troškovi energije, trajanje projekta, te kamatne stope. Slika 20. prikazuje isplativost grupe izmjenjivača tlaka u usporedbi s Peltonovom grupom u odnosu na energetske troškove. Graf na slici 20 predstavlja slučaj postrojenja za desalinizaciju od 3943 m<sup>3</sup>/h, 10 godišnji kredit, uz kamatu od 7,5 posto. Kao što se je prikazano, ako su troškovi energije za veliko industrijsko postrojenje iznad 1,75 posto po kWh, grupa izmjenjivača tlaka može biti ekonomičnija od opreme iz Peltonove grupe.[7]



Slika 20: .Isplativost grupe izmjenjivača tlaka za razliku od Peltonove grupe u odnosu na trošak energije[7]

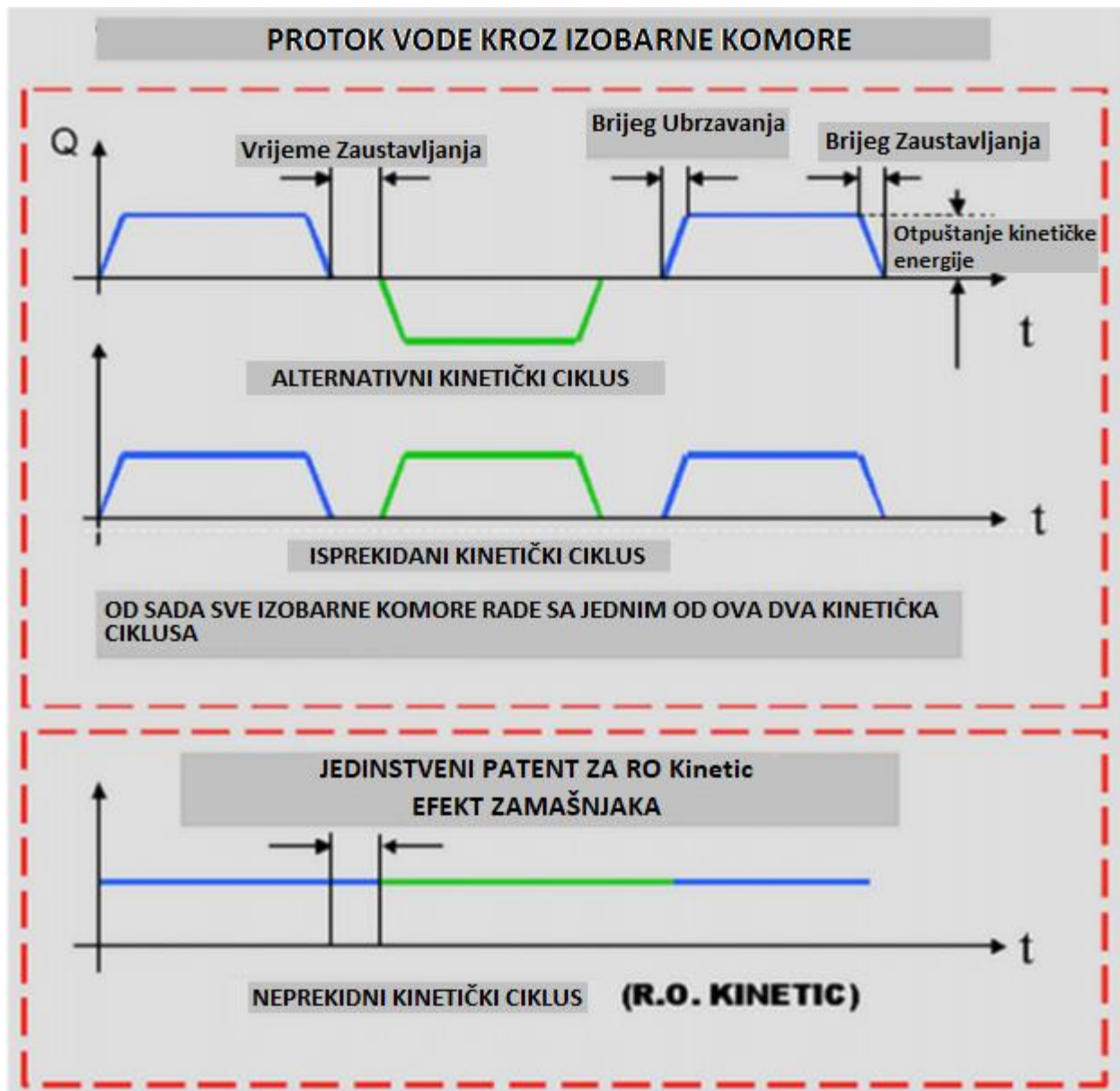
Tablica 2: Isplativost grupe izmjenjivača tlaka za razliku od Peltonove grupe u odnosu na trošak energije[7]

Zajednički podaci projektnih parametara koji se koriste u obje tehnološke grupe							
Proizvodnja postrojenja za vodu	Tlak do membrane	Tlak rasoline od membrane	Povrat postrojenja	Učinkovitost HP pumpe	Učinkovitost Peltonove turbine	Učinkovitost cirkulacijske pumpe	Učinkovitost motora
3943 m <sup>3</sup> /h	63 bara	50%	85%	87 %	89%	95 %	
Peltonova grupa							
Potrošnja energije KS pumpe	Povrat energije pomoću Peltona	Ukupna potrošnja energije za jedan sat rada	Specifična potrošnja energije po 1000 gal				
16232 kW	5716 kW	11069 kWh	10,63 kWh				
Grupa izmjenjivača tlaka							
Snaga HP pumpe	Snaga cirkulacijske pumpe	Ukupna potrošnja energije za jedan sat rada	Specifična potrošnja energije po 1000 gal			Razlika u potrošnji energije između grupe izmjenjivača tlaka i Peltonove grupe je 2,04 kWh po 1000 gal	
8543 kW	405 kW	8948 kWh	8,59 kWh				



### 5.3. RO KINETIC PREDNOSTI

Glavna prednost je ostvarena smanjena specifična potrošnja energije. Proces reverzne osmoze dosegne razinu  $2,10 \text{ kWh/m}^3$  (za postrojenje obrnute osmoze morske vode s nazivnim kapacitetom proizvodnje od  $2000 \text{ m}^3/\text{dan}$ ), u usporedbi s  $3,50$  do  $4,00 \text{ kWh/m}^3$  u optimiziranim postrojenjima koja koriste konvencionalne uređaje za povrat energije „turbinskog tipa“. Redukcija potrošnje električne energije je između 25 i 50% u odnosu na postrojenja s uobičajenim uređajima za povrat energije. Ovo smanjenje od gotovo 50% varijabilnih troškova u postrojenju za desalinizaciju predstavlja smanjenje ukupne cijene od 25%. Maksimalna energetska učinkovitost je oko 98%. Cijeli odbačeni tlak se iskorištava za tlačenje morske vode, bez da se i dio njega pretvara u bilo koju drugu vrstu energije. To je jedini sustav na svijetu koji maksimalno iskorištava kinetičku energiju i koji radi u neprekidnom kinetičkom ciklusu (između 8 i 10% energije je kinetička energija) uz odsutnost buke i vibracija koje mogu uzrokovati kvar zbog zamora materijala sustava ili materijala ostatka postrojenja. Razina buke koju proizvodi RO Kinetik može se smatrati zanemarivom jer je maskirana pomoću pomoćne pumpe i visokotlačne pumpe; procjenjuje se da je 10 dB u trajanju od nekoliko sekundi kad se odvija promjena ventila. Smanjen je kapacitet visokotlačne pumpe koja treba upravljati samo protokom jednakim protoku permeata, smanjujući radni volumen za gotovo 60% u odnosu na onaj potreban u konvencionalnim postrojenjima, što dovodi do uštede troškova pri kupnji manje crpke i potrošnje električne energije.[6]



Slika 21: Kontinuirani kinetički ciklus unutar izobarnih komora.[6]

Također je smanjena količina potrebnog sredstva protiv kamenca. Stopa povrata je smanjena na 38%, u usporedbi s 45% ili više kod postrojenja s konvencionalnim sustavima za povrat energije. Zbog toga smanjenja, odbačeni protok se povećava što uzrokuje smanjenje koncentracije slane vode. To dovodi do boljeg protoka kroz membranske površine, čime se smanjuje kamenac na membrani, a time i smanjuje količina potrebnog sredstva protiv kamenca, što proizvodi primjetnu uštedu u troškovima proizvodnje. Ukupni troškovi aditiva iznose oko 0,02 €/m<sup>3</sup> u odnosu na 0,05-0,06 €/m<sup>3</sup> za konvencionalne količine doziranja reagensa; stoga je trošak reagensa smanjen za 50%. Rad s većim omjerom povrata povećava koncentraciju slane vode i protok membrane nije dovoljan da bi se uklonile soli koje se talože na površini membrane. Povećanje stope povrata povećava pad tlaka, čime se povećava potrošnja energije od strane visokotlačne pumpe. Prilikom rada s izobarnim komorama, visokotlačna pumpa doprinosi toku permeata ekvivalentnim tokom, a ostatak doprinosi uređaju za povrat energije pomoću pomoćne pumpe čija je potrošnja energije znatno niža nego od visokotlačne pumpe (8-10% od potrošnje energije visokotlačne pumpe). Optimalna radna točka RO Kinetik je povrat između 38 i 40%. Nizak postotak miješanja između morske vode i slane otopine u izobarnoj komori smanjuje povećanje ukupne slanosti, čime povećava tlak potreban u procesu. To praktički nepostojeće miješanje događa se jer se tekućina unutar komore uvijek giba; pokretna masa vode nikada ne naiđe na statičku masu, za razliku od onoga što se događa s drugim izobaričkim uređajima za povrat energije. Postoji međufaza miješanja od oko 10 cm (može biti manja prema veličini petlje), ali miješanje je linearno te ne postoji turbulencija, što je razlog zašto miješanje nije homogeno. Osim toga ventili se podešavaju kako bi obavili promjenu u točnom trenutku, izbjegavajući pretjerano dulji kontakt između morske vode i slane vode, smanjujući postotak miješanja između obje struje. Vrlo spor rad (oko 5 ciklusa po minuti ili manje) se prenosi na gotovo nezamjetno mehaničko trošenje, za razliku od drugih uređaja za povrat energije s visoko-brzinskim rotirajućim izobarnim komorama koji mogu pretrpjeti katastrofalan kvar ako se protok premaši. Ovaj rad gotovo bez ikakvog održavanja predstavlja značajno smanjenje cijene troškova održavanja te produžuje životni vijek sustava. Također instalacija je vrlo učinkovita bez potrebe za velikim prostorima. RO Kinetik zatvorene petlje mogu se instalirati na vrlo različite načine (okomito, vodoravno, ispod blokova za reverznu osmozu, paralelne s blokom ili integrirane u strukturu bloka). Fleksibilan volumen vode kojim upravlja svaki uređaj smanjuje broj jedinica za instalaciju. To se postiže dimenzioniranjem volumena slane vode koju mogu primiti RO Kinetik petlje te reguliranjem vremena promjena

tlaka podešavanjem pomoću ventila. Uz to prestanak rada jedinice paralelno s nekoliko RO ne uzrokuje kaskadno isključivanje ostalih jedinica, dok je veći kapacitet uređaja za povrat energije moguće se postići radom više jedinica paralelno.[6]

#### 5.4. MOGUĆNOSTI IMPLEMENTACIJE

RO Kinetic sustav za uštedu energije predstavlja različite mogućnosti ugradnje; stoga ćemo napraviti razliku između već postojećih objekata i novih postrojenja.

Nova postrojenja: imaju koristi od uštede specifične potrošnje energije dobivene ugradnjom RO Kinetic i od smanjenja troškova visokotlačne pumpe dizajnirane za volumen proizvodne vode, što je samo oko 40% morske vode koju koristi postrojenje.

Već postojeća postrojenja: Postoje dvije mogućnosti:

1) Održavanje proizvodnje pogona i smanjenje specifične potrošnje energije instalacije do 50% u mnogim postrojenjima, dakle smanjenje operativnih troškova. Potrebno je uključiti VFD (pogon varijabilne frekvencije) na visokotlačnu pumpu za reguliranje njegove radne frekvencije, jer se novi protok se smanjuje na 40% nazivnog protoka.

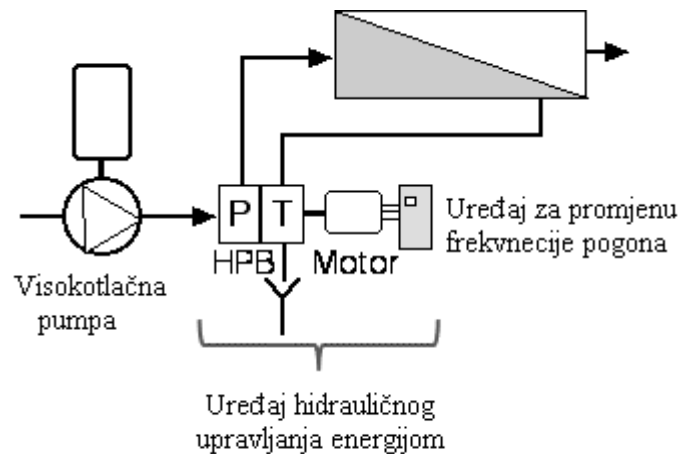
2) Održavanje sadašnje potrošnje energije postrojenja i povećanje proizvodnje postrojenja. Trenutni protok visokotlačne pumpe postaje protok permeata; dakle uključivanjem potrebnih posuda pod tlakom dobili smo povećanje protoka između 2 i 2,5 puta u odnosu na početni protok postrojenja. Stoga je moguće smanjiti specifičnu potrošnju energije postrojenja povećanjem proizvodnje, zadržavajući pritom istu potrošnju električne energije.[6]

Moguća su četiri načina ublažavanja tlaka kod visokotlačnih centrifugalnih pumpi u sustavima obrnute osmoze i to:

1. Protočni ventil – pumpa visokog tlaka dimenzionirana je za najviši predviđeni tlak sa regulacijskim ventilom koji raspodjeljuje tlak kako bi se postigao željeni tlak na membranu.
2. Uređaj za promjenu frekvencije pogona (eng. VFD) – koristi se za prilagodbu frekvencije napajanja motora same pumpe. Prema tome VFD može regulirati motor visokotlačne pumpe prema potrebi sa svrhom reguliranja izlaznog tlaka.
3. „Trim ili jockey“ pumpa – druga pumpa koja se koristi, smještena je u seriju sa visokotlačnim pumpama. „Jockey“ pumpa opremljena je uređajem za promjenu frekvencije pogona kako bi se omogućile promjene tlaka. Ukupno proizvedeni tlak pumpi izjednačava se sa stalnim tlakom pumpe, plus promjenjivi tlak „jockey“ pumpe. Namjera je koristiti manji VFD (uređaj za promjenu frekvencije pogona) na „jockey“ pumpi nego što bi inače bilo potrebno kod visokotlačne pumpe.
4. Uređaj za hidraulično upravljanje energijom – ovaj uređaj je modificirana verzija hidrauličnog turbopunjača, koji je široko prihvaćen od strane proizvođača sustava obrnute osmoze. Modifikacija dozvoljava preciznu regulaciju napajanja, te protoka i tlaka.[1]

### 5.4.1. FUNKCIJA HIDRAULIČNOG UPRAVLJANJA ENERGIJOM

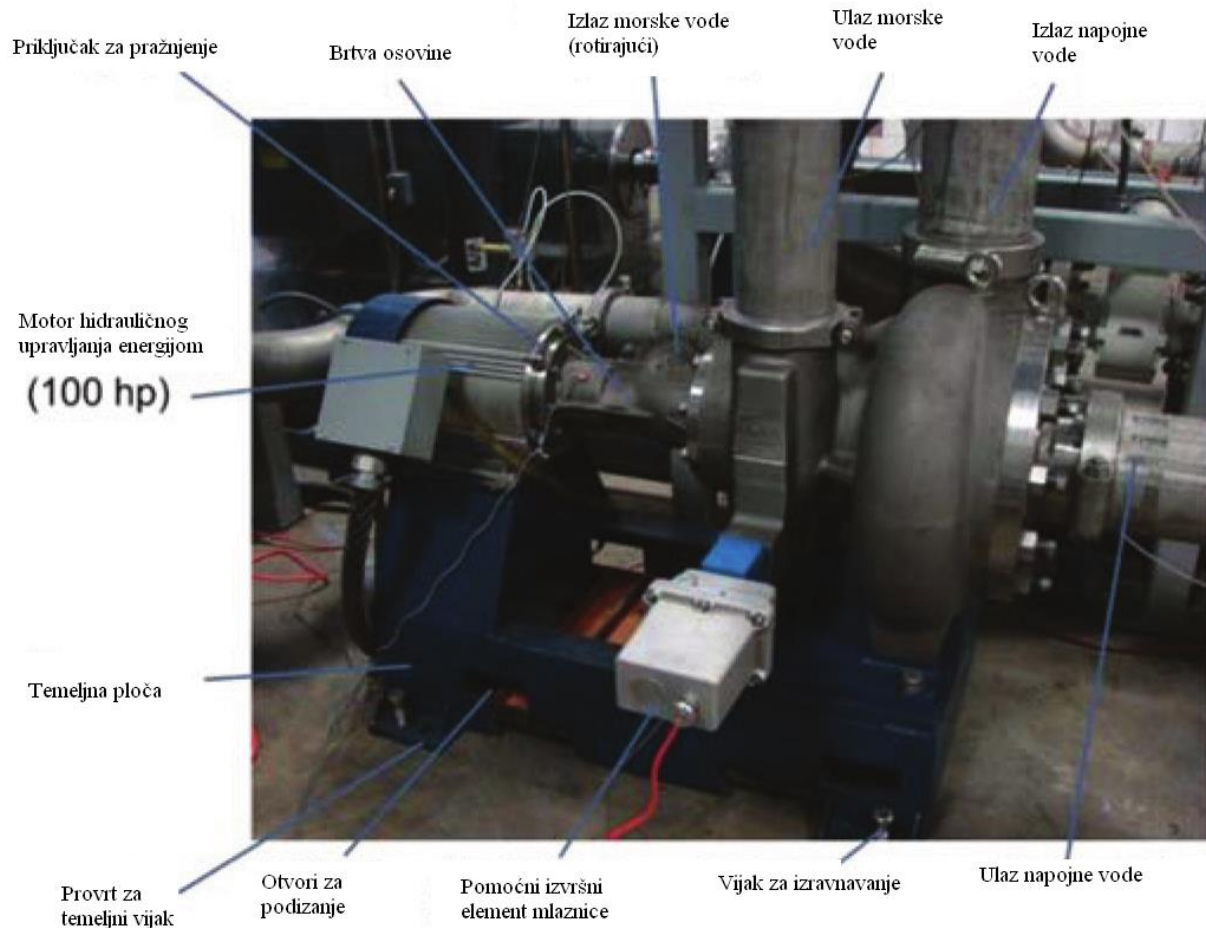
Hidraulično upravljanje energijom HEMI (eng. Hydraulic Energy Management Integration) je kombinacija standardnog hidrauličnog turbopunjača s motorom i uređaja za promjenu frekvencije pogona. Rotor pumpe hidrauličnog turbopunjača i rotor turbine povezani su na vanjski motor i svi rotiraju zajedno kao jedna cjelina. Sekcija pumpi hidrauličnog upravljanja energijom radi u seriji s pumpama visokog tlaka, a sekcija turbine nadoknađuje morsku vodu i hidrauličnu energiju (Slika 22).[1]



HPB - hidraulični turbopunjač

Slika 22: Sustav hidrauličnog upravljanja energijom [1]

Uređaj pojačava tlak napajanja do željenog tlaka membrane bez obzira na tlak visokotlačne pumpe. Turbina morske vode pokreće pumpe hidrauličnog upravljanja energijom. U slučaju da turbina ne može ispuniti zahtjeve za energijom, privješeni motor pruža ravnotežu. U pravilu je motor hidrauličnog upravljanja energijom između 10% i 15% snage motora visokotlačne pumpe. Slika 23 prikazuje uređaj hidrauličnog upravljanja.

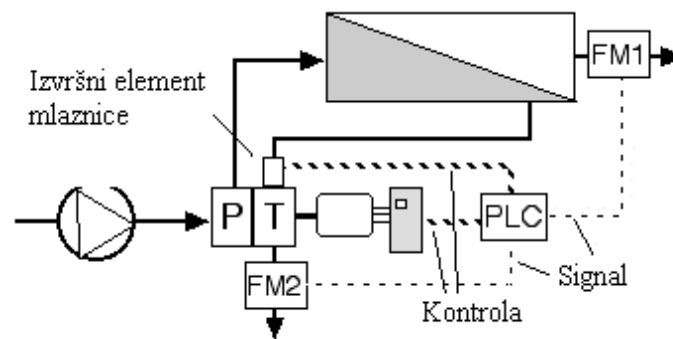


Slika 23: Uređaj hidrauličnog upravljanja [1]

#### 5.4.2. KONTROLA HIDRAULIČNOG UPRAVLJANJA ENERGIJOM

Cilj kontrole u sustavima obrnute osmoze je osigurati konstantno širenje i protok morske vode bez obzira na salinitet napojne vode, temperaturu i obraštanje membrane. To se može postići kontrolom tlaka napajanja i tlaka morske vode. Uređaj hidrauličnog upravljanja energijom osigurava kontrolu u dva smjera. Prvi je da porast tlaka generiran hidrauličnim upravljanjem energije ovisi o broju okretaja samog uređaja, koji je kontroliran motorom. Broj okretaja motora

za hidraulično upravljanje energijom kontroliran je uređajem za promjenu frekvencije pogona (upravilu od 380 ili 460 V i 150-300 kW). Uređaj za promjenu frekvencije pogona kontroliran je od strane PLC uređaja hidrauličnog upravljanja. Dakle, PLC (Eng. Programmable Logic Controller) kontrolira tlak napajanja. Drugi kontrolni dodatak je da uređaj hidrauličnog upravljanja energijom može održavati konstantni protok morske vode u širokom rasponu promjene tlaka korištenjem mlaznice na turbini. Ta se mlaznica podešava pomoću izvršnog elementa koji je pod kontrolom PLC uređaja. Slika 24 prikazuje osnovnu kontrolnu shemu.



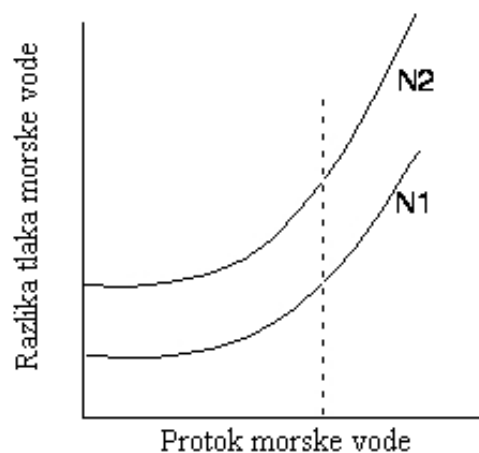
Slika 24: Kontrola sustava hidrauličnog upravljanja energijom [1]

Tablica 3: Mogući odgovori uređaja s obzirom na stanje

Stanje	Odgovor uređaja hidrauličnog upravljanja energijom
Protok prožimanja pre nizak	Povećavanje brzine rotora
Protok prožimanja pre visok	Smanjenje brzine rotora
Veliki protok morske vode	Zatvaranje mlaznice turbine
Mali protok morske vode	Otvaranje mlaznice turbine

Sekundarna hidraulična interakcija proizlazi iz činjenice da se uz promjenu brzine rotora, također mijenja i tlak turbine, kao što je prikazano na slici 25.





Slika 25: Karakteristike turbine

Naime, za određeni protok morske vode, povećavanje brzine rotora dovodi i do povećavanja otpora protoku kroz turbinu. Ovakav odgovor je poželjan sve dok povećanje brzine odgovara većem tlaku morske vode što zahtjeva veći protok kroz turbinu. Prema tome, efekti brzine rotora na otpor protoku kroz turbinu doprinose polu-pasivnoj kontroli hidrauličnog upravljanja energijom. Ovaj efekt smanjuje potrebu varijacije u mlaznici turbine kako bi se postigao određeni otpor protoku kroz turbinu.

## 6. ENERGETSKI ZAHTJEV ZA PROCES DESALINIZACIJE

### 6.1. MINIMALNI ENERGETSKI ZAHTJEV ZA DESALINIZACIJU

Svi procesi desalinizacije su energetske intenzivni i dijele zajednički minimalni energetske zahtjev za odvajanje slane otopine u čistu vodu i koncentrirane rasoline. To je neovisno o upotrijebljenoj detaljnoj tehnologiji, preciznom mehanizmu ili broju procesnih faza. Ideja minimalne energije za proces odvajanja dobro je utvrđena u termodinamici. Kretanje otopljive supstance u cijelosti je određeno fluktuacijama toplinskih sudara s obližnjim molekulama otapala. Minimalni potrebni rad je jednak razlici slobodne energije između ulaznog napajanja (morskom vodom) i izlaznog toka (proizvodne vode i ispusta rasoline). Korištene su različite metode za izračunavanje minimalne energetske potrebe za desalinizaciju vode. Korištenjem Van't Hoff formule za normalnu slanost morske vode, jednako; 33000 ppm na 25° C, minimalni rad je izračunat kao 0.77 kWh/m<sup>3</sup>. [3]

### 6.2. ZAHTJEV STVARNE ENERGIJE GLAVNIH PROCESA DESALINIZACIJE

Stvarni potrebni rad je vjerovatno mnogo puta teoretski minimalan. To je zbog dodatnog rada koji je potreban za održavanje procesa pri konačnoj brzini, umjesto da se postigne odvajanje. Trenutno, postrojenja za desalinizaciju koriste 5 do 26 puta više rada nego što iznosi teoretski minimum, ovisno o vrsti procesa koji se koristi. Zbog ove intenzivne potrošnje energije, postoji potreba da procesi desalinizacije budu što je moguće energetske učinkovitiji, što će se ostvariti poboljšavanjem tehnologije i ekonomijom razmjera. Sustavi obrnute osmoze, elektrodijalizni sustavi i sustavi kompresije pare koriste električnu energiju kao primarni izvor energije, dok sustavi poput višestupanjskog flash, višestruke destilacije i toplinske kompresije pare koriste toplinsku energiju kao primarni izvor i električnu energiju za pogon povezanih pumpi kao sekundarni izvor. Struja bi se mogla generirati iz fosilnih goriva (ugljenja, nafte i plina), obnovljive energije i nuklearnih izvora. Toplinska energija mogla bi se proizvesti iz kotlova koja rade na fosilna goriva, otpadne topline u elektranama, obnovljivih izvora energije i izvora topline od industrijskih otpadaka. [3]

## 7. POTROŠNJA ENERGIJE U RO PROCESU

Električna struja je jedina energija koja se koristi u RO procesu. Potrošnja energije u RO procesu ovisi uglavnom od saliniteta napojna vode i brzina obnavljanja. Osmotski tlak je povezan sa brojem otopljenih čestica u napojnoj vodi; stoga, visoki salinitet zahtjeva i veću količinu energije tijekom visokog osmotskog tlaka. Veličina RO jedinice varira od jedinica malog kapaciteta do jedinice  $0.1\text{m}^3/\text{l}$  na dan do  $395\,000\text{ m}^3/\text{l}$  na dan. Prosječna potrošnja energije kreće se između  $3.7\text{kW h/m}^3$  do  $8\text{ kW h/m}^3$ . Potrošnja može prelaziti  $15\text{ kW h/m}^3$  za jako male jedinice. Za tipičnu veličinu RO jedinice od  $24\,000\text{ m}^3/\text{l}$  dan, potrošnja se kreće između  $4$  i  $6\text{ kW h/m}^3$ . Niski tlak je potreban za destilaciju bočate vode; stoga, drugačije membrane se koriste i puno viši omjeri obnavljanja su mogući, što čini potrošnju energije manjom. Za RO bočate vode, potrošnja struje se kreće između  $1.5$  do  $2.5\text{ kW h/m}^3$ . Električna energija je jedini oblik energije koji se troši u membranskim procesima. Za proces obrnute osmoze, izmjenična struja se troši za pogon različitih pumpi, dok se istosmjerna struja troši u elektrodijaliznim elektrodama, i izmjenična ili istosmjerna struja se troši za pogon elektrodijalizne pumpe.[3]

### 7.1. EKONOMIČNOST MEMBRANSKOG PROCESA

Tijekom godina, tehnologija membrane se poboljšala što je razlog smanjenja troškova RO proizvodnje vode. Za velika postrojenja obrnute osmoze morske vode, s kapacitetom između  $100,000$  te  $320,000\text{ m}^3/\text{l}$  dan, cijena proizvodnje vode se kreće između  $0.45$  do  $0.66\text{ US\$/m}^3$ . Za srednja postrojenja obrnute osmoze morske vode sa kapacitetom proizvodnje tehničke vode između  $15,000$  te  $60,000\text{ m}^3/\text{l}$  dan, cijena proizvodnje iznosi  $0.48$ - $1.62\text{US\$/m}^3$ . Za postrojenja obrnute osmoze manjih kapaciteta  $1000$ - $4800\text{ m}^3/\text{l}$  dan, cijena proizvodnje tehničke vode je između  $0.7$ - $1.72\text{US\$/m}^3$ . Za slatkastu vodu (ispod  $10,000\text{ ppm}$ ), obrnuta osmoza te elektrodijaliza su najekonomičnije metode desalinizacije. Oba procesa mogu biti korištena za desalinizaciju. Kada je ppm nizak ili kada je potrebna visoka rekuperacija topline, process elektrodijalize je optimalan gledajući cijenu te efektivnost desalinizacije. Trošak proizvodnje tehničke vode kod velikih postrojenja obrnute osmoze slane vode ( $40,000$ - $46,000\text{ m}^3/\text{l}$  dan) je  $0.26$  - $0.54\text{ US\$/m}^3$ , dok trošak proizvodnje vode postrojenja elektrodijalize iznosi od  $0.6$  do  $1.05\text{ US\$/m}^3$ . Trošak svih postrojenja ovisi o slanitetu vode.[3]

Tablica 3: Potrošnja energije glavnih desalinizacijskih procesa[3]

Svojstva	Višestupnjevita flash destilacija	Višestruka destilacija	Mehanička kompresija pare	Termalna kompresija pare	Obrnuta osmoza morske vode	Obrnuta osmoza slankaste vode	Elektrodijaliza
Tipične veličine postrojenja m <sup>3</sup> /dan	50,000–70,000	5,000–15,000	100–3,000	10,000–30,000	do 128,000	do 98,000	2–145,000
Potrošnja električne struje kWh/m <sup>3</sup>	2.5–5	2–2.5	7–12	1.8–1.6	4–6 s energijom	1.5–2.5	2.64–5.5
Potrošnja toplinske energije (MJ/m <sup>3</sup> )	190–282	145–230	Nema	227	Nema	Nema	Nema
Ekvivalent električne i toplinske energije kWh/m <sup>3</sup>	15.83–23.5	12.2–19.1	Nema	14.5	Nema	Nema	Nema
Ukupna potrošnja električne energije kWh/m <sup>3</sup>	19.58–27.25	14.45–21.35	7–12	16.26	4–6	1.5–2.5	2.64–5.5, 0.7–2.5
Kvaliteta proizvedene vode (ppm)	E 10	E 10	E 10	E 10	400–500	200–500	150–500

Iako destilacijska postrojenja proizvode vodu vrlo niskog slaniteta (10ppm) u usporedbi s (400-500 ppm) sistemima obrnute osmoze, unaprijeđenje tehnologije je rezultiralo razvojem membrane koja zahtjeva manji tlak (manje energije), duži vijek trajanja te smanjuje troškove. Ovo omogućuje RO procesu da bude ekonomičniji od ostalih desalinizacijskih metoda. Ovo nije slučaj kad je nisko temperaturno zagrijavanje dobiveno iz proizvodnje električne struje, te otpadne topline ili solarnog izvora. Ekonomičnost može biti pomak u korist desalinizacijskog procesa. Svi podatci su predstavljeni u tablici 4.

Tablica 4: Proječni trošak za glavne desalinizacijske procese[3]

Tip procesa	Tip vode	Trošak (US\$/m <sup>3</sup> )
Višestupnjevita flash destilacija 23,000-528,000 m <sup>3</sup> /1 dan	Morska	0,56 do 1,75
Višestruka destilacija 91,000-320,000 m <sup>3</sup> /1 dan 12,000-55,000 m <sup>3</sup> /1 dan manje od 100 m <sup>3</sup> /1 dan	Morska	0,52-1,01 0,95-1,5 2,0-8,0
Kompresija pare 30,000 m <sup>3</sup> /1 dan 1,000 m <sup>3</sup> /1 dan	Morska	0,87-0,95 2,0-2,6
Obrnuta osmoza 100,000-320,000 m <sup>3</sup> /1 dan 15,000-60,000 m <sup>3</sup> /1 dan 1,000-4,800 m <sup>3</sup> /1 dan	Morska	0,45-0,66 0,48-1,62 0,7-1,72
Obrnuta osmoza veliki kapaciteti: 40,000 m <sup>3</sup> /1 dan srednji: 20-1,200 m <sup>3</sup> /1 dan jako mali: nekoliko m <sup>3</sup> /1 dan	Slana voda	0,26-0,54 0,78-1,33 0,56-12,99
Elektro dijaliza veliki kapacitet mali kapacitet	Slana voda	0,6 1,05

## ZAKLJUČAK

Tijekom zadnjih 20 godina, inovacije u polju obrnute osmoze kao što su u području drugačijeg dizajna membrane i njezine aplikacije, i uređaji za obnovu energije značajno su smanjili trošak proizvodnje desalinizirane vode obrnutom osmozom. Razvoj u ovim područjima nastaviti će poboljšavati tehnologiju desalinizacije. Uređaji za obnovu energije trebaju biti procijenjeni od slučaja do slučaja. Turbopunjači, pelton kola i izmjenjivači rada imaju drugačije zasluge i svaki izvodi očuvanje energije sa najvećim mogućim očuvanjem obrnuto proporcionalnim za njihove relativne glavne troškove.

Izmjenjivači rada su pokazali, pouzdanu povijest učinka i pokazali su poprilično manju potrošnju energije nego ostali dostupni proizvodi. Za duže vrijeme, veća upotreba gdje su troškovi energije visoki, iako imaju veće glavne troškove, izmjenjivači rada mogu biti najjeftinije sveukupno rješenje (gledajući operacijske i glavne troškove). Izobarni uređaji za povrat energije osiguravaju veću učinkovitost od centrifugalnih uređaja, no centrifugalni uređaji su općenito bolje karakterizirani i jednostavniji za održavanje i rad. Učinkovitosti uređaja za povrat energije kreću se od 78% do 99%, pri čemu je izobarna najučinkovitija i Pelton turbina s najnižom učinkovitosti.

Uređaj RO Kinetic za povrat energije osigurava visoku učinkovitost prijenosa energije, minimalno održavanje, veliku jednostavnost rada. U ranim danima desalinizacije morske vode, potrošnja energije je oko  $20 \text{ kWh/m}^3$ . Poboljšanja prinosa u komponentama postrojenja (posebno u membranama) omogućila su da se postupno smanji specifična potrošnja energije procesa, koji sa sustavima kao što je RO Kinetic® dostiže vrijednosti od oko  $2,20 \text{ kWh/m}^3$ . RO Kinetic je uređaj za povrat energije koji u stanju znatno smanjiti specifičnu potrošnju energije, a time i troškove poslovanja, približavajući se minimalnim teoretskim granicama vrijednosti potrošnje energije procesa reverzne osmoze za desalinizaciju morske vode. Prilagodljivost sustava omogućuje raznoliku ugradnju s mogućnosti postavljanja RO Kinetic zatvorene petlje u različitim konfiguracijama. Zbog sporog režima rada, postaje pouzdan uređaj s jednostavnim održavanjem. Od 2002. godine RO Kinetic postaje tehnologija dostupna bilo kojem operatoru ili proizvođaču ove vrste postrojenja. Ostvarive vrijednosti specifične potrošnje energije sa sustavom RO Kinetic blizu su teoretskih minimuma.

## LITERATURA

- [1] E. Oklejas, J. Hunt: Desalination and Water Treatment, 31.July.2011., page 88-94.
- [2] P. A. Davies: Comparison of Configurations for High-Recovery Island Desalination Systems, 17.September.2012.
- [3] A. Al-Karaghoul, L. L. Kazmerski: Renewable and Sustainable Energy Reviews, page 343-356, 29.Deceber.2012.
- [4] L. R. Littrell: Energy Recovery in Desalination: Returning Alternative water supplies to consideration
- [5] S. Meyer-Steele, A.von Gottberg, J. L. Talavera: Seawater Reverse Osmosis Plants in the Caribbean Recover Energy and Brine and Reduce Costs
- [6] B. Penate, J. A. de la Fuente, M. Barreto: Operation of the RO Kinetic energy recovery system: Description and real experiences, 25.November.2009.
- [7] Dr. B. Liberman: The importance of energy recovery devices in reverse osmosis desalination
- [8] J. P. MacHarg, S. A. McClellan: Pressure Exchanger Helps Reduce Energy Costs