# Model generatora slatke vode

**Kralj, Predrag**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2012**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:188:694983

*Rights / Prava:* Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

Image not found or type unknown

*Repository / Repozitorij:*

Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository

Image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**
**POMORSKI FAKULTET**
**U R I J E C I**

**Mr. sc. PREDRAG KRALJ**

# MODEL GENERATORA SLATKE VODE

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Rijeka, 2012.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**
**POMORSKI FAKULTET**
**U R I J E C I**

**Mr. sc. PREDRAG KRALJ**

# MODEL GENERATORA SLATKE VODE

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Rijeka, 3. srpanj 2012.**

## INFORMACIJE O DOKTORANDU

1. Ime i prezime: PREDRAG KRALJ
2. Datum i mjesto rođenja: 10. rujna 1963., Rijeka
3. Naziv završenog fakulteta i godina diplomiranja: TEHNIČKI FAKULTET U RIJECI, 1988.
4. Naziv poslijediplomskog studija i datum obrane magistarskog rada: BRODSKA ENERGETSKA POSTROJENJA, 5. veljače 1996.
5. Naslov magistarskog rada: OPTIMIZIRANJE BRODSKIH UREĐAJA ZA DESTILACIJU MORSKE VODE

## INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

1. Naslov disertacije: **MODEL GENERATORA SLATKE VODE**
2. UDK: 628.165(043.3)
   629.063.4(043.3)
3. Fakultet na kojem je disertacija obranjena: POMORSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI

## POVJERENSTVA, OCJENA I OBRANA DISERTACIJE

1. Datum prihvaćanja teme: 15. lipnja 2011.
2. Mentor: Doc. dr. sc. Dragan Martinović
   Komentor: Doc. dr. sc. Mato Tudor
3. Povjerenstvo za ocjenu: Izv. prof. dr. sc. Željko Kurtela
   Doc. dr. sc. Dragan Martinović
   Doc. dr. sc. Mato Tudor
4. Povjerenstvo za obranu: Izv. prof. dr. sc. Željko Kurtela
   Doc. dr. sc. Dragan Martinović
   Doc. dr. sc. Mato Tudor
5. Datum obrane: 6.07.2012.
6. Datum promocije:
7. Rad je pohranjen na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.
   Rad nije objavljen.

## INFORMATION ON THE Ph.D. CANDIDATE

1. Name and surname: PREDRAG KRALJ
2. Date and place of birth: 10th September 1963 at Rijeka
3. The faculty the candidate has graduated from and the year of graduation: FACULTY OF ENGINEERING RIJEKA; in 1988
4. The postgraduate study and the master's (M.Sc.) thesis defence date: SHIP POWER PLANT; master's thesis defended on 5th February 1996
5. The master's (M.Sc.) thesis entitled: OPTIMIZATION OF THE SHIP SEAWATER DISTILLATION EQUIPMENT

## INFORMATION ON THE Ph.D. THESIS

1. The Ph.D. thesis entitled: **A FRESH WATER GENERATOR MODEL**
2. UDC: 628.165(043.3)
   629.063.4(043.3)
3. The Ph.D. thesis defended at the: FACULTY OF MARITIME STUDIES IN RIJEKA, University of Rijeka

## COMMITTEES, Ph.D. THESIS EVALUATION AND DEFENCE

1. Ph.D. thesis acceptance date: 15th June 2011
2. Super advisor: Assistant professor Dragan Martinović, Ph.D., BSME
   Advisor: Assistant professor Mato Tudor, Ph.D., BSEE
3. Evaluation committee: Associate professor Željko Kurtela, Ph.D., BSMT
   Assistant professor Dragan Martinović, Ph.D., BSME
   Assistant professor Mato Tudor, Ph.D., BSEE

4. Ph.D.thesis defence committee: Associate professor Željko Kurtela, Ph.D., BSMT
   Assistant professor Dragan Martinović, Ph.D., BSME
   Assistant professor Mato Tudor, Ph.D., BSEE
5. Ph.D. thesis defence date: 6th July 2012
6. Degree awarding ceremony date:
7. The Ph.D. thesis is deposited at the Faculty of Maritime Studies of the University of Rijeka.
   The Ph.D. thesis is not published.

**SAŽETAK**

U radu su obrađeni kriteriji za odabir optimalne izvedbe uređaja za proizvodnju slatke vode iz morske ili bočate vode te analizirane postojeće metode, odnosno utrošak i oblik energije potrebne za rad uređaja. Pored toga, ponuđeni su dodatni kriteriji za odabir stacionarnih i brodskih uređaja.

Razvijeni su matematički modeli za analizu pojava pri procesu vakuumske destilacije, metode koja je najzastupljenija na brodovima velikih nosivosti te termodinamičkih svojstava morske vode ovisnih o temperaturi i slanosti. Slijedom toga analizirani su procesi prekidnog i neprekidnog isparavanja što je rezultiralo izradom matematičkog modela ovisnosti kapaciteta uređaja za proizvodnju slatke vode o ekspolatacijskim uvjetima. U radu su prikazani dvo i trodimenzionalni dijagrami promjene koncentracije soli u vodi, tj. slanosti, tijekom procesa destilacije. Matematički model ovisnosti kapaciteta o eksploatacijskim uvjetima, tj. slanosti i temperaturi ulazne morske vode, količini dovedene topline te postignutom podtlaku u uređaju, omogućuje razmatranja o optimalnom ponašanju časnika stroja ili optimalnoj izvedbi sustava upravljanja uređajem. Ispravnost modela provjerena je anketnom metodom te usporedbom s radom simulatora strojarnice renomiranog svjetskog proizvođača. Simulirane su promjene eksploatacijskih uvjeta te potvrđen, matematičkim modelom postavljen, utjecaj na rad uređaja, odnosno kapacitet i slanost destilata.

Pored modela kapaciteta uređaja analizirana je primjena sustava automatskog upravljanja te su kao rezultat toga ponuđena dva modela. U prvom se slučaju radi o potpuno automatiziranom postrojenju, dok drugi slučaj predstavlja jednostavniju izvedbu s manje elemenata, ali koja u potpunosti prati matematički model kapaciteta uređaja.

Ključne riječi: matematički model, destilacija, model sustava upravljanja

**SUMMARY**

The criteria necessary to determine the optimal fresh water production equipment design are presented in the doctoral thesis. The existing methods, the shape and the consumption of energy in the process of operation are analyzed. Additional criteria used for the selection of both the stationary and the marine fresh water producing equipment, are given as well.

The mathematical models describing the processes that occur during vacuum distillation, the method most commonly in use on board large ships, are developed, as well as the models of the sea water thermodynamic properties depending on the temperature and the salinity. Furthermore, the processes of a continuous evaporation and of evaporation in charges have been analyzed, which led to the development of the mathematical model of fresh water producing equipment capacity dependence on the exploitation terms. The two and three dimensional diagrams showing changes of the salt concentration in the water, i. e. salinity, during the distillation process are given. The mathematical model of the capacity dependence on the exploitation terms, i. e. the sea water salinity and its entry temperature, the quantity of the heating energy and, the vacuum in the vessel, allows further considerations on the marine engineer optimal behavior or, the optimal design of the distillation equipment control system. The validity of the model has been confirmed through the poll method and by comparing it with the engine room simulator of one of the world most distinguished producer. The exploitation terms changes have been simulated thus confirming, by a set mathematical model, its influence on the equipment, namely the capacity and the distillate salinity.

Besides the equipment capacity model, the application of the automatic control system has been analyzed, which resulted in the two suggested models. In the first case, it is a fully automated plant, while the second case represents a slightly simplified version with fewer elements but completely in accordance with the equipment capacity mathematical model.

Key words: mathematical model, distillation, control system model

**SADRŽAJ**

**1. UVOD 1**

**1.1. Postavljanje problema 1**

**1.2. Postavljanje cilja 2**

**1.3. Dosadašnja istraživanja 3**

*1.3.1 Matematički modeli isparivača* **3**

*1.3.2. Matematički modeli odnošenja te odvajanja kapljica iz struje pare* **5**

*1.3.3. Matematički modeli kondenzatora* **6**

*1.3.4. Kogeneracija i drugi izvori topline* **7**

*1.3.5. Povećanje stupnja iskoristivosti* **8**

*1.3.6. Makroskopski modeli* **9**

*1.3.7. Svojstva morske vode* **10**

**1.4. Metode istraživanja 11**

**1.5. Kompozicija rada 11**

**2. PRIMJENJIVOST METODE I KONSTRUKCIJSKOG RJEŠENJA 13**

**2.1. Metode desalinizacije morske ili bočate vode 13**

**2.2. Uvjeti okoline 32**

**2.3. Zahtijevani kapacitet 33**

**2.4. Prihvatljivost rješenja i moguća poboljšanja 35**

**3. MATEMATIČKI MODEL VAKUUMSKOG GENERATORA SLATKE VODE 50**

**3.1. Matematički model isparivača 51**

*3.1.1. Jednadžbe očuvanja za isparivač* **52**

*3.1.2. Koeficijenti prijelaza topline za cijevni isparivač* **57**

*3.1.3. Režimi strujanja u vertikalnoj cijevi* **61**

**3.2. Matematički model ejektora 62**

**3.3. Matematički model odjeljivača kapljica 64**

**3.4. Matematički model kondenzatora 66**

*3.4.1. Jednadžbe očuvanja za kondenzator* **67**

*3.4.2. Koeficijenti prijelaza topline za cijevni kondenzator* **68**

**3.5. Toplinska svojstva morske vode 72**

**3.6. Kapacitet 77**

**3.7. Diskontinuirano i neprekidno isparavanje te intenzitet isparivanja 80**

*3.7.1 Diskontinuirano ispaaivanje* **82**

*3.7.2. Neprekidno isparavanje* **84**

*3.7.3. Intenzitet ispaaivanja* **86**

**4. NUMERIČKO RJEŠENJE PROBLEMA 100**

**4.1. Dimenzije modelirane posude isparivača 100**

**4.2. Potprogrami za izračunavanje fizikalnih svojstava morske vode 101**

**4.3. Numerička rješenja i grafičke interpretacije matematičkih modela 107**

**5. VREDNOVANJE REZULTATA MODELA 130**

**5.1. Matematički model jednostupanjskog destilacijskog uređaja 130**

**5.2. Matematički model kapaciteta 138**

**5.3. Matematički model ovisnosti nominalnog kapaciteta o eksploatacijskim uvjetima 138**

**5.4. Primjena modela 139**

*5.4.1. Dijagram toka rada destilacijskog uređaja* **140**

*5.4.2. Prijedlog rješenja sustava upravljanja jednostupanjskim destilacijskim postrojenjem* **145**

**6. ZAKLJUČAK 149**

**7. PRILOZI 153**

**7.1. Popis literature 153**

**7.2. Popis oznaka i simbola 163**

**7.3. Popis slika 168**

**7.4. Popis tablica** **174**
**7.5. Ispis programa** **175**
**7.6. Životopis** **210**

# 1. UVOD

Proces proizvodnje slatke vode destilacijom morske vode poznat je od davnina te su u znanstvenim i stručnim publikacijama objavljeni mnogi radovi u kojima se različito pristupa ovoj temi. Obrađuju se koeficijenti prijelaza topline u isparivaču i kondenzatoru, odnošenje kapljica rasoline te njihovo odvajanje, elementi uređaja, numerički modeli kogenerativnih sustava i dr.

Osim metode destilacije primjenjuju se na brodovima, ali i u stacionarnim postrojenjima, uređaji zasnovani na drugim metodama desalinizacije. Neovisno o tipu uređaja, dva su glavna kriterija za odabir: kapacitet uređaja i cijena proizvoda – vode.

Tehnološki napredak postavlja sve veće zahtjeve pred projektante brodskih energetskih sustava i uređaja, koji se suočavaju s primjenom metoda numeričkog modeliranja u fazi projektiranja. Razvoj takvih sustava i uređaja, koji će biti ekonomski i ekološki prihvatljivi od velikog je interesa.

## 1.1. Postavljanje problema

Uvjeti koje moraju zadovoljiti stacionarni uređaji razlikuju se od uvjeta koje trebaju ispunjavati brodski uređaji. Stoga se pojavljuju razlike u konstrukcijskim rješenjima. Vođenje procesa, odnosno eksploatacijska rješenja, također se razlikuju.

Postavlja se pitanje, mogu li se neka konstrukcijska rješenja, u prošlosti odbačena kao nepogodna za brodske uvjete, uz bolje poznavanje i praćenje procesa ipak primijeniti na brodu te postoje li argumenti za promjenu eksploatacijskog ponašanja operatera kako brodskih tako i stacionarnih uređaja. **Moguće je postaviti egzaktne kriterije za usporedbu raznih tipova desalinizacijskih uređaja, koji bi se u kombinaciji s drugim kriterijima, koristili kao osnova za odabir.**

Energetski sustavi broda, u širem smislu, predstavljaju značajan izvor zagađenja morskog okoliša. Optimalno vođenje svih brodskih energetskih procesa moglo bi dovesti do daljnjeg povećanja stupnja iskoristivosti pogonskog kompleksa i smanjenja zagađivanja. Opravdanost primjene konstrukcijskih rješenja kojima će se povećati stupanj iskoristivosti stacionarnog uređaja čini se neupitna. Ipak, u oba se slučaja povećanjem stupnja iskoristivosti mogu povećati troškovie održavanja pa postaje upitna isplativost takvog postupka. Poznato je da se ukupna iskoristivost brodskog energetskog sustava povećava primjenom evaporativnog generatora slatke vode, no njegova je primjena ograničena, zbog ograničenog prostora za smještaj proizvedene vode. Širom bi se primjenom ovakvih uređaja racionalnije vršila pretvorba energije, što bi indirektno utjecalo

na smanjenje zagađenja. Posebice zbog sigurnosti, trebalo bi osigurati odgovarajuću kontrolu procesa.

Postupak nije moguće izvesti bez poznavanja procesa te vanjskih utjecaja koji mogu dovesti do poremećaja u radu uređaja. Premda će eksperiment na izvedenim uređajima i nadalje ostati snažan alat za rješavanje problema, kompjuterska simulacija ostvarena odgovarajućim numeričkim modelom, postaje sve prisutnije sredstvo pri projektiranju uređaja i sustava upravljanja, ne samo zbog cijene, već i zbog razine kvalitete projektiranja.

Problemi numeričkog rješenja procesa isparavanja morske vode pri prisilnom strujanju kroz kanale različitih presjeka, separacije kapljica rasoline te kondenzacije proizvedene pare složeni su termodinamički problemi.

U morskoj su vodi otopljene soli i to u različitim koncentracijama. Prisutnost soli rezultira porastom temperature zasićenja i usporenjem procesa isparavanja, a još ne postoji ekonomski prihvatljiv način sprječavanja nastajanja kamenca na stijenkama izmjenjivača topline u potpunosti.

Proces separacije kapljica rasoline ovisi direktno o slanosti morske vode i brzini, tj. intenzitetu procesa isparavanja. Kapljice nastaju raspršivanjem opni mjehurića pare pri njihovom probijanju vodene površine. Intenzitet isparavanja utječe na slanost otopine pa time i na napetost površine, a graničan je slučaj pojava pjene koja smanjuje put kapljica do kondenzatora i smanjuje kvalitetu proizvedenog destilata.

Efekt kondenzacije, čak ako se ne ispituje utjecaj različitih površina izmjenjivača topline, također će ovisiti o prethodnim čimbenicima. Dakle, postoji potreba da se ispita utjecaj različitih čimbenika na rad uređaja te definira način vođenja procesa (regulacije radnih parametara) na ekonomski opravdan način uz zadovoljenje svih potreba.

**Pretpostavka je da se složeni matematički modeli koji opisuju fizikalne procese u uređaju za destilaciju mogu pojednostaviti te da se može izvesti matematički model koji daje kapacitet uređaja u lakomjerljivim parametrima. Model će uz sva pojednostavljenja ipak dati eksplicitnu ovisnost o ključnim parametrima.**

**Prema postavljenom modelu, čija će se valjanost provjeriti, može se primijeniti odgovarajući sustav upravljanja procesom kako bi se optimizirala proizvodnja.**

## 1.2. Postavljanje cilja

Cilj je istraživanja razviti kriterije za odabir optimalnog tipa stacionarnog i brodskog uređaja te metode vođenja procesa.

Nadalje, cilj je istraživanja razviti matematički model i numeričko rješenje procesa desalinizacije. Usvajanjem teorijskih osnova i odabirom matematičkog modela te razvojem numeričkog modela omogućit će se simuliranje procesa u uređaju te odabir sustava upravljanja. Sustav upravljanja trebao bi voditi proces proizvodnje slatke vode na, dugoročno gledano, najisplativiji način.

Konačno, cilj je razraditi u obliku tehničkog rješenja ekonomski, energetski, i sa stanovišta zaštite okoliša opravdan sustav proizvodnje slatke vode.

## 1.3. Dosadašnja istraživanja

Metoda proizvodnje slatke vode destilacijom morske vode poznata je i primjenjivana od davnina. Danas su takvi uređaji neophodni na brodovima i slatkom vodom nedovoljno opskrbljenim priobalnim područjima. Velika se pažnja posvećuje povećanju toplinskog stupnja iskoristivosti, prije svega višestepenih stacionarnih uređaja.

### 1.3.1. Matematički modeli isparivača

Minton [15] u svojoj knjizi daje pregled koeficijenata izmjene topline kod isparivača. Van Stralen u radovima [22] i [23] razvija teoriju i daje eksperimentalnu potvrdu razvoja sferičnog mjehura u početno pregrijanoj čistoj tvari te u binarnoj smjesi. Rast mjehura je kod binarne smjese usporen. Temperatura zasićenja binarne smjese veća je u odnosu na čistu tvar za iznos $\Delta T$, odnosno potrebno je veće pregrijanje okolne tekućine da bi došlo do izmjene tvari i rasta mjehura.

Florschuetz i Rashid Khan [24] daju eksperimentalnu potvrdu ranijih teorijskih predviđanja Van Stralena i drugih autora, ovisnosti promjene polumjera sferično-simetričnog mjehura o vremenu za binarnu smjesu.

Van Wijk, Vos i Van Stralen [25] ispituju izmjenu topline pri vrenju binarnih smjesa. Uspoređuju toplinski tok kod različitih binarnih smjesa s onim za čistu vodu. Određuju ovisnost toplinskog toka o temperaturi grijače žice. Kod nekih smjesa maksimalni toplinski tok nekoliko je puta veći nego kod čiste vode za istu temperaturu žice. Kod čiste vode mjehur mora pri prolasku kroz pregrijanu tekućinu uvijek rasti, što ne mora biti tako za binarnu smjesu. Pojavljuje se situacija kada je para u mjehuru u ravnoteži s graničnim slojem tekućine, koja se po sastavu razlikuje od okolne tekućine, ali je iste temperature. Nema, dakle, izmjene topline između okolne tekućine i graničnog sloja pa do daljnjeg isparivanja, promjene sastava i temperature zasićenja pare, dolazi zbog difuzije između okolne, pregrijane tekućine i graničnog sloja.

Coogan i Brewster [26] daju analitički model isparivača adijabatskog uređaja. Kako bi se odredio omjer isparavanja, tj. odnos isparene količine prema dovedenoj, potrebno je poznavati gradijent temperature u posudi.

Al-Ansari i Owen [27] daju termodinamičku i hidrodinamičku analizu procesa isparavanja i kondenzacije u uređaju za desalinizaciju. Analizirana je izmjena topline pri kondenzaciji u unutrašnjosti horizontalne cijevi i isparivanju u tankom filmu s vanjske strane cijevi. Djelomično se rezultati mogu primijeniti i na izmjenjivače s vertikalnim cijevima.

Muthunayagam i koautori u radovima [28] i [29] obrađuju problem adijabatskog procesa pri sniženom tlaku. Mjerenjima potvrđuju teorijske postavke ovisnosti temperature i tlaka dovedene morske vode te potlaka u posudi s vremenom isparavanja i količinom proizvedene pare. Morska voda površinske temperature uvodi se raspršena u posudu sniženog tlaka. Kondenzacija se, u cijevnom cilindričnom, kondenzatoru, izvodi dubinskom morskom vodom. Eksperiment je vođen u rasponu od 98 do 99%-tnog vakuuma. Mjerenja su pokazala dobru sukladnost s predloženim modelom.

Armenta-Deu [30, 31] ispituje utjecaj slanosti i temperature na produktivnost uređaja za destilaciju. Razvijen je matematički model koji daje količinu proizvedenog destilata po jedinici površine izmjenjivača u ovisnosti o napetosti površine te gradijentu temperature, odnosno razlici temperature proizvedene pare i temperature u kondenzatoru. Iako usvaja neke pretpostavke, poput jednake napetosti površine u isparivaču i kondenzatoru te velike razlike u temperaturi isparivača i kondenzatora, za uređaj koji je radio s konstantnim 90%-tnim vakuumom mjerenja su pokazala rezultate sukladne modelu.

U radu [32], Rahman, Hawlander i Malek izvode eksperiment s uronjenim isparivačem s vertikalnim cijevima. Metodom kontrolnog volumena dobiveni su izrazi za kvalitetu proizvedenog destilata, pad tlaka te gradijent temperature izvan i u cijevi isparivača. Tijekom mjerenja mijenjane su temperature i količine napojne morske vode i ogrjevnog medija te tlak u posudi. Količina proizvedene pare, ukupni koeficijent prolaza topline te toplinski tok su osnovni mjereni parametri. Mjerenjem istih željelo se utvrditi toplinsku efikasnost uređaja. Utvrđeno je da na količinu proizvedenog destilata najveći utjecaj ima temperatura i količina ogrjevnog medija.

El-Dessouky, Ettouney i Mandani [33] ispituju efikasnost višestupanjskih uređaja s paralelnim i unakrsnim strujanjem. Efikasnost postrojenja analizirana je kao funkcija slanosti napojne morske vode, broja stupnjeva te temperature rasoline. Parametri na osnovi kojih se analizirala efikasnost su: toplinski omjer, specifični protok rashladne vode kondenzatora, omjer proizvedenog destilata i dovedene vode te specifična ogrjevna površina. Rezultati pokazuju da je

unakrsni uređaj bolji, no paralelni nije znatno lošiji uz jednostavniju konstrukciju i eksploataciju.

### 1.3.2. Matematički modeli odnošenja te odvajanja kapljica iz struje pare

Izvedba i smještaj odjeljivača kapljica može imati veliki utjecaj na kvalitetu proizvedenog destilata. Odjeljivač može biti izveden kao skretna ploča, ciklonski ili žičani. Položaj odjeljivača osigurava pad većih kapljica, dok do njega dospijevaju samo kapljice reda veličine nekoliko mikrometara i manje. Objavljeni su radovi o matematičkim modelima odjeljivanja samo djelovanjem sile gravitacije, odnosno visinom posude.

Kapljice veće od 10 μm ne slijede strujanje pare te se hvataju na odjeljivaču. Manje kapljice, promjera 1-10 μm, slijede strujanje pare, no i one se u najvećoj mjeri hvataju na odjeljivač ili zbog njegove ukupne površine (kalota) ili zbog dimenzija slobodne površine (žičani). Najmanje kapljice se kreću nasumično te može doći do njihovog spajanja.

Zbog masenog udjela kapljica promjera iznad 10 μm, s čisto tehnološkog stajališta, najvažniji je prvi efekt. Osim izvedbe i smještaja odjeljivača kapljica, na efikasnost utječu i eskploatacijski uvjeti kao: intenzitet isparavanja koji utječe na brzinu kapljica; slanost rasoline koja također može utjecati na brzinu kapljica, ali zbog velike slanosti može doći i do pjenjenja; eksploatacijsko stanje samog odjeljivača, u smislu kamenca na žicama odjeljivača i dr.

U radu Sommarive, Borsania i Tasce [34 ] uspoređeni su rezultati empirijskog izraza za efikasnost odjeljivača kapljica s rezultatima mjerenja. Usporedbom s Carpenterovim modelom njihov izraz daje dobre rezultate čak i kod zaprljanog, odnosno korodiranog odjeljivača.

Cosandey, Günther i von Rohr [35, 36] mjere odnošenje krutih čestica i topivih tvari prilikom rasprskavanja parnih mjehura na razini vrele tekućine u posudi. Zaključili su da odnošenje raste s porastom tlaka za čistu paru iznad površine, a pada za smjesu pare i zraka. Ustanovili su da se faktor odnošenja za otopljene tvari kreće u rasponu od $3.96\times10^{-6}$ do $7.10\times10^{-5}$.

Ettouney [37] ustanovljava vezu temperature rasoline pojedinog stupnja višestupanjskog adijabatskog uređaja s odnošenjem, odnosno kvalitetom proizvedenog destilata. Veće odnošenje prisutno je kod stupnjeva niže temperature, odnosno tlaka.

Paradissiadis i Widmer [38] uspoređuju tri poznata izraza (Golub, Sterman i Reed) s rezultatima mjerenja u vertikalnoj posudi bez odjeljivača. U radu su

dijagrami s krivuljama odnosa odnošenja $E_{CO}$[1] i brzine strujanja pare prema navedena tri autora, te izmjerenim vrijednosti na dvama mjernim mjestima u uređaju. Ustanovljeno je da se model Goluba najbolje približava izmjerenim veličinama.

Iljushchenko, Rosen i Golub [33] daju novi pristup u modeliranju procesa odvođenja tekućine pri isparavanju. Model se zasniva na distribuciji veličina kapljica u prostoru posude isparivača.

Kod nekih se postrojenja (nuklearni reaktor) para pročišćava od soli tako da prolazi kroz perforiranu ploču, dovoljno udaljenu od površine isparavanja, na kojoj je čista voda. Sterman, Lavigin i Rojnatovsky [40] eksperimentalno utvrđuju koliko vode odnosi primarna para što se može iskoristiti za optimizaciju brzine njenog strujanja.

Plassmeier [41] eksperimentalno utvrđuje utjecaj nekoliko faktora (napetost površine, protok morske vode i ogrjevnog medija i dr.) na odnošenje, odnosno na potrebnu visinu posude, kako bi kvaliteta kondenzata bila odgovarajuća.

### 1.3.3. Matematički modeli kondenzatora

Kod jednostupanjskih uređaja rashladni medij kondenzatora jest morska voda. U nekim se izvedbama ispušta, dok se u nekim izvedbama dijelom koristi kao primarni fluid ejektora, a dijelom destilira. U tom slučaju, kondenzator predstavlja predgrijač. U višestupanjskim uređajima para iz stupnja višeg tlaka i temperature se koristi kao ogrjevni medij u stupnju nižeg tlaka i temperature, a samo se u zadnjem stupnju ili nekoliko zadnjih stupnjeva kod višestupanjskih adijabatskih uređaja, koristi kao rashladni fluid okolna morska voda.

Izmjenjivačke površine su cijevne, horizontalne ili koso položene te pločaste. U slučaju cijevne izvedbe, rashladni medij, morska voda ili rasolina, redovito prolazi s unutrašnje strane cijevi. Pločasti izmjenjivači postavljaju se vertikalno.

Gregorig [17] u svojoj knjizi daje teoretske postavke i praktična rješenja problema kondenzacije kod različitih izvedbi, među ostalim, za horizontalni kružni snop šahovski raspoređenih cijevi. Obrađuje i problem prisutnih nekondenzibilnih plinova.

Genthner i Seifert [42, 43] daju matematički model kondenzacije uz utjecaj nekondenzibilnih plinova u horizontalnom snopu cilindričnog izmjenjivača. Snop je podijeljen u radijalne ljuske i aksijalne segmente. Ti su elementi

[1] Indeks CO se odnosi na pojam odnošenje, engl. carry over.

povezani radijalnim strujanjem pare i aksijalnim strujanjem rasoline. Osnovni zaključak proizašao iz rada jest da se odnos toplinskog toka kondenzatora s prisutnim nekondenzibilnim plinovima i kondenzatora s čistom parom ne razlikuje po stupnjevima, već ovisi isključivo o koncentraciji nekondenzibilnih plinova. Ustanovljavanjem te veze, složeni problem kondenzacije s prisutnim nekondenzibilnim plinovima, može se rješavati kao problem kondenzacije čiste pare i primjenom korektivnog faktora.

Rifert i ostali u radu [44] daju mogućnosti za povećanje koeficijenta izmjene topline u unutrašnjosti horizontalnih cijevi kondenzatora uređaja za desalinizaciju. Isto se može postići skraćivanjem puta kondenzatu umecima u cijevi ili orebrivanjem unutrašnjosti, aktivnim metodama, kao što je povećanje brzine strujanja, te intenzifikacijom kapljičaste kondenzacije dodavanjem stimulatora. Autori daju dijagrame ovisnosti omjera povećanog i osnovnog koeficijenta izmjene topline o mijenjanom parametru.

Wu i Vierow [45] eksperimentalno utvrđuju koeficijente izmjene topline u horizontalnim cijevima kondenzatora. U struju pare, koja najprije prolazi kroz separator kapljica, uvodi se struja nekondenzibilnih plinova (zraka).

Bourouni i Chaibi [49] modeliraju izmjenu topline i mase u kondenzatoru s horizontalnim cijevima. Model je potvrđen eksperimentalno. Snop cijevi podijeljen je u ćelije te su za svaku riješene jednadžbe izmjene topline i mase. Svojstva fluida određena su za srednju temperaturu u ćeliji. Određena je najveća moguća količina kondenzata koja ne može biti premašena u stvarnim uvjetima.

Utjecaj kamenca na stijenkama cijevi kondenzatora eksperimentalno su ispitivali Kalendar i Griffiths [50]. Ispitivanje je izvršeno za dva promjera cijevi iz Al-mesinga s trima različitim brzinama strujanja rashladne tekućine. Kao rashladna tekućina korištena je slatka voda i rasolina. Ukupni koeficijent prijelaza topline raste s brzinom strujanja rashladnog fluida i promjerom cijevi, kako za glatke tako i za orebrene cijevi. Kod orebrenih cijevi postiže se čak i do 2,13 puta veći ukupni koeficijent prijelaza topline. Rezultati mjerenja su pokazali da za neke promjere postoji optimalna brzina strujanja, tj. ona koja daje maksimalni koeficijent. Također, za neke brzine strujanja postoji optimalni promjer cijevi.

### 1.3.4. Kogeneracija i drugi izvori topline

Uređaji za proizvodnju slatke vode metodom destilacije često su dio nekog složenijeg kogenerativnog sustava pa je dostupan veći broj znanstvenih radova koji obrađuju tu tematiku. Nadalje, stacionarni uređaji ili uređaji izoliranih zajednica (npr. otoka ili naftnih platformi), koji nemaju dovoljno otpadne topline, koriste se drugim izvorima. U zemljama koje oskudijevaju pitkom

vodom potrebno je ostvariti veliku produktivnost, odnosno nisku cijenu proizvedene vode, što je također razlog primjene nekih tehnoloških rješenja.

U radovima [53-63] su obrađeni različiti aspekti primjene Sunčeve energije u uređajima za proizvodnju slatke vode. Gräter i koautori [54] predlažu neka tehnološka rješenja kod višestupanjskih uređaja s uronjenim ogrjevnim elementima, koja mogu rezultirati smanjenjem površine solarnog kolektora ili kotla. Bouchekima i ostali [55] ispituju efikasnost kapilarnog isparivača sa Sunčevom energijom u izoliranoj lokaciji Alžira.

U člancima Al-Kharabsheha i YogiGoswamija [57] te Kudisha i ostalih [58] izrađeni su numerički modeli inovativnih postrojenja. U prvom se slučaju radi o niskotlačnom uređaju sa solarnom energijom, a u drugom o solarnom uređaju izrađenom iz polimerskih materijala. Izvršena su eksperimentalna mjerenja kojima su potvrđeni model i ukazana optimalna rješenja. U radu [59] također je izrađen model solarnog uređaja te ispitan eksperimentalno. Vieira i koautori [61] izrađuju dva numerička modela za određivanje omjera praznine. Oba modela koriste se veličinama dobivenim eksperimentalno i dobro se poklapaju.

Veći broj radova se odnosi na uređaje s rekompresijom pare [64-78]. Rezultati matematičkih modela ili mjerenja na insatliranim uređajima su prikazani u obliku kapaciteta uređaja ili cijene proizvedenog destilata. Ophir [80] opisuje izgrađene kogeneracijske uređaje tvrtke IDE Technologies Ltd. Prikazana su dva uređaja: prvi iskorištava otpadnu energiju parne turbine, a drugi dizelskog motora. Mjerenja na instalacijama pokazala su kapacitet te cijenu proizvedene vode. Ima i radova koji obrađuju uređaje pogonjene silom valova [82].

### 1.3.5. Povećanje stupnja iskoristivosti

Toplinski stupanj iskoristivosti može se promatrati u užem smislu, analizirajući isključivo uređaj s pripadajućom pomoćnom opremom ili u širem smislu, kao dio jednog većeg tehnološko-energetskog procesa. U užem se smislu, razmatrajući mogućnosti povećanja toplinskog stupnja iskoristivosti, prije svega treba voditi računa o koeficijentima prijelaza topline u izmjenjivačkim cijevima uređaja. Gregorig [17], te Rifert [44] i Slesarenko [86] ukazuju na mogućnosti njihovog povećanja.

Naime, dovođenjem medija na cijevi isparivača ili kondenzatora u vidu tankog filma ili izvođenjem različitih profila cijevi može se postići značajna povećanja koeficijenata prijelaza topline. To su ukazivali različiti autori još početkom prošlog stoljeća. Predlažu se rješenja kod kojih se morska voda uvodi u isparivač raspršivanjem u mlazu kapljica malih dimenzija, s rotirajućim isparivačem te s izvana orebrenim cijevima.

Osnovni nedostatak ovih postupaka te razlog zašto se ne primjenjuju kod brodskih uređaja za destilaciju jeste činjenica da mala promjena u kemijskom sastavu otopine, odnosno povećanje slanosti, dovodi do brzog stvaranja kamenca na cijevima izmjenjivača topline uzrokujući smanjenje intenziteta isparivanja te kroz povećane eksploatacijske troškove dovodi do povećanja cijene proizvedenog destilata.

Kondenzacija bi se po Rifertu i koautorima mogla intenzivirati trima metodama:
1) skraćivanjem puta kondenzata primjenom umetaka unutar cijevi ili pravljenjem orebrenja;
2) aktivnim metodama kao što su povećanje brzine strujanja pare ili izazivanjem njenog cirkularnog strujanja i
3) postizavanjem kapljičaste kondenzacije.
U radu [44] su dani dijagrami koji ukazuju na povećanja koeficijenata izmjene topline za različite izvedbe cijevi kondenzatora.

U literaturi često spominjani način za povećanje termodinamičkog stupnja iskoristivosti je rekompresija pare, no usprkos tome uglavnom se primjenjuje samo kada je nedostupna dovoljna količina otpadne topline nekog industrijskog procesa. Naime, postojanje kompresora povećava cijenu koštanja uređaja i negativno utječe na raspoloživost istog.

Povećanje ukupnog toplinskog stupnja iskoristivosti, u širem se smislu može postići primjenom višestupanjskih uređaja ili u raznim kogenerativnim sustavima.

### 1.3.6. Makroskopski modeli

Low i Tay [83] izrađuju matematički model prema eksperimentalnom niskotlačnom uređaju koji koristi otpadnu topline parne turbine. Za fiksne početne i rubne uvjete model, prema utrošku energije, izračunava cijenu masene ili volumenske jedinice proizvedene vode.

U radu Baumgartnera, Junga i Sizmanna [87] izrađen je matematički model eksperimentalnog destilacijskog uređaja malog kapaciteta. Model se zasniva na određivanju dovedene niskotemperaturne topline i odvedene topline. Dobijeni su rezultati za različite dobave i gornje temperature procesa, a u osnovi se radi o cijeni volumenske jedinice proizvedene vode. U cijenu nisu uključeni troškovi pumpe destilata i dobave ogrjevnog fluida.

Usporedbu destilacijskih uređaja i uređaja koji rade na principu reverzibilne osmoze u kombinaciji s različitim kogeneracijskim sustavima na osnovi cijene

jedinice proizvedene vode izveo je Wade [97]. U većini radova navedenih prije, posebno u člancima o kogeneraciji, također se radi o makroskopskim modelima.

Proces destilacije obrađuje Rant [16]. Opisani su toplinski procesi kod uparivanja i isparivanja[2]. Toplinski dijagrami prikazuju promjene sastava rastopine te utrošak topline za različite procese.

Lalić i Kolombo [105, 106] daju definicije kapaciteta procesnih postrojenja, odnosno utjecaja eksploatacijskih uvjeta na stvarni kapacitet postrojenja te konačnu cijenu proizvoda.

### 1.3.7. Svojstva morske vode

Sva fizikalna svojstva vode ovise o ukupnoj koncentraciji, tj. slanosti, a samo u manjoj mjeri o relativnom udjelu pojedinih soli. Relativni udio soli može biti važan kod uređaja za desalinizaciju ako je potreban kemijski tretman s ciljem sprječavanja nastanka kamenca na ogrjevnim površinama ili u proizvedenoj vodi. Niti jedno od navedenog ne odnosi se na brodske uređaje za destilaciju.

Tisućljeća miješanja dovela su do toga da se u svim uzorcima morske vode nalaze svi poznati ioni. To ne znači da svi uzorci imaju isti sastav, već da su svi ioni prisutni u istim omjerima i da se mijenja samo iznos čiste vode. Ako je, dakle, poznat udio samo jednog iona u uzorku, može se izračunati i udio svih ostalih.

Budući da fizikalna svojstva morske vode ovise o ukupnom udjelu soli, u početku se pokušalo određivati ukupan iznos anorganskih soli, tj. slanost[3], no to se pokazalo nepraktično, jer su se neke soli nakon sušenja uzorka raspadale, ostavljajući lakši ostatak. Ponovljivi rezultati ostvareni su određivanjem kloriniteta te na osnovi njega, slanosti. U literaturi [13, 33, 89, 100] se daju fizikalna svojstva morske vode u ovisnosti o slanosti i temperaturi. Vrijednosti su prikazane tablično ili se navode iskustveni matematički modeli.

Prisutnost soli otežavajuća je okolnost i zbog činjenice da se iste, pri povišenim temperaturama i koncentracijama kristaliziraju te da se kristali taložе na izmjenjivačkim površinama kao kamenac. Neki su kamenci lako topivi pri nižim temperaturama i većim protocima vode, no ima i netopivih. Dobavna vode većih, stacionarnih postrojenja, kemijski se tretira kako bi se smanjio intenzitet nastanka kamenca [93, 94], dok se dobavna voda za destilacijska postrojenja trgovačkih brodova ne tretira, barem ne na teretnim brodovima.

[2] Prema Rantu [16] uparivanje je postupak proizvodnje čiste otopljene tvari, a isparivanje čistog otapala.
[3] Salinitet.

Osim soli, u morskoj su vodi otopljeni i plinovi: dušik, kisik i ugljični dioksid. Dušik je u ovim uvjetima nekondezibilan plin te se, ispušten iz vode, sakuplja u gornjem dijelu posude, odnosno prostoru kondenzatora, pa negativno utječe na efekt kondenzacije [42, 43]. Prisustvo nekondenzibilnih plinova povezano je i s efikasnošću ejektora.

Kisik i ugljični dioksid utječu na koroziju metalnih dijelova uređaja, a posebno isparivača [102, 103]. Njihovo prisustvo u vodi štetno je i za druge brodske strojeve i uređaje.

## 1.4. Metode istraživanja

Izvršit će se analiza desalinizacijskih metoda, koje se prema objavljenoj znanstvenoj i stručnoj literaturi koriste za proizvodnju vode na brodu i u stacionarnim postrojenjima, kako bi se mogao izraditi matematički model efikasnosti postrojenja i cijene proizvodnje. Metodom komparacije ustanovit će se optimalno rješenje. Matematički model termodinamičkih i hidrodinamičkih procesa u destilacijskom uređaju bit će osnova za izradu numeričkog modela te programskih aplikacija. Izvršit će se simulacija rada uređaja pri različitim uvjetima.

Provjera točnosti modela, odnosno njegova eksperimentalna verifikacija, provela bi se usporedbom s veličinama izmjerenim na ugrađenim uređajima koji su objavljeni u relevantnoj znanstvenoj literaturi. Utjecaj eksploatacijskih čimbenika na kapacitet uređaja procijenit će se statističkom metodom te metodom intervjuiranja.

Izvršit će se optimizacija sustava upravljanja uređajem u skladu s izrađenim matematičkim modelom. Prijedlog rješenja sustava upravljanja izradit će se metodom kompilacije i sinteze, jer će se već prihvaćena i primijenjena rješenja iskoristiti na optimalan način.

## 1.5 Kompozicija rada

Osim uvodnih razmtranja rad ima još šest poglavlja. Drugo poglavlje ima četiri potpoglavlja. Analizira metode koje se koriste za desalinizaciju morske ili bočate vode. U osnovnim se crtama opisuje rad postrojenja s osvrtom na eksploatacijske uvjete te prednostima i nedostacima primjene. Daju se matematički modeli efikasnosti procesa kao omjera ukupno utrošene energije po jedinici proizvoda. U drugom se potpoglavlju razmatra utjecaj na okoliš kao

dodatni kriteriji za procjenu primjenjivosti, dok se u trećem obrazlaže najvažniji kriterij, tj. potrebni kapacitet. Na kraju se obrađuju nekoliko rješenja koja su energetski učinkovitija.

U trećem poglavlju daju se matematički modeli procesa isparivanja, rada ejektora, separacije kapljica te kondenzacije, tj. procesa koji se odvijaju u jednostupanjskom vakuumskom destilacijskom uređaju. Uključeni su i izrazi za koeficijente izmjene topline za jednofazno i dvofazno strujanje u isparivaču i kondenzatoru. Nadalje, dani su matematički modeli za određivanje toplinskih svojstava morske vode. Šesto potpoglavlje daje model procesnog kapaciteta koji za brodske uvjete ovisi o godišnjem broju radnih sati plovidbe. Konačno, u sedmom potpoglavlju izrađen je matematički model koji daje ovisnost kapaciteta destilacijskog uređaja o ključnim eksploatacijskim čimbenicima.

Poglavlje četiri, koje ima tri potpoglavlja, daje numerička rješenja modela iz prethodnog poglavlja. Numerička rješenja ostvarena su programskim aplikacijama u *MS Fortran Powerstation* i *Mathematica 5.0*. U zadnjem potpoglavlju prikazane su grafičke interpretacije numeričkih rješenja.

U poglavlju pet, s četiri potdpoglavlja, izvršeno je vrednovanje modela. Analizirana je ovisnost kapaciteta uređaja, ali i drugih fizikalnih veličina, o promjenjivim radnim uvjetima i potvrđena valjanost modela. Predložena su rješenja sustava upravljanja postrojenjem u skladu s predloženim matematičkim modelom.

Poglavlje šest je zaključno, a u poglavlju sedam su danti prilozi: popis literature, popis korištenih oznaka i simbola, popis slika, popis tablica, popis ispisa izrađenih aplikacija te životopis autora.

# 2. PRIMJENJIVOST METODE I KONSTRUKCIJSKOG RJEŠENJA

Primjenjivost metode iz koje će slijediti i konstrukcijsko rješenje ovisi prije svega o dostupnim resursima i zahtijevanom proizvodnom kapacitetu. Kako bi se mogli odrediti čvrsti kriteriji za odabir, potrebno je analizirati metode desalinizacije.

## 2.1. Metode desalinizacije morske ili bočate vode

Morska je voda otopina različitih soli. Koncentracije istih mogu varirati, ali su odstupanja mala i u pravilu se radi o uprosječenim vrijednostima. Desalinizacija je u svojoj biti proces razdvajanja molekula vode i iona soli. Teoretski se može provesti odvođenjem molekula vode iz rasoline[1] ili odvođenjem molekula soli iz vode.

Metode se, prema vrsti djelovanja, odnosno sili kojom se savladavaju međumolekularne sile, dijele na:

- individualne,
- površinske,
- volumenske.

Kod **individualnih metoda** u morsku se vodu uvodi sredstvo koje se kemijski ili fizikalno veže na molekule vode ili ione soli. U ovu grupu metoda ubraja se **kemijska desalinizacija** kod koje se kemijski reagens, uveden u morsku vodu, vezuje s ionima soli, a razdvajanje nastalih kristalnih čestica vrši se mehaničkim putem npr. filtriranjem ili češće, taloženjem. **Hidracija** je sličan proces, ali se uvedeno sredstvo, najčešće plinovito, kemijski vezuje s vodom i tvori krute hidrate. Za proces hidracije potreban je visoki tlak, a po smanjenju tlaka plinovito se sredstvo oslobađa i koristi u novom procesu. Primjer je cikolopropan koji vezuje oko 19 molekula vode. **Primjena organskih otapala** također pripada ovoj grupi. Aceton otapa molekule vode, ali ne djeluje na ione soli. Za razdvajanje acetona od vode potrebna je toplina.

U praktičnoj je primjeni jedino kemijska desalinizacija i to kao sredstvo u nuždi na brodskim čamcima i splavima za spašavanje.

Sve **površinske metode** koriste neku vrstu propusne membrane. To su neutralne, polupropusne i biološke membrane. Metoda s neutralnom membranom, koja se zove još ultrafiltracija ili **reverzibilna osmoza**, koristi porozan materijal[2] kroz koji prolaze molekule vode, ali ne ioni soli.

[1] Pojam rasoline se uvodi zbog činjenice da se morskoj vodi odvođenjem molekula vode povećava slanost.
[2] Npr. acetat-celuloza.

U skupinu **volumenskih metoda** svrstavaju se sve one kod kojih se djeluje na cijeli volumen (uzorak) morske vode. Metode s gravitacijom, ultrazvučnim valovima i centrifugalnom silom nisu pokazale zadovoljavajuće rezultate. **Primjenom električnog ili magnetskog polja**, iako ovog drugog s nešto manjom efikasnošću, postižu se zadovoljavajući rezultati. Ipak, od ove skupine metoda, još su uvijek najinteresantnije metode s dovođenjem (**destilacija**) ili odvođenjem topline (**kristalizacija**).

Od ovih spomenutih metoda vrijedi istaknuti neke. Kemijska desalinizacija čini se jednostavna jer ne zahtijeva primjenu složenih uređaja. Potrebno je, međutim, primijeniti količinu kemijskih sredstava koja čini oko 3 – 5% količine desalinizirane vode. Drugi je problem prisustvo većeg broja različitih iona koje treba izolirati iz morske vode ($Na^+$, $K^+$, $Mg^{2+}$, $Ca^{2+}$, $Cl^-$, $Br^-$, $SO_4^-$ te $HCO_3^-$), a za to je potrebno više različitih reagensa.

Djelomična desalinizacija, odstranjivanjem samo iona $Na^+$, $Mg^{2+}$, $Cl^-$ i $SO_4^-$, može zadovoljiti ako se tako proizvedena voda treba koristiti za pranje i samo u iznimnim slučajevima za piće. Takva je voda nezadovoljavajuće kvalitete za brodske strojeve i uređaje, odnosno ne može se koristiti kao rashladna voda motora ili napojna voda brodskih generatora pare.

Primjena ove metode odnosi se na čamace i splavi za spašavanje u koje se pohranjuju pilule za djelomičnu kemijsku desalinizaciju. U pravilu je osnovni sastojak svih tableta za desalinizaciju srebro. Nastali kristali soli talože se na dnu posude, a talog se odstranjuje dekantiranjem ili filtriranjem.

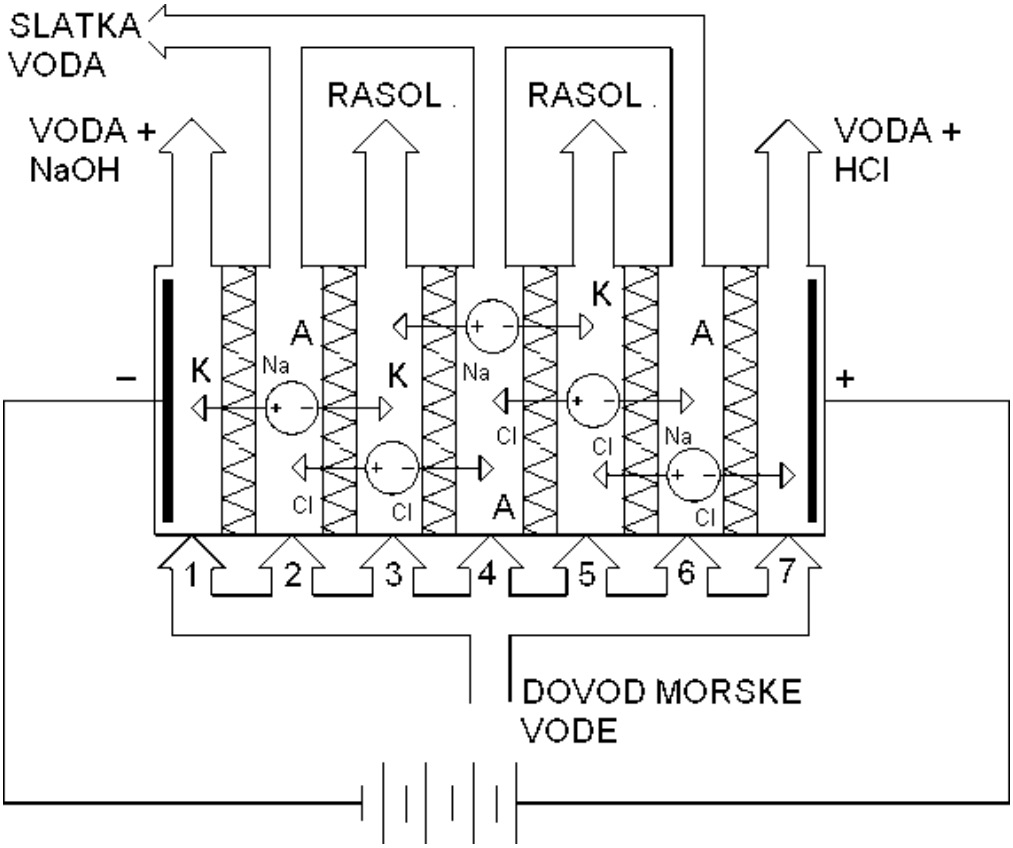
Ovu metodu koriste i ionski izmjenjivači, no njihova je primjena potrebna samo na brodovima s parnoturbinskim porivom[3] gdje kotlovska voda mora zadovoljiti vrlo stroge kriterije, a osim toga ne radi se o desalinizaciji morske vode već o dodatnoj desalinizaciji već proizvedene destilirane vode.

**Elektrokemijska desalinizacija** (dijaliza) koristi električni naboj iona na koje se može djelovati električnim poljem. Katoda privlači osnovni kation $Na^+$ u obliku metala natrija koji se polako otapa i stvara natrijevu lužinu NaOH i vodik. Osnovni anion $Cl^-$ izdvaja se na površini anode u plinovitom obliku koji dalje s vodom stvara klorovodičnu kiselinu HCl. Ista ostaje otopljena u vodi, a vodik se izdvaja na anodi.

Osnovni problem za širu primjenu ove metode jest veliki utrošak električne energije. Potrošnja električne energije se povećava sa smanjenjem slanosti vode. Time se smanjuje električna vodljivost vode pa je potrebno primijeniti veći napon. Za proizvodnju čiste vode visokog kvaliteta, tj. malog udjela soli, kakvu za rad trebaju brodski sustavi potreban je veliki utrošak struje.

[3] Ili u bilo kojem drugom slučaju gdje brodski generator pare radi s visokim tlakovima i temperaturama pare.

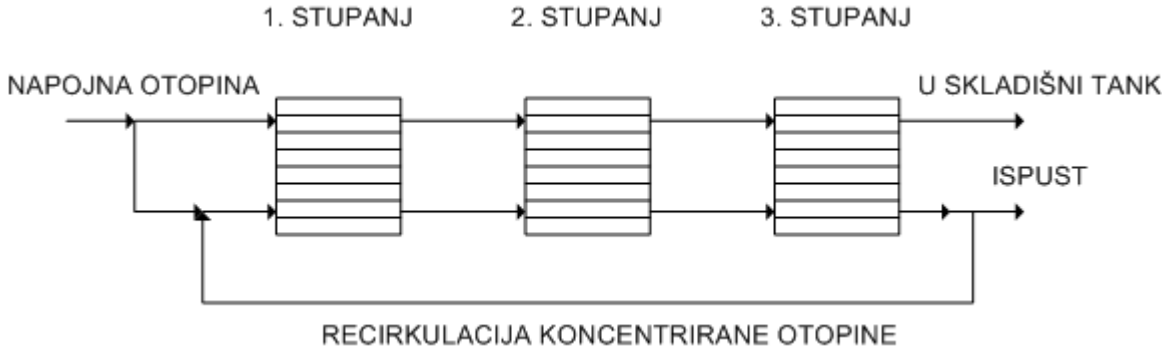
Poboljšanje ove metode postiže se primjenom polupropusnih membrana. Shema takvog uređaja prikazana je na slici 2.1. U komore od 1 do 7 uvodi se morska voda. U neparnim se komorama formira rasolina, a u parnim čista voda.




**Slika 2.1.** Elektrokemijska metoda s polupropusnim membranama

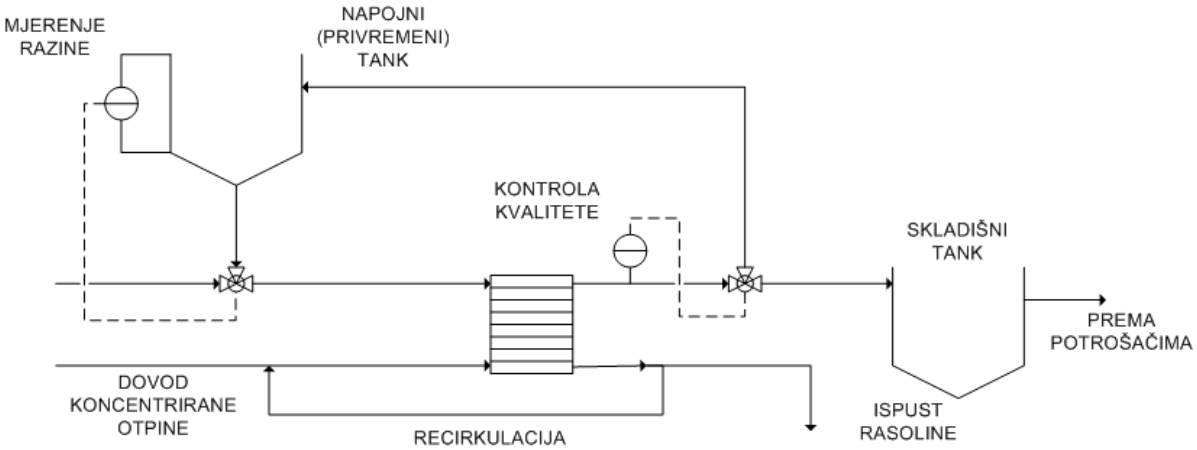
Kationske membrane uglavnom se izrađuju od vlakana polistirena na koje su nanešene kemijske grupe $SO_3H$. Iste se u vodi ioniziraju na slobodni $H^+$ i fiksnu grupu $SO_3^-$. Anionske membrane imaju sličnu izvedbu, ali se na polimer veže grupa $NH_3OH$. Ove grupe daju slobodni $OH^-$ ion. Slobodni ioni lako zamjenjuju mjesta s ionima istog naboja u otopini. Između elektroda se nalaze naizmjenično prostor u kojem je voda s povećanim udjelom soli, kationska membrana, prostor s vodom smanjenog udjela te anionska membrana, što se zajedno može nazvati ćelija. U jednom se stupnju može nalaziti više ćelija.

Uređaji velikih kapaciteta nisu, u pravilu, jednostupanjski već **višestupanjski**. Ukupno potrebno smanjenje koncentracije soli postiže se u više stupnjeva. Svaki sljedeći stupanj radi s nižim naponom elektroda, a tretirana voda prolazi kroz stupnjeve dok se ne postigne potrebno smanjenje koncentracije soli kako prikazuje slika 2.2. Napojna otopina kontinuirano prolazi kroz sve stupnjeve do skladišnog tanka. Na isti način prolazi stupnjevima i koncentrirana otopina koja se postiže miješanjem napojne s recirkuliranom koncentriranom otopinom.




**Slika 2.2.** Kontinuirani rad višestupanjskog elektrokemijskog desalinizacijskog postrojenja

Ukoliko je potrebni kapacitet uređaja mali te se uz to zahtijeva i visoka kvaliteta proizvedene vode može se koristiti uređaj prikazan na slici 2.3. Uređaj se upućuje s praznim napojnim (ili privremenim) tankom pa u početku koristi napojnu vodu iz drugog izvora kao npr. napojne pumpe. Proizvedena voda sprema se privremeno u skladišni tank dok mjerač razine ne signalizira visoku razinu. Tada se uređaj počinje napajati vodom iz napojnog tanka. Kako se slanost vode u napojnom tanku smanjuje, smanjuje se i jakost struje na elektrodama. Kada se na izlazu iz stupnja postigne zahtijevani sastav voda se iz napojnog tanka ispušta u skladišni tank.



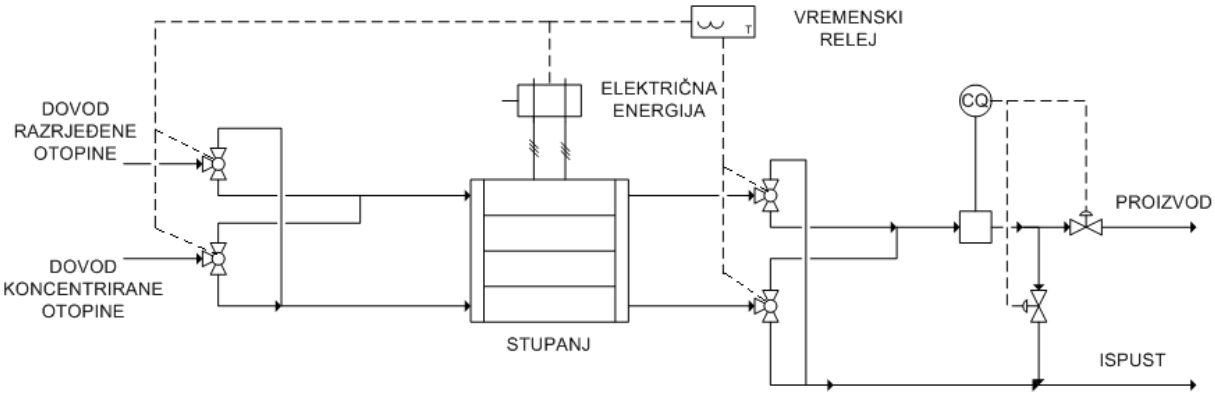

**Slika 2.3.** Naizmjeničan rad elektrokemijskog desalinizacijskog postrojenja

Mjerni instrument razine u napojnom tanku će po indikaciji niske razine započeti novi ciklus.

Kako bi se izbjegli neki eksploatacijski problemi povezani s istosmjernim tokom struje kroz membranu može se primijeniti izvedba s mogućnošću **promjene**

**smjera električne struje**. Manjkavost ovog rješenja očituje se u složenijem cjevovodu i manjoj iskoristivosti membranskog stupnja.

Metoda se može primijeniti na svakom od prethodnih rješenja elektrodijalize, ali je dovoljno razmotriti rješenje prikazano na slici 2.4. Prekret uređaja izvodi vremenski relej otprilike svakih 1.000 sekundi. Tada komora razrijeđene otopine postaje komora koncentrirane otopine i obrnuto, a također ono što je bila anoda postaje katoda i obrnuto. Stoga su ugrađeni troputni ventili na ulazu i izlazu iz stupnja za prekretanje smjera strujanja te odgovarajuće elektrode koje podnose promjenu smjera električne struje.




**Slika 2.4.** Izvedba s promjenjivim smjerom električne struje

Odgovarajućim periodom prekretanja mogu se znatno smanjiti brzine nastanka štetnih tvari na elektrodama pa čak i u potpunosti izbjeći. Budući je za ispravan rad potrebno mjeriti veći broj, uglavnom električnih, veličina te upravljati s većim brojem elemenata, neizbježna je automatska regulacija koja poskupljuje izvedbu.

Ova metoda ne primjenjuje se na brodovima zbog potrebne kvalitete vode i s tim povezanog utroška električne energije, no primjenjuje se u stacionarnim postrojenjima.

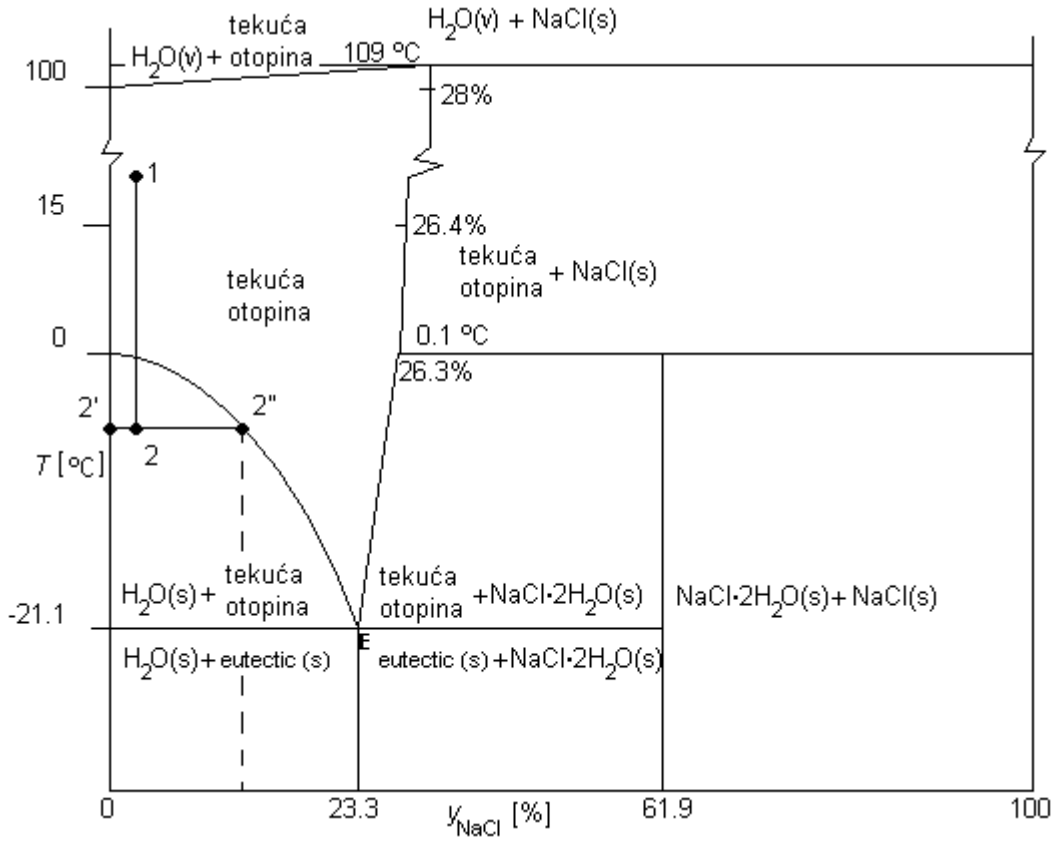
Efikasnost uređaja može se definirati izazom 2.1.1

$$e = \frac{E_{el}}{D} \ [\mathrm{Jskg^{-1}}], \qquad (2.1.1)$$

jer toplina za rad ovog tipa uređaja nije potrebna. Energija se troši za rad dobavne pumpe i proces elektrodijalize.

Metoda sa **zamrzavanjem** u osnovnim se crtama može objasniti pomoću faznog dijagrama $H_2O$ – NaCl koji je dan na slici 2.5. Na apscisi je maseni udio NaCl – $y$[%], a na ordinati temperatura $T$[°C] sustava $H_2O$ – NaCl. Kada se hladi otopina eutektičkog sastava E (23,3%) pri temperaturi -21,1°C pojavljuju se kristali leda ($H_2O$) i soli. Slanost svjetskih oceana i otvorenih mora[4] u rasponu je od 3 – 4%, dakle manja od eutektičke koncentracije E. Hlađenjem otopine, npr. sastava i temperature 1, do temperature 2, nastat će kristali čistog leda koncentracije $y_2$=0 u otopini povećane koncentracije $y_{2''}$.

Ukoliko se pri temperaturi nižoj od 0°C izvrši odlijevanje rasoline, ostat će kristali čistog leda koji se otapa polijevanjem čistom vodom više temperature.




**Slika 2.5.** Ravnotežni fazni dijagram voda – kuhinjska sol

Teoretski, u takvoj vodi nema otopljenih soli. U stvarnosti se između kristala čistog leda pojavljuje rasolina pa proizvedena voda ipak ima neki udio soli koji ovisi o početnom sastavu morske vode, temperaturi i brzini hlađenja te brzini strujanja morske vode uz rashladnu površinu.

Efikasnost ove metode može se procijeniti prema:

- odnosu proizvedene i upotrijebljene vode

[4] Atlantski ocean 3,5 - 3,58%, Tihi 3,46 – 3,51%, Sredozemno more 3,7 – 3,9%...

- odnosu udjela soli u proizvedenoj i upotrijebljenoj vodi
- utrošku energije.

Prvi se odnos može nazvati i maseni stupanj korisnosti te definirati izrazom

$$\eta_m = \frac{D}{m_{SW}} \ , \tag{2.1.2}$$

gdje je $D$ [kg/s, t/h] količina proizvedene destilirane vode, a $m_{SW}$ [kg/s, t/h] količina upotrijebljene morske vode. Oznaka $D$ uzeta je zbog usporedbe s metodom destilacije.

Drugi se odnos može nazvati koeficijent kvalitete postupka i definirati izrazom

$$\eta_s = \frac{S_D}{S_{SW}} \ , \tag{2.1.3}$$

gdje je $S_D$ slanost proizvedenog destilata, a $S_{SW}$ slanost upotrijebljene morske vode.

Koeficijent energetske učinkovitosti uređaja treba definirati imajući u vidu utrošak u svim pomoćnim sustavima uređaja za proizvodnju leda te njegovo kasnije otapanje. Uređaj troši električnu energiju za rad pumpi za dobavu morske vode, odvod rasoline, dovod tople vode za otapanje leda, odvod proizvedenog destilata te rad rashladnog uređaja[5]. Transport kristala leda do prostora za otapanje može, također predstavljati potrošnju energije[6]. Toplinska se energija koristi za zagrijavanje vode za otapanje. Koeficijent energetske učinkovitosti uređaja može se definirati prema

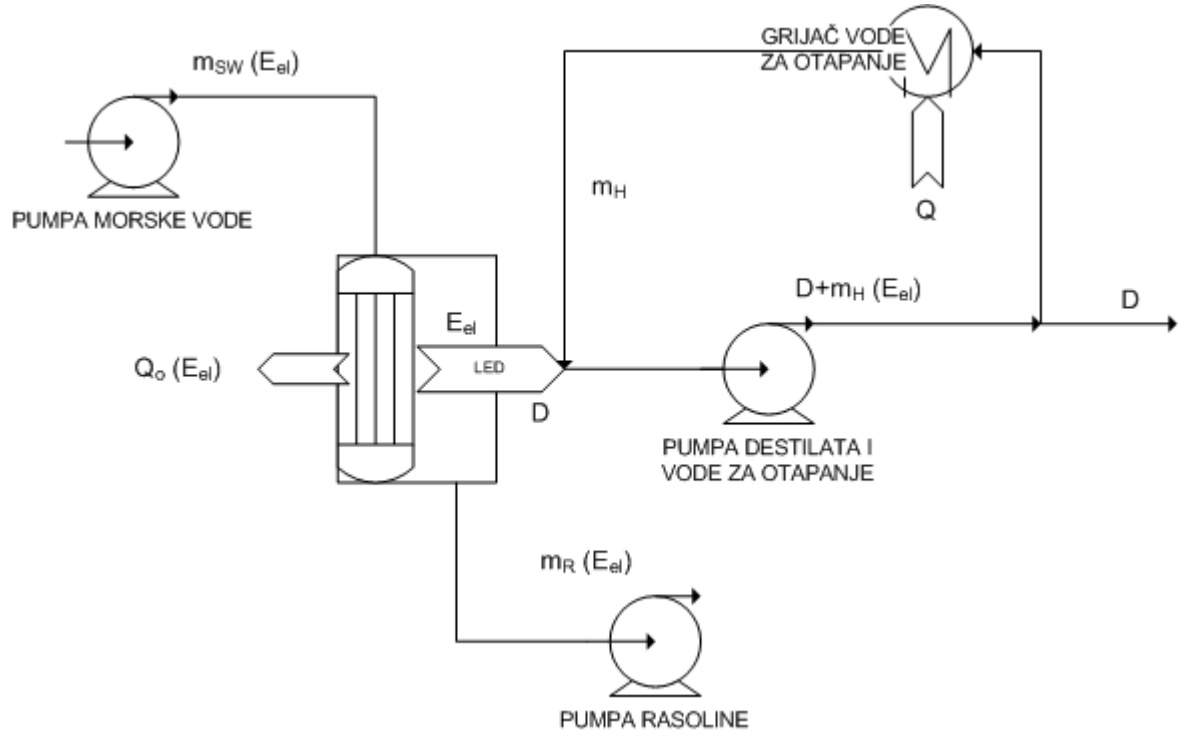
$$e = \frac{E_{ukup}}{D} \ [\mathrm{Jskg^{-1}}], \tag{2.1.4}$$

gdje je $E_{ukup}$ [J] ukupno utrošena energija prema izrazu $E_{ukup}=E_{el}+Q$, a $Q$ [J] predstavlja količinu topline dovedene vodi za otapanje.

Shematski se takav postupak može izvest kako to prikazuje slika 2.6. Dovodi se $m_{SW}$ [kg/s] morske vode koja se hladi te je potreban rashlani uređaj učina $Q_o$. Led se transportira (konvejerom), a rasolinu odvodi pumpa kapaciteta $m_R$ [kg/s].

[5] Pretpostavka je da se radi o parnokompresijskom rashladnom uređaju.
[6] Na primjer za rad konvejera.

Preko leda se prelijeva slatka voda, prethodno zagrijana dovođenjem topline $Q$[7], a ukupnu količinu odvodi pumpa kapaciteta $D+m_H$ [kg/s].



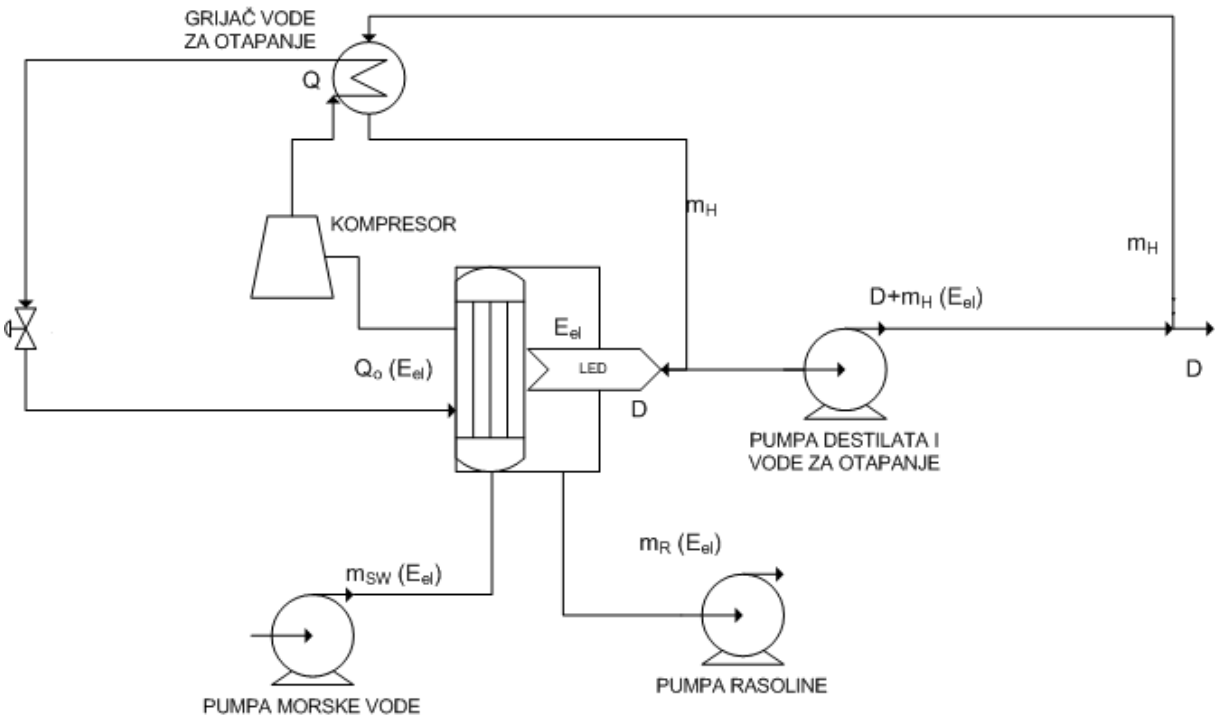

**Slika 2.6.** Prikaz procesa proizvodnje slatke vode metodom zamrzavanja

Električna energija potrebna je za rad pumpi morske vode, rasoline te destilata, kao i za rad konvejera leda. Ukoliko se zahtijevani rashladni učin ostvaruje parno-kompresijskim rashladnim uređajem, električna energija potrebna je i za njegov rad.

Poboljšanje procesa može se postići primjenom otpadne topline rashladnog uređaja za zagrijavanje vode za otapanje. Rashladni učin potreban za zaleđivanje ostvaruje se parno-kompresijskim uređajem. Toplinu $Q$ je potrebno odvoditi iz rashladnog procesa za zahtijevani rashladni učin $Q_o$. Ista se koristi za grijanje $m_H$ vode koja se naknadno koristi za otapanje leda, kako to shematski prikazuje slika 2.7.

Ovime se vrši rekuperacija otpadne topline rashladnog uređaja, a mijenja se i utrošak energije. Toplinska energija potrebna za zagrijavanje vode, odnosno topljenje leda posljedica je rada rashladnog uređaja te se energetska efikasnost uređaja umjesto izrazom 2.1.4 daje izrazom 2.1.1.

[7] Zagrijava se na 15 – 20°C.




**Slika 2.7.** Prikaz eksergetski učinkovitijeg procesa proizvodnje slatke vode metodom zamrzavanja

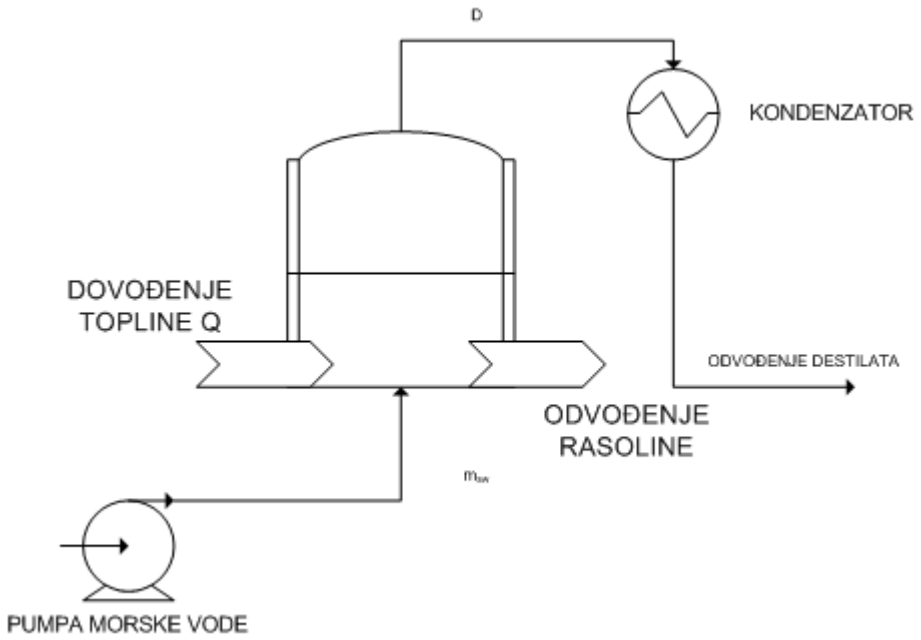
Metoda **destilacije**, poznata od davnina, najraširenija je među brodskim i stacionarnim postrojenjima. Otopini je potrebno dovesti dovoljno energije kako bi jedna komponenta[8] počela isparavati. Para se sakuplja u parnom prostoru te hladi kako bi se kondenzirala u čisti destilat.

Uređaji se razlikuju u složenosti, ali se bit može prikazati shemom na slici 2.8. Pumpa dobavlja $m_{SW}$ morske vode koja se zagrijava dovođenjem topline $Q$. Isparena faza $D$ sakuplja se na vrhu posude i odvodi u kondenzator u kojem se hladi i ukapljuje.

Osnovne razlike principijelno istih uređajia su u izvedbi i smještaju izmjenjivača topline (isparivača i kondenzatora), smjeru strujanja ogrjevnog fluida, radnog fluida te rashladnog fluida, kao i tlaku u posudi. Na shemi je kondenzator smješten izvan posude, dok je zagrijač-isparivač uronjen. Zbog jednostavnosti izvedbe ukoliko se radi o uređaju s uronjenim isparivačem i kondenzator je u samoj posudi.

Uređaji koji se izvode s vanjskim zagrijačem nazivaju se adijabatski[9]. Zagrijani radni fluid uvodi se u posudu u kojoj zbog dovoljno sniženog tlaka ishlapljuje. Para se sakuplja u parnom prostoru posude i odvodi u vanjski kondenzator.

[8] U slučaju vodene otopine soli to je voda.
[9] Mogu se nazivati i ishlapljivački.



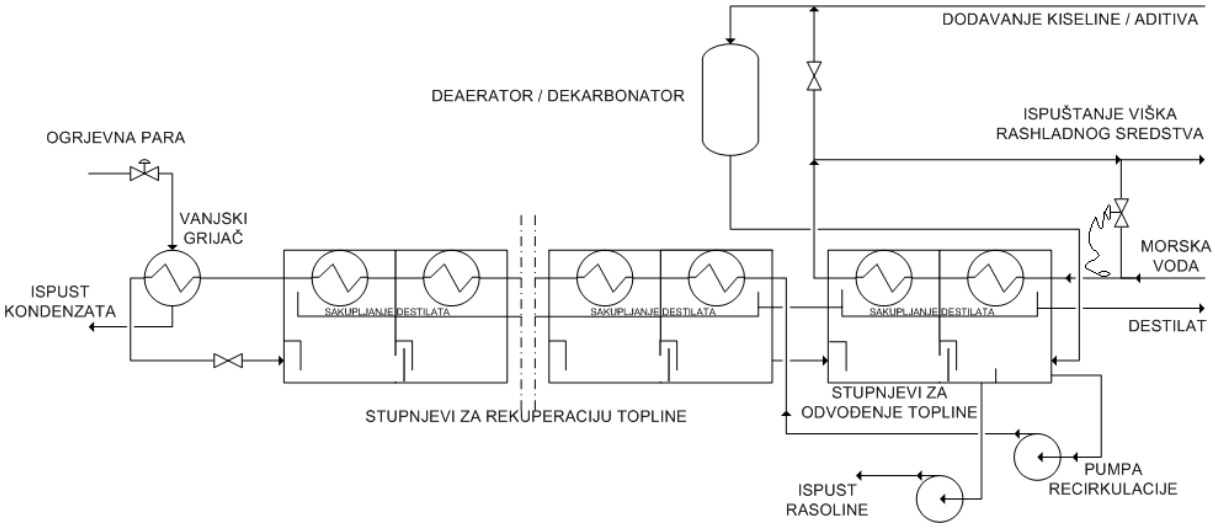

**Slika 2.8.** Shematski prikaz destilacijske metode

Kako bi se povećao ukupni toplinski stupanj iskoristivosti te kapacitet, uređaji mogu biti i višestupanjski. Slika 2.9. prikazuje **višestupanjski adijabatski uređaj**. Morska voda uvodi se u uređaj kao rashladno sredstvo kondenzatora te se na taj način predgrijava. Po izlasku iz kondenzatora dodaju se aditivi, vrši se odzračivanje i djelomična recirkulacija s ciljem uštede topline. Drugi se dio predgrijane i tretirane morske vode uvodi u stupnjeve za odvođenje viška topline. Iz zadnjeg stupnja sišu dvije pumpe: pumpa za odvođenje rasoline te pumpa recirkulacije.

Radni medij[10] kojega tlači pumpa recirkulacije prolazi kroz kondenzatore stupnjeva za rekuperaciju topline te se dodatno predgrijava, a zatim i kroz vanjski zagrijač. Ogrjevni medij je para. Tako zagrijan uvodi se u seriju posuda u kojima zbog niskog tlaka dolazi do ishlapljivanja. Svaka sljedeća posuda je pod nižim tlakom od prethodne. Ishlapljena faza diže se u gornji dio posude gdje se ukapljuje i slijeva u tavu za sakupljanje. Na shemi je crtkanom linijom naznačeno kako broj stupnjeva može biti i veći. Isto u biti vrijedi i za stupnjeve za odvođenje topline.

Kondenzat struji niz tavu do 'hladnog' kraja postrojenja, tj. stupnja s najnižim tlakom. Rasolina struji u istom smjeru prema posudi s najnižim tlakom. Morska se voda prolazeći kroz kondenzatore zagrijava gotovo do točke zasićenja te je utrošak energije u vanjskom grijaču mali. Izvedbe se razlikuju po broju stupnjeva te tehničkim karakteristikama izmjenjivača topline.

[10] Više nije morska voda već rasolina.




**Slika 2.9.** Višestupanjski adijabatski uređaj

Utrošak energije povećava se s debljinom kamenca na cijevima vanjskog grijača. Glavni tvorac kamenca je kalcij-sulfat. Sprječavanje nastanka kamenca ili smanjivanje brzine nastanka istog postiže se preciznom regulacijom tlaka ogrjevne pare[11]. Gornja temperatura rasoline mora biti malo niža od temperature nastanka kamenca. Drugi je važan faktor za sprječavanje nastanka kamenca tlak rasoline u cijevima kondenzatora. Isti mora biti viši od tlaka isparivanja. Odstupanje od projektnih vrijednosti dovest će do brzog nastanka kamenca, a s time do većeg utroška topline, ukupno većeg broja radnih sati potrebnih za čišćenje cijevi i većeg utroška repromaterijala te konačno do smanjenja učinkovitosti postrojenja.

Osim kalcij-sulfata, kamenac uzrokuje i kalcij-karbonat te magnezij-hidroksid. Kamenci nastaju na izmjenjivačkim površinama, ali i drugim stjenkama uređaja. Kod postrojenja koja rade s temperaturama do 95°C kontrola nastanka kamenca kalcij-karbonata uspješno se postiže dodavanjem nekoliko *ppm* aditiva koji mijenja strukturu kristala kamenca i smanjuje adheziju na površinama uređaja.

Princip doziranja je vrlo jednostavan. U struju rasoline ili morske vode dozira se neznatno veća količina od teoretski potrebne. Nedostatak leži u činjenici da se troši više aditiva, što povećava ukupne troškove proizvodnje. Preobilno doziranje rezultira samo nastankom i akumuliranjem mulja u cijevima uređaja.

Ova metoda ne sprječava nastanak kamenca u potpunosti već proces usporava do prihvatljive razine. Periodično se uređaj mora čistiti i to u pravilu otopinom kiseline. Ukoliko takav način rada nije prihvatljiv iz bilo kojeg razloga (npr. viših radnih temperatura) u napojnu vodu se dodaje kisela otopina. Doziranje se regulira prema pH vrijednosti koja se očitava nakon mjesta doziranja i mora biti izuzetno precizno. Veća kiselost može izazvati velika oštećenja svih metalnih

[11] Čime se u biti regulira temperatura ogrjevne površine.

dijelova postrojenja, dok smanjena kiselost dovodi do brzog nastanka kamenca u unutrašnjosti cijevi izmjenjivača topline pa čak i njihovog potpunog začepljivanja.

Na nastanak kamenca utječe također i koncentracija soli u rasolini te temperatura. Efikasno računsko određivanje koncentracije postiže se mjerenjem protoka u napojnoj liniji te liniji destilata. Dodatnim mjerenjem sastava napojne morske vode te slanosti rasoline može se postići dovoljno točna gornja razina koncentracije soli u rasolini, a s time i kapaciteta. Kapacitet postrojenja proporcionalan je cirkulaciji rasoline. Povećanje pada tlaka u recirkulacijskoj liniji ukazuje na začepljenje izmjenjivačkih cijevi kamencem te se nužnim pokazuje i mjerenje tlaka u recirkulacijskoj liniji, odnosno na tlačnoj strani recirkulacijske pumpe. Indikacija tlaka potrebna je i neposredno nakon vanjskog grijača, jer operateru može promptno ukazati na isparavanje radnog fluida ili nastanak kamenca i eroziju cijevi.

U svakom se pojedinom stupnju mjeri razina rasoline prema čemu operater podešava prigušnice između stupnjeva. Visoka razina može dovesti do odnošenja[12] i naplavljivanja stupnja.

Udio kisika u radnom fluidu pospješuje kisikovu koroziju. Smanjenje udjela postiže se u deaeratoru koji može biti izveden kao zasebna jedinica ili smješten u jednom od stupnjeva uređaja. U kvalitetnijim postrojenjima udio kisika može se smanjiti i do ispod 10 ppb[13].

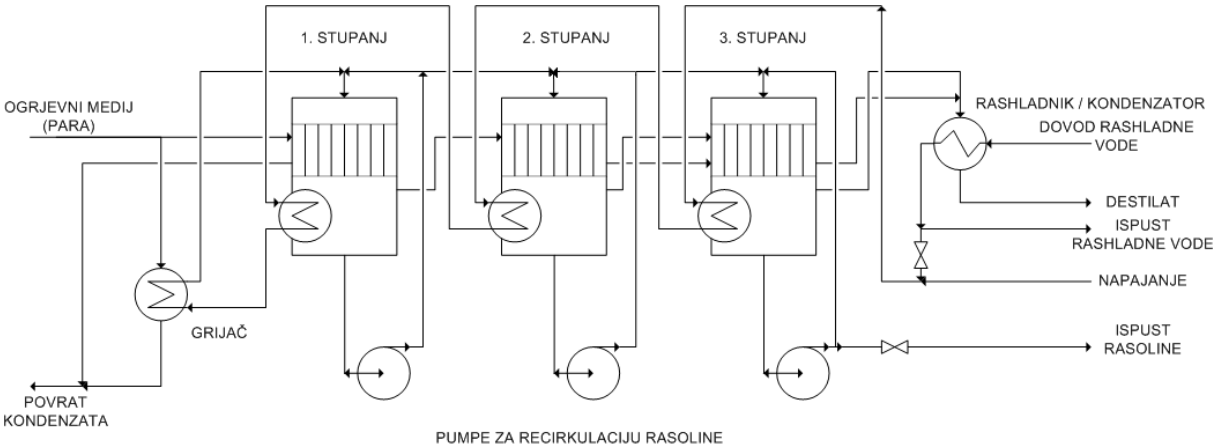
Kod stacionarnih postrojenja temperatura napojne morske vode mijenja se s promjenom godišnjeg doba, a kod pokretnih i s geografskom širinom, morskim strujama i dr. U pravilu se konstantna temperatura napojne struje postiže metodom recirkulacije kao kod sustava na slici. Na prikazanom primjeru ugrađen je prigušni termostatski ventil. Umjesto njega može se ugraditi troputni ventil – mješač.

Na slikama 2.10 i 2.11 prikazani su sustavi s **vertikalnim izmjenjivačkim cijevima**. Kod prvoga se radi o istosmjernom napajanju, a kod drugoga o protusmjernom. U odnosu na postrojenje prikazano shematski na slici 2.9, ovi sustavi imaju prednost u mogućnosti regulacije proizvedene količine destilata regulacijom količine ogrjevne pare, maksimalne temperature ili obje veličine. Kapacitet može varirati u rasponu od 20% do 120% projektne veličine [13].

Napojna voda predgrijava se najprije u krajnjem kondenzatoru, a zatim u izmjenjivačima topline smještenim u parnim prostorima svih stupnjeva i to redom od stupnja s najnižom temperaturom do onog s najvišom. Konačno prolazi kroz primarni zagrijač u kojem se zagrijava vanjskom parom, koja je i ogrjevni medij prvog stupnja. Tako predgrijana napojna voda uvodi se na vrhu

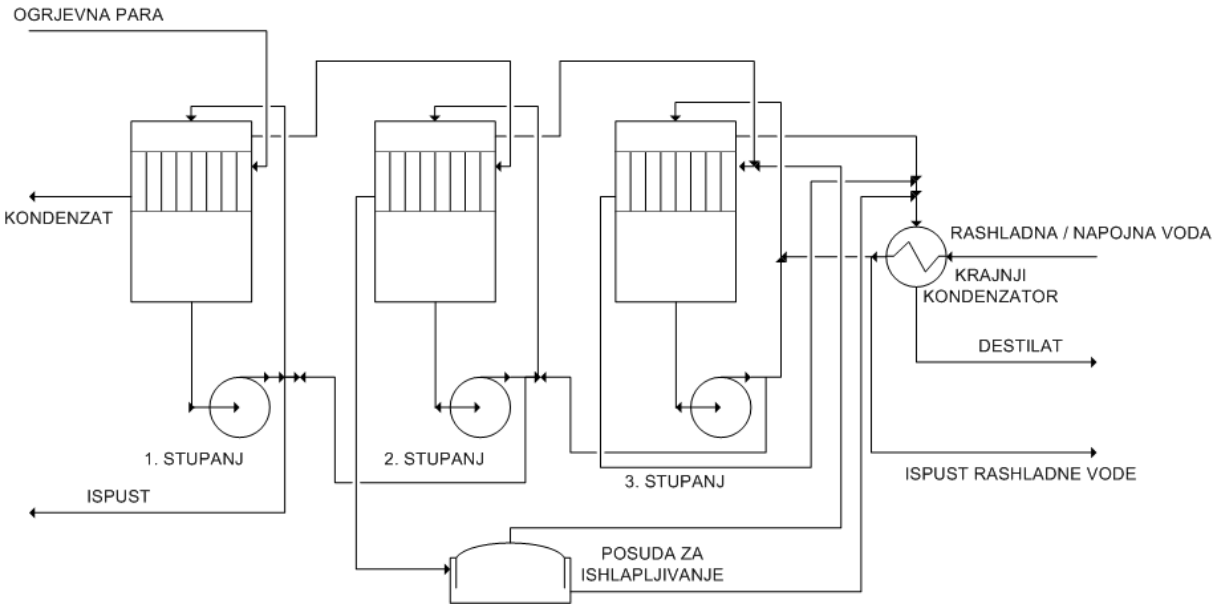
[12] Kapljica rasoline s molekulama pare, engl. carry over.
[13] Engl. part per billion – milijarditi dio.

stupnja kako bi se postigla ravnomjerna distribucija, tj. tanki film na stijenkama cijevi. Proizvedena para vodi se kao ogrjevni fluid u sljedeći stupanj, a rasolina sakuplja na dnu posude. Pumpa recirkulacije vraća dio rasoline, a dio se vodi u sljedeći stupanj kako bi se najveća koncentracija soli postigla u stupnju s najnižom temperaturom.




**Slika 2.10.** Višestupanjski uređaj s istosmjernim napajanjem

Ovakvi su sustavi pogodni ukoliko se koristi napojna voda takvog sastava koji bi mogao rezultirati brzim nastajanjem kamenca. Ispravnost rada postrojenja prati se mjerenjem tlaka, temperature i protoka rasoline kroz svaki stupanj.

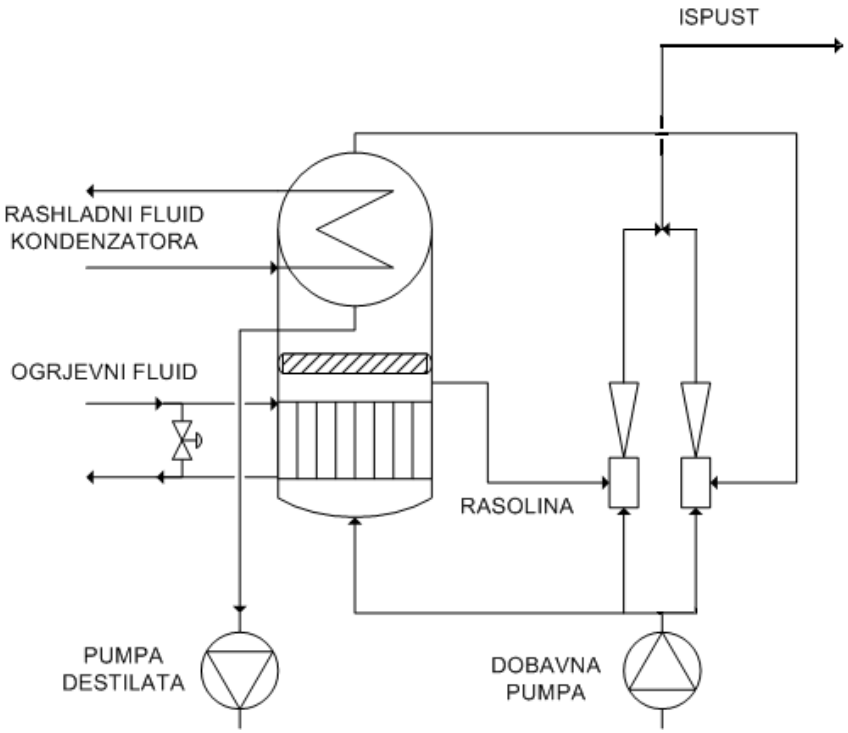



**Slika 2.11.** Višestupanjski uređaj s protusmjernim napajanjem

Kod sustava s protusmjernim napajanjem napojna se voda također predgrijava u krajnjem kondenzatoru i u prvom je stupnju ogrjevni fluid vanjska para, no bitna je razlika što se ovdje najviša koncentracija postiže u stupnju s najvišom temperaturom. Zahtijevaju se vrlo precizni uređaji za mjerenje koncentracije rasoline, jer je moguć brz nastanak kamenca na izmjenjivačkim površinama.

U oba slučaja prikazani su sustavi s tri stupnja, dok je u stvarnosti broj stupnjeva veći. Isto tako, izmjenjivačke su površine prikazane s vertikalnim cijevima. U upotrebi su i izmjenjivači s horizontalnim cijevima gdje ogrjevni fluid struji kroz cijevi, a rasolina se prska po vanjskim površinama. Kod takvih je izvedbi potrebna još preciznija regulacija te dodatna regulacija protoka i razine rasoline jer se na površinama cijevi mogu pojaviti suha mjesta te uzrokovati brz nastanak kamenca.

Uređaji prikazani na slikama 2.9 do 2.11 su adijabatski, no isparivač može bit smješten u samoj posudi. To su **uređaji s uronjenim ogrjevnim elementom**. Na slici 2.12 prikazan je jednostupanjski, a na slici 2.13 šesterostupanjskii uređaj.




**Slika 2.12.** Jednostupanjski uređaj s uronjenim ogrjevnim elementom

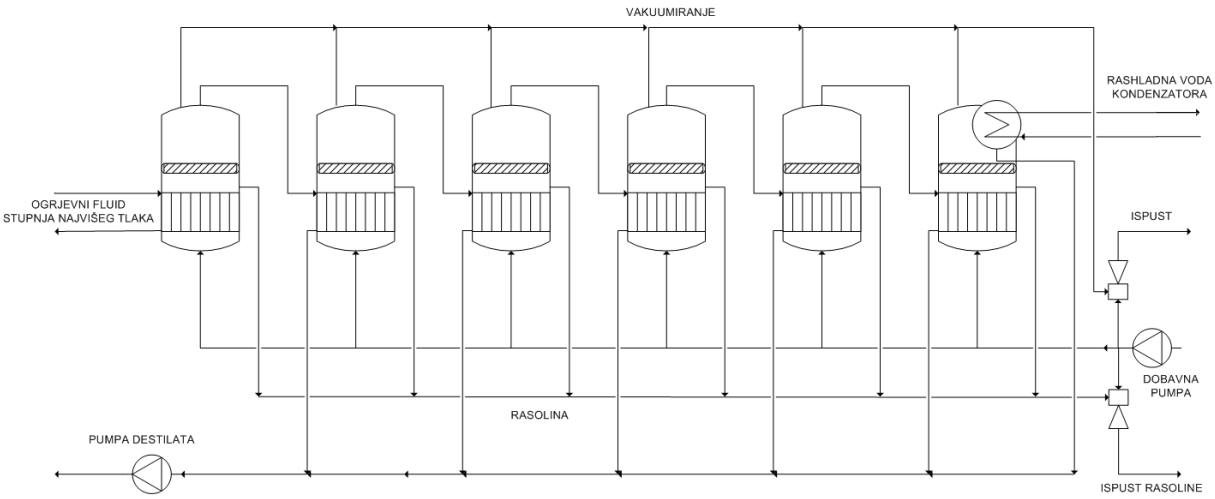
Osnovna razlika uređaja prikazanog na slici 2.12 i adijabatskih uređaja s prethodnih slika jest u smještaju ogrjevnog elementa. Dobavna pumpa tlači radni fluid u posudu te daje radni fluid ejektora[14]. Količina dovedene topline

[14] Engl. ejektor pump.

regulira se mimovodnim ventilom. Između zagrijača – isparivača i kondenzatora nalazi se separator kapljica. Destilat sakupljen na dnu kondenzatora odvodi se pumpom destilata. Rasolinu odvodi ejektor rasoline. Ukoliko je ogrjevni fluid niske radne temperature uređaj mora raditi u području potlaka kojega ostvaruje zasebni ejektor[15].

Kako bi se povećao ukupni stupanj iskoristivosti izgrađuju se višestupanjski uređaji s uronjenim ogrjevnim elementima kao na slici 2.13. Dobavna pumpa ima istu ulogu kao i kod jednostepenog uređaja: tlači radni medij u isparivačke posude i daje radni fluid ejektorima. Istu ulogu imaju i ejektori te pumpa destilata.

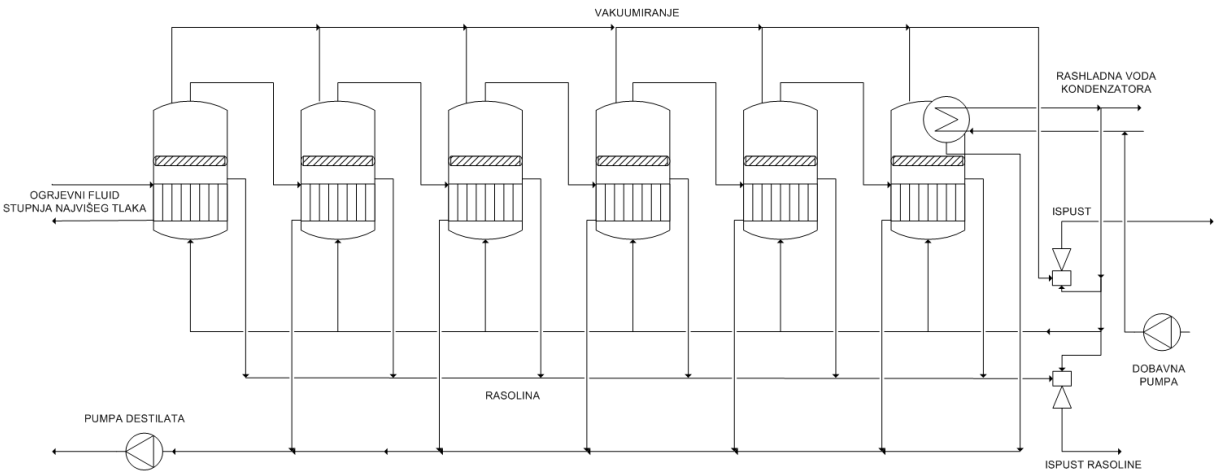
Međutim, vanjski se ogrjevni fluid dovodi samo prvom stupnju, tj. stupnju koji radi s najvišim radnim tlakom. Rashladni fluid kondenzatora dovodi se samo zadnjem stupnju najnižeg tlaka. U međustupnjevima para iz prethodnog stupnja postaje ogrjevni fluid stupnja nižeg tlaka i tako redom te se na taj način kondenzira. Na slici je pojednostavljeni prikaz, jer je za ispravan rad važno održavanje pravilnih tlakova u stupnjevima, kao i regulacija dovedene topline.




**Slika 2.13.** Višestupanjski uređaj s uronjenim ogrjevnim elementom

Ušteda energije postiže se predgrijavanjem radnog fluida kako je to prikazano na slici 2.14. Dobavna pumpa radni fluid tlači najprije u kondenzator, gdje se isti, preuzimajući toplinu od destilata zadnjeg stupnja, predgrijava, a zatim prema ejektorima i isparivačkim stupnjevima.

[15] Kod nekih izvedbi ugrađuje se samo jedan ejektor.




**Slika 2.14.** Višestupanjski uređaj s uronjenim ogrjevnim elementom i predgrijavanjem radnog fluida

U svim je izvedbama s uronjenim ogrjevnim elementom potrebna regulacija količine dovedene topline te tlaka u isparivačkim posudama, no konkretna izvedba ovisi o ukupnoj cijeni uređaja ili, u konačnici, o cijeni proizvoda (vode).

Iako relativno složeni destilacijski su uređaji najbrojniji zbog toga što najveći dio energije potrebne za proces dolazi u toplinskom obliku, a to može biti i otpadna energija nekog drugog procesa.

I u ovom se slučaju koeficijent energetske učinkovitosti uređaja može definirati prema izrazu 2.1.4, jer se dovedena energija sastoji od električne energija potrebne za rad pumpi te toplinske energije. Dakle, opet vrijedi $E_{ukup}=E_{el}+Q$. Razlika se pojavljuje u odnosu električne energije i topline potrebne za rad.

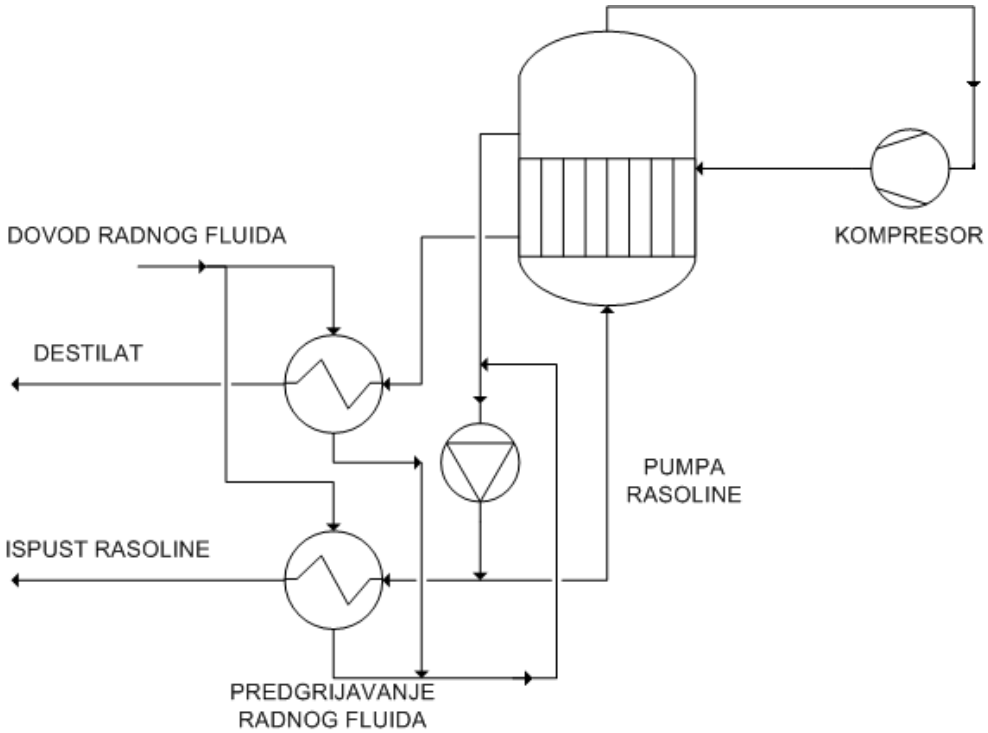
Usporedba utrošenih energija za proizvodnju jednake količine vode adijabatskog postrojenja kao na slici 2.9, višestupanjskog destilacijskog postrojenja kao na slici 2.10 te uređaja koji koristi reverzibilnu osmozu data je u tablici 2.1 [84].

**Tablica 2.1.** Srednji utrošak energije destilacijskih postrojenja

| Tip postrojenja | Utrošak toplinske energije [kWh/m$^3$] | Utrošak električne energije [kWh/m$^3$] |
|---|---|---|
| Adijabatski (sl. 2.9) | 100 | 3 |
| Višestupanjski destilacijski (sl. 2.10) | 50 | 3 |
| Reverzibilna osmoza | - | 4,5 |

Ukoliko toplinske energije nema ili je nema dovoljno, koristi se uređaj s rekompresijom pare prikazan na slici 2.15. Za rad istog potrebna je mehanička

energija potrebna za kompresiju pare[16]. Radni fluid predgrijava se u dva izmjenjivača topline: parama 'proizvoda' koje se na taj način kondenziraju te ispuštenom rasolinom. Pumpa rasoline djelomično siše rasolinu iz posude, a djelomično predgrijani fluid. Pare koje se sakupljaju u vrhu posude siše kompresor te ih tlači u izmjenjivač topline u kojem zagrijavaju rasolinu do točke vrenja.

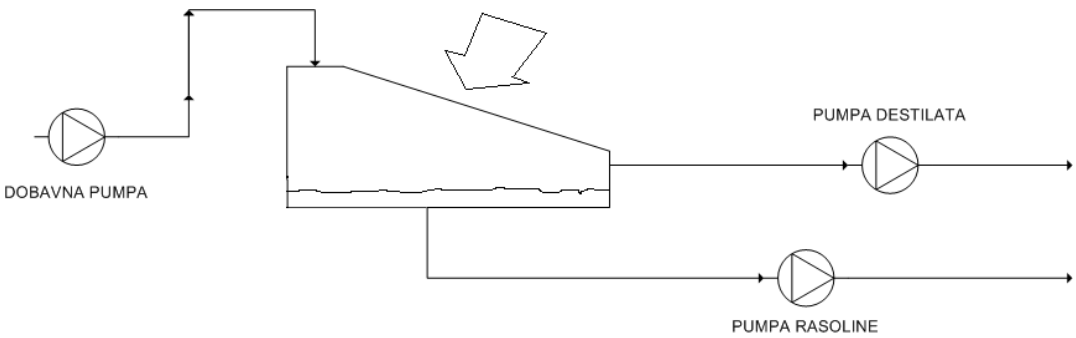



**Slika 2.15.** Uređaj s rekompresijom pare

I kod ovog je tipa uređaja energetsku efikasnost moguće prikazati jednadžbom 2.1.1, jer je za masenu jedinicu proizvedenog destilata potrebna samo električna energija. Uređaj treba raditi s malim temperaturnim razlikama pa zagrijač pare treba imati veliku izmjenjivačku površinu. Isto vrijedi i za predgrijače čime se smanjuju toplinski gubici postrojenja.

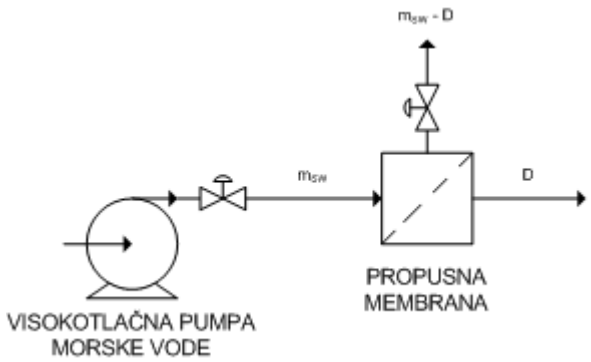
U svjetlu tendencije primjene obnovljivih izvora energije treba navesti **destilacijske uređaju koji toplinu dobivaju u obliku Sunčeve energije**. Teoretska shema takvog uređaja dana je na slici 2.16. Iako je za rad uređaja potrebna toplina, ista je iz obnovljivog izvora te se energetska efikasnost uređaja može opet prikazati izrazom 2.1.1.

[16] Iako postoje rješenja gdje se dovoljno povećanje tlaka postiže ejektorom za rad kojega je potreban samo radni fluid (npr. para).




**Slika 2.16.** Sunčani kolektor za destilaciju

Primijenjeni uređaji koji koriste površinske metode desalinizacije su uređaji koji koriste reverzibilnu osmozu. Prednost je ove metode u usporedbi s nekim drugim, u praksi jako zastupljenim metodama, što se energija potrebna za rad dovodi u obliku električne struje. Shematski se proces izvodi kao što to prikazuje slika 2.17.




**Slika 2.17.** Jednostupanjski uređaj koji radi na principu reverzibilne osmoze

Visokotlačna pumpa tlači $m_{SW}$ radnog fluida na propusnu membranu kroz koju ne mogu proći ioni soli pa prolazi $D$ čiste vode. Regulacijskim ventilima održava se tlak u cjevovodu. Metoda je pogodna za gradska naselja gdje ne postoje izvori otpadne topline te na brodovima s elektromotornom propulzijom.

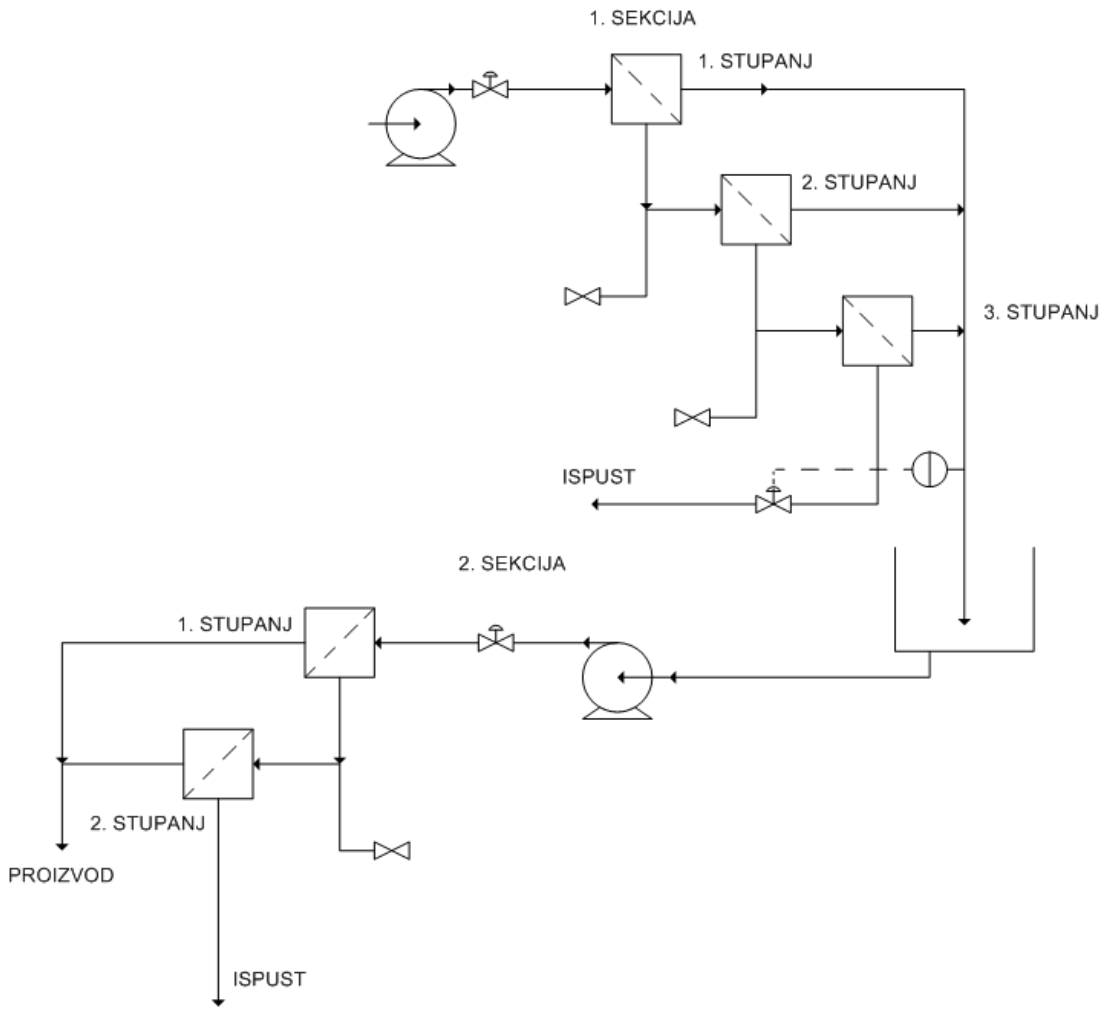
Uređaji s polupropusnim membranama također mogu biti **višestupanjski**. Na slici 2.18 prikazan je uređaj s tri stupnja u prvoj sekciji i dva stupnja u drugoj sekciji.' pri čemu je 'proizvod' prve sekcije 'sirovina' druge. Takva bi se izvedba primijenjivala ukoliko je sirovina kontaminirana, kakva bi bila u blizini velikih gradskih središta.

Osim izvedbe kod koje 'proizvod' prve sekcije biva ispušten u tank iz kojega ga usisava pumpa druge sekcije, uz odgovarajuće se elemente automatske regulacije može izvesti i direktan usis pumpe druge sekcije.

Protok kroz uređaj proporcionalan je tlaku i, što je još važnije, o tlaku ovisi trajnost membrana. Tlak se regulira promjenom karakteristike pumpe te regulacijskim ventilima na ispusnim cjevovodima rasoline. Na ispravnost rada i trajnost uređaja utječe i temperatura radnog fluida te koncentracija soli.

Povišenje temperature radnog fluida za jedan 1°C povećava protok za 3% [13], ali smanjuje trajnost membrana. Uređaji u pravilu rade s ulaznom temperaturom 45°C i imaju automatsku zaštitu koja prekida rad (zaustavlja pumpe) u slučaju previsoke temperature.

Koncentracija soli održava se pravilnim ispuštanjem rasoline za što je na ispusnom cjevovodu potrebno ugraditi mjerače protoka. Pored toga, u radni se fluid doziraju kemikalije.




**Slika 2.18.** Višestupanjski uređaj koji radi na principu reverzibilne osmoze

Koeficijent energetske učinkovitosti uređaja može se definirati izrazom 2.1.1, jer toplina za rad ovog tipa uređaja nije potrebna. Energija se troši za rad dobavne pumpe i ovisi prije svega, o potrebnom radnom tlaku. Ipak, ukoliko se radni

fluid predgrijava, a u tom slučaju 'proizvod' se i hladi, postoji utrošak toplinske energije te izraz za efikasnost uređaja postaje 2.1.4.

Ukupni utrošak energije može se smanjiti primjenom rekuperacijske turbine. Ona kao radni medij koristi rasolinu koja izlazi s relativno visokim tlakom[17] te se na taj način može povratiti i do 35% energije potrebne za rad visokotlačnih pumpi [81].

Dakle, ovisno o obliku energije koja je potrebna za rad uređaja, energetska efikasnost uređaja dana je izrazom 2.1.1, ukoliko uređaj troši samo električnu energiju ili 2.1.4, ukoliko je uz električnu energiju potrebna i toplina. Treba ipak napomenuti da u nekim slučajevima uređaji toplinu dobivaju kao otpadnu toplinu nekog procesa te se ista ne bi trebala uzimati u obzir. Primjer za to su brodski vakuumski uređaji kojima je izvor topline rashladna voda porivnih strojeva.

Kod prethodno opisanih rješenja, koja za rad trebaju i toplinsku energiju, nije precizirano iz kojeg se izvora dovodi. Često se radi o otpadnoj toplini nekog, potpuno neovisnog, industrijskog procesa[18], no ima slučajeva gdje je tu toplinu nužno djelomično ili potpuno iskorištavati u postrojenju za desalinizaciju jer se u protivnom ne može ostvariti potreban rashladni učinak, tj. radni se fluid pregrijava. Također, ukoliko takve otpadne topline nema na raspolaganju ili je nema u dovoljnoj količini, za njezinu je proizvodnju potrebno utrošiti gorivo.

Budući da se cijena proizvedene jedinice vode, iskorištavanjem otpadne topline, smanjuje u primjeni je veći broj različitih kogeneracijskih postrojenja.

## 2.2. Uvjeti okoline

Kada se radi o stacionarnim postrojenjima treba razmatrati ulazne i izlazne parametre. Ulazne veličine su svojstva vode koja se desalinizira te energija potrebna za proces. Voda može biti morska ili bočata, ali u blizini većih gradova može biti bakteriološki i kemijski kontaminirana. Zagađenost vode poskupljuje kompletan proces pripreme vode, iako za razmatranje desalinizacijskih uređaja nema većeg značaja. Oblik i količina energije potrebna za proces desalinizacije, odnosno dovođenje iste, mogu imati negativan utjecaj na okoliš.

Na rad postrojenja utječe temperatura i slanost ulazne vode pri čemu se za slanost može uzeti konstantna veličina dok se temperatura može mijenjati u ovisnosti o godišnjem dobu.

[17] Kreće se u rasponu od 5 do 6,5 MPa.
[18] U širem smislu i brodski pogonski kompleks takav je proces.

Iz procesa desalinizacije odvodi se 'proizvod' i rasolina, koja uz povećanu slanost može imati i povišenu temperaturu. Ispuštanje iste u okoliš može negativno utjecati na biljne i životinjske organizme pa čak, ukoliko se radi o većim količinama, i na mikroklimu. Kako je prije navedeno za ispravan rad uređaja radni se fluid kemijski tretira ili se uređaj periodički čisti, uglavnom kemijskim preparatima, što također ima negativan utjecaj na okoliš.

O brodskim se uređajima može razmišljati na isti način, no postoje i bitne razlike. Kada se razmatraju svojstva morske vode na ulazu u pravilu se smatra kako je voda bakteriološki i kemijski čista. To je u većini slučajeva ispravno razmišljanje. Uređaji su uvijek malo predimenzionirani u odnosu na brodske potrebe za destiliranom vodom te se rad prekida prije nego li brod uplovi u more sumnjive čistoće, tj. dovoljno daleko od obale sa stambenim naseljima ili industrijskim postrojenjima, a s radom se započinje tek nakon ponovnog uplovljenja u čisto more.

Suprotna je situacija s temperaturom i slanošću vode na ulazu. Ovi se parametri, za razliku od stacionarnih postrojenja, mogu znatno mijenjati jer na iste ne utječe samo godišnje doba, već i zemljopisna širina, morske struje, prisustvo većih izvora slatke vode (rijeka ili leda) i dr.

'Ulaz' energije potrebne za rad u stvari je glavni čimbenik koji određuje tip uređaja koji će se primijeniti na brodu. Poriv brodova većih nosivosti ili većih nazivnih snaga porivnih strojeva u velikoj se većini izvodi dizelskim motorima za rad kojih je potreban rashladni sustav, što upućuje na činjenicu kako je dostupno dovoljno otpadne topline. Iz toga slijedi kako se na brodovima ugrađuju uređaji koji koriste metodu destilacije.

Rasolina koja se ispušta iz broda, kako je već navedeno, u otvoreno more, nema bitnijeg utjecaja na morski okoliš.

## 2.3. Zahtijevani kapacitet

Kapacitet postrojenja za desalinizaciju treba uskladiti s potrebama:

- osoba koje žive ili rade u okruženju postrojenja[19]
- industrijskih postrojenja koja za svoj rad trebaju destiliranu vodu.

Ukoliko se iz destilirane vode proizvodi voda za piće, kuhanje te sanitarne potrebe ljudi, količine vode po čovjeku i danu određene su nacionalnim i

[19] Ovakva definicija uslijedila je iz želje za generalizacijom pa okruženje postrojenja može biti stambeno naselje ili brod.

međunarodnim normama[20]. Ukupni se kapacitet određuje na osnovi ukupnog broja osoba na određenom području ili brodu.

Potrebe stacionarnih industrijskih postrojenja za slatkom (tehnološkom) vodom teško je generalizirati. S druge strane, potrebe brodskog pogonskog kompleksa mogu se okvirno odrediti. Između nekoliko različitih porivnih sustava, statistički promatrano prema nosivosti brodova ili instaliranoj snazi strojeva, može se tvrditi kako će na velikoj većini brodova biti ugrađena neka vrsta dizelmotornog postrojenja[21] te barem jedan ili više spregnutih generatora pare.

Potrebe za destiliranom vodom dizelmotornog postrojenja, mogu se opisati, iako ih se ne može točno kvantificirati:

- nenamjerna ispuštanja ili curenja iz visoko ili niskotemperaturnih rashladnih cjevovoda motora;
- namjerna ispuštanja zbog periodičnog uzimanja uzoraka vode, prilikom popravaka ili zbog kontaminacije morskom vodom;
- gubici pri odušivanju cjevovoda uslijed grešaka u radu, zbog npr. previsokih temperatura;
- utrošak vode potrebne za rad separatora goriva i ulja za podmazivanje;
- utrošak za rad nekih drugih pomoćnih uređaja, koji nemaju direktne veze s tipom postrojenja, ali se ugrađuju na sve tipove brodova, kao npr. uređaji za pročišćavanje kaljužne vode.

Isto vrijedi i za gubitke u sustavu pare, kondenzata i napojne vode:

- nenamjerna ispuštanja iz generatora pare ili cjevovoda;
- namjerna ispuštanja kotlovske vode zbog uzimanja uzoraka, periodičnog odsoljavanja, otpjenjivanja ili odmuljivanja;
- gubici prilikom održavanja cjevovoda;
- utrošak zbog propuhivanja dimnih kanala kotlova (loženih ili na ispušne plinove).

Neki se od gore navedenih utrošaka vezuju uz kvarove ili pogreške u sustavu i teško ih je ili nemoguće predvidjeti niti točno odrediti. Drugi se mogu javljati u pravilnim vremenskim razmacima, ali opet ovise o tipu postrojenja, načinu vođenja procesa, održavanju sustava i dr. Zbog nemogućnosti točnijeg određenja gubitaka isti se definiraju u odnosu na nazivnu snagu dizelmotornog postrojenja i kapacitet generatora pare[22].

[20] WHO – World health organisation (Svjetska zdravstvena organizacija daje količinu vode po čovjeku dnevno.
[21] Poriv broda ili pogon generatora električne energije.
[22] U pravilu je to između 1 i 2% od nazivne snage i kapaciteta generatora pare, pri čemu se relativno veći iznosi javljaju kod manjih snaga i kapaciteta.

## 2.4. Prihvatljivost rješenja i moguća poboljšanja

Prihvatljivost nekog rješenja treba procjenjivati barem prema sljedećim kriterijima:

- zahtijevanom kapacitetu
- cijeni proizvedene vode, uzimajući u obzir investicijske i eksploatacijske troškove
- kvaliteti proizvedene vode
- potrebnoj količini i obliku energije za rad
- ukupnom utjecaju na okoliš.

Uz ove, brodska bi postrojenja trebala zadovoljavati i neke specifične zahtjeve:

- male dimenzije zbog skučenog prostora brodske strojarnice i zbog potrebnog prostora za održavanje
- pouzdanost u radu pri raznim vremenskim – okolišnim uvjetima (npr. naginjanja broda ili tijekom plovidbe tropskim morima)
- kvaliteta vode koja zadovoljava brodsko postrojenje[23]
- mogućnost opskrbe rezervnim dijelovima i servisa u lukama pristanaka broda.

Kriteriji se isprepliću pa ponekad ispunjavanje jednoga znači loš utjecaj na jedan ili više drugih. Kapacitet se može promatrati kao trenutačna veličina izražena u masenim jedinicama proizvedene vode u vremenu, no zadovoljavajući kapacitet možda se postiže uz brzo stvaranje kamenca što će dovesti do povećanog utroška kemikalija ili radnih sati za čišćenje i time povećane cijene proizvedene vode te ukupno smanjenog kapaciteta[24] zbog vremena kada postrojenje ne radi.

Energetski efikasna destilacijska postrojenja koja troše malo ogrjevne energije i proizvode relativno velike količine mogu zahtijevati dosta sati održavanja i u konačnici, proizvoditi vodu relativno visoke cijene. Osim toga veliki kapaciteti mogu značiti i lošu kvalitetu proizvedene vode.

Na ukupnu cijenu postrojenja utječu i mjerni instrumenti potrebni za praćenje rada te automatsko upravljanje. Isti se ugrađuju sa svrhom sprječavanja problema u radu i s tim povezanih troškova, ali povećavaju investicijske troškove. Ponekad to znači i povećanje eksploatacijskih troškova jer se i sustavi upravljanja, kontrole i regulacije također kvare.

[23] Isti zahtjev mogu postaviti i stacionarna industrijska postrojenja, ali se voda proizvedena uređajem za desalinizaciju može dodatno tretirati u samom postrojenju.
[24] Kroz neki duže razdoblje.

Jedan od mogućih ciljeva poboljšanja moglo bi biti smanjenje cijene 'proizvoda' što se može postići na dva načina:

- smanjenjem investicijskih, eksploatacijskih ili ukupnih troškova, pri čemu se u eksploatacijske troškoškove ubraja trošak energije, potrošnog materijala i radnih sati operatera[25],
- povećavanjem kapaciteta uz iste uvjete.

Krajnji je cilj povećati kapacitet i smanjiti troškove.

Na ukupnu cijenu destilacijskog uređaja može se utjecati kvalitetom izmjenjivača topline [110]. To može značiti manje izmjenjivačke površine ili manje padove tlaka te manju teoretsku snagu dobavnih pumpi. Manji broj regulacijskih, kontrolnih i upravljačkih elemenata također smanjuje cijenu.

Izvedbe koje zahtijevaju manji broj radnih sati održavanja imaju niže eksploatacijjske troškove. Potrošni materijal, poput kemijskih aditiva napojnoj vodi ili sredstava za čišćenje izmjenjivačkih površina, također definira eksploatacijske troškove.

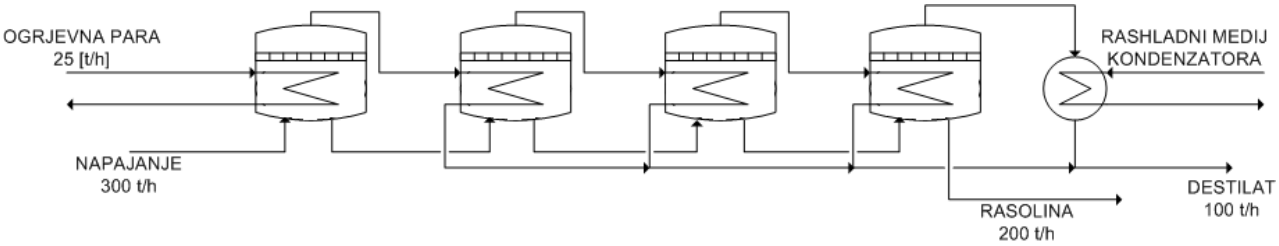
Promjene koje su se dešavale s konstrukcijskim rješenjima težile su upravo tome. Noviji destilacijski uređaji imaju pločaste izmjenjivače topline.koje je lakše čistiti i, u slučaju potrebe, mijenjati. Najnovija rješenja izvedena su s jedinstvenim pločama isparivača i kondenzatora, a iste objedinjuju i odjeljivač kapljica. Ploče su od titanija, otporne na korozivno djelovanje morske vode, čime se postiže ušteda na eksploatacijskim troškovima.

Uštede na regulacijskoj, kontrolnoj ili upravljačkoj opremi može, u konačnici, dovesti do povećanih troškova neovisno o kojem se tipu desalinizacijskog postrojenja radi. Kako je prethodno navedeno, sustavi automatskog upravljanja postrojenja za desalinizaciju vode proces na način da 'proizvod' ima zadovoljavajuća svojstva[26]. Drugi je mogući cilj, koji se ne ugrađuje uvijek, održavanje potrebnog kapaciteta pri promjenjivim vanjskim uvjetima. Ukoliko radni parametri premaše dopuštene vrijednosti aktivira se sustav upozoravanja i sustav zaštite koji može isključiti uređaj iz rada, preusmjeriti izlaz 'proizvoda', prekrenuti elektrokemijsku desalinizaciju, ubacivati veće doze kemikalija i drugo. Očito, manji stupanj automatizacije snizuje cijenu postrojenja, ali je upitno kako će to djelovati na konačnu cijenu proizvedene vode zbog povećanih troškova uslijed zastoja u radu i više radnih sati održavanja uzrokovanih pogreškama u radu koje nisu na vrijeme uočene [111].

Jedan od ciljeva, i.e. smanjivanje troškova te u konačnici cijene proizvedene vode, može se postići različitim **kogeneracijskim postrojenjima**. Steinegger u radu [65] postiže uštede kombinacijom četverostupanjskog destilacijskog

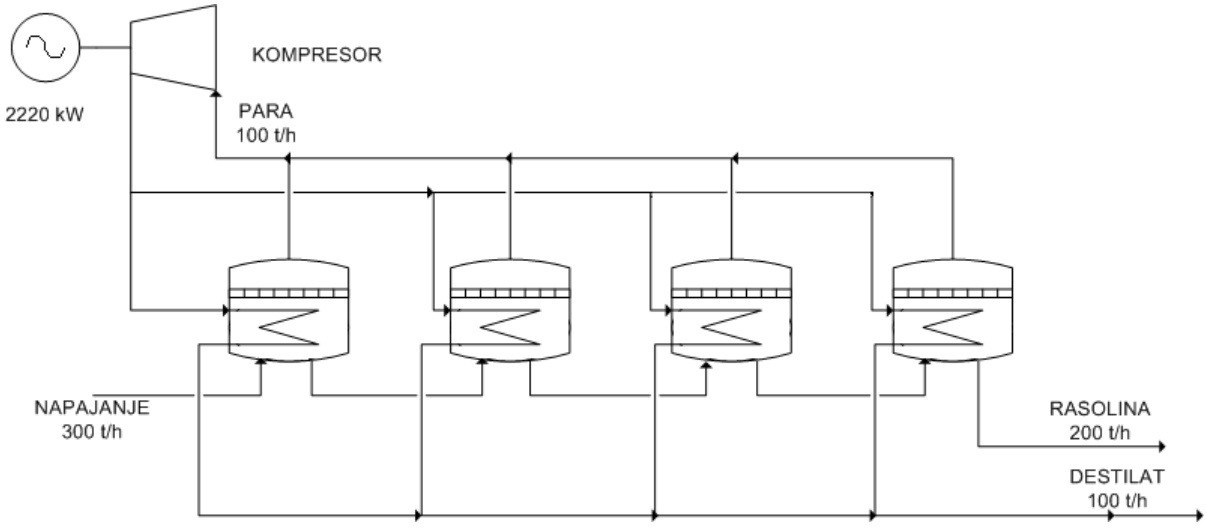
[25] Eksploatacijski se troškovi se mogu promatrati kroz različite vremenske raspone, ali je uobičajena veličina jedna godina.
[26] U pravilu je to slanost, ali može biti i prisustvo otopljenih plinova ili drugo.

postrojenja prikazanog pojednostavljeno na slici 2.19 i postrojenja za proizvodnju toplinske i električne energije uz primjenu kompresora pare.




**Slika 2.19.** Četverostupanjski destilacijski uređaj

U ovom se slučaju za proizvodnju 100 *t/h* destilata troši 16.444 kW toplinske energije. Postrojenje prikazano na slici 2.20 umjesto toplinske energije dovedene parom u stupnju najvišeg tlaka koristi rekompresiju proizvedene pare[27] koja se koristi kao ogrjevni medij svih stupnjeva.




**Slika 2.20.** Četverostupanjski destilacijski uređaj s rekompresijom pare

Kompresor treba teoretsku snagu od 2220 kW. Ukoliko se pretpostavi jednak utrošak energije za rad pumpi rasoline i destilata, razlika ovih dvaju postrojenja jest u cijeni toplinske energije potrebne u prvom slučaju i električne u drugom. Zanemare li se slučajevi gdje se toplinska energija dobije kao ostatak nekog drugog industrijskog procesa za njezinu je proizvodnju potrebno gorivo. S druge strane, električna se energija kod stacionarnih postrojenja dominantno proizvodi

[27] Umjesto kompresora pogonjenog elektromotorom može se koristiti i mlazna pumpa ili termokompresija, no njihov je eksergetski učinak manji pa se koriste samo u postrojenjima manjih kapaciteta kod kojih značaj jednostavnosti izvedbe premašuje nedostatak manjeg stupnja iskoristivosti [65].

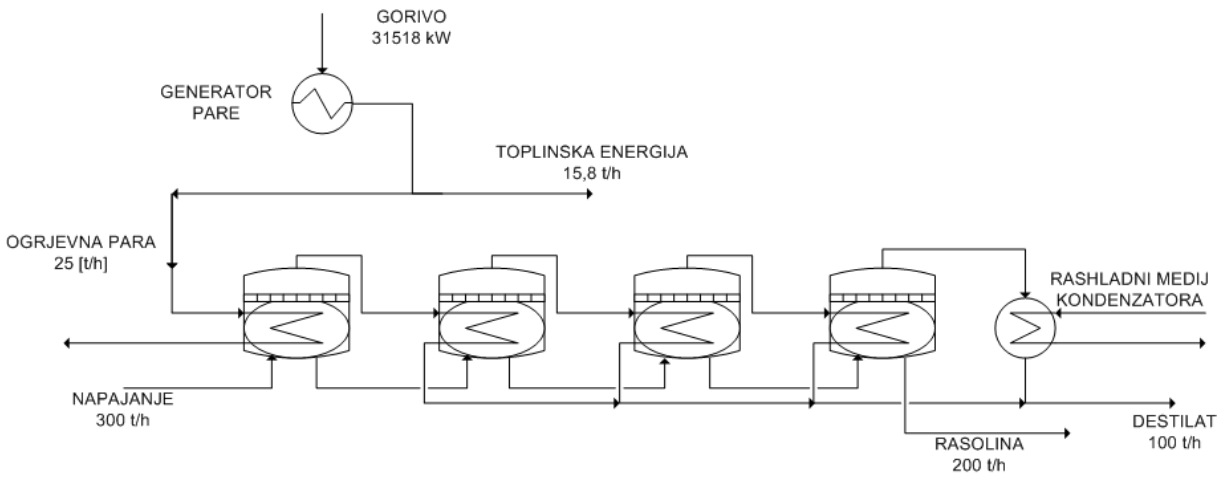
u hidroelektranama i nuklearnim elektranama, a sve više u vjetroelektranama te solarnim elektranama.

Promjene cijena energenata nezahvalno je predviđati, pogotovo za duže razdoblje, no promjene u proteklim godinama mogu ipak dati naznaku odnosa cijena u budućnosti. Cijene električne energije nisu znatno rasle za razliku od cijena fosilnih goriva. Iz takvog odnosa vidi se prednost rješenja s rekompresijom pare. Treba ipak ponoviti kako se ovo razmišljanje treba preispitati ukoliko se koristi otpadna toplina.

Na ukupnu cijenu proizvedene vode utječu i drugi troškovi – investicijski i eksploatacijski. Isti su se, međutim, tijekom niza godina malo ili nikako mijenjali pa je u cijeni vode sve veći udio preuzimala cijena energije. Uz niske je cijene energije nepotrebno razmišljati o bilo kakvim odstupanjima od postrojenja na slici 2.19, ali uređaj na slici 2.20 postaje interesantan kada cijene rastu. Dodatne je uštede moguće postići kogeneracijskim postrojenjima.

Usporedbom postrojenja koje proizvodi toplinsku energiju za destilaciju te za druge potrebe kakvo prikazuje slika 2.21 s kogeneracijskim postrojenjima prikazanim na slikama koje slijede, može se pokazati poboljšanje postignuto smanjenjem troškova zbog smanjenog utroška goriva.

Potrebna toplinska energija, 15,8 t/h niskotlačne pare potrebne za grijanje te dodatnih 25 t/h ogrjevne pare destilacijskog uređaja prikazanog na slici 2.19, troši goriva za proizvodnju 31.518 kW energije. Postrojenja na sljedećim slikama koriste rekompresiju pare, ali uz istu potrošnju toplinske energije (15,8 t/h) za druge potrebe.

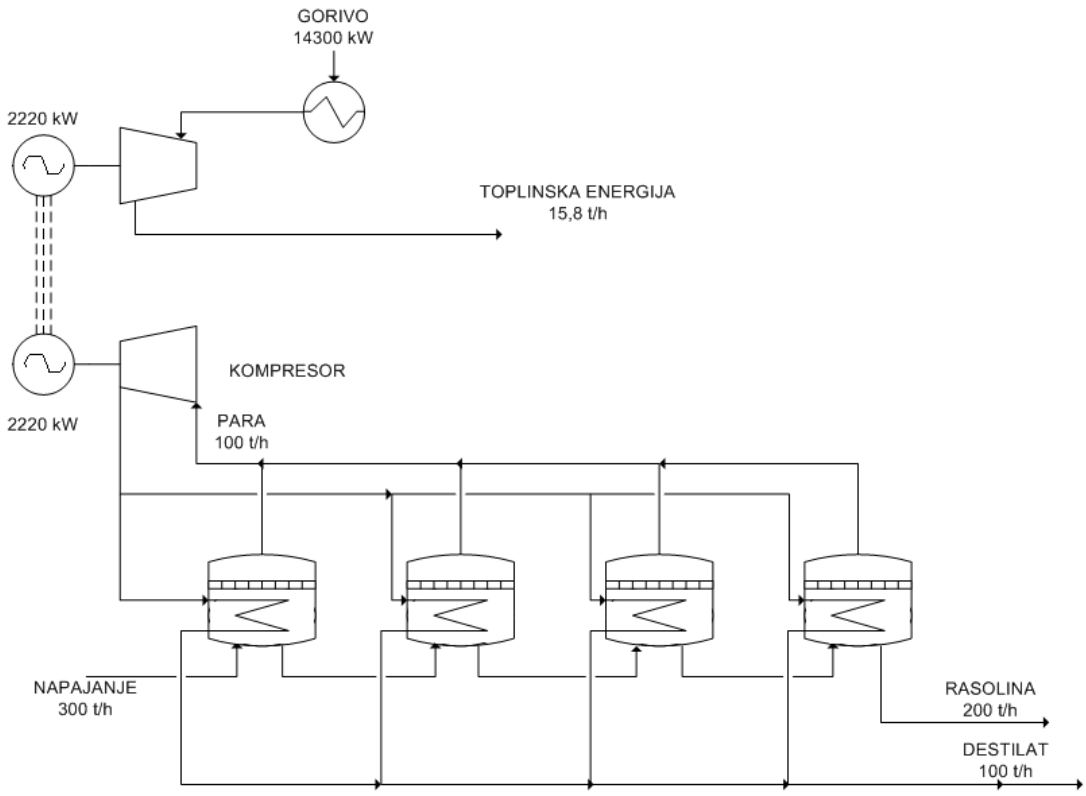



**Slika 2.21.** Osnovna izvedba postrojenja koje proizvodi paru za destilaciju te druge potrebe

Postrojenje na slici 2.22 osim toplinske energije proizvodi i električnu energiju, potrebnu za rad kompresora. Troši 14.300 kW energije u obliku fosilnog goriva

za proizvodnju 15,8 t/h pare stanja 470°C i tlaka 6 MPa. Turbina je protutlačna te se ispušna para koristi za grijanje.

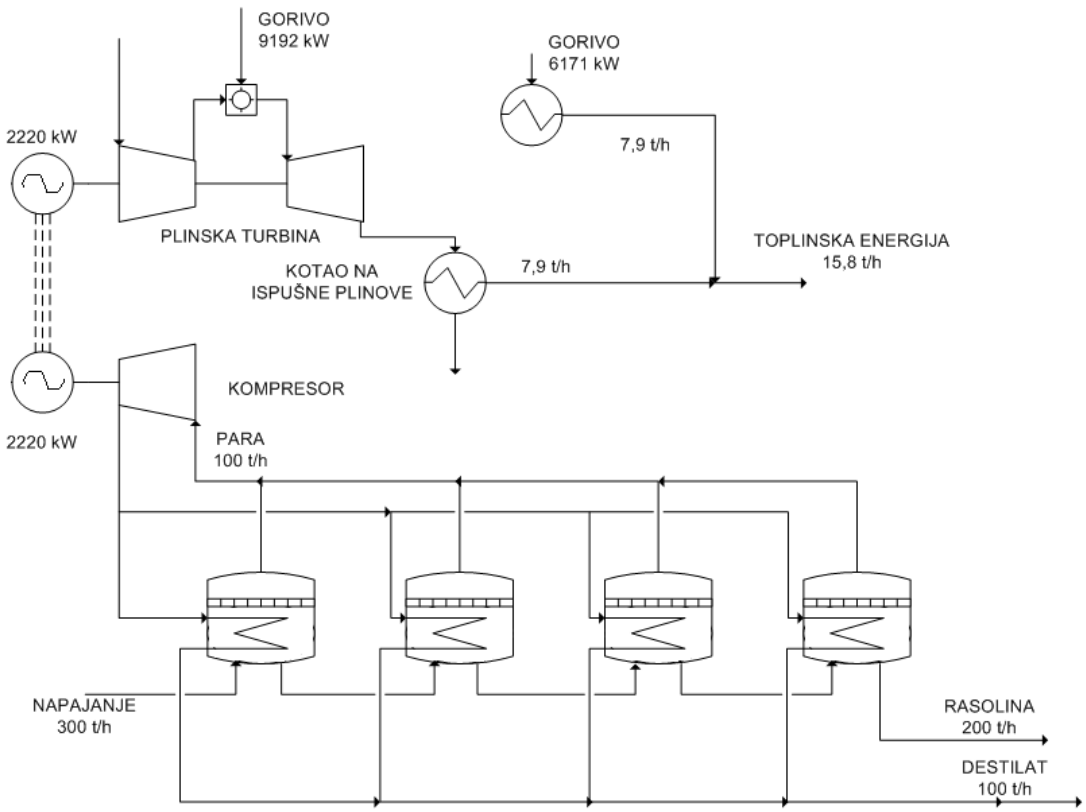
Teoretska snaga turbine odgovara kompresoru kao i na slici 2.20. Ogrjevni učin potreban za rad destilacijskog uređaja, umjesto s 25 t/h pare, postiže se rekompresijom pare samog destilacijskog uređaja.




**Slika 2.22.** Kogeneracijsko postrojenje s parnom turbinom i četverostupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare

Postrojenje na slici 2.23 troši gorivo za rad loženog generatora pare te plinske turbine. Od ukupnih osnovnih potreba za toplinskom energijom pola zadovoljava loženi generator pare, a pola generator pare koji koristi ispušne plinove plinske turbine.

Za razliku od prethodnog rješenja koje troši goriva za 14.300 kW energije, ovdje se troši goriva za proizvodnju 15.363 kW energije.

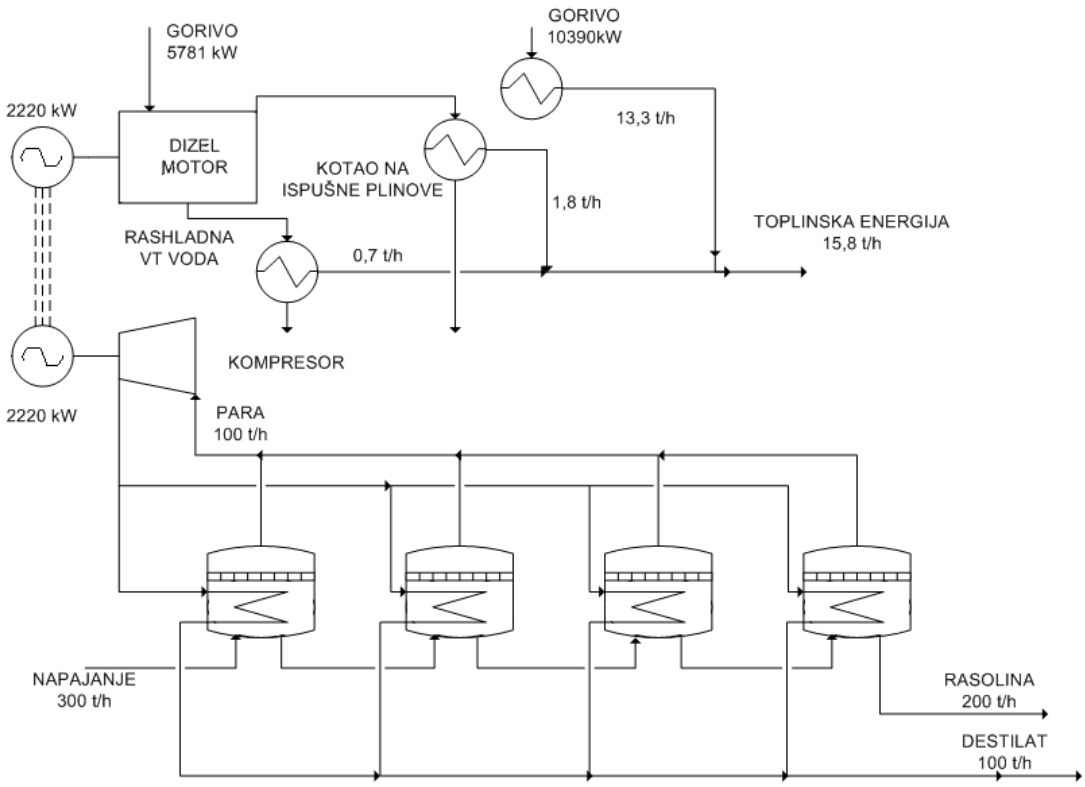



**Slika 2.23.** Kogeneracijsko postrojenje s plinskom turbinom i četverostupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare

Na slici 2.24 prikazano je kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom. Destilacijsko postrojenje s rekompresijom pare je identično prethodnim rješenjima, ali se potreban toplinski učin postiže loženim generatorom pare (13,3 t/h), generatorom pare koji iskorištava energiju ispušnih plinova (1,8 t/h) te niskotlačnim generatorom pare koji iskorištava energiju sadržanu u rashladnoj vodi motora (0,8 t/h). U ovom se slučaju utroši goriva u dizelskom motoru i loženom generatoru pare za 16.171 kW.

Sva četiri prikazana sustava opslužuju četverostupanjsko destilacijsko postrojenje koje proizvodi 100 t/h destilata, no utrošak goriva kogeneracijskih postrojenja je upola manji u usporedbi s postrojenjem koje proizvodi samo paru za grijanje.

Naravno, ovdje se radi o vrlo pojednostavljenim sustavima i prikazanim troškovima. Navodi se samo potrebna količina energije koju postrojenja dobiju fosilnim gorivom, no ne uspoređuju se različite karakteristike pa, u skladu s time, i cijene goriva. Loženi generator pare i dizelski motor troše teško gorivo, dok plinske turbine troše, u pravilu, kvalitetnije i skuplje gorivo. Nadalje, za ispravan rad dizelskog motora takvo je gorivo potrebno znatnije zagrijavati zbog zahtijevanog kinematičkog viskoziteta, nego što je to potrebno kod generatora pare.

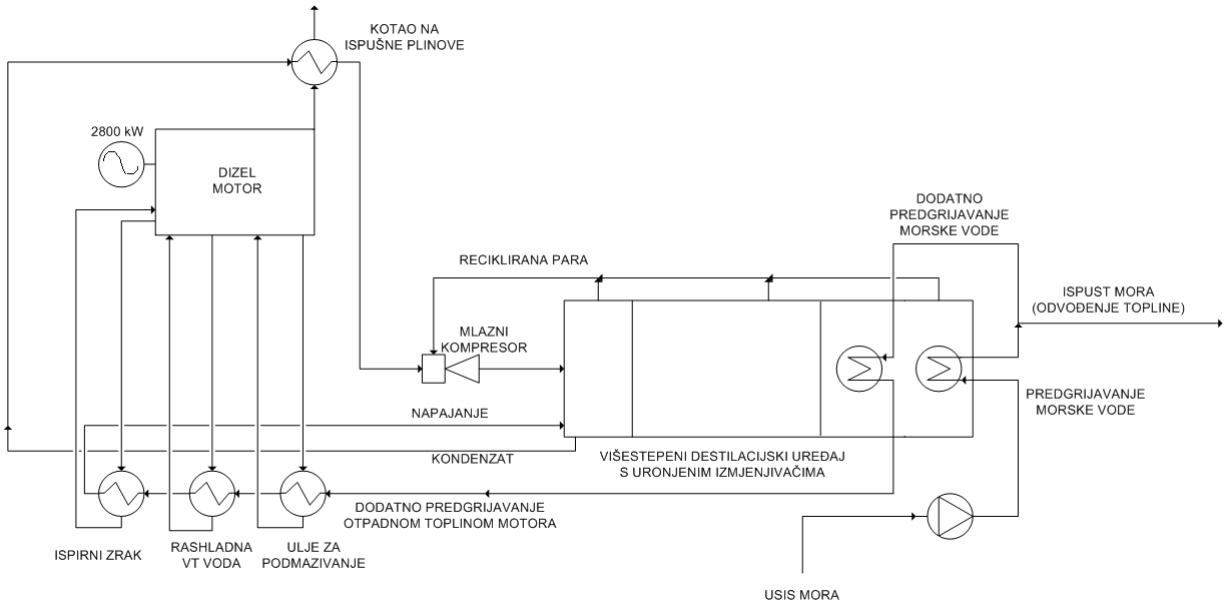



**Slika 2.24.** Kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom i četverostupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare

Kogeneracijsko postrojenje [80] na slici 2.25 također se sastoji od dizel-generatorskog i destilacijskog dijela. Ovdje se umjesto mehaničkog kompresora koristi mlazni, kojemu radni fluid – paru daje generator pare na ispušne plinove dizelskog motora. Dodatno poboljšanje toplinske iskoristivosti postiže se predgrijavanjem napojne vode u izmjenjivačima topline koji iskorištavaju niskotemperaturnu toplinu dizelskog procesa, tj. toplinu sadržanu u ulju za podmazivanje, rashladnoj vodi te ispirnom zraku.

Sustav s parnom turbinom i generatorom pare fleksibilniji je u odabiru tipa goriva, ali postrojenje s plinskom turbinom te posebno dizelskim motorom može po potrebi proizvoditi i više električne energije nego što je to navedeno na slikama. Uz to, dizelski motor radi s daleko većim toplinskim stupnjem korisnosti.

Zanemarujući spomenute razlike te uz jednaku cijenu goriva, amortizaciju i broj radnih sati prikazana kogeneracijska postrojenja mogu se isplatiti kroz razdoblje u trajanju od nekoliko godina [65]. Razdoblje isplativosti u svakom će slučaju ovisiti o promjenama cijena energenata i u svezi s recentnim događajima na svjetskim tržištima sirove nafte, teško ga je preciznije odrediti.



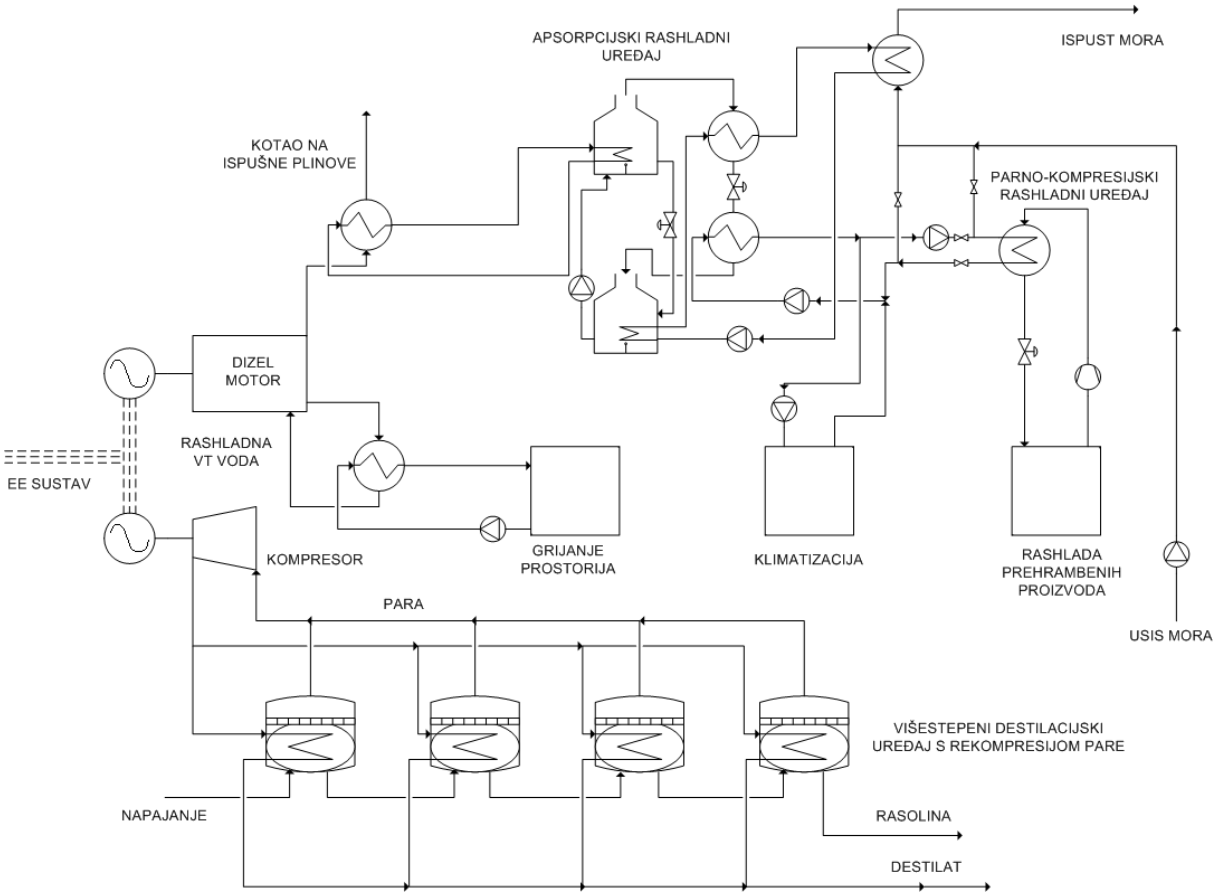

**Slika 2.25.** Kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom i višestupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare koje koristi i niskotemperaturnu otpadnu toplinu dizelskog procesa

Kako bi se umanjile nejednolikosti opterećenja tijekom kalendarske godine predlaže se rješenje prikazano na slici 2.26 [79]. Izvor električne energije također je dizelski motor. Ista se troši za rad mehaničkog kompresora te pomoćnih uređaja – pumpi i kompresora. Destilacijski uređaj s rekompresijom pare najbolje odgovara potrebnom kapacitetu i raspoloživoj energiji.

Otpadna toplina sadržana u rashladnoj vodi motora iskorištava se za zagrijavanje stambenih prostora. Toplina ispušnih plinova koristi se za proizvodnju pare koja se dalje koristi kao ogrjevni fluid apsorpcijskog rashladnog uređaja. Postignutim rashladnim učinom hlade se klima jedinice te ukapljuje radni fluid parno-kompresijskog rashladnog uređaja očuvanja hrane.

Postrojenje namijenjeno proizvodnji destilirane vode, koje se sastoji od plinske turbine, generatora pare koji koristi energiju ispušnih plinova te parne turbine, prikazano je na slici 2.27.

Višestupanjski adijabatski uređaj odgovara uređaju prikazanom na slici 2.9 te je prikazan simbolički. Otpadna energija ispušnih plinova plinske turbine iskorištava se u generatoru pare, a ista pokreće višestupanjsku parnu turbinu. Električna energija koju proizvode plinska i parna turbina troši se djelomično za rad pomoćnih uređaja (pumpi), a djelomično za rad pumpi uređaja koji proizvodi vodu na principu reverzibilne osmoze. Ispušna para stupnja višeg tlaka koristi se kao ogrjevni medij vanjskog grijača destilacijskog postrojenja. Energetska učinkovitost i kapacitet ovise o vanjskim uvjetima, tj. temperaturi morske vode.

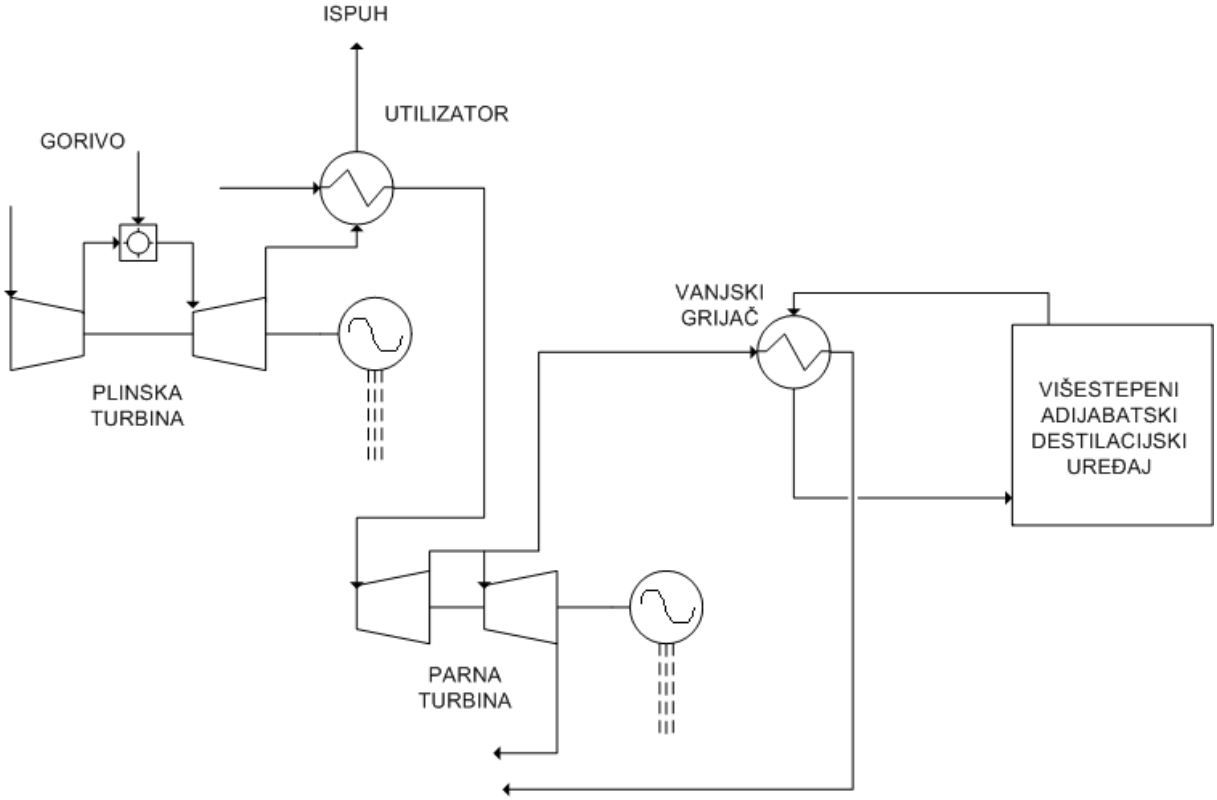



**Slika 2.26.** Kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom i višestupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare i rashladnim uređajima za klimatizaciju te čuvanje hrane

Ovakva se postrojenja koriste u arapskim zemljama [81]. Za ISO vanjske uvjete (15 °C) uređaji koji rade na principu reverzibilne osmoze troše oko 7,5 kWh/m$^3$ proizvedene vode, dok destilacijski uređaji troše oko 4,5 kWh/m$^3$ za rad pumpi te uz utrošak 1 kg ogrjevne pare manometarskog tlaka od 0,2 do 0,3 MPa proizvode od 6 do 8 kg vode.

Umjesto otpadne topline sadržane u ispušnim plinovima i rashladnoj vodi dizelskog motora ili sadržane u ispušnim plinovima plinske turbine, izvor topline može biti i drugo toplinsko postrojenje, ali su osnove iste. Kod nuklearnih elektrana s PWR[28] reaktorom primarni medij hladi reaktor i preuzetu toplinu predaje sekundarnom fluidu – vodi, koja isparava. Po izlasku iz parne turbine para se ukapljuje u kondenzatoru. Oduzimanje pare prije zadnjeg stupnja omogućuje upotrebu iste kao ogrjevnog fluida za destilacijski proces [84].

[28] Engl. Pressurized Water Reactor, ujedno i najčešća izvedba na plovilima.




**Slika 2.27.** Kogeneracijsko postrojenje s plinskom i parnom turbinom te višestupanjskim adijabatskim destilacijskim uređajem

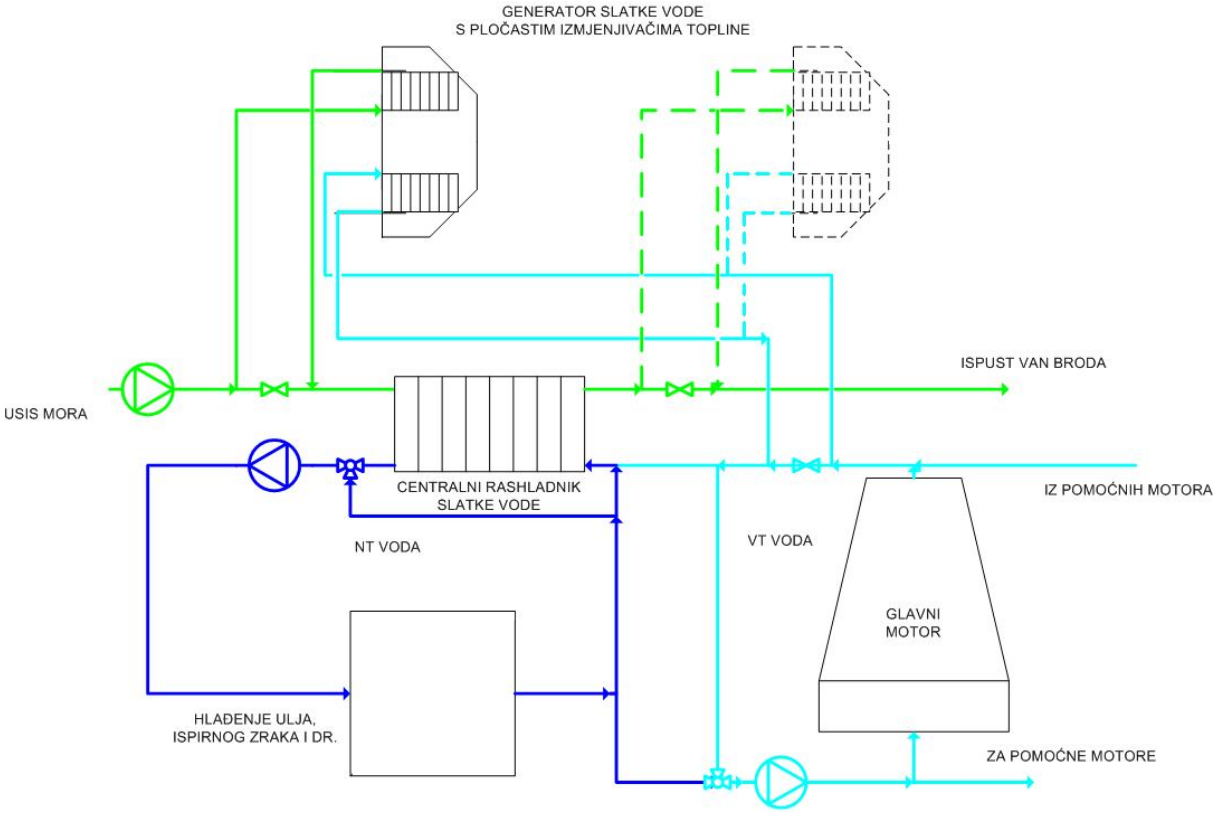
Cijena proizvedene vode ovisi o cijeni potrebne energije te obliku energije. U budućnosti vjerojatno jeftinija zbog smanjenja rezervi fosilnih goriva, a sada barem ekološki prihvatljivija jest energija iz obnovljivih izvora (vjetar, plima i oseka, valovi, Sunčeva energija). Valovi su u priobalnim područjima najčešći i najkonzistentniji. Ukoliko se koriste za proizvodnju električne energije koja se dalje iskoristi za neku vrstu desalinizacijskog uređaja, povećava se iskoristivost cijelog procesa. Umjesto proizvodnje električne energije valovi se mogu iskoristiti za direktan pogon destilacijskog postrojenja s rekompresijom pare [82]. Prethodna dva rješenja neće se u radu više obrađivati jer imaju iste termodinamičke osnove s već spomenutim izvedbama.

Primjenu destilacijskog uređaja na brodu u sklopu većeg kogeneracijskog postrojenja, kao što to prikazuju neke od prethodnih slika, je potrebno posebno razmotriti sa stanovišta sigurnosti cijelog pogona, prostora za ugradnju te odnosa potrebnih radnih sati i dostupnog osoblja za održavanje. Ipak, i kod vrlo čestih, gotovo standardnih izvedbi, ima prostora za poboljšanja.

Na sljedećem primjeru, s jednostavnim jednostupanjskim uređajem i uronjenim ogrjevnim elementom, pokazuju se moguće uštede [91]. Primjer se odnosi na brod s dizelmotornom propulzijom te je ogrjevni medij visokotemperaturna rashladna voda motora. Razmišljanja o upotrebi pare kao ogrjevnog sredstva mogu se odbaciti, jer se na ovaj način iskorištava otpadna toplina motora te time

povećava ukupni stupanj iskoristivosti pogona. Može se, međutim, razmišljati o rashladnom mediju kondenzatora.

Isti se može ugraditi u sustav morske vode i to prije centralnih rashladnika slatke vode ili nakon centralnih rashladnika. Smještaj prije centralnih rashladnika prikazan je punom linijom, a nakon centralnih rashladnika isprekidanom linijom, na slici 2.28.

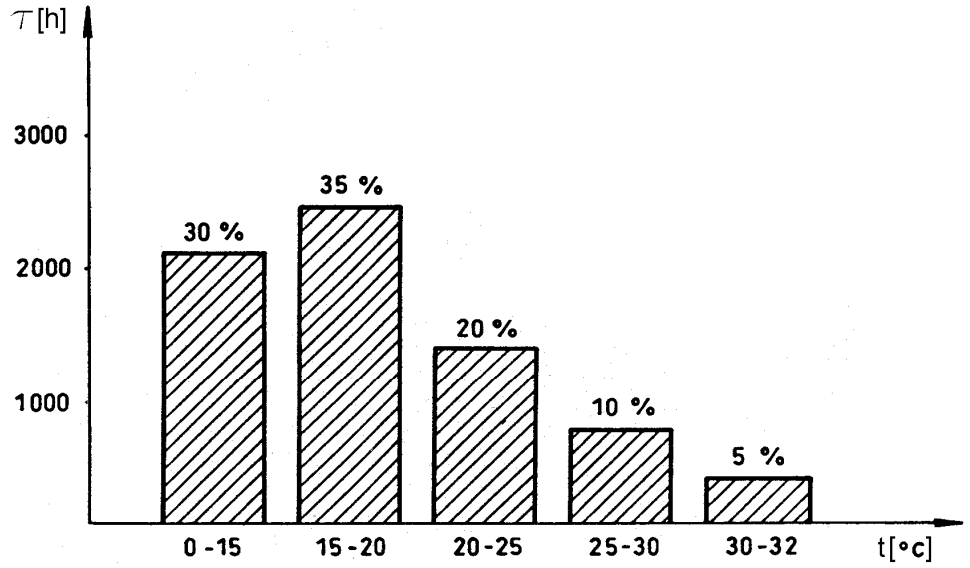



**Slika 2.28.** Kondenzator destilacijskog uređaja hlađen morskom vodom – prije ili poslije centralnih rashladnika slatke vode

Iako se ovakvo rješenje može činiti optimalno, zbog niže temperature morske vode u odnosu na druga rashladna sredstva, lako je pokazati bitan nedostatak. Ukoliko se u sustavu morske vode nalazi samo centralni rashladnik slatke vode mogu se ostvariti znatne uštede u energetskim potrebama broda [110]. Propisima klasifikacijskih društava određeno je da se nominalna opterećenja porivnih strojeva trebaju ostvarivati pri tropskim uvjetima, tj. temperaturi morske vode od 32°C. Ukoliko se to usporedi s vremenom koje brod zaista provede u morskoj vodi takve temperature, lako je zaključiti kako se primjenom pumpi s mogućnošću regulacije kapaciteta može otvariti ušteda u pogonskim troškovima.

Na slici 2.29 prikazana je statistička raspodjela radnih sati svjetske flote provedenih u morskoj vodi određene temperature. Većinu vremena brodovi

provedu u morskoj vodi temperature od 15 do 20 °C, a ukupno preko 90% vremena u morskoj vodi temperature niže od 20 °C.




**Slika 2.29.** Odnos radnih sati svjetske flote i temperature okolišne morske vode [110]

Na ordinati su radni sati u jednoj kalendarskoj godini i to ukupna vrijednost koja se uobičajeno uzima kao referentna kod procjene amortizacijskih troškova prema izrazu:

$$\tau_{ukupno} = \tau_{0-15} + \tau_{15-20} + \tau_{20-25} + \tau_{25-30} + \tau_{30-32} \ , \tag{2.4.1}$$

što prema dijagramu iznosi

$$\tau_{ukupno} = 2100 + 2450 + 1400 + 700 + 250 = 7000[h] \ . \tag{2.4.2}$$

Količina topline koju morska voda preuzima od slatke rashladne vode dana je izrazom

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \ , \tag{2.4.3}$$

pri čemu je $m$ [kg/s] maseni protok vode kroz izmjenjivač topline, $c$ [J/kgK] specifični toplinski kapacitet morske vode i $\Delta t$ [K ili °C] temperaturna razlika morske vode. Specifični toplinski kapacitet se malo mijenja s promjenom režima rada rashladnog sustava te će potreban maseni protok ovisiti o temperaturnoj razlici. Ona se odabire u rasponu od 10 do 20 ℃ u odnosu na ulaznu temperaturu od definiranih 32 ℃.

Odnos masenih protoka morske vode za najčešću[29] i projektnu temperaturu, uz pretpostavku konstantnog opterećenja i specifičnog toplinskog kapaciteta morske vode te dopuštenog povećanja temperature morske vode kroz rashladnik dana je izrazom

$$\frac{m_{17,5}}{m_{32}} = \frac{\Delta t}{\Delta t_{17,5}} \ , \tag{2.4.4}$$

pri čemu je temperaturna razlika za ulaznu temperaturu od 17,5 ℃ dana izrazom

$$\Delta t_{17,5} = \Delta t + (32 - 17{,}5) \ . \tag{2.4.3}$$

Odnos masenih protoka prema izrazu 2.4.4 za temperaturne razlike od 10, 15 i 20 ℃ dan je u tablici 2.2. što ukazuje na mogućnost uštede energije pumpanja.

**Tablica 2.2.** Odnos masenih protoka u ovisnosti o temperaturnim razlikama

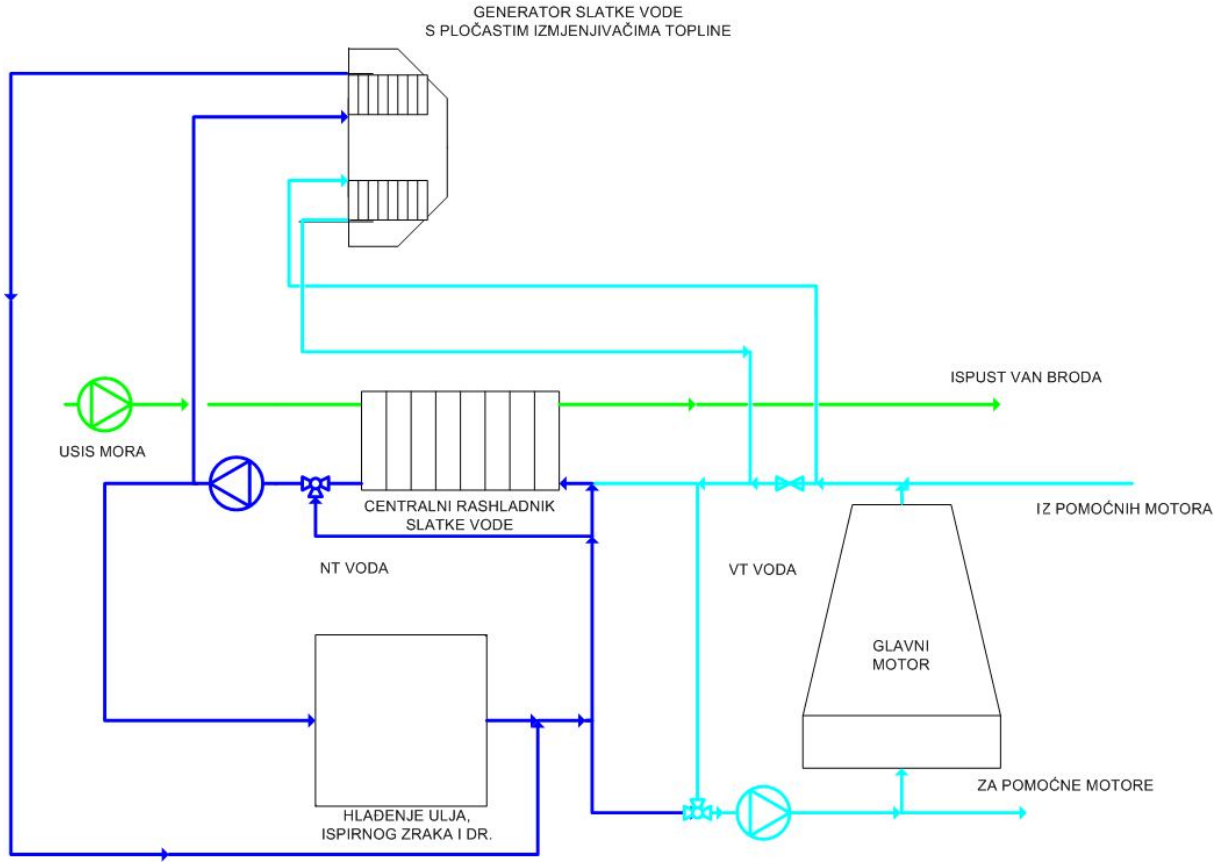
| | $\Delta t$ =10 ℃ | $\Delta t$ =15 ℃ | $\Delta t$ =20 ℃ |
|---|---|---|---|
| $\frac{m_{17,5}}{m_{32}}$ | 0,408163 | 0,508475 | 0,57971 |

Odnos potrebnog i nominalnog protoka morske vode za tri navedena slučaja temperaturne razlike je približno 40%, 50% i 60%, iz čega je u ovisnosti o karakteristikama pumpi i njihovih pogonskih strojeva moguće odrediti ostvarene uštede. Kada bi u sustavu morske vode bili ugrađeni dodatni izmjenjivači topline, kako je to predloženo slikom 2.28, prethodna razmatranja bi bila pogrešna. Uslijed pada tlaka kroz dodatni izmjenjivač topline morale bi biti ugrađene pumpe veće teoretske snage. Regulacija kapaciteta pumpe ne bi se mogla izvoditi prema navedenim odnosima zbog potrebnog protoka morske

[29] Uzeta je srednja vrijednost raspona od 15 do 20 ℃.

vode kroz kondenzator destilacijskog uređaja. Stoga se rješenje prikazano slikom 2.28 može odbaciti kao energetski neefikasno.

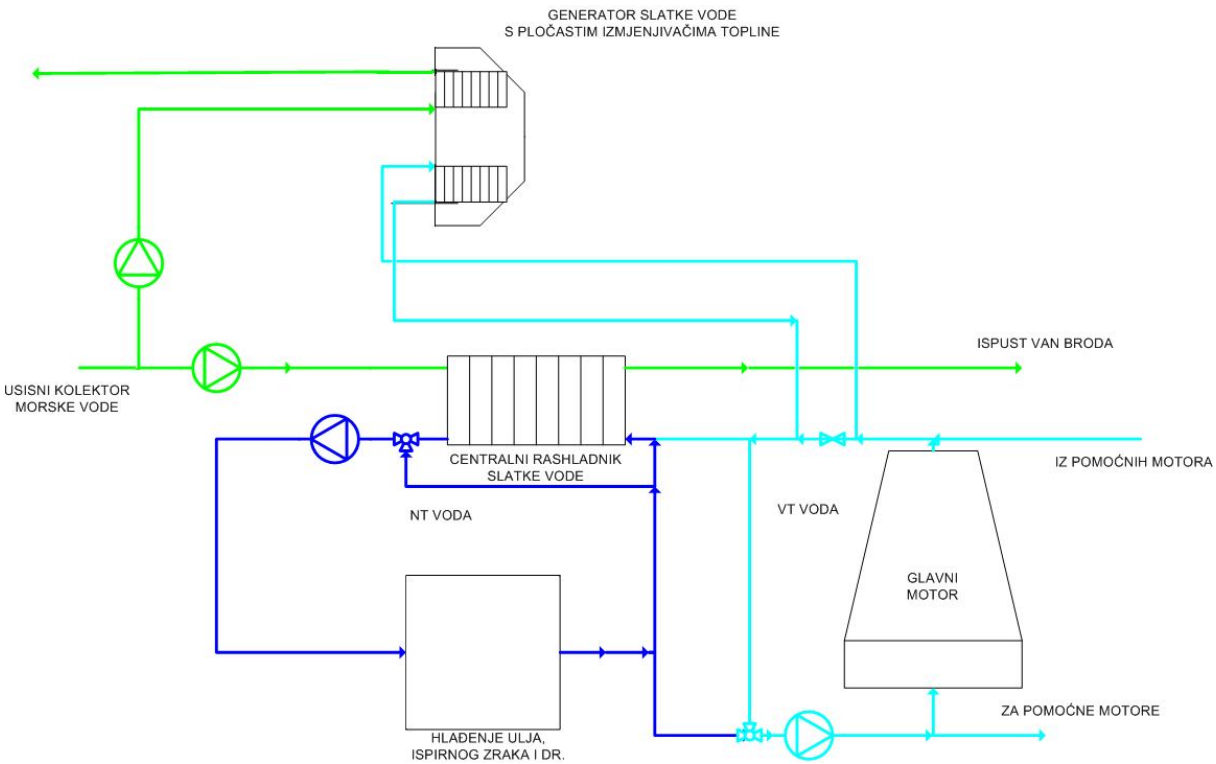
Rashladni medij kondenzatora destilacijskog uređaja može biti i niskotemperaturna slatka rashladna voda, kako je to prikazano na slici 2.30. Kondenzator destilacijskog uređaja samo je još jedan od više, paralelno spojenih izmjenjivača topline, kojima je niskotemperaturna slatka voda rashladni medij.




**Slika 2.30.** Kondenzator destilacijskog uređaja hlađen niskotemperaturnom slatkom vodom

Paralelno spojeni kondenzator destilacijskog uređaja zahtijeva pumpu slatke vode većeg kapaciteta, a zbog većeg protoka slatke vode mora se predvidjeti i pumpa morske vode većeg kapaciteta te veći centralni rashladnici slatke vode. Povećani troškovi cjevovoda zbog većeg promjera mogu se zamijeniti većim troškovima zbog veće teoretske snage pumpe koja tlači kroz isti cjevovod. Ovakvo je rješenje ekonomski neisplativo, jer se troši više energije za pogon pumpe morske vode koja, zbog većeg centralnog rashladnika, mora uvijek raditi punim kapacitetom kako bi se održavao potrebni pad tlaka kroz sustav.

Treće je rješenje opet s morskom vodom, ali i zasebnom pumpom, prikazano na slici 2.31. Shema je pojednostavljena pa nije prikazano kako se morska voda iz kondenzatora vodi u isparivač i djelomično koristi kao pogonski fluid ejektora.

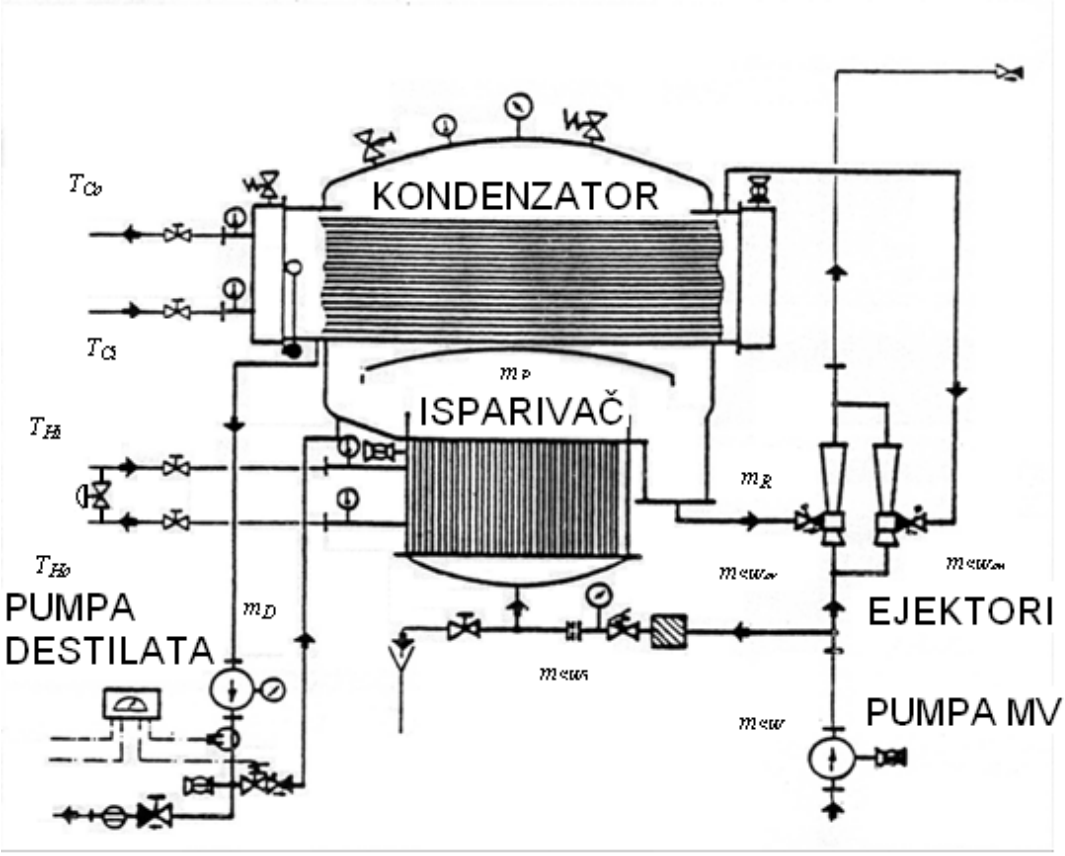



**Slika 2.31.** Shematski prikaz destilacijskog uređaja s kondenzatorom hlađenim morskom vodom koju dobavlja zasebna pumpa

Pumpa morske vode kondenzatora može se isključiti kada destilacijski uređaj nije u pogonu, pa nema dodatnog utroška energije.

# 3. MATEMATIČKI MODEL VAKUUMSKOG GENERATORA SLATKE VODE

Matematičkim modelom, koji će se razviti u ovome radu, nastojat će se prikazati termodinamičke i hidrodinamičke procese u brodskom jednostupanjskom vakuumskom generatoru slatke vode. Slatka se voda proizvodi destilacijom morske vode, koja se zagrijava do točke isparavanja za tlak u uređaju. Uređaj, zbog relativno niske temperature ogrjevnog medija, koja se najčešće kreće u rasponu od 70 do 80ºC, radi pri sniženom tlaku. Brodski jednostupanjski vakuumski generator slatke vode prikazan je shematski na slici 3.1.




**Slika 3.1.** Shema jednostupanjskog vakuumskog generatora slatke vode

Uređaj se sastoji od sljedećih osnovnih dijelova: isparivača, odjeljivača ili separatora kapljica te kondenzatora. Iako nije neophodno, morsku vodu $m_{SW}$ temperature $T_{SW}$ najčešće dobavlja zasebna centrifugalna pumpa. Ukupni se protok dijeli na dobavnu vodu isparivača $m_{SWi}$ te pogonsku vodu ejektora rasoline $m_{SWer}$ i plinova $m_{SWep}$.

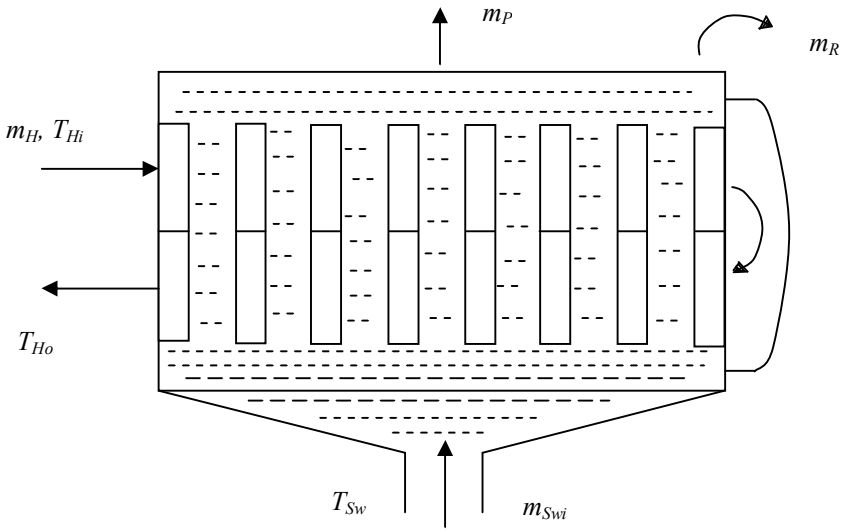
U isparivaču se morska voda grije visokotemperaturnom slatkom rashladnom vodom glavnog brodskog motora ($m_{VT}$), koja se zbog toga ohladi s $T_{Hi}$ na $T_{Ho}$. Dio u isparivač uvedene morske vode isparava ($m_P$), a ostatak, povećane slanosti (rasolina), odvodi ejektor ($m_R$). Drugi ejektor

usisava plinove ($m_{Pl}$) iz prostora kondenzacije. Para ogiba oko odjeljivača kapljica te struji u kondenzator, u kojem se hladi morskom vodom. Rashladnoj morskoj vodi kondenzatora ($m_C$) temperatura se zbog toga poveća s $T_{Ci}$ na $T_{Co}$. Proizvedeni destilat $m_D$ temperature $T_D$ pumpa destilata odvodi u skladišne tankove slatke vode.

Matematičkim se modelom mora, u usporedbi sa stvarnim uređajem, uvesti niz pojednostavljenja. Usporedbom rezultata dobivenih modelom i izmjerenih veličina, tj. eksperimentalnih rezultata objavljenih u literaturi, ustanovit će se točnost modela. Za ovaj model usvojit će se sljedeće pretpostavke:
- zanemarit će se utjecaj otopljenih soli, osim na gustoću i temperaturu isparavanja;
- u promatranom vremenu i prostoru analizirani podsustavi uređaja u termodinamičkoj su ravnoteži.
Pored ovih osnovnih pretpostavki za pojedine podsustave može se pojaviti potreba za dodatnim pojednostavljenjima.

## 3.1. Matematički model isparivača

Isparivač je cijevni izmjenjivač topline, shematski prikazan na slici 3.2. Morska voda, okolne temperature ili predgrijana, dolazi s donje strane uređaja i struji kroz okomite cijevi. Ogrjevni medij, visokotemperaturna slatka rashladna voda glavnog motora, struji dvoprolazno (kod nekih rješenja i višeprolazno), uglavnom okomito na cijevi.




**Slika 3.2.** Shematski prikaz isparivača

Zbog povećanja temperature i pada tlaka morske vode na nekoj visini u cijevi nastaje prvi mjehur pare. Mjehuri pare struje većom brzinom te se udio pare u presjeku cijevi s visinom povećava.

### 3.1.1. Jednadžbe očuvanja za isparivač

U uređaju dolazi do procesa prijenosa mase, količine gibanja i energije. Isti se opisuju skupom jednadžbi očuvanja za sve sudionike:
1. jednadžba očuvanja ukupne mase (jednadžba kontinuiteta)
2. jednadžba očuvanja količine gibanja
3. jednadžba očuvanja energije
4. jednadžba očuvanja mase sudionika.

Postavljajući diferencijalni kontrolni volumen slijedi jednadžba očuvanja ukupne mase u obliku

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \ , \tag{3.1.1}$$

što se uvođenjem Hamiltonovog operatora može kompaktnije napisati kao

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathrm{V}) = 0 \, . \tag{3.1.2}$$

U gornjoj jednadžbi prvi član predstavlja promjenu gustoće po jedinici vremena, a drugi, konvekcijski član, daje razliku mase fluida koja strujanjem izlazi, odnosno ulazi u kontrolni volumen.

Jednadžba očuvanja količine gibanja glasi

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \mathbf{V})\mathbf{V} - \nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \, , \tag{3.1.3}$$

gdje član s lijeve strane jednadžbe predstavlja ukupnu promjenu količine gibanja u jedinici vremena, a s desne strane redom promjenu količine gibanja uslijed konvekcije, sile tlaka na kontrolni element, viskoznih sila te gravitacijske sile u jediničnom kontrolnom volumenu.

Jednadžba očuvanja energije može se napisati u obliku

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\left(u+\frac{\mathbf{V}^2}{2}\right)=-\nabla\rho\mathbf{V}\left(u+\frac{\mathbf{V}^2}{2}\right)-\nabla\mathbf{q}''+\rho(\mathbf{V}\mathbf{g})-\nabla p\mathbf{V}+\nabla(\boldsymbol{\tau}\,\mathbf{V})+q''', \tag{3.1.4}$$

gdje član s lijeve strane jednadžbe predstavlja promjenu unutarnje i kinetičke energije, a s desne strane redom, promjenu energije uslijed konvekcije, provođenjem u kontrolni volumen, promjenu potencijalne energije uslijed djelovanja gravitacije, promjenu energije djelovanjem tlaka na element, promjenu uslijed viskoznih sila te konačno, promjenu energije zbog prisutnih izvora topline unutar kontrolnog volumena.

S ciljem pojednostavljenja problema te potrebnog vremena proračuna, gornje se jednadžbe, koje opisuju općeniti slučaj strujanja fluida uz izmjenu topline, pojednostavljuju uvođenjem sljedećih aproksimacija:

1. Strujanje morske vode i pare u cijevima te ogrjevnog fluida (visokotemperaturne slatke rashladne vode) oko cijevi, laminarno je i u smjeru jedne koordinatne osi. Brzina je u tom slučaju skalarna veličina, a zavisne veličine su tlak, gustoća i unutarnja energija. Usvaja se jednodimenzionalni model strujanja.
2. Članovi u izrazima za očuvanje energije i količine gibanja povezani s viskozitetom fluida, odnosno viskoznom disipacijom, zbog malih se gradijenata brzina zanemaruju.
3. Utjecaj tlaka u jednadžbama očuvanja količine gibanja i energije se zanemaruje.
4. Utjecaj potencijalne (sila gravitacije) i kinetičke energije, također se zanemaruje. Utjecaj gravitacije na povučene kapljice rasoline usvojit će se empirijskim jednadžbama za efikasnost odjeljivača kapljica.
5. Para i morska voda (rasolina) u promatranom su presjeku cijevi u toplinskoj ravnoteži, istog su tlaka, a svaka faza struji različitom srednjom brzinom. Udio presjeka zauzetog parom i tekućinom definira se „udjelom praznine“ $\varepsilon$.
6. Kod ovakvog tipa strujanja uz izmjenu topline, Pecletov broj (Pe'=RePr) je velik, te se utjecaj provođenja topline u fluidu, u odnosu na utjecaj konvekcije može zanemariti.

Uvedena pojednostavljenja uklanjaju potrebu rješavanja jednadžbe očuvanja količine gibanja, a jednadžbe očuvanja ukupne mase te energije pojednostavljuju se u oblik

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v)=0, \tag{3.1.5}$$

odnosno

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v h)}{\partial x}=\frac{\partial q}{\partial x}. \tag{3.1.6}$$

Jednadžbe 3.1.5 i 3.1.6 treba riješiti za morsku vodu i ogrjevni fluid, odnosno visokotemperaturnu slatku rashladnu vodu glavnog motora, pri čemu član s desne strane jednadžbe 3.1.6 za morsku vodu postaje

$$\frac{\partial q_{Sw}}{\partial x}=\alpha_{Sw}\frac{d_u\pi}{A_{slob}}(T_s-T_{Sw}), \tag{3.1.7}$$

a za ogrjevnu slatku vodu

$$\frac{\partial q_h}{\partial x}=\alpha_h\frac{d_v\pi}{A_{slob}}(T_h-T_s), \tag{3.1.8}$$

gdje je $T_s$ temperatura stijenke cijevi, $T_{Sw}$ temperatura morske vode u isparivaču, $T_h$ temperatura ogrjevne vode, $d_u$ i $d_v$ unutarnji i vanjski promjer cijevi isparivača te $A_{slob}$ slobodna površina poprečnog presjeka kroz koju struji fluid. Za fluid u cijevi vrijedi $A_{slob}=\frac{d_u^2\pi}{4}$, dok je za fluid koji struji oko cijevi za ovaj tip izmjenjivača topline slobodna površina promjenjiva.

Uvođenjem izraza 3.1.7 i 3.1.8 u 3.1.6 dobiju se jednadžbe očuvanja energije za morsku vodu

$$\frac{\partial(\rho_{sr}A_{slob}h_{Sw})}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_{sr}v_{Sw}A_{slob}h_{Sw})}{\partial x}-\alpha_{Sw}d_u\pi(T_s-T_{Sw})=0 \tag{3.1.9}$$

i ogrjevnu slatku vodu

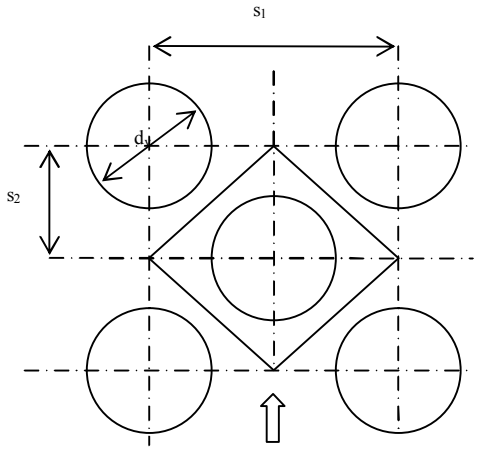
$$\frac{\partial(\rho_h A_{slob}h_h)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_h v_h A_{slob}h_h)}{\partial x}-\alpha_h d_v\pi(T_h-T_s)=0. \tag{3.1.10}$$

Osim toga potrebno je riješiti jednadžbu očuvanja energije za stijenku cijevi. Uz pretpostavku zanemarivog provođenja topline uzduž cijevi otpada drugi član s lijeve strane jednadžbe 3.1.6 te se uz primjenu izraza 3.1.7 i 3.1.8 ista jednadžba može napisati u obliku

$$\rho_s A_s c_s\frac{\partial T_s}{\partial t}=\alpha_h d_v\pi(T_h-T_s)-\alpha_{Sw}d_u\pi(T_s-T_{Sw}), \tag{3.1.11}$$

gdje je $\rho_s$ gustoća materijala cijevi, $A_s = \frac{\left(d_v^2 - d_u^2\right)\pi}{4}$ površina poprečnog presjeka cijevi, a $c_s$ specifični toplinski kapacitet materijala cijevi.

Kod izmjenjivača topline sa šahovski raspoređenim vertikalnim cijevima u snopu geometrija izmjenjivača je kao na slici 3.3. Kontrolni volumen ogrjevne slatke vode predstavlja u sredini naznačeni kvadrat umanjen za površinu poprečnog presjeka cijevi. Budući da se presjek takvog volumena mijenja, mijenjaju se i brzine strujanja. Ovdje će se uzeti srednja brzina strujanja kroz presjek.




**Slika 3.3**. Geometrija vertikalnih, šahovski raspoređenih cijevi i kontrolni volumen ogrjevne slatke vode; strelica pokazuje smjer strujanja ogrjevnog fluida

Veličina tako formiranog kontrolnog volumena visine $h_{isp}$ iznosit će za ogrjevnu vodu

$$V = h_{isp}(s_1 s_2 - d_v^2 \frac{\pi}{4}), \tag{3.1.12}$$

a za morsku vodu, koja struji kroz cijev unutarnjeg promjera $d_u$

$$V = h_{isp} \frac{d_u^2 \pi}{4}. \tag{3.1.13}$$

Jednadžba 3.1.5 za morsku vodu postaje

$$\frac{\partial \rho_{sr}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho_{sr} v\right) = 0, \tag{3.1.14}$$

a za slatku vodu

$$\frac{\partial m_H}{\partial x} = 0 . \tag{3.1.15}$$

U jednadžbama 3.1.9 i 3.1.14 vrijedi da je $\rho_{sr}=\rho_{Sw}$ do mjesta u cijevi na kojem nastaje prvi mjehurić pare, dok je u višim dijelovima cijevi potrebno izračunavati srednju gustoću u ovisnosti o udjelu praznine.

Udio praznine definira se kao omjer presjeka zauzetog parom $A_P$ i ukupnog presjeka cijevi $A$ [99]

$$\varepsilon_v = \frac{A_P}{A} , \tag{3.1.16}$$

gdje je

$$A = A_P + A_L \ , \tag{3.1.17}$$

a $A_L$ površina poprečnog presjeka cijevi ispunjena tekućinom.

Razlika između sadržaja pare pri strujanju definiranog izrazom

$$x = \frac{m_P}{m_P + m_L} \ , \tag{3.1.18}$$

i za slučaj termodinamičke ravnoteže, kada je poznata entalpija za neki tlak $p$, prema izrazu

$$x_{tr} = \frac{h - h'}{h''+h'} \ , \tag{3.1.19}$$

u nastavku se zanemaruje.

Iz izraza 3.1.16, 3.1.17 i 3.1.18, pri čemu je $m_P = A_P v_P \rho_P$, a $m_L = A_L v_L \rho_L$ slijedi veza udjela praznine i sadržaja pare

$$\varepsilon_P = \frac{1}{1 + \frac{v_P \rho_P}{v_L \rho_L}\left(\frac{1-x}{x}\right)} , \tag{3.1.20}$$

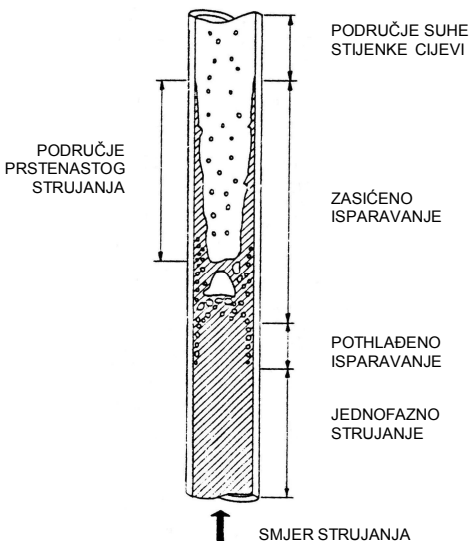
a tada se srednja gustoća dvofazne struje $\rho_{sr}$ u 3.1.9 i 3.1.14 može definirati izrazom

$$\rho_{sr} = \rho_P \varepsilon_P + \rho_L (1 - \varepsilon_P) \ . \tag{3.1.21}$$

### 3.1.2. Koeficijenti prijelaza topline za cijevni isparivač

Pregled izvedbi isparivača, uključujući i koeficijente prijelaza topline, dan je u radovima [15, 99]. Sa strane ogrjevnog fluida dolazi do senzibilne izmjene topline, odnosno do promjene temperature, dok se sa strane morske vode u donjem dijelu cijevi radi također o senzibilnoj, a u gornjem dijelu cijevi o latentnoj izmjeni topline. Potrebno je, dakle, ustanoviti, na kojoj visini u cijevi započinje isparavanje i dvofazno strujanje.

Van Stralen u [22] i [23] obrađuje izmjenu topline i mase te rast mjehura pare u smjesama. Utvrđeno je da na graničnoj plohi mjehura mora postojati izvjesno, malo, pregrijanje okolne tekućine. Također je utvrđeno da je za smjese, zbog veće površinske napetosti, minimalno, nužno pregrijanje, nešto veće nego za čiste tvari. U radu će se odrediti visina u cijevi na kojoj se postiže potrebno pregrijanje, dakle, na kojoj započinje isparavanje. Do te visine u cijevi radi se o senzibilnoj, a u gornjim dijelovima cijevi o latentnoj izmjeni topline. Za to će se područje dvofaznog strujanja koristiti koeficijenti izmjene topline u ovisnosti o režimu strujanja. Režimi dvofaznog strujanja u vertikalnoj cijevi prikazani su na slici 3.4.




**Slika 3.4.** Režimi strujanja u vertikalnoj cijevi

Proces destilacije trebao bi se voditi na način kojim se izbjegava prerani početak isparavanja. Time se izbjegava pojava područja suhe stijenke cijevi u njenom najvišem dijelu.

**Koeficijent prijelaza topline pri prisilnom jednofaznom strujanju fluida kroz cijev**

Za laminarno strujanje razvijenog hidrodinamičkog profila, uzimajući u obzir promjenjivost svojstava fluida s temperaturom, srednja se vrijednost Nusseltove značajke za cijeli raspon 0<Re Pr $d_i/l$<∞ u [99] daje izrazom

$$Nu = Nu_{sr}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_S}\right)^{0,11}. \tag{3.1.22}$$

Pri tome vrijedi

$$Nu_{sr,1} = 3,66 \tag{3.1.23}$$

za male vrijednosti izraza Re Pr $d_i/l$, a

$$Nu_{sr,2} = 1,615 \cdot \sqrt[3]{\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\, d_i / l} \tag{3.1.24}$$

za velike vrijednosti izraza Re Pr $d_i/l$ te uz odstupanje do 1%, srednja vrijednost Nusseltovog broja $\mathrm{Nu_m}$ slijedi prema izrazu

$$Nu_{sr} = \left[Nu_{sr,1}^3 + 0,7^3 + \left(Nu_{sr,2} - 0,7\right)^3\right]^{1/3}. \tag{3.1.25}$$

Izraz 3.1.22 se odnosi na strujanje morske vode u vertikalnoj cijevi isparivača do trenutka, odnosno visine u cijevi, kada započinje isparivanje te će se prema njemu izračunavati koeficijent prijelaza topline konvekcijom $\alpha_{Sw}$ sa stijenke cijevi na morsku vodu.

**Koeficijent prijelaza topline pri prisilnom jednofaznom strujanju fluida oko snopa cijevi**

Ukoliko se usvoji srednja brzina strujanja fluida kroz udio praznine presjeka po cijeloj visini cijevi, Nusseltov broj je dan izrazom [99]

$$\mathrm{Nu}_{snop} = f_A \mathrm{Nu}_1, \tag{3.1.26}$$

gdje $f_A$ predstavlja faktor udjela praznine u presjeku izmjenjivača i rasporeda cijevi, a $\mathrm{Nu}_1$ Nusseltovu značajku za jedan red cijevi.

Za raspored cijevi prema slici 3.3, koeficijenti rasporeda cijevi poprečno na smjer strujanja i uzdužno na njega dani su izrazima $a=s_1/d_v$ i $b=s_2/d_v$, udjel praznine presjeka izmjenjivača

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4a} \text{ za } b \geq 1, \text{ odnosno} \tag{3.1.27}$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4ab} \text{ za } b < 1. \tag{3.1.28}$$

Faktor udjela praznine presjeka i rasporeda cijevi slijedi prema

$$f_A = 1 + \frac{2}{3b}. \tag{3.1.29}$$

Ako su značajke strujanja date izrazima

$$\mathrm{Re}_\psi = \frac{vl}{\psi \upsilon} \text{ za } 10 < \mathrm{Re}_\psi < 10^6, \tag{3.1.30}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\upsilon}{a} \text{ za } 0{,}6 < \mathrm{Pr} < 10^3, \tag{3.1.31}$$

tada Nusseltova značajka za jedan red cijevi slijedi iz izraza

$$\mathrm{Nu}_{\mathrm{lam}} = 0{,}664 \sqrt{\mathrm{Re}_\psi} \sqrt[3]{\mathrm{Pr}}, \tag{3.1.32}$$

$$\mathrm{Nu}_{\mathrm{turb}} = \frac{0{,}037\, \mathrm{Re}_\psi^{0{,}8}\, \mathrm{Pr}}{1 + 2{,}443\, \mathrm{Re}_\psi^{-0{,}1} \left(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1\right)}, \tag{3.1.33}$$

$$\mathrm{Nu}_1 = 0{,}3 + \sqrt{\mathrm{Nu}_{\mathrm{lam}}^2 + \mathrm{Nu}_{\mathrm{turb}}^2}. \tag{3.1.34}$$

Izraz 3.1.34 odnosi se na strujanje ogrjevnog medija, tj. visokotemperaturne slatke rashladne vode glavnog motora i na osnovi njega izračunavaju se lokalne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline konvekcijom $\alpha_h$ s ogrjevnog fluida na stijenku cijevi isparivača.

**Koeficijent prijelaza topline pri isparivanju**

Isparavanje započinje kada se postigne malo pregrijanje tekućine u odnosu na temperaturu zasićenja $t_b$, odnosno ako je temperatura stijenke izmjenjivača viša od temperature zasićenja te vrijedi $t_s$-$t_b$>0 na stijenci se

počinju stvarati mjehuri pare [99]. Znatnije povećanje udjela praznine izostaje, što se tumači gotovo istovremenim isparavanjem i kondenzacijom mjehura.

Tek kada se tekućina znatnije pregrije dolazi do intenzivnijeg isparivanja uz povećanje koeficijenta prijelaza topline. Gibanje mjehura pare te bolja cirkulacija tekućine uzrokuje povećanje koeficijenta prijelaza topline. Ukoliko se postigne još veća temperaturna razlika, mjehuri se spajaju te uz stijenku izmjenjivača nastaje film plinovite faze. Koeficijent prijelaza topline pada zbog manje toplinske vodljivosti pare.

Na termodinamičku analizu procesa dodatno utječe i činjenica da se radi o vodenoj otopini većeg broja soli. Uglavnom je riječ o kuhinjskoj soli NaCl. Od nastanka prvog mjehura pare mijenja se sastav otopine, a s time i toplinska svojstva, koja je potrebno odrediti za svaki sljedeći prostorni korak.

Proces isparavanja pri prisilnom strujanju znatno se razlikuje od procesa isparavanja u posudi. Minton [15] daje izraz Chena koji pretpostavlja postojanje mjehuričastog i konvekcijskog vrenja

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_k \ . \tag{3.1.35}$$

Koeficijent prijelaza topline za konvekcijsko isparavanje u vertikalnoj cijevi za sve režime strujanja i cijeli raspon masenog udjela pare od $x$=0 do $x$=1 dan je izrazom [99]

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_{LO}} = \left\{ \begin{array}{l} \left[ (1-x)^{1,5} + 1{,}9 x^{0,6} (1-x)^{0,01} \left( \frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,35} \right]^{-2,2} \\ + \left[ \frac{\alpha_{GO}}{\alpha_{LO}} x^{0,01} \left( 1 + 8(1-x)^{0,7} \left( \frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,67} \right) \right]^{-2} \end{array} \right\}^{-0,5} , \tag{3.1.36}$$

gdje su $\alpha_{LO}$ i $\alpha_{GO}$ lokalni koeficijenti prijelaza topline za jednofazno strujanje, odnosno za kapljevinu ili paru, na nekoj visini cijevi $z$. Određuju se na osnovi masenog protoka $m$ kapljevine ili pare kroz cijeli presjek cijevi, prema izrazima 3.1.22 do 3.1.25.

Za slučaj uzlaznog strujanja kroz cijev, koeficijent prijelaza topline pri mjehuričastom vrenju za sve režime strujanja dan je izrazom [99]

$$\frac{\alpha_{mj}}{\alpha_o} = C_F \left( \frac{q}{q_o} \right)^n F \ , \tag{3.1.37}$$

u kojem je $\alpha_o$ koeficijent prijelaza topline za slučaj vrenja u posudi, koeficijent $C_F$ uzima u obzir svojstva kapljevine, a faktor $F$ utjecaj tlaka, dimenzija cijevi, svojstava ogrjevne plohe te parametara protoka prema izrazu

$$F = F(p^*)F(d)F(W)F(m,x) \ . \tag{3.1.38}$$

Eksponent $n$ ovisi o tlaku $p^*$ i za vodu je dan relacijom

$$n = 0{,}8 - 0{,}1 \cdot 10^{0{,}76\,p^*} \ , \tag{3.1.39}$$

dok se faktor $F$ može napisati kao

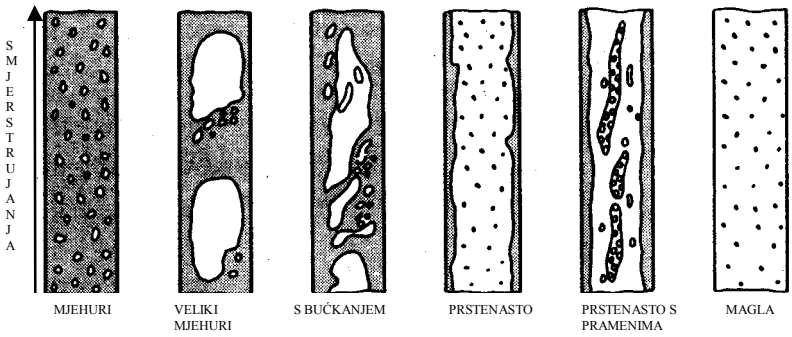
$$F = \left[ 2{,}816 p^{*0{,}45} + \left( 3{,}4 + \frac{1{,}7}{1 - p^{*7}} \right) p^{*3{,}7} \right] \left( \frac{d_o}{d} \right)^{0{,}4} \left( \frac{R_a}{R_{a0}} \right)^{0{,}133} \ . \tag{3.1.40}$$

Referentne vrijednosti su $d_o$=1·10$^{-2}$m, $R_{ao}$=1·10$^{-6}$m, $C_F|_{H2O}$=0,72, $\alpha_o|_{H2O}$=25580 W/m$^2$K. Detaljnija objašnjenja nalaze se u [99].

Izraz 3.1.35 daje koeficijent prijelaza konvekcijom $\alpha_{Sw}$ sa stijenke na morsku vodu uz promjenu agregatnog stanja.

### 3.1.3. Režimi strujanja u vertikalnoj cijevi

U VDI toplinskom atlasu prikazani su režimi strujanja u vertikalnoj cijevi kao na slici 3.5.

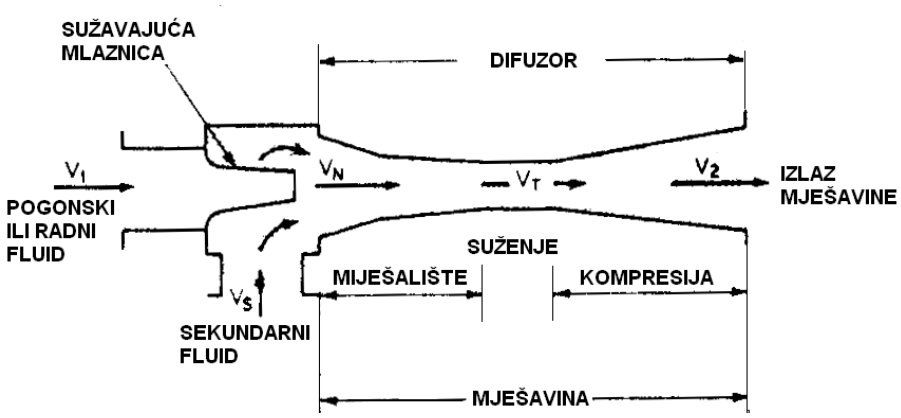



**Slika 3.5.** Režimi uzlaznog strujanja u vertikalnoj cijevi

Budući da još nisu poznati utjecaji režima, kako kod uzlaznog tako i kod silaznog strujanja, na proces izmjene topline, te da je osim u zadnjem slučaju, strujanja u magli, stijenka uvijek okvašena, u ovom se radu neće detaljnije razmatrati.

## 3.2. Matematički model ejektora

Ejektor je općeniti naziv za mlazne pumpe kod kojih je vrijednost izlaznog tlaka mješavine između ulaznih tlakova primarnog (radnog) i sekundarnog fluida. Teorija rada ejektora, shematski prikazanog na slici 3.6, izvodi se direktno iz Bernoullijeve jednadžbe.




**Slika 3.6.** Prikaz strujanja kroz ejektor

Statički tlak pogonskog fluida se u sužavajućoj mlaznici pretvara u kinetičku energiju te dolazi do usisavanja sekundarnog fluida, odnosno njihovog miješanja. U izlaznom difuzoru se kinetička energija mješavine pretvara u statički tlak.

Bernoullijeva jednadžba za mlaznicu glasi

$$\frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_s}{\rho_1 g} + \frac{v_N^2}{2g} \ , \tag{3.2.1}$$

no uz pretpostavku kako se prije mlaznice radi u potpunosti o potencijalnoj energiji ($v_1$=0), može se pisati

$$\frac{v_N^2}{2g} = \frac{p_1 - p_s}{\rho_1 g} \ . \tag{3.2.2}$$

Veličina $v_N$ dana izrazom 3.2.2 u praksi se naziva radni (operativni) tlak.

U difuzoru se pojavljuje obrnuti princip te se početna Bernoullijeva jednadžba

$$\frac{p_S}{\rho_2 g}+\frac{v_T^2}{2g}=\frac{p_2}{\rho_2 g}+\frac{v_2^2}{2g} \ , \tag{3.2.3}$$

zbog uvjeta da je na izlazu iz difuzora sva energija pretvorena u potencijalnu, tj. $v_2$=0, može napisati u obliku

$$\frac{v_T^2}{2g}=\frac{p_2-p_s}{\rho_2 g} \ . \tag{3.2.4}$$

Veličina $v_T$ dana izrazom 3.2.4 naziva se izlazni tlak. Korisno je postaviti omjer radnog i izlaznog tlaka prema izrazu

$$R_H=\frac{v_N^2}{v_T^2}=\frac{(p_1-p_s)\rho_2}{(p_2-p_s)\rho_1} \ , \tag{3.2.5}$$

gdje su $\rho_1$ i $\rho_2$ gustoća radnog fluida i gustoća mješavine.

Iz jednadžbe očuvanja količine gibanja

$$m_1 v_N+m_S v_S=(m_1+m_S)v_T \ , \tag{3.2.6}$$

uz pretpostavku kako vrijedi $v_S$=0 slijedi maseni radni omjer

$$R_m=\frac{m_S}{m_1}=\frac{v_N}{v_T}-1 \ , \tag{3.2.7}$$

što se zbog 3.2.5 može pisati u obliku

$$R_m=\sqrt{R_H}-1 \ . \tag{3.2.8}$$

Zbog gubitaka miješanja i trenja, stvarni je učin uređaja uvijek manji, što se uzima u obzir iskustvenim koeficijentom iskoristivosti $\varepsilon_e$ te se stvarni maseni radni omjer daje izrazom

$$R_{m,stv}=\varepsilon_e\sqrt{R_H}-1 \ . \tag{3.2.9}$$

U projektiranju ejektora, osim teoretskih postavki, važni su empirijski podaci i pokusi s prototipovima. Pored toga, na efikasnost ejektora može

bitno utjecati promjena viskoziteta radnog i usisavanog fluida, jer porast viskoziteta dovodi do povećanja gubitaka zbog trenja. Za male vrijednosti dinamičkog viskoziteta (manje od 0,02 Pas), utjecaj je neznatan, a za više se vrijednosti koeficijent iskoristivosti kreće u rasponu od 0,65 do 0,9.

Iako se u brodogradnji primjenjuju i generatori slatke vode s jednim ejektorom, u ovom se radu modelira uređaj s dva ejektora: zraka i rasoline. Ejektor rasoline modelirat će se prema gornjim izrazima, vodeći računa o bitnim promjenama u uvjetima rada. U početku, kada je posuda prazna, usisava zrak, a kada se cijevi isparivača napune morem te se ono počne prelijevati, morsku vodu. Gustoća izlaznog fluida $\rho_2$ zbog toga se osjetno mijenja.

Ejektor zraka može se modelirati prema iskustvenim karakteristikama proizvođača (Schutte i Koerting), kako je to prikazano dijagramom na slici 3.7.

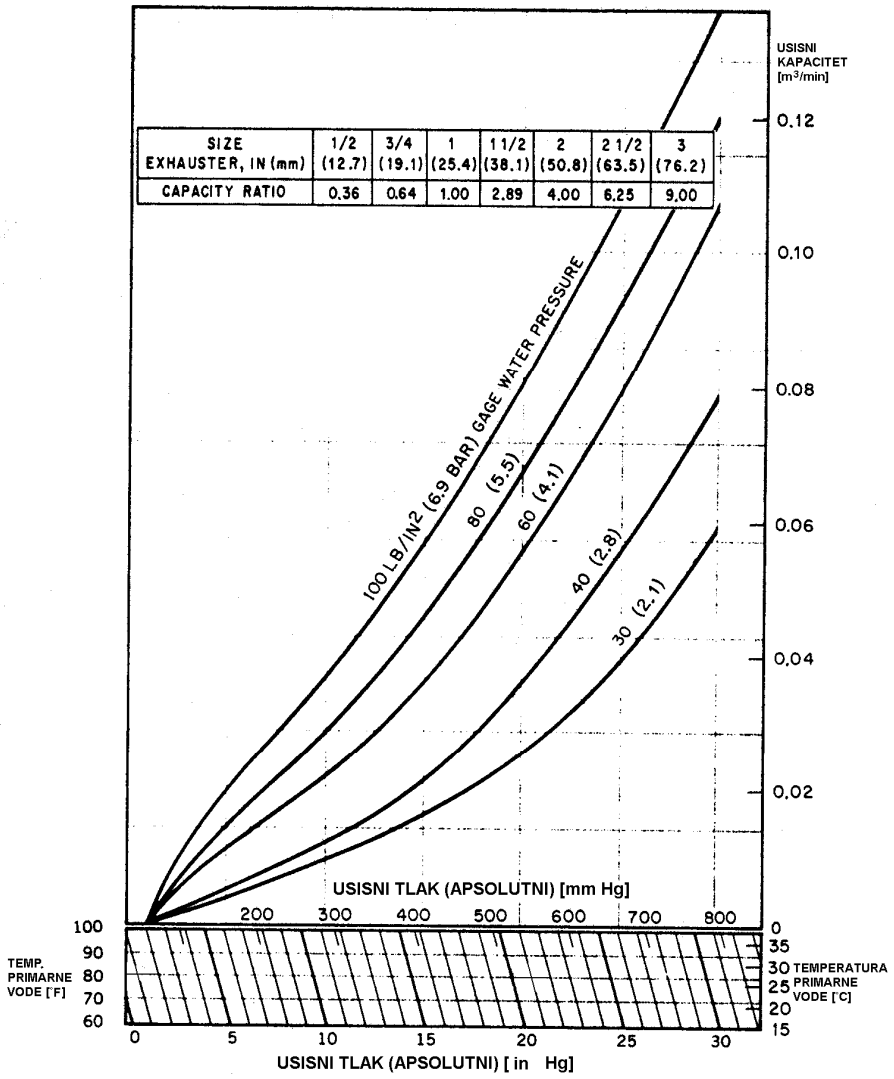
Iz dijagrama je vidljivo kako se kapaciteti povećavaju sa sniženjem temperature operativne (primarne) vode. Brodski se strojevi i uređaji proračunavaju za tropske uvjete, odnosno morsku vodu temperature 32°C. Za navedenu temperaturu operativne vode, apsolutni usisni tlak od 100 mm Hg, što odgovara skoro 90%-tnom vakuumu u posudi te manometarski tlak operativne vode od 6,9 bar ($p_{aps}$=0,79 MPa), može se očitati kapacitet od 0,016 $m^3$/min. Isti će se, kao najgori slučaj za referentnu temperaturu, koristiti u modelu.

## 3.3. Matematički model odjeljivača kapljica

Odjeljivač kapljica (odvlaživač, separator kapljica) se izvodi kao skretna stijenka ili kao žičana mreža. Prvi je u primjeni kod cijevnih izvedbi evaporatora, oblika je kalote i izrađen od titana zbog otpornosti na koroziju. Hvata veće kapljice vode zbog njihove veće mase, budući da samo najmanje kapljice mogu slijediti struju pare i ogibati oko odljeljivača. Nasuprot toj izvedbi, mrežasti hvata kapljice uglavnom zbog njihove dimenzije.

Matematički model za efikasnost odjeljivača kapljica koji se dobro slaže sa stvarnim vrijednostima, čak i nakon velikog broja radnih sati, odnosno zaprljanja, daju Sommariva, Borsani i Tasca:

$$\eta_s = 1 - e^{\left(\frac{-cs_d A k_f \rho_v D_z}{V}\right)}, \qquad (3.3.1)$$




**Slika 3.7.** Kapaciteti ejektora zraka

što modeli Carpentera ili Langmuira i Blodgetta ne uzimaju u obzir. U gornjem izrazu $c$ predstavlja brzinu strujanja na razini rasoline u isparivaču, a $k_f$ koeficijent oblika koji se izračunava prema izrazu

$$k_f = \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) 0{,}6233 \left(1 - 2{,}168 e^{(-0{,}0127 c^{3{,}05} + 0{,}005)}\right), \tag{3.3.2}$$

za čisti odjeljivač, odnosno prema izrazu

$$k_f = \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) 0{,}6233 \left(1 - 2{,}168 e^{(-0{,}0645 c^{1{,}675} + 0{,}005)}\right), \tag{3.3.3}$$

za odjeljivač koji je kontaminiran kamencem.

Ako se omjer rasoline povučene s razine isparivača i proizvedene pare odredi pomoću Carpenterovih empirijskih formula

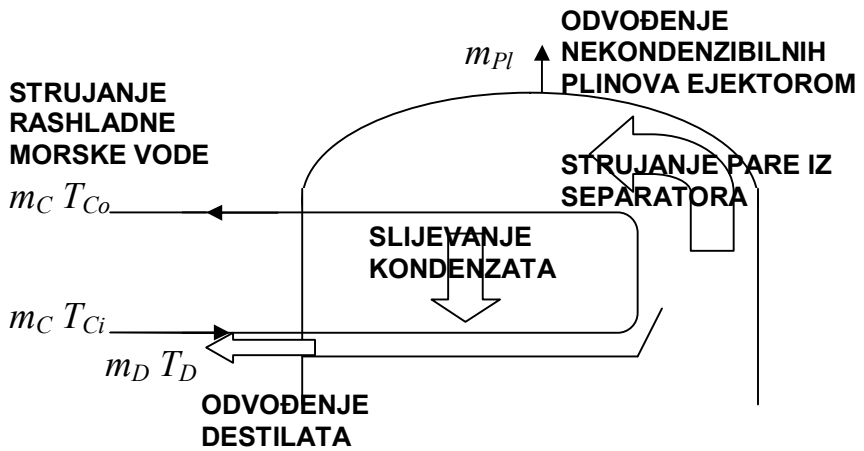
$$E_{CO} = 34100\left[2{,}205 \cdot 10^{-8} G^3 v^2\right]^{-0{,}157} \text{ i}$$
$$E_{CO} = 84\left[2{,}205 \cdot 10^{-8} G^3 v^2\right]^{0{,}87}, \qquad (3.3.4)$$

gdje se prva formula koristi ako je vrijednost izraza u zagradi manja od 347, a druga ako je veća od 347, može se pomoću izraza 3.3.1 odrediti slanost proizvedenog destilata.

## 3.4. Matematički model kondenzatora

Kod cijevnih izvedbi generatora slatke vode, kondenzator se izvodi s horizontalnim snopom tzv. 'U' cijevi, smještenim iznad tave u unutrašnjosti generatora slatke vode. Raspored cijevi je šahovski. Hlađenje se izvodi direktno, morskom vodom, koju može dobavljati pumpa samog uređaja ili glavna pumpa rashladne morske vode motora [110]. U kondenzatoru predgrijana morska voda može se djelomično koristiti kao pogonski fluid ejektora te djelomično voditi u isparivač ili je sustav hlađenja u potpunosti neovisan.

Para orošena na cijevima kondenzatora slijeva se u tavu ispod cijevnog snopa te odvodi pumpom destilata. Na efekt kondenzacije utječe temperatura rashladne morske vode i podtlak u posudi te udio nekondenzibilnih plinova. Na slici 3.8 je dan pojednostavljeni prikaz dijela uređaja za proizvodnju destilirane vode s kondenzatorom i tavom.




**Slika 3.8.** Shematski prikaz strujanja u cijevnom kondenzatoru

### 3.4.1. Jednadžbe očuvanja za kondenzator

Analogno jednadžbama danim u poglavlju 3.1.1. za model isparivača te navedenim pojednostavljenjima, za model kondenzatora mogu se postaviti jednadžbe očuvanja mase i energije koje je potrebno riješiti za rashladnu morsku vodu, destilat, tj. slatku vodu u plinovitom i tekućem stanju te stijenku cijevi kondenzatora.

Jednadžba očuvanja energije za rashladnu morsku vodu i destilat dana je izrazima

$$\frac{\partial(\rho_{sr} h_{Sw})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{sr} v_{Sw} h_{Sw})}{\partial x} - \alpha_{Sw} \frac{d_u \pi}{A_{slob}} (T_s - T_{Sw}) = 0 \ , \tag{3.4.1}$$

i

$$\frac{\partial(\rho_h h_h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_h v_h h_h)}{\partial x} - \alpha_D \frac{d_v \pi}{A_{slob}} (T_D - T_s) = 0 \ , \tag{3.4.2}$$

dok jednadžba očuvanja energije za cijevi kondenzatora, analogno izrazu 3.1.7, postaje

$$\rho_s A_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_D d_v \pi (T_D - T_s) - \alpha_{Sw} d_u \pi (T_s - T_{Sw}) \ , \tag{3.4.3}$$

gdje je $\rho_s$ gustoća materijala cijevi, $A_s = \frac{(d_v^2 - d_u^2)\pi}{4}$ površina poprečnog presjeka cijevi, a $c_s$ specifični toplinski kapacitet materijala cijevi.

Kod izmjenjivača topline sa šahovski raspoređenim horizontalnim cijevima u snopu geometrija izmjenjivača je kao na slici 3.9. Kontrolni volumen pare i kondenzata predstavlja u sredini naznačeni kvadrat umanjen za površinu poprečnog presjeka cijevi. Budući da se presjek takvog volumena mijenja, mijenjaju se i brzine strujanja. Ovdje će se uzeti srednja brzina strujanja.

Veličina tako formiranog kontrolnog volumena duljine $l$ iznosit će za paru i kondenzat

$$V = l(s_1 s_2 - d_v^2 \frac{\pi}{4}) \ , \tag{3.4.4}$$

a za morsku vodu, koja struji kroz cijev unutarnjeg promjera $d_u$

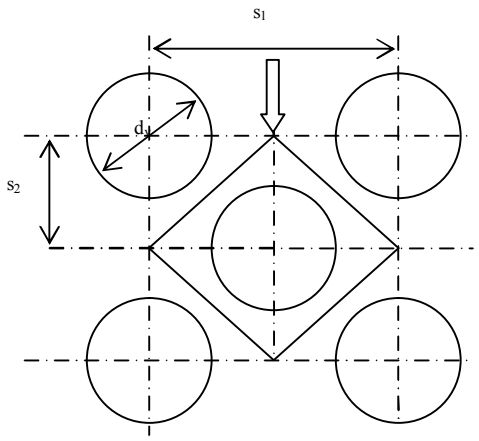
$$V = l\frac{d_u^2\pi}{4} \ . \tag{3.4.5}$$

Jednadžbe očuvanja mase za morsku vodu postaje

$$\frac{\partial \rho_{sr}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho_{sr} v\right) = 0 \ , \tag{3.4.6}$$

a za destilat

$$\frac{\partial \dot{m}_H}{\partial x} = 0 \ . \tag{3.4.7}$$




**Slika 3.9**. Geometrija šahovski raspoređenih horizontalnih cijevi, kontrolni volumen pare i kondenzata te njihov smjer strujanja

### 3.4.2. Koeficijenti prijelaza topline za cijevni kondenzator

Pregled izvedbi kondenzatora, uključujući i koeficijente prijelaza topline, dan je u radovima [17, 99]. Sa strane rashladnog fluida, u brodskim uređajima je to redovito morska voda, dolazi do senzibilne izmjene topline, odnosno do promjene temperature, dok se sa strane destilata radi o latentnoj izmjeni topline.

Odabrana izvedba ima snop horizontalnih, šahovski raspoređenih U cijevi, ispod koji se nalazi tava za sakupljanje destilata. Složenost problema se povećava ukoliko se u model želi uključiti i pojavljivanje

kamenca sa strane rashladnog fluida, prisustvo nekondenzibilnih plinova te soli u destilatu.

Ako se zanemari pregrijanje pare, pothlađivanje filma kondenzata i pad tlaka, odnosno pretpostavi kako je temperatura zasićene pare konstantna [99], jednadžba bilance energije

$$Ak\Delta T_{\log} = m_{kond}\Delta h_P \ , \qquad (3.4.8)$$

gdje je $A$ [m$^2$] površina izmjenjivača, $k$ [W/m$^2$K] srednji koeficijent izmjene topline, $\Delta T_{log}$ [K] logaritamska temperaturna razlika, $m_{kond}$ [kg/s] maseni protok kondenzata i $\Delta h_P$ [J/kgK] toplina kondenzacije čiste pare, može se iskoristiti za odabir površine kondenzatora ili se za odabrane karakteristike cijevnog snopa može odrediti količina proizvedenog destilata.

Prema $m_{kond}$ koji slijedi iz jednadžbi očuvanja masa, odabrat će se površina kondenzatora $A$, no za to je potrebno odrediti koeficijente izmjene topline i logaritamsku razliku temperatura.

Srednji koeficijent izmjene topline može se prikazati u obliku

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_{CSw}} + \frac{1}{\frac{\lambda_s}{\delta_s}} + R_f \ , \qquad (3.4.9)$$

ako se zanemari razlika vanjske i unutarnje površine cijevi[1] te gdje je $\lambda_s$ [W/mK] koeficijent toplinske vodljivosti materijala cijevi, $\delta_s$ [m] debljina stijenke cijevi i $R_f$ [m$^2$K/W] utjecaj zaprljanja cijevi[2]. Koeficijenti prijelaza topline konvekcijom ovise o temperaturnim razlikama te će se računati lokalne vrijednosti.

**Koeficijent prijelaza topline pri prisilnom jednofaznom strujanju fluida kroz cijev**

Radi se o strujanju rashladne, morske vode. Ovdje će se koristiti model kod kojega je temperatura morske vode na ulazu jednaka temperaturi okoline, iako postoje i druge izvedbe.

[1] Što zbog tanke stijenke nije velika pogreška.
[2] Kamenac nastaje s unutarnje strane, jer je rashladni medij morska voda. Utjecaj kamenca s vanjske strane cijevi je zanemariv.

Na izmjenu topline utječe duljina cijevi, izvedba ulaza u cijev te vrsta strujanja. Pretpostavit će se laminarno strujanje s razvijenim hidrodinamičkim profilom. Zanemarit će se i utjecaj tehnološke izvedbe ulaza u cijevi. U radu [99] se predlaže Martinova jednadža

$$Nu_{sr} = \left\{ Nu_{sr,1}^{3} + 0{,}7^{3} + \left[ Nu_{sr,2} - 0{,}7 \right]^{3} + Nu_{sr,3}^{3} \right\}^{1/3} , \qquad (3.4.10)$$

gdje je prvi član jednadžbe s desne strane $Nu_{sr,1}$=3,66 za male vrijednosti izraza $Re \cdot Pr \cdot d_u/l$, drugi član s desne strane dan izrazom

$$Nu_{sr,2} = 1{,}615 \sqrt[3]{\mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr} \cdot d_u / l} , \qquad (3.4.11)$$

a treći izrazom

$$Nu_{sr,3} = \left( \frac{2}{1 + 22\,\mathrm{Pr}} \right)^{1/6} \left( Re \cdot Pr \cdot d_u / l \right)^{1/2} , \qquad (3.4.12)$$

za konstantnu temperaturu stjenke cijevi, koja vrijedi za sve duljine. Iz gornjeg će se izraza odrediti lokalni koeficijent prijelaza topline konvekcijom $\alpha_{CSw}$ za rashladnu morsku vodu kondenzatora.

**Koeficijent prijelaza topline pri kondenzaciji čiste pare**

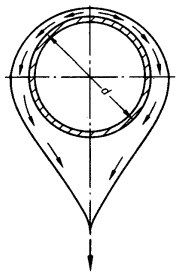
Srednju vrijednost bezdimenzionalnog koeficijenta izmjene topline pri kondenzaciji s vanjske strane jedne cijevi kružnog poprečnog presjeka, kao na slici 3.10 daje Nusselt [99]

$$Nu = 0{,}954 \left[ \frac{1 - \dfrac{\rho_P}{\rho}}{\mathrm{Re}_F^{\circ}} \right]^{1/3} , \qquad (3.4.13)$$

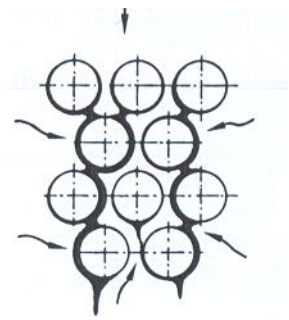
pri čemu je Reynoldsova značajka dana izrazom

$$\mathrm{Re}_F^{\circ} = \frac{m_{kond}}{L\eta} , \qquad (3.4.14)$$

gdje je $L$ [m] duljina cijevi, a $\eta$ [Pas] dinamički viskozitet kondenzata.



**Slika 3.10.** Kondenzacija na vanjskoj stijenci jedne cijevi



**Slika 3.11.** Kondenzacija na snopu cijevi

Kondenzacija na snopu horizontalnih cijevi razlikuje se zbog:

1. utjecaja brzine nastrujavanja pare na film kondenzata, što se javlja čak i kada je ulazna brzina pare zanemariva[3]
2. kondenzat popunjava slobodnu površinu između cijevi, čime onemogućava cirkulaciju pare oko cijevi te dolazi do pothlađivanja kondenzata
3. struje kondenzata se spajaju i razdvajaju pri slijevanju niz snop pa se para kondenzira pothlađenim kondenzatom, kako to prikazuje slika 3.11 [99].

Prvi je praktični model kondenzacije u snopu razvio Nusselt, a zatim je Kern predložio izmjenu prema kojoj se model bolje slaže s eksperimentalnim vrijednostima, kako to prikazuje donji izraz

$$\frac{\overline{\alpha}}{\alpha_1} = n^{-1/6} \quad . \tag{3.4.15}$$

Koeficijent izmjene topline $\alpha_1$ računa se kao za jednu, prvu i slobodnu za nastrujavanje fluida, cijev, a $n$ je broj cijevi u jednom redu. Vrijednost $\overline{\alpha}$ odnosi se na jednu kolonu poprečnog presjeka snopa.

**Koeficijent prijelaza topline pri kondenzaciji čiste pare uz prisustvo inertnog plina**

Pri kondenzaciji plinovitih mješavina inertni je plin komponenta, koja se pri normalnom režimu rada ne kondenzira. U slučaju ovakvog uređaja radi se o zraku, koji je otopljen u morskoj vodi, a ista ga pri zagrijavanju djelomično oslobađa.

Otpori izmjeni topline i mase javljaju se u dijelu kondenzatora u kojem su tvari u plinovitoj fazi, dok se u dijelu kondenzatora u kojem je stvoren

[3] Cijevni snop usisava paru.

film kondenzata prisutan samo otpor izmjeni topline. Posljedica je smanjen učin kondenzatora [99].

U radu [104] se navodi udio plinova, točnije kisika, ugljičnog dioksida i dušika, otopljenih u morskoj vodi. Prema njemu količina kisika otopljena u površinskim slojevima mora iznosi 7 - 8 ml/l. Smanjenje udjela prema većim dubinama za ovaj rad nema utjecaja, jer se usis ostvaruje kroz usisne košare i direktno ovisi o gazu broda i smještaju usisa. Omjer kisika i dušika u morskoj vodi razlikuje se od njihovog omjera u zraku i iznosi približno 1:2. Udio ugljičnog dioksida je približno jednak udjelu u zraku.

Iz gore navedenog ukupni udio plinova u morskoj vodi iznosi oko 20 ml/l. Ovdje će se pretpostaviti kako je ejektor zraka zadovoljavajućeg kapaciteta, čak i kada bi se tijekom zagrijavanja morske vode oslobodila sva navedena količina plinova, čime se izbjegava nepotrebna složenost problema.

## 3.5. Toplinska svojstva morske vode

Fizikalna svojstva vode ne mijenjaju se bitno za male promjene temperature do kojih dolazi u nižim dijelovima cijevi uređaja za destilaciju. Međutim, tijekom isparavanja, mijenja se sastav morske vode – rasoline, uslijed čega dolazi i do promjena u gustoći, toplinskoj vodljivosti, viskozitetu i dr. U radovima [13, 33, 89, 100] se daju empirijski izrazi za određivanje nekih svojstava morske vode ili su vrijednosti prikazane tablično.

**Tablica 3.1.** Gustoća vodene otopine soli $\rho$ [kg/m$^3$]

| Temperatura [°C] | Slanost [g/kg] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 | 110 | 130 | 150 |
| 20 | 1005.8 | 1020.8 | 1035.9 | 1051.2 | 1066.7 | 1082.4 | 1098.2 | 1114.2 |
| 30 | 1002.8 | 1017.6 | 1032.6 | 1047.8 | 1063.1 | 1078.5 | 1094.1 | 1109.9 |
| 40 | 999.2 | 1013.9 | 1028.8 | 1043.8 | 1059.0 | 1074.2 | 1089.6 | 1105.2 |
| 50 | 995.0 | 1009.7 | 1024.5 | 1039.4 | 1054.4 | 1069.5 | 1084.8 | 1100.1 |
| 60 | 990.2 | 1004.9 | 1019.6 | 1034.5 | 1049.4 | 1064.4 | 1079.5 | 1094.8 |
| 70 | 984.9 | 999.5 | 1014.3 | 1029.1 | 1044.0 | 1058.9 | 1074.0 | 1089.1 |
| 80 | 979.0 | 993.7 | 1008.4 | 1023.2 | 1038.1 | 1053.0 | 1068.0 | 1083.1 |
| 90 | 972.7 | 987.4 | 1002.1 | 1017.0 | 1031.8 | 1046.8 | 1061.8 | 1076.8 |
| 100 | 965.8 | 980.6 | 995.4 | 1010.3 | 1025.2 | 1040.2 | 1055.2 | 1070.3 |

El-Dessouky i ostali u radu [33] određuju gustoću morske vode prema izrazu

$$\rho = 10^3 (A_1 F_1 + A_2 F_2 + A_3 F_3 + A_4 F_4) . \tag{3.5.1}$$

Kada se parametri u zagradi izraza 3.5.1 računaju prema relacijama

$$\begin{aligned}
A &= \frac{2t - 200}{160} , \\
B &= \frac{2s - 150}{150} , \\
G_1 &= 0{,}5; G_2 = B; G_3 = 2B^2 - 1 , \\
A_1 &= 4{,}032219 G_1 + 0{,}115313 G_2 + 3{,}26 \cdot 10^{-4} G_3 , \\
A_2 &= -0{,}108199 G_1 + 1{,}571 \cdot 10^{-3} G_2 - 4{,}23 \cdot 10^{-4} G_3 , \\
A_3 &= -0{,}012247 G_1 + 1{,}74 \cdot 10^{-3} G_2 - 9 \cdot 10^{-6} G_3 , \\
A_4 &= 6{,}92 \cdot 10^{-4} G_1 - 8{,}7 \cdot 10^{-5} G_2 - 5{,}3 \cdot 10^{-5} G_3 , \\
F_1 &= 0{,}5; F_2 = A; F_3 = 2A^2 - 1; F_4 = 4A^3 - 3A ,
\end{aligned} \tag{3.5.2}$$

dobijene vrijednosti u skladu su s vrijednostima koje su prikazane u tablici rada [13]. Odstupanje je reda veličine $10^{-2}$. Vrijednosti u navedenoj tablici, dio koje je prikazan u tablici 3.1. rada, koristit će se u numeričkom rješenju problema. Iz originalne su tablice ispuštene vrijednosti za temperature više od 100°C, kao i za tzv. normalnu morsku vodu, slanosti 35 g/kg.

Dinamički viskozitet $\eta_d$ dan je izrazom [33]

$$\eta_d = \eta_{dW} \eta_{dR} \cdot 10^{-3} , \tag{3.5.3}$$

gdje vrijedi

$$\begin{aligned}
&\ln \eta_{dW} = \frac{-3{,}79418 + 604{,}129}{139{,}18 + t} , \\
&\text{uz } A = 1{,}474 \cdot 10^{-3} + 1{,}5 \cdot 10^{-5} t - 3{,}927 \cdot 10^{-8} t^2 , \\
&B = 1{,}0734 \cdot 10^{-5} - 8{,}5 \cdot 10^{-8} t - 2{,}23 \cdot 10^{-10} t^2 \\
&\text{i } \eta_{dR} = 1 + As + Bs^2 .
\end{aligned} \tag{3.5.4}$$

U numeričkom rješenju problema koristit će se, međutim, izraz koji daju Isdale i Fabuss [13]

$$\eta_d\big|_t = \frac{\eta_d\big|_{20}}{10^E} \ , \tag{3.5.5}$$

gdje je $\eta_d\big|_{20} = 1{,}002 + 0{,}001652s + 0{,}0000083s^2$ dinamički viskozitet pri 20°C

uz $E = \frac{t-20}{t+109}\left[1{,}37060A + 0{,}000832B(t-20)\right]$ ,

$A = 1 - 0{,}000619s + 0{,}000003s^2$

i $B = 1 + 0{,}000942s - 0{,}000015s^2$ ,

pri čemu su rezultati provjerljivi prema tablici 3.2. Iz originalne su tablice ispuštene vrijednosti za temperature više od 100°C.

**Tablica 3.2.** Dinamički viskozitet vodene otopine soli $\eta_d$ [cP=$10^{-3}$Pas]

| Temperatura | Slanost [g/kg] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [°C] | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 | 110 | 130 | 150 |
| 20 | 1.019 | 1.059 | 1.105 | 1.158 | 1.218 | 1.284 | 1.357 | 1.437 |
| 30 | 0.812 | 0.846 | 0.884 | 0.928 | 0.976 | 1.029 | 1.087 | 1.150 |
| 40 | 0.666 | 0.694 | 0.727 | 0.764 | 0.804 | 0.848 | 0.896 | 0.947 |
| 50 | 0.558 | 0.583 | 0.611 | 0.643 | 0.677 | 0.714 | 0.754 | 0.797 |
| 60 | 0.476 | 0.498 | 0.523 | 0.551 | 0.581 | 0.613 | 0.647 | 0.684 |
| 70 | 0.413 | 0.433 | 0.455 | 0.479 | 0.506 | 0.534 | 0.564 | 0.595 |
| 80 | 0.363 | 0.381 | 0.400 | 0.422 | 0.446 | 0.471 | 0.497 | 0.525 |
| 90 | 0.322 | 0.339 | 0.356 | 0.376 | 0.397 | 0.420 | 0.444 | 0.469 |
| 100 | 0.289 | 0.304 | 0.320 | 0.338 | 0.357 | 0.378 | 0.399 | 0.422 |

Iz izraza 3.5.1 i 3.5.5 odredit će se kinematički viskozitet morske vode prema poznatom izrazu

$$\nu = \frac{\eta_d}{\rho} \ . \tag{3.5.6.}$$

Latentna toplina isparavanja $r$, računa se prema sljedećem izrazu [33]

$$r = 2589{,}583 + 0{,}9156t - 4{,}8343 \cdot 10^{-2} t^2 \ . \tag{3.5.7}$$

Koeficijent toplinske vodljivosti morske vode $\lambda$, slijedi iz izraza [33]

$$\ln\left(\frac{\lambda}{1000}\right) = \ln(240 + 2 \cdot 10^{-4} s) + 0{,}434\left(2{,}3 - \frac{343{,}5 + 0{,}37s}{t + 273{,}15}\right)\left(1 - \frac{t + 273{,}15}{647{,}3 + 0{,}03s}\right)^{1/3} \ . \tag{3.5.8}$$

Sličan izraz, preciznosti unutar 1%, daju Jamieson i Tudhope [13]

$$\lambda = (0{,}24 + 0{,}0002s)e^{E} \quad , \tag{3.5.9}$$

gdje je eksponent $E$ u izrazu dan relacijom

$$E = \left(2{,}3 - \frac{343{,}5 + 0{,}37s}{t + 273{,}15}\right)\left(1 - \frac{t + 273{,}15}{T_c + 0{,}03s}\right)^{0{,}333} , \tag{3.5.10}$$

a $T_c$=647[K] je kritična temperatura destilirane vode. Vrijednosti izraza u skladu su s tablicom 3.3.

**Tablica 3.3.** Specifični toplinski kapacitet vodene otopine soli $c$ [kJ/kgK]

| Temperatura [°C] | Slanost [g/kg] | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| 0 | 4.207 | 4.079 | 3.962 | 3.854 | 3.756 | 3.668 | 3.590 | 3.522 | 3.464 |
| 20 | 4.189 | 4.078 | 3.973 | 3.875 | 3.784 | 3.699 | 3.621 | 3.550 | 3.485 |
| 40 | 4.181 | 4.079 | 3.982 | 3.890 | 3.802 | 3.719 | 3.640 | 3.566 | 3.497 |
| 60 | 4.183 | 4.085 | 3.991 | 3.901 | 3.814 | 3.731 | 3.652 | 3.576 | 3.504 |
| 80 | 4.194 | 4.097 | 4.003 | 3.912 | 3.825 | 3.741 | 3.660 | 3.583 | 3.509 |
| 100 | 4.215 | 4.116 | 4.020 | 3.927 | 3.837 | 3. 753 | 3.671 | 3.592 | 3.517 |

Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku $c_p$ može se računati prema relaciji danoj u radu [33]

$$c_p = (A + Bt + Ct^2 + Dt^3) \cdot 10^{-3} . \tag{3.5.11}$$

Empirijski koeficijenti u izrazu 3.5.11 računaju se kako slijedi:

$$\begin{aligned} A &= 4206{,}8 - 6{,}6197s + 1{,}2288 \cdot 10^{-2} s^2 , \\ B &= -1{,}1262 + 5{,}4178 \cdot 10^{-2} s - 2{,}2719 \cdot 10^{-4} s^2 , \\ C &= 1{,}2026 \cdot 10^{-2} - 5{,}3566 \cdot 10^{-4} s + 1{,}8906 \cdot 10^{-6} s^2 , \\ D &= 6{,}8777 \cdot 10^{-7} + 1{,}517 \cdot 10^{-6} s - 4{,}4268 \cdot 10^{-9} s^2 . \end{aligned} \tag{3.5.12}$$

Sličan izraz koristi i Jamieson [13]

$$c_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 , \tag{3.5.13}$$

gdje se koeficijenti A, B, C i D računaju prema relacijama

$$\begin{aligned} A &= 5{,}328 - 9{,}76 \cdot 10^{-2} s + 4{,}04 \cdot 10^{-4} s^2 , \\ B &= -6{,}913 \cdot 10^{-3} + 7{,}351 \cdot 10^{-4} s - 3{,}15 \cdot 10^{-6} s^2 , \end{aligned}$$

$$C = 9{,}6 \cdot 10^{-6} - 1{,}927 \cdot 10^{-6} s + 8{,}23 \cdot 10^{-9} s^2 ,$$
$$D = 2{,}5 \cdot 10^{-9} + 1{,}666 \cdot 10^{-9} s - 7{,}125 \cdot 10^{-12} s^2 . \tag{3.5.14}$$

Temperatura zasićenja morske vode za dani tlak, zbog otopljenih je soli, viša u odnosu na temperaturu zasićenja slatke vode. To temperaturno povećanje računat će se u skladu s empirijskim izrazom [33]

$$\Delta t_s = X(B + CX) \cdot 10^{-3} , \tag{3.5.15}$$

gdje $X$ predstavlja udio soli u milijuntnim dijelovima (ppm), a koeficijenti $B$ i $C$ računaju se prema

$$B = (6{,}71 + 6{,}34 \cdot 10^{-2} t + 9{,}74 \cdot 10^{-5} t^2)10^{-3}$$
$$C = (22{,}238 + 9{,}59 \cdot 10^{-3} t + 9{,}42 \cdot 10^{-5} t^2)10^{-8} . \tag{3.5.16}$$

U jednadžbama 3.5.1 do 3.5.16 $t$ predstavlja temperaturu u [°C], $T$ u [K], a $s$ je slanost u [g/kg].

Za izračunavanje temperature zasićenja slatke vode iz poznatog tlaka ili obratno koristi se Clausius-Clapeyronova jednadžba ili, nešto preciznija Antoineova jednadžba koja ima oblik

$$p_s = e^{A - \frac{B}{C + t_s}} , \tag{3.5.17}$$

pri čemu je za temperaturu zasićenja u °C tlak dan u 1 torr=1 mm Hg = 133,322 Pa, a koeficijetni iznose A=8,07131, B=1730,63, C=233,426 za temperaturni raspon od 1 do 100°C, odnosno A=8,14019, B=1810,94, C=244,485 za temperaturni raspon od 99 do 374°C. Za SI sustav jedinica gdje se temperatura uvrštava u Kelvinovim stupnjevima, a rezultat je u kPa, koeficijenti iznose A=16,5362, B=3985,44 i C=-38,9974.

Osim toga, na složenost proračuna znatno utječe stacionarnost procesa. U radu će se pretpostaviti stacionaran rad dobavne pumpe morske vode, čime se ujedno pretpostavlja konstantan dotok morske vode u uređaj i stacionarna dobava primarnog fluida ejektora rasoline i plinova. Time se ne uvodi bitnija pogreška u stvarni model, budući da opće prihvaćeni postupak upućivanja i normalnog rada uređaja odgovara takvom radu.

Iz izraza 3.5.17 slijedi eksplicitni izraz za temperaturu zasićenja

$$T_s = \frac{B}{A - \log_{10} p_s} - C \,. \tag{3.5.18}$$

S druge strane, toplinski tok se može mijenjati s vremenom, te je proces sa strane ogrjevnog medija nestacionaran. Do nestacionarnosti dolazi, ne zbog rada glavnog porivnog stroja, čija se rashladna voda koristi za grijanje, već zbog karakteristika regulatora koji upravlja troputnim ventilom mješačem, odnosno temperaturom vode. U radu će se pretpostaviti najčešće rješenje, regulacija temperature rashladne vode na izlazu iz motora djelovanjem PID regulatora na troputni ventil–mješač pa se, poznavajući karakteristike regulatora može sa zadovoljavajućom točnošću uzeti kako je temperatura ogrjevnog fluida također konstantna. Nadalje, zbog sličnih se razloga može pretpostaviti konstantna temperatura rashladne vode kondenzatora.

## 3.6. Kapacitet

'Kapacitet kao tehničko-tehnološka i ekonomska veličina ima posebno značenje, jer ulazi u sve pore projekta i služi kao osnova proračuna ekonomske opravdanosti izgradnje nekog postrojenja' [105]. Postoji u stručnoj i znanstvenoj literaturi više definicija kapaciteta, no čini se da je u ovom slučaju dovoljno razraditi kapacitet postrojenja izražen u volumenskoj količini proizvedene destilirane vode zahtijevanih fizikalno-kemijskih svojstava u jedinici vremena $D$ [l/h ili t/h ili t/dan][4].

Iako se ovdje radi o samo jednom 'proizvodu' određenje kapaciteta nije jednostavno. Na njega utječu konstrukcijski i eksploatacijski faktori koji se ne mogu točno predvidjeti. U tome, barem djelomično, mogu pomoći statistički podaci.

Neki od faktora koji utječu na točnost određenja kapaciteta uređaja su:

- Uređaj se, zbog zahtijevane bakteriološke i kemijske čistoće morske vode, ali i zbog nominalnog opterećenja glavnog porivnog stroja, tj. dovoljne količine topline sadržane u rashladnoj vodi motora, koristi samo tijekom plovidbe otvorenim morem. Nemoguće je generalno odrediti odnos broja dana plovidbe otvorenim morem i plovidbe kanalima, zatvorenim morima, zaljevima, odnosno boravka u lukama i sidrištima. To ovisi o vrsti broda i tereta koji se prevozi, lukama ukrcaja i iskrcaja, odnosno njihovim udaljenostima, raspoloživosti tereta i mnogim drugim faktorima. Čak i u

[4] Umjesto volumenske količine u jedinici vremena može se upotrijebiti i masena.

konkretnom slučaju ovo ne bi bilo pouzdano, jer se može promijeniti vlasnik broda ili zakupac (charter), a time i broj dana. Statistički podaci mogu samo djelomično pomoći.

- Na efikasnost rada utječu mnogi eksploatacijski faktori koje je teško generalizirati kroz duže razdoblje ili cijeli eksploatacijski vijek broda: stanje pumpi i cjevovoda morske vode, stanje ogrjevnih cijevi, tj. debljina kamenca na njima, hermetičnost uređaja, odnosno mogućnost postizanja podtlaka, temperatura morske vode i ogrjevnog fluida. I u ovome slučaju statistika može biti od pomoći kod pretpostavljanja temperature morske vode ili brzine nastanka kamenca na cijevima. Valbak i Thoren u radu [91] predlažu neka rješenja kojima se ostvaruju uštede na ukupno utrošenoj energiji za rad rashladnog sustava dizelmotornog postrojenjana te na slici 2.29. daju statističku raspodjelu vremena koje brod provede u morskoj vodi određenog temperaturnog raspona.
- Održavanje uređaja može se planirati ili izvoditi nakon uočavanja bitnih odstupanja, a broj utrošenih radnih sati može znatno varirati. Naime, održavanje može biti dodijeljeno članovima posade ili se prepušta nekom ovlaštenom servisu. Uvježbanost radnika utječe na utrošene radne sate i gubitak proizvodnje, a treba ubrojiti i gubitke od trenutka otkazivanja do početka radova. Ukoliko se radovi oduže toliko da se potroše brodske zalihe proizvedene vode mora se izvršiti nabavka vode s kopna, što predstavlja dodatni trošak.

Zbog brojnih navedenih situacija u kojima će se brod naći tijekom eksploatacije minimalni kapacitet, koji je izjednačen s potrošnjom vode na brodu, ne zadovoljava. Potrošači vode na brodu su:

- posada kojoj je potrebna voda za piće, pranje i kuhanje;
- dizelski motori, odnosno rashladni sustavi visokotemperaturne i niskotemperaturne vode, koje je potrebno nadopunjavati zbog namjernih ili nenamjernih ispuštanja;
- generatori pare, odnosno sustavi napojne vode u kojima se također javljaju gubici;
- ostali manji potrošači kao što su separatori koji koriste slatku vodu za upravljanje i stvaranje vodene brtve, neki tipovi kaljužnih separatora i drugi brodski uređaji.

Takav, minimalni potrebni kapacitet, koji bi nadoknađivao gore navedenu potrošnju ne može biti dovoljan, jer se uređaj ne koristi kontinuirano. Dakle, potrebno je odabrati uređaj većeg kapaciteta, koji će biti u stanju napuniti skladišne tankove slatke vode u kraćem vremenu, a što će biti

dovoljna rezerva za nadoknađivanje brodskih potreba tijekom razdoblja kada se uređaj ne koristi.

'Nominalni maksimalni kapacitet je u stvari tehnički izvodivi kapacitet' [105], a daje ga proizvođač uređaja. Kod ovakvoga, destilacijskog uređaja, kojemu je ogrjevni fluid visokotemperaturna voda glavnog porivnog stroja broda, kapacitet je određen opterećenjem stroja, odnosno količinom u vodi sadržane topline koja se može iskoristiti za zagrijavanje morske vode i vanjskim uvjetima, odnosno temperaturom morske vode. Raspoloživa količina topline ovisi o protoku vode te njezinoj temperaturi. Zbog pojednostavljenja problema može se pretpostaviti kako je temperatura vode na ulazu u isparivač jednaka temperaturi vode na izlazu iz motora koja je konstantna i jednaka 80°C. Potonje slijedi iz stacionarnog režima rada motora kod plovidbe mirnim, otvorenim morem te PID regulacije temperature. Uz takvu se pretpostavku može usvojiti i konstantan protok visokotemperaturne vode kroz motor, dok će protok kroz isparivač ovisiti o položaju mimovodnog prigušnog ventila kao na slici 3.1., koji bi u slučaju nominalnog maksimalnog kapaciteta trebao biti u potpunosti zatvoren.

Takav bi rad uzrokovao skraćenje vremena između dva remonta, povećane troškove zbog većeg broja radnih sati kod održavanja te lošiju kvalitetu proizvedene destilirane vode. Korisno bi bilo odrediti optimalni ekonomski kapacitet ili još bolje, osmisliti sustav upravljanja postrojenjem u svim režimima rada koji bi kroz odabrano, ali obavezno duže vrijeme, zadovoljavao potrebe uz najbolju ekonomsku iskoristivost.

Ukupni maksimalni nominalni kapacitet može se definirati prema donjem izrazu

$$D_{ukup} = D \cdot \tau_{\max} \quad , \tag{3.6.1}$$

gdje je $\tau_{max}$ [h/g] ukupni broj sati rada u jednoj godini, a $D_{ukup}$ [t/g] proizvedena količina u jednoj godini kada je $D$ [t/h] maksimalni nominalni kapacitet. Očito je

$$\tau_{max}=365\ [\mathrm{d/g}]\cdot 24\ [\mathrm{h/d}]=8760\ [\mathrm{h/g}]\ , \tag{3.6.2}$$

što treba umanjiti za vrijeme boravka u luci, na sidrištu te plovidbe obalnim vodama, uključujući i manevriranje. To ovisi, kako je prije navedeno o tipu broda, lukama i njihovim udaljenostima te mnoštvu faktora koje je nemoguće generalizirati. Ipak, ako se zanemari manevriranje, jer je u pravilu kratkotrajno te usvoji srednje vrijeme rada

glavnog motora za različite tipove brodova, ono iznosi 7.000 h godišnje. To je u odnosu na $\tau_{max}$ gotovo 80%.

Prema Laliću i Kolombu [105] maksimalni kapacitet treba umanjiti za ukupno vrijeme trajanja remonta kako bi se dobio procesni kapacitet pa slijedi

$$D_{proc} = D \cdot \tau_{proc} \ , \tag{3.6.3}$$

gdje je $\tau_{proc}$ vrijeme rada dano izrazom

$$\tau_{proc} = \tau_{\max} - (n_{kr} \cdot \Delta\tau_{kr} + n_{sd} \cdot \Delta\tau_{sd} + n_g \cdot \Delta\tau_g) . \tag{3.6.4}$$

Veličine u zagradi predstavljaju radne sate izgubljene zbog remonta pa je $n_{kr}$ broj kratkotrajnih, $n_{sd}$ broj srednjih, $n_g$ broj godišnjih remonta, a $\Delta\tau_{kr}$, $\Delta\tau_{sd}$ *i* $\Delta\tau_g$ su trajanja remonta.

Uz pretpostavku preventivnog održavanja, što znači da će se periodičke provjere te čišćenja i zamjene dijelova vršiti kada je brod u luci ili na sidru, a ukupni broj radnih sati izgubljenih zbog remonta manji je od ukupnog vremena kada ne radi glavni motor, te da će se s takvom praksom izbjeći neočekivane kvarove i gubitke sati rada, može se uzeti da vrijedi

$$D_{proc} = 0{,}8 \cdot D_{\max} = 0{,}8 \cdot D \cdot \tau_{\max} \ . \tag{3.6.5}$$

## 3.7. Diskontinuirano i neprekidno isparavanje te intenzitet isparavanja

Diskontinuirano isparavanje u šaržama provodi se na način da se isparivač napuni rastopinom koncentracije $\xi_1$ koja se zagrijava do temperature vrenja za pogonski tlak te isparava do željene koncentracije $\xi_2$ [16]. Ukoliko se u isparivač kontinuirano dovodi svježa i oduzima koncentrirana rastopina radi se o procesu neprekidnog isparavanja. Prvo se koristi u manjoj mjeri i prije svega kod manjih kapaciteta, dok se kod postrojenja većih kapaciteta uvijek radi o neprekidnom isparavanju.

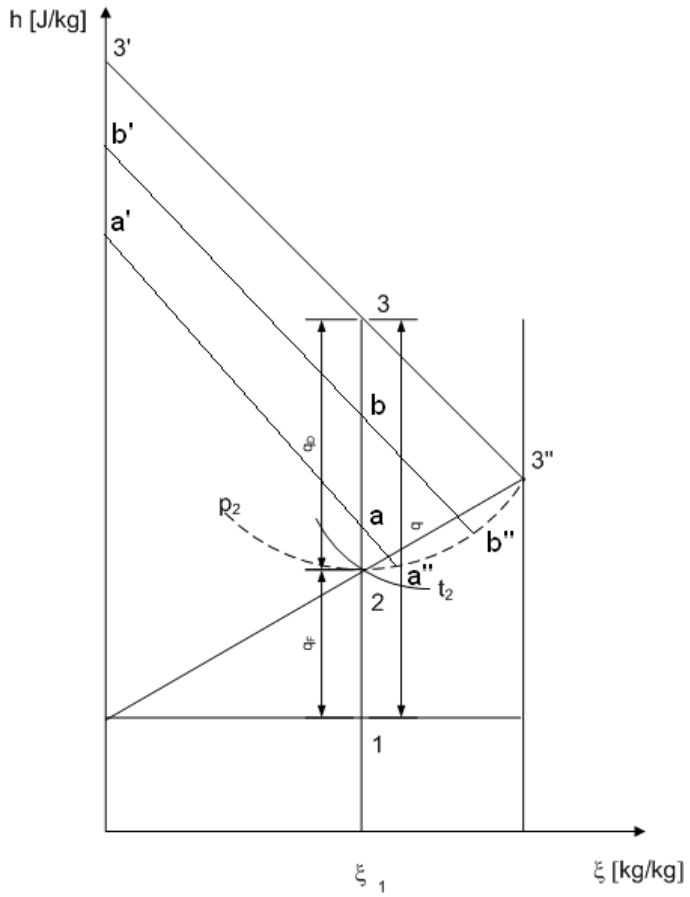
U morskoj je vodi otopljen veći broj soli, no uglavnom je to kuhinjska sol (NaCl) te se proces isparavanja može promatrati u dijagramu $h$-$\xi$ koji je prikazan na slici 3.12. Vodenoj otopini sastava $\xi_1$ i temperature $t_1$ dovodi se toplina. Točka vrenja 2 temperature $t_2$ koja odgovara radnom tlaku $p_2$ postiže se nakon što se 1 kg otopine dovede toplina $q_F$.

Daljnjim dovođenjem topline stanje se mijenja po liniji $\xi=\xi_1$=konst., pri čemu nastaje para sastava $\xi$=0 koja je u ravnoteži s bogatom otopinom čije stanje leži na krivulji $p_2$. Tako je para a' u ravnoteži s koncentriranom otopinom a", para b' u ravnoteži s bogatom otopinom b" te para 3' u ravnoteži s bogatom otopinom 3". Za 1 kg otopine potrebno je dovesti još $q_D$ topline kako bi se postiglo stanje 3 te je ukupno utrošena toplina dana izrazom

$$q_{ukup} = q_F + q_D \ , \tag{3.7.1}$$

ili zbog

$$q_F = h_2 - h_1 \tag{3.7.2}$$




**Slika 3.12.** Proces isparavanja u *h*-$\xi$ dijagramu [16]

i

$$q_D = h_3 - h_2 \tag{3.7.3}$$

vrijedi

$$q_{ukup} = h_3 - h_1 \ . \tag{3.7.4}$$

Udio pare i preostale bogate otopine odnosi se kao udaljenosti $\overline{33''} : \overline{3'3}$.

### 3.7.1. Diskontinuirano isparavanje

Najjednostavniji proces diskontinuiranog isparavanja u šaržama odgovarao bi procesu prikazanom u dijagramu na slici 3.12. Radi se o postupku tijekom kojega nastala para ostaje u kontaktu s bogatom otopinom sve do željenog sastava otopine $\xi_{3''}$.

Dovođenjem male količine topline $dq_a=h_a-h_2$ nastaje malo pare, a preostaloj se otopini sastav promijeni za vrijednost $d\xi_a=\xi_{a''}-\xi_1$. Nadalje, dovođenjem $dq_b=h_b-h_a$ preostaloj se otopini sastav promijeni za vrijednost $d\xi_b=\xi_{b''}-\xi_{a''}$ , te konačno dovođenjem $dq_3=h_3-h_b$ preostaloj se otopini sastav promijeni za vrijednost $d\xi 3_b=\xi_{3''}-\xi_{b''}$. Ukupno je potrebno dovesti topline kao prema izrazu 3.7.1 ili 3.7.4.

U pravilu se nastala para odvodi iz posude. Takvo vođenje procesa utječe na utrošak topline. Toplinski proces prikazan je dijagramom na slici 3.13. Umjesto jednog procesa, koji bi se sastojao od prethodnog zagrijavanja otopine stanja 1 do 2 te zagrijavanja isparavanja do stanja B[5] kojemu odgovara para entalpije $h_f$ sastava $\xi$=0 i bogata otopina sastava $\xi_{3''}=\xi_f$, vodilo bi se beskonačno diferencijalnih procesa. Nakon dovođenja diferencijalne topline $dq_1$ odvede se diferencijalni iznos nastale pare sastava $\xi$=0 te se promijeni sastav otopine za $d\xi$. Novoj se otopini ponovo dovodi diferencijalna toplina i odvodi nastala para te dolazi do nove promjene u sastavu.

Na dijagramu je prikazan konačan broj diferencijalnih procesa do konačnog sastava $\xi_{3''}=\xi_f$,. Kada se diferencijalne topline potrošenje u konačnom broju procesa preslikaju na pravac sastava $\xi_1$ uočava se manji utrošak topline nego što bi to bilo potrebno kod procesa bez odvođenja pare, odnosno vrijedi

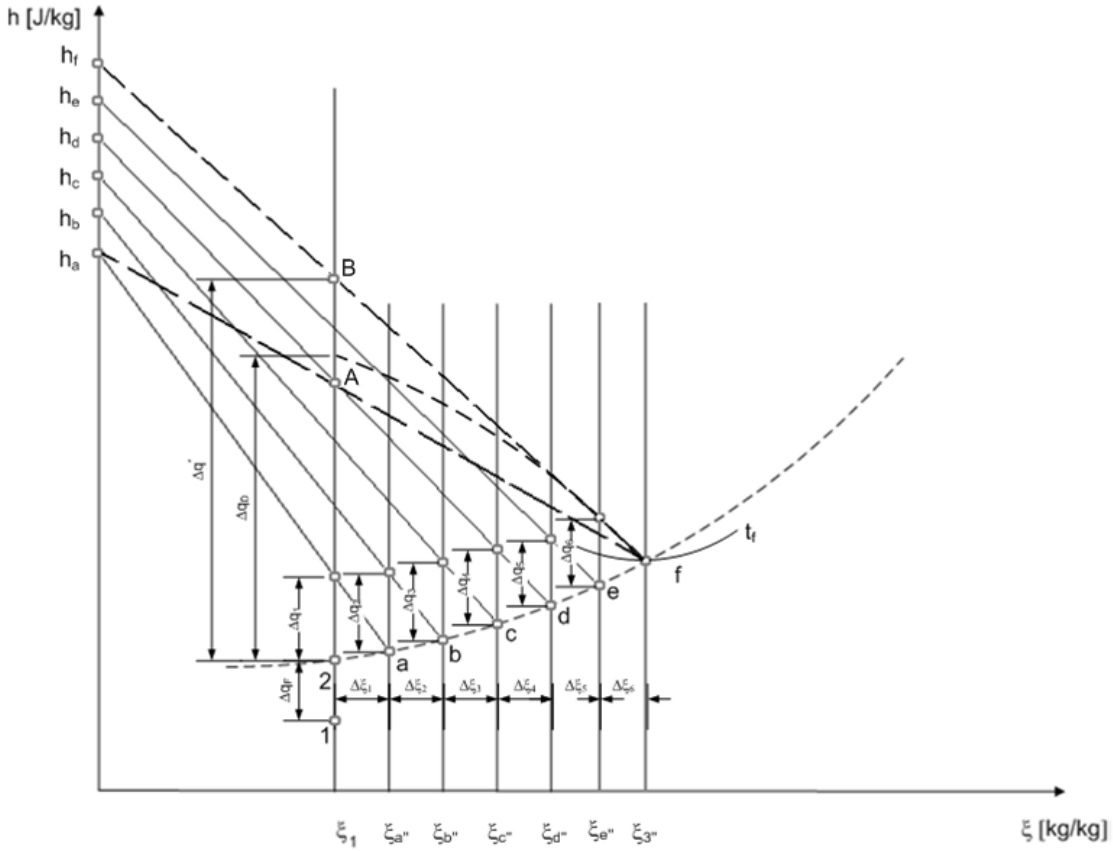
$$q^* > q_D \ . \tag{3.7.5}$$

[5] Što na slici 3.11 odgovara stanju 3.

Problem kod ovakvog načina vođenja procesa leži u činjenici da se količina otopine u posudi smanjuje te dolazi do smanjenja učinka izmjenjivača topline. Dio izmjenjivačke površine može ostati otkriven ili se na njoj mogu ubrzano stvarati naslage koje, u konačnici, predstavljaju toplinski otpor.

To se rješava nadoknađivanjem isparene vode s novom količinom otopine početnog stanja i to na način da se nadoknađuje isparena masa vode ili ispareni volumen. Za ovakav je proces potrebno utrošiti nešto više topline nego za proces bez nadoknađivanja isparene vode.

Mnogo je faktora koji su promjenjivi te je točan izračun konstrukcijskih karakteristika složen. Dovođenje topline nakon postizanja vrelišta odvija se pri promjenjivom temperaturnom razlikom uz pretpostavku konstantne temperature ogrjevnog medija, a znatno se mijenja koeficijent prijelaza topline sa strane rasoline.




**Slika 3.13.** Proces isparavanja u *h*-*ξ* dijagramu za slučaj odvođenja pare [16]

Kod isparivanja bez nadopune u posudu se uvodi ukupna količina rasoline te se posude izvode nesrazmjerno velike. U početku, kod nižih koncentracija, isparavaju veće količine vode, dok se pri završetku procesa bitnije mijenja koncentracija.

Ukoliko se proces vodi uz nadopunu, posuda je manja te se koncentracija u početku brzo mijenja, ali pri završetku procesa brzina promjene koncentracije opada zbog lošeg koeficijenta izmjene topline. Utrošak topline je veći zbog hlađenja posude uvođenjem hlade otopine. Ovaj se štetan utjecaj može smanjiti predgrijavanjem otopine za nadopunu nastalom parom. Treba imati na umu kako će se, uz potrebne temperaturne razlike, teško moći postići temperatura vrenja otopine.

### 3.7.2. Neprekidno isparavanje

Kako je već prije utvrđeno, dovodi li se u posudu kontinuirano svježa otopina i odvodi koncentrirana otopina, radi se o neprekidnom isparavanju. Ovo je jedini postupak koji se koristi u industrijskim postrojenjima većih kapaciteta. Postoji nekoliko načina nadopune:

- bez unutarnjeg optoka
- s unutarnjim optokom
- s vanjskim predgrijavanjem.

U prvom se slučaju radi o procesu gdje u isparivač uvedena rasolina struji samo jednom te joj se koncentracija promijeni kao prema dijagramu na slici 3.12. Iako nastali mjehuri pare struje u cijevima brže[6] od rasoline približno su u svakom presjeku cijevi u ravnoteži.

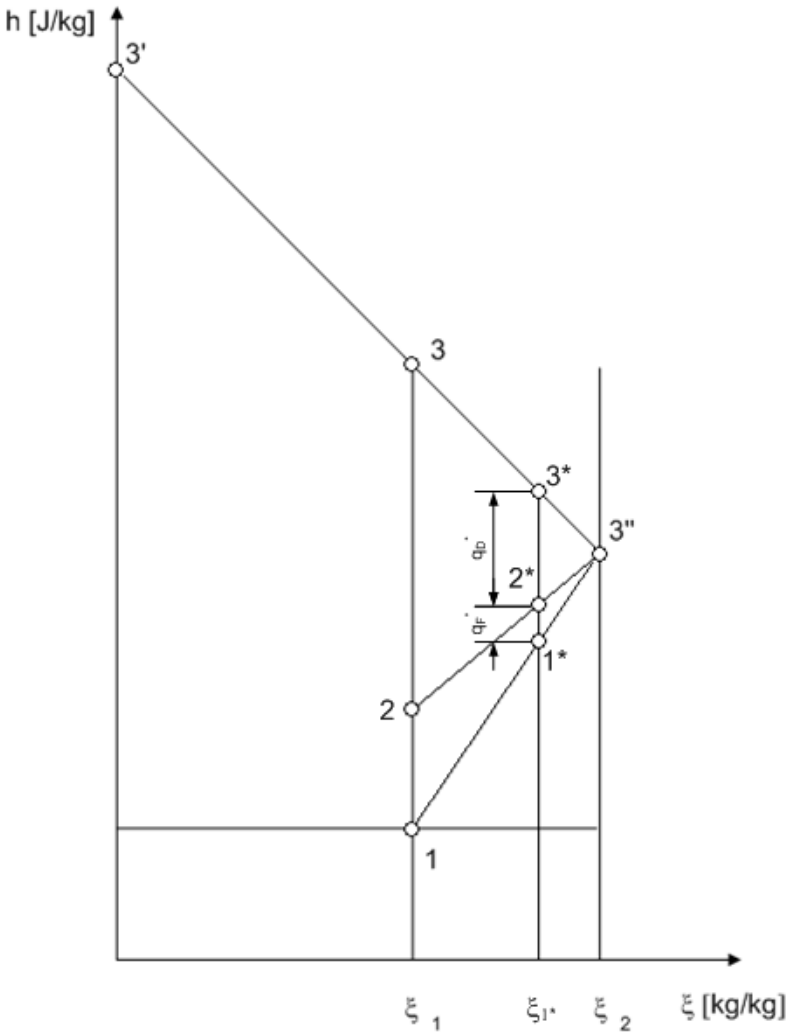
Kada u isparivaču postoji optok, odnosno svježa dovedena rasolina miješa se s, u pravilu, znatno većom količinom rasoline veće koncentracije koja kruži isparivačem, proces se mijenja prema slici 3.14.

Proces, umjesto po pravcu koncentracije $\xi_1$, ide po pravcu koncentracije $\xi_{1*}$, jer najprije dolazi do miješanja svježe i optočne rasoline. Uvođenjem 1 kg svježe rasoline stanja 1 u $n$ kg optočne rasoline stanja 3" nastaje stanje 1* koje leži na pravcu miješanja pri čemu vrijedi

$$\overline{1,1*} : \overline{1*3''} = n : 1 \ . \tag{3.7.6}$$

Nastala otopina stanja 1* najprije se zagrijava dovođenjem topline $q_{D*}$ do stanja 2*, a zatim isparava dovođenjem topline $q_{F*}$ do stanja 3* gdje u posudi nastaje para stanja 3' i bogata rasolina stanja 3". Uvođenje svježe rasoline u optočnu te odvođenje bogate rasoline može se izvesti na različite načine, ali kako nema principijelnih razlika, neće se obrazlagati.

[6] Zbog manje gustoće.




**Slika 3.14.** Proces isparavanja u *h*-*ξ* dijagramu za slučaj optoka rasoline [16]

Kod vanjskog predgrijavanja, prikazanog dijagramom sa slike 3.15, u isparivač se uvodi svježa rasolina početne koncentracije $\xi_1$ zagrijana do točke isparavanja 2 za što je utrošeno topline $q_F$. Predgrijavanje je izvršeno parom iz procesa. Rasolina stanja 2 miješa se u isparivaču s optočnom rasolinom stanja 3" te nastaje stanje 2* koje leži u području pare za radni tlak *p* te se razdvaja na paru stanja 2' i rasolinu stanja 2**. Nju se zatim isparuje do stanja 3** koje odgovara pari stanja 3' i rasolini stanja 3" za što je potrebno utrošiti $q_{D**}$ topline. Odnos toplina potrebnih za zagrijavanje i isparavanje je različit u odnosu na prethodne izvedbe, a prednost je u jeftinijoj izvedbi zagrijača u odnosu na isparivač.

### 3.7.3. Intenzitet isparavanja

Iz prethodnih je objašnjenja vidljivo kako tijekom procesa isparavanja dolazi do promjene sastava tekuće faze, tj. udjela otopljenih tvari u isparivaču. Do toga dolazi kod neprekidnog procesa kao i kod prekidnog, diskontuiranog procesa pa se potonji može smatrati samo kao jedan poseban slučaj prvoga.

U ovisnosti o intenzitetu isparivanja mijenja sa sastav bogate rasoline u isparivaču, o čemu ovisi kvaliteta proizvedenog destilata i kapacitet uređaja. Može se uzeti kako u nastaloj pari nema otopljenih tvari, no na konačnu kvalitetu destilata utječe odnošenje kapljica rasoline. Utjecaj odnošenja se povećava s povećanjem intenziteta isparivanja. Kapacitet se mijenja direktno, zbog promjene koeficijenata izmjene topline sa strane rasoline, i indirektno jer se zbog nastalog kamenca koji je periodički potrebno čistiti moraju izgubiti radni sati.

Intenzitet isparavanja može se promatrati kao odnos dviju veličina: u proces uvedene morske vode i dovedene količine topline. Stoga se, dakle, može i mijenjati promjenom tih dviju veličina. U većini slučajeva je dobava morske vode konstantna tijekom rada, a mijenja se količina dovedene topline.

S ciljem određivanja željenog intenziteta isparivanja odredit će se promjena slanosti rasoline u vremenu. Za razmatranje iste promatrat će se isparivač-posuda kao prema slici 3.16. Nakon prijelaznog razdoblja tijekom kojega dolazi do punjenja s morskom vodom u posudi se održava konstantna razina, tj. napunjena je konstantnom masom $M_o$. U posudu tijekom diferencijalong vremena ulazi masa morske vode $Md\tau$ sastava $\xi_o$, a iz nje izlazi $M_R d\tau$ bogate rasoline te $Dd\tau$ pare siromašne otopljnim tvarima te se može postaviti bilansa tvari prema izrazu dolje

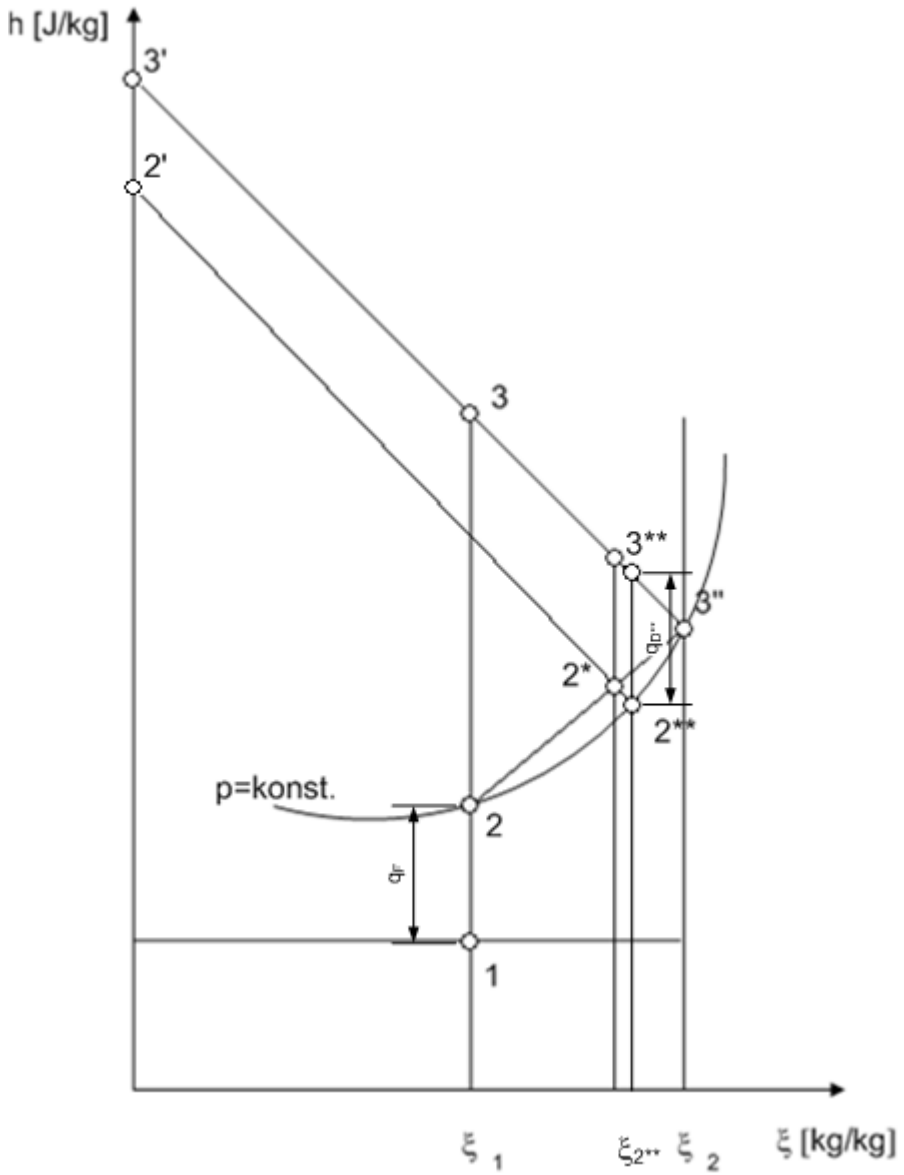
$$Md\tau = (M_R + D)d\tau \quad . \tag{3.7.7}$$

Količina nastale pare, tj. proizvedenog destilata, može se izraziti u postotku dovedene mase, dok rasolina predstavlja ostatak prema izrazima

$$D = kM \tag{3.7.8}$$

i

$$M_R = (1-k)M \quad . \tag{3.7.9}$$




**Slika 3.15.** Proces isparavanja u *h*-*ξ* dijagramu za slučaj predgrijavanja svježe rasoline [16]

Dijeljenjem izraza 3.7.8 s 3.7.9 te uvrštenjem

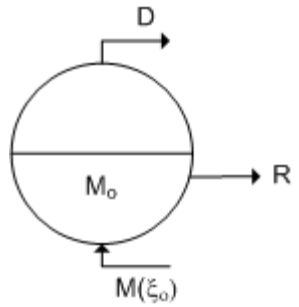
$$\varepsilon = \frac{1-k}{k} \tag{3.7.10}$$

slijedi

$$M_R = \varepsilon D \tag{3.7.11}$$

pa se izraz 3.7.7 može napisati u obliku

$$Md\tau = (1+\varepsilon)Dd\tau \quad . \tag{3.7.12}$$




**Slika 3.16.** Isparivač s ulazom i izlazom masa

Izraz 3.7.12 predstavlja bilancu ukupne mase tvari u posudi isparivača. Treba odrediti bilancu soli, tj. u vodi otopljenih krutih tvari. U prethodnim poglavljima je koncentracija otopljenih tvari označena s $\xi$ pa će se isti način zadržati. Kako je označeno na slici morska voda je na ulazu u posudu sastava $\xi_o$, što ovisi isključivo o okolnoj morskoj vodi. Za određeno područje u kojem je smješten stacionarni uređaj ili u nekom vremenu tijekom kojega brod plovi nekim širim područjem, može se s dovoljnom točnošću uzeti kako je sastav morske vode konstantan.

S morskom vodom u posudu ulazi količina soli prema izrazu

$$\xi_o(1+\varepsilon)Dd\tau \quad , \tag{3.7.13}$$

tijekom diferencijalnog vremena $d\tau$ sastav vode u posudi promijeni se za $d\xi$, odnosno

$$M_o d\xi \quad , \tag{3.7.14}$$

a ukoliko se pretpostavi da je tijekom tog diferencijalnog vremena promjena sastava linearna, tj. na početku je sastav $\xi$ i raste do $\xi+d\xi$ te je srednja slanost

$$\frac{\xi+(\xi+d\xi)}{2} = \xi + \frac{d\xi}{2} \tag{3.7.15}$$

što, uzimajući u obzir 3.7.11, daje količinu soli koja se tijekom diferencijalnog vremena ispušta iz posude s rasolinom

$$\varepsilon D\left(\xi+\frac{d\xi}{2}\right)d\tau \tag{3.7.16}$$

te konačno slijedi izraz za bilansu otopljenih tvari

$$\xi_o(1+\varepsilon)Dd\tau = M_o d\xi + \varepsilon D\left(\xi+\frac{d\xi}{2}\right)d\tau \ . \tag{3.7.17}$$

Kako bi se izvršila separacija varijabli i uz zanemarivanje drugog člana u zagradi s desne strane jednadžbe koji je manjeg reda veličine izraz 3.7.17 postaje

$$M_o d\xi = \xi_o(1+\varepsilon)Dd\tau - \varepsilon D\xi d\tau \tag{3.7.18}$$

što dalje daje

$$M_o d\xi = \left[\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi\right]Dd\tau \tag{3.7.19}$$

te konačno

$$d\tau = \frac{M_o}{D}\frac{1}{\left[\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi\right]}d\xi \ . \tag{3.7.20}$$

Izraz 3.7.20 je potrebno integrirati za vrijeme od 0 do $\tau$ tijekom kojega se sastav promijeni od $\xi_1$ do $\xi$, što uz pretpostavku da se tijekom tog diferencijalnog vremena ne mijenja količina proizvedene pare daje

$$\int_0^{\tau} d\tau = \frac{M_o}{D}\int_{\xi_1}^{\xi}\frac{1}{\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi}d\xi \ . \tag{3.7.21}$$

Uvođenjem supstitucije

$$\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi = x \tag{3.7.22}$$

te

$$d\xi = -\frac{dx}{\varepsilon} \tag{3.7.23}$$

pokazuje se da vrijedi

$$\tau = -\frac{M_o}{\varepsilon D}\int_{x_1}^{x}\frac{dx}{x} \tag{3.7.24}$$

te da je

$$\tau = -\frac{M_o}{\varepsilon D}\left\{\ln\left[\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi\right]-\ln\left[\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi_1\right]\right\} \ . \tag{3.7.25}$$

Gornji se izraz može srediti te postaje

$$\tau = \frac{M_o}{\varepsilon D}\ln\left[\frac{\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi_1}{\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi}\right] \ , \tag{3.7.26}$$

a eksponencijalni oblik jednadžbe 3.7.20 glasi

$$\frac{\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi_1}{\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi} = e^{\tau\frac{\varepsilon D}{M_o}} \ . \tag{3.7.27}$$

Sređivanje gornjeg izraza daje

$$\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi_1 = \left[\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi\right]e^{\tau\frac{\varepsilon D}{M_o}} \ , \tag{3.7.28}$$

odnosno

$$\left[\xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi_1\right]e^{-\tau\frac{\varepsilon D}{M_o}} = \xi_o(1+\varepsilon)-\varepsilon\xi \ . \tag{3.7.29}$$

Iz gornjeg se izraza može dokazati ovisnost koncentracije o vremenu pa vrijedi

$$\xi = \xi_o\frac{(1+\varepsilon)}{\varepsilon}-\left[\xi_o\frac{(1+\varepsilon)}{\varepsilon}-\xi_1\right]e^{-\tau\frac{\varepsilon D}{M_o}} \ . \tag{3.7.30}$$

U početku rada stanje je jednako stanju okoline te vrijedi

$$\xi_1 = \xi_o \tag{3.7.31}$$

pa izraz 3.7.30 postaje

$$\xi = \xi_o \frac{(1+\varepsilon)}{\varepsilon} - \left[ \xi_o \frac{(1+\varepsilon)}{\varepsilon} - \xi_o \right] e^{-\tau \frac{\varepsilon D}{M_o}} \quad . \tag{3.7.32}$$

Izraz 3.7.26 može se dalje srediti te postaje

$$\xi = \frac{\xi_o}{\varepsilon} \left( 1 + \varepsilon - e^{-\tau \frac{\varepsilon D}{M_o}} \right) \quad . \tag{3.7.33}$$

Iz izraza 3.7.30 i 3.7.33 uočljiva je ovisnost koncentracije soli u isparivačkoj posudi o početnoj slanosti $\xi_o$, odnosu isparene vode i odvedene rasoline $\varepsilon$, odnosu isparene vodu i ukupne mase vode u posudi $D/M_o$, te vremenu $\tau$.

Gornji se izrazi mogu primijeniti za prethodno opisane procese isparavanja pa će za slučaj prekidnog isparavanja uz ispuštanje pare izraz 3.7.19, uzimajući da je $\varepsilon$=0, postati

$$M_o d\xi = \xi_o D d\tau \quad . \tag{3.7.34}$$

Integracijom u granicama od $\xi_1$ do $\xi$ te od 0 do $\tau$ slijedi

$$M_o(\xi - \xi_1) = \xi_o D \tau \quad , \tag{3.7.35}$$

te konačno eksplicitna ovisnost koncentracije o vremenu isparivanja

$$\xi = \xi_1 + \xi_o \frac{D}{M_o} \tau \quad . \tag{3.7.36}$$

Izraz 3.7.36 pokazuje linearnu ovisnost koncentracije soli o vremenu isparavanja, no u stvarnom procesu zbog promjena koeficijenta prijelaza topline sa strane rasoline, što je već prije utvrđeno, nije tako. Ipak, ukoliko bi postojao sustav regulacije dovedene topline koji bi povećavao količinu iste u skladu sa smanjenjem koeficijenta prijelaza topline, proces bi se mogao voditi na taj način. Neovisno o iskazanoj nepreciznosti, izraz

je koristan jer pokazuje da kod manjih isparivača slanost raste brže, a kod većih sporije. I u ovome slučaju vrijedi stav već opisan za izraz 3.7.30 da je u početku rada $\xi_1=\xi_o$, te se izraz 3.7.36 pojednostavljuje u

$$\xi = \xi_o\left(1+\frac{D}{M_o}\tau\right) . \tag{3.7.37}$$

Kod prekidnog isparivanja uz odvođenje pare proces se može voditi tako da se u isparivaču postigne najviša dopuštena koncentracija, nakon čega je potrebno izvršiti protiskivanje posude. Protiskivanje se vrši potpunim pražnjenjem i ponovnim punjenjem. Vrijeme potrebno kako bi se od početne koncentracije okolne morske vode postigla najviša dopuštena koncentracija slijedi iz izraza 3.7.37 uvrštenjem za $\xi=\xi_{dop}$

$$\xi_{dop} = \xi_o\left(1+\frac{D}{M_o}\tau\Big|_{\xi_{dop}}\right) \tag{3.7.38}$$

iz čega slijedi

$$\tau\Big|_{\xi_{dop}} = \frac{\xi_{dop}-\xi_o}{\xi_o}\frac{M_o}{D} . \tag{3.7.39}$$

Proces se vodi na način da se odredi broj protiskivanja u nekom dužem vremenu (npr. 1 h ili 24 h). Broj protiskivanja je dan izrazom

$$N = \frac{T_{uk}}{\tau\Big|_{\xi_{dop}}} , \tag{3.7.40}$$

gdje je $T_{uk}$ ukupno vrijeme. Uvrštavanjem 3.7.39 u 3.7.40 te sređivanjem dobije se izraz za kapacitet:

$$D = \frac{N}{T_{uk}}M_o\frac{\xi_{dop}-\xi_o}{\xi_o} . \tag{3.7.41}$$

Stvarni kapacitet $D_{stv}$ mora biti manji budući da se ukupno vrijeme ne može uzeti prema izrazu

$$T_{uk} = N\tau\Big|_{\xi_{dop}} , \tag{3.7.42}$$

koji slijedi iz 3.7.40. Potrebno je uzeti u obzir vrijeme za istiskivanje rasoline, ponovno punjenje isparivača te zagrijavanje punjenja do temperature isparavanja. Dakle, vrijeme cijelog ciklusa sastojat će se od vremena potrebnog za punjenje isparivača, za zagrijavanje punjenja, za isparavanje do dopuštene koncentracije te za istiskivanje prema izrazu

$$\tau_{ukup} = \tau_{punj} + \tau_{zag} + \tau\big|_{\xi_{dop}} + \tau_{istis} \ . \tag{3.7.43}$$

Ukupno vrijeme uzimajući u obzir stvarno vrijeme trajanja cijelog ciklusa i mogući broj istih, dano je izrazom

$$T_{uk} = N_{stv}\tau_{ukup} \ . \tag{3.7.44}$$

Budući je $\tau_{ukup}>\tau|_{\xi dop}$ mora vrijediti

$$N_{stv}<N \tag{3.7.45}$$

pa je i stvarni kapacitet

$$D_{stv} = \frac{N_{stv}}{T_{uk}} M_o \frac{\xi_{dop} - \xi_o}{\xi_o} \tag{3.7.46}$$

manji od teoretskog danog izrazom 3.7.41.

Proces neprekidnog punjenja i isparivanja je jedini koji se primjenjuje u uređajima većih kapaciteta. Može se činiti kako je u ovom slučaju nepotrebno određivati koncentraciju soli, no poznavanje koncentracije može se iskoristiti za upravljanje procesom na ekonomski opravdan način ili dijagnostiku kvarova.

U odnosu na prekidno isparavanje gdje se isparivanje vrši sve dok se u posudi ne postigne koncentracija $\xi_{dop}$, sada će se održavati neka željena koncentracija za koju vrijedi

$$\xi_{želj} \le \xi_{dop} \ . \tag{3.7.47}$$

Kada se u izraz 3.7.19 uvrsti $\xi=\xi_{želj}$ i $d\xi=0$ slijedi

$$\xi_o(1+\varepsilon) = \varepsilon\xi_{želj} \tag{3.7.48}$$

pa je dalje

$$\varepsilon = \frac{\xi_o}{\xi_{želj} - \xi_o} \quad . \tag{3.7.49}$$

Gornji se izraz, uz 3.7.7 i 3.7.11, može primijeniti za određivanje kapaciteta napojne pumpe morske vode te potrebne količine odvedene rasoline za željenu količinu destilata.

Odnos energetskih efikasnosti neprekidnog $e_n$ i prekidnog isparavanja $e_p$ prema 2.1.4 je

$$\frac{e_n}{e_p} = \frac{E_{ukup,n} D_p}{E_{ukup,p} D_n} \quad , \tag{3.7.50}$$

a ukoliko se to svede na jednaku količinu destilata, tj. ako vrijedi $D_n$=$D_p$, izraz se pojednostavljuje te postaje

$$\frac{e_n}{e_p} = \frac{E_{ukup,n}}{E_{ukup,p}} \quad . \tag{3.7.51}$$

U drugom poglavlju je utvrđeno kako se ukupno utrošena energija kod ovakvog tipa uređaja sastoji od električne energije potrebne za rad pumpi te toplinske energije za isparavanje. Cjelokupni proces neprekidnog isparivanja može se podijeliti u tri dijela. To su:

- upućivanje, tijekom kojega treba postići radni tlak i temperatura u posudi te, kada se sakupi dovoljno destilata, uputiti pumpu destilaat;

- normalan rad uređaja, koji se može smatrati kao stacionaran proces, jer su vanjski utjecaji zbog malih promjena temperatura ili tlaka nebitni;

- zaustavljanje rada, tijekom kojega se zaustavljaju pumpe i ispušta zagrijana rasolina iz posude.

Postupak upućivanja uređaja koji vrši neprekidno isparivanje već je objašnjen, a u skladu s njime se energija troši na:

- rad dobavne pumpe, a koja ujedno daje i pogonski fluid ejektorima prema

$$P_{Edobp} = \frac{V_{ukup} \Delta p}{\eta_{EMp}} \quad , \tag{3.7.52}$$

gdje je $V_{ukup}$[m$^3$/s] volumenski kapacitet pumpe prema

$$V_{ukup}=V_{ispar}+V_{ej,ras}+V_{ej,potl}^{7}\ , \tag{3.7.53}$$

$\Delta p$[Pa] pad tlaka kroz cjevovod, a $\eta_{EMp}$ iskoristivost elektromotora pumpe;

- rad pumpe rashladne vode kondenzatora[8] prema

$$P_{Ekondp}=\frac{V\Delta p}{\eta_{EMp}}\ , \tag{3.7.54}$$

gdje je $V$ [m$^3$/s] volumenski kapacitet pumpe, $\Delta p$[Pa] pad tlaka kroz cjevovod, a $\eta_{EMp}$ iskoristivost elektromotora pumpe;

- zagrijavanje morske vode do točke isparavanja prema

$$Q_{zagr}=Mc_{Sw}\left(t_{isp}-t_o\right)\ , \tag{3.7.55}$$

gdje je $t_o$[°C] ulazna temperatura morkse vode[9], $t_{isp}$[°C] temperatura isparavanja koja odgovara tlaku u posudi isparivača, $c_{Sw}$[J/kgK] specifični toplinski kapacitet morske vode te $M$[kg/s] maseni dotok morske vode u isparivač.

Ukupni utrošak energije $E_{upu}$[kWh] tijekom postupka upućivanja koje traje $\tau_{upu}$[h] dano je izrazom

$$E_{upu}=\tfrac{1}{1000}(P_{Edobp}+P_{Ekondp}+Q_{zagr})\tau_{upu}\ . \tag{3.7.56}$$

Nakon što se proces ustali te sakupi dovoljno destilata uključuje se pumpa destilata koja troši energiju prema izrazu

$$P_{Edestp}=\frac{V\Delta p}{\eta_{EMp}}\ , \tag{3.7.57}$$

gdje je $V$ [m$^3$/s] volumenski kapacitet pumpe, $\Delta p$[Pa] pad tlaka kroz cjevovod, a $\eta_{EMp}$ iskoristivost elektromotora pumpe. Ovaj iznos treba

[7] $V_{ej,ras}$ pogonski fluid ejektora rasoline, a $V_{ej,potl}$ pogonski fluid ejektora koji održava podtlak u posudi.
[8] U drugom poglavlju je utvrđeno kako je rješenje sa zasebnom pumpom bolje od rješenja gdje se potreban protok morske vode postiže glavnom pumpom rashladne morske vode.
[9] Jednaka temperaturi okolne morske vode ili viša, ukoliko se vrši predgrijavanje.

pridodati u 3.7.56. Također, treba uzeti u obzir utrošak topline za isparavanje

$$Q_{ispar} = D\dot{x}r \ , \tag{3.7.58}$$

gdje je $D$ [kg/s] proizvodnja destilata, $\dot{x}$ udio pare prema 3.1.18 i $r$ [J/kg] toplina isparavanja morske vode pa ukupno utrošena energija pri normalnom radu koji traje $\tau_{rad}$[h] postaje

$$E_{rad} = \tfrac{1}{1000}(P_{Edobp} + P_{Ekondp} + Q_{zagr} + Q_{ispar} + P_{Edestp})\tau_{rad} \ . \tag{3.7.59}$$

Treba istaknuti da kod nekih brodskih destilacijskih uređaja, kao i kod nekih stacionarnih, dio energije utrošen[10] za zagrijavanje (3.7.55) i isparavanje (3.7.58) gotovo u potpunosti otpada, jer se koristi otpadna energija drugih procesa.

Kada se radi o tipičnom brodskom uređaju ogrjevna se toplina dovodi visokotemeperaturnom rashladnom vodom motora i besplatna je, jer je vodu motora potrebno hladiti. Povećani utrošak električne energije za rad pumpe visokotemperaturne rashladne vode koja umjesto iznosa danog izrazom

$$P_{EVTp} = \frac{V\Delta p}{\eta_{EMp}} \ , \tag{3.7.60}$$

zbog pada tlaka kroz isparivač troši

$$P_{EVTp} = \frac{V\left(\Delta p + \Delta p_{ispar}\right)}{\eta_{EMp}} \ , \tag{3.7.61}$$

može se kompenzirati smanjenim utroškom električne energije za rad pumpe rashladne morske vode.

Prethodni stav ovisi o izvedbi rashladnog sustava broda, no uvijek će se toplina koju na sebe, hladeći košuljice i glave motora, preuzme visokotemperaturna voda $Q_{VT}$ [W] morati predati morskoj vodi. Ukoliko se zanemare topline koje morska voda preuzima u nekih drugim rashladnicima (kondenzatorima) tada je snaga elektromotora pumpe morske vode dana izrazom

[10] Pod pojmom utrošen podrazumijeva se da proizvodnja te topline košta, što znači da utječe na cijenu proizvedene vode.

$$P_{EMVp} = \frac{Q_{VT}\Delta p}{\rho c \Delta t \eta_{EMp}} \ , \tag{3.7.62}$$

pri čemu je $\rho$ [kg/m$^3$] gustoća morske vode, $c$ [J/kgK] specifični toplinski kapacitet iste, a $\Delta t$ [°C] povećanje temperature morske vode kroz rashladnik[11].

Ako se dio topline koju preuzme visokotemperaturna voda iskorištava za zagrijavanje i isparavanje morske vode u destilacijskom uređaju tada iz izraza

$$Q_{VT} = Q_{zagr} + Q_{ispar} + Q_{ost} \ , \tag{3.7.63}$$

otpadaju prva dva člana desne strane jednadžbe. U tom slučaju morska voda mora preuzeti samo $Q_{ost}$ za što je potrebna manja količina vode tj. pumpa manjeg kapaciteta pa je i snaga elektromotora, dana izrazom

$$P_{EMVp} = \frac{Q_{ost}\Delta p}{\rho c \Delta t \eta_{EMp}} \ , \tag{3.7.64}$$

manja.

Iz izraza 3.7.62 do 3.7.64 jasno je kako treba težiti da $Q_{ost}$ bude što manji, tj. da se što veći dio topline iskoristi za destilacijski proces. To se ipak, ne smije raditi nekritički[12] pa je time važnost odabira uređaja veća.

Izraz 3.7.49 uz primjenu 3.7.7 i 3.7.11 daje sljedeću ovisnost

$$\xi_{želj} - \xi_0 = \frac{\xi_0}{\frac{M}{D} - 1} \ , \tag{3.7.65}$$

gdje $\xi_{želj}$ predstavlja gornju vrijednost koncentracije soli u rasolini iznad koje ne bi trebalo ići zbog eksploatacijskih razloga. S većom koncentracijom soli u rasolini brži je nastanak kamenca na stijenkama isparivača te se prema izrazima 3.7.43 do 3.7.46 smanjuje stvarni kapacitet uređaja. Uvažavajući tu činjenicu, kao i činjenicu kako će se zbog ovakvog načina rada trošiti više kemikalija za skidanje kamenca te veći broj radnih sati operatera, cijena proizvedene vode će rasti. Iz izraza

[11] Uobičajeno je od 10 do 20°C.

[12] U prethodnim je poglavljima objašnjeno kako veliki intenzitet isparavanja dovodi do nastanka kamenca, dugoročno smanjenog kapaciteta i povećanja slanosti proizvedenog destilata.

3.7.65 očito je kako za veći udio proizvedene pare raste vrijednost koncentracije soli u rasolini.

Umjesto gornjeg izraza pogodno je prikazati eksplicitnu ovisnost kapaciteta uređaja o napajanju uređaja morskom vodom te gornjoj (željenoj) koncentraciji soli u rasolini

$$D = M \frac{\xi_{želj} - \xi_0}{\xi_{želj}} \ . \tag{3.7.66}$$

Preuredi li se gornji izraz u oblik *M=f(D)* i uvrsti u izraz 3.7.55 slijedi količina topline potrebna za zagrijavanje dobavne morske vode u ovisnosti o željenoj količini destilata

$$Q_{zagr} = D \frac{\xi_{želj}}{\xi_{želj} - \xi_0} c_{Sw} \left( t_{isp} - t_o \right) \ . \tag{3.7.67}$$

Nadalje, izraz 3.7.63 može se napisati u obliku

$$Q_{VT} = Q_{iskor} + Q_{ost} \ , \tag{3.7.68}$$

gdje prvi član s desne strane jednadžbe predstavlja ukupno iskorištenu toplinu potrebnu za zagrijavnje *M*[kg/s] napojne morske vode i proizvodnju *D*[kg/s] pare, što dalje prema izrazima 3.7.67 i 3.7.57, uzimajući u obzir $x \cong k$ te da iz 3.7.10 slijedi

$$k = \frac{1}{1+\varepsilon} \ , \tag{3.7.69}$$

daje konačno

$$D = \frac{Q_{iskor}}{\frac{\xi_{želj}}{\xi_{želj} - \xi_0} c_{Sw} \left( t_{isp} - t_o \right) + \frac{1}{1+\varepsilon} r} \ . \tag{3.7.70}$$

Dakle, količina proizvedenog destilata ovisit će, prema izrazu 3.7.70:

- o količini dovedene topline, tj. iskorištene otpadne topline VT vode motora;
- o početnom stanju morske vode, $t_o$ i $\xi_o$;
- o svojstvima morske vode $c_{Sw}$, $r$ i $t_{isp}$, koja ovise o tlaku i temperaturi u posudi isparivača;
- o željenoj koncentraciji soli u ispuštenoj rasolini $\xi_{želj}$;

- o odnosu isparene vode i ispuštene rasoline $\varepsilon$[13].

Prema shemi danoj na slici 3.1 količina ogrjevne VT vode koja se uvodi u isparivač ovisi o položaju prigušnog mimovodnog ventila ugrađenog na spoju ulazne i izlazne cijevi. Analiza odnosa ukupno iskoristive topline sadržane u VT vodi motora, kapaciteta uređaja i položaja mimovodnog ventila može se izvršiti samo za poznate parametre plovila. Ipak, mogle bi se usvojiti neke pretpostavke:

- uzima se količina topline sadržane u VT vodi motora, ne pri maksimalnoj trajnoj snazi ili čak maksimalnoj kratkotrajnoj snazi, već pri opterećenju s kojim će motor raditi najviše vremena[14];
- kapacitet destilacijskog postrojenja trebao bi biti zadovoljavajući s tom količinom dovedene topline pa čak i malo predimenzioniran, kako bi se mogla nadoknaditi količina izgubljena tijekom boravka u luci, tijekom plovidbe obalnim vodama ili tijekom održavanja;
- odnos stvarno dovedene topline i maksimalno moguće linearno je ovisan o položaju mimovodnog ventila te će se s potpuno zatvorenim mimovodnim ventilom dovoditi maksimalna toplina, a s potpuno otvorenim će dovedena toplina biti minimalna.

Početna stanja, slanost i temperatura morske vode ovise o vanjskim uvjetima, ali temperatura može ovisiti i o izvedbi postrojenja jer može postojati predgrijavanje morske vode. Numerički modeli toplinskih svojstava morske vode dani su u poglavlju 3.5. Posebnu pažnju treba posvetiti utjecaju $t_{isp}$ jer se bitno mijenja s tlakom u posudi isparivača. Utjecaj eksploatacije, tj. vođenja procesa očituje se u $\xi_{želj}$ i $\varepsilon$.

[13] U izrazu 3.7.64 umjesto odnosa danog relacijom 3.7.63 mogla se ostaviti vrijednost $k$, no ovo je učinjeno zbog povezanosti s nekim prethodnim izrazima i njihovim grafičkim interpretacijama danim u sljedećem poglavlju.

[14] To naravno ovisi o projektantu i odgovornim osobama na brodu i brodarskoj kompaniji, ali uobičajeno je 80%-tno opterećenje.

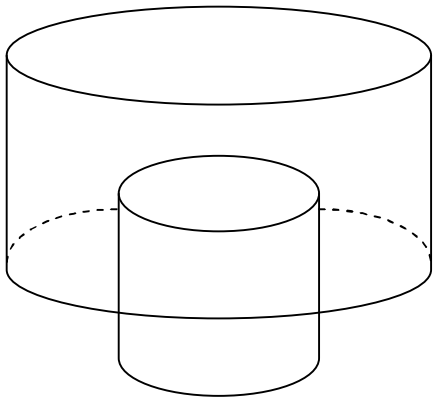
# 4. NUMERIČKO RJEŠENJE PROBLEMA

Simulacija startanja i rada uređaja izvest će se pomoću programskog jezika Fortran. Izgradnja programa s potrebnim potprogramima slijedi uobičajeni postupak startanja uređaja:

1. Hermetičko zatvaranje posude, odnosno zatvaranje odzračnog ventila te ventila za ispuštanje rasoline;
2. Otvaranje zajedničkog ventila na izlaznoj strani ejektora za ispuštanje sadržaja u more;
3. Startanje pumpe radne morske vode ejektora i dobave morske vode isparivaču;
4. Kada se postigne zahtijevani (npr. 70%-tni) vakuum u posudi otvaraju se zaporni ventili ogrjevnog medija (visokotemperaturne slatke rashladne vode motora i zaporni ventili rashladnog medija (morske vode) kondenzatora te se podešavaju njihovi protoci;
5. Kada se postigne dovoljna razina kondenzata u tavi za sakupljanje uključuje se pumpa destilata;
6. Ukoliko je udio otopljenih soli u destilatu manji od podešene granice vodi ga se u skladišni tank destilirane vode, a ukoliko je viši vraća ga se u posudu te ga ejektor izbacuje u more.

## 4.1. Dimenzije modelirane posude isparivača

Vanjski plašt posude generatora slatke vode dobijen je kao prodor dvaju cilindara različitih promjera, kako to prikazuje slika 4.1. Izabrani model neznatno odstupa od uobičajene izvedbe.



**Slika 4.1.** Geometrija posude

U donjem cilindru smještene su vertikalne cijevi isparivača, oko kojih dvoprolazno cirkulira ogrjevni fluid. Po sredini posude je dovod morske vode. Neispareni dio moske vode – rasolina, slijeva se u 'donji prsten' većeg cilindra.

Rasolinu siše ejektor rasoline. Iz gornjeg dijela većeg cilindra usis ima ejektor zraka. U modelu će se koristiti cilindri sljedećih dimenzija danih u tablici 4.1.

**Tablica 4.1.** Dimenzije posude.

| | |
|---|---|
| Unutarnji promjer manjeg cilindra $D_1$ | 0,5 m |
| Unutarnji promjer većeg cilindra $D_2$ | 1 m |
| Visina manjeg cilindra $H_1$ | 0,5 m |
| Visina 'donjeg prstena' $H_2$ | 0,1 m |
| Visina gornjeg dijela većeg cilindra $H_3$ | 0,7 m |

## 4.2. Potprogrami za izračunavanje fizikalnih svojstava morske vode

Potrebno je odrediti gustoću, kinematički viskozitet, toplinu isparavanja, koeficijent toplinske vodljivosti, specifični toplinski kapacitet te povećanje temperature zasićenja pri nekom tlaku u odnosu na slatku vodu[1].

U potprogramu za određivanje gustoće morske vode koristi se jednadžba [13] koja je dobro usklađena s izmjerenim vrijednostima. Na isti su način izrađeni potprogrami za izračunavanje topline isparavanja, koeficijenta toplinske vodljivosti te specifičnog toplinskog kapaciteta.

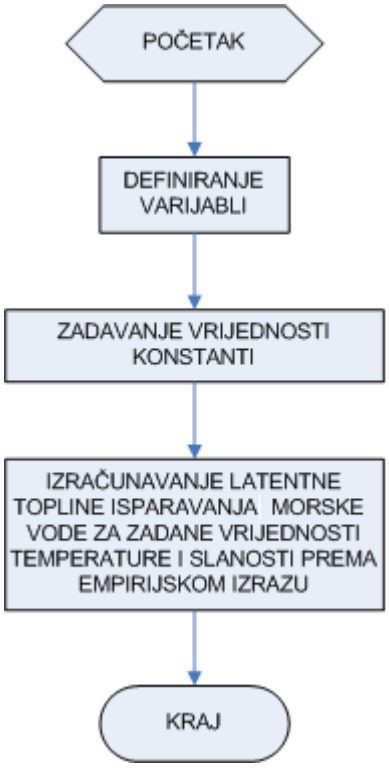
Kinematički se viskozitet izračunava na osnovi izračunatog dinamičkog viskoziteta. Dinamički viskozitet morske vode pri nekoj temperaturi određuje se, također prema empirijskoj jednadžbi, usporedbom s referentnim dinamičkim viskozitetom pri 20°C.

Blok dijagrami jednostavnih potprograma koji izračunavaju navedena fizikalna svojstva morske vode za zadanu temperaturu i slanost prikazani su na slikama 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 i 4.6.

Povećanje temperature zasićenja pri nekom tlaku u odnosu na slatku vodu izračunava se metodom interpolacije iz učitanih tabličnih vrijednosti [13][2]. Blok dijagram potprograma prikazan je na slici 4.7.

[1] Engl. boiling point elevation.
[2] U radu je korišten samo dio izvorne tablice, u skladu s očekivanim područjem temperatura i gustoća morske vode.

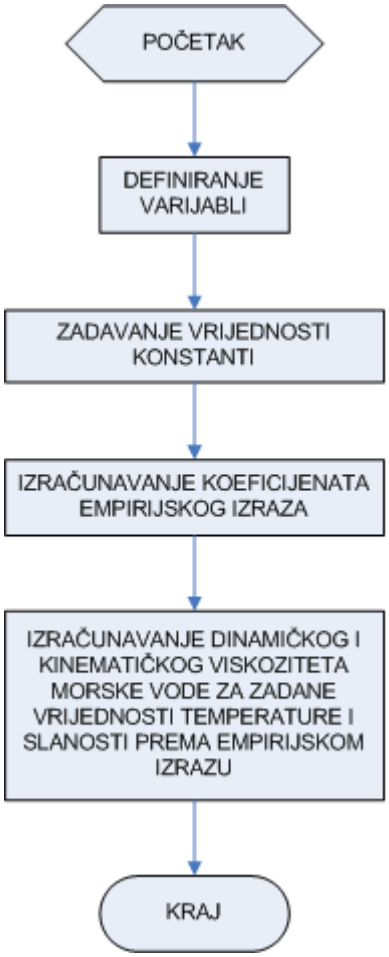
**Slika 4.2.** Blok dijagram potprograma za određivanje gustoće morske vode



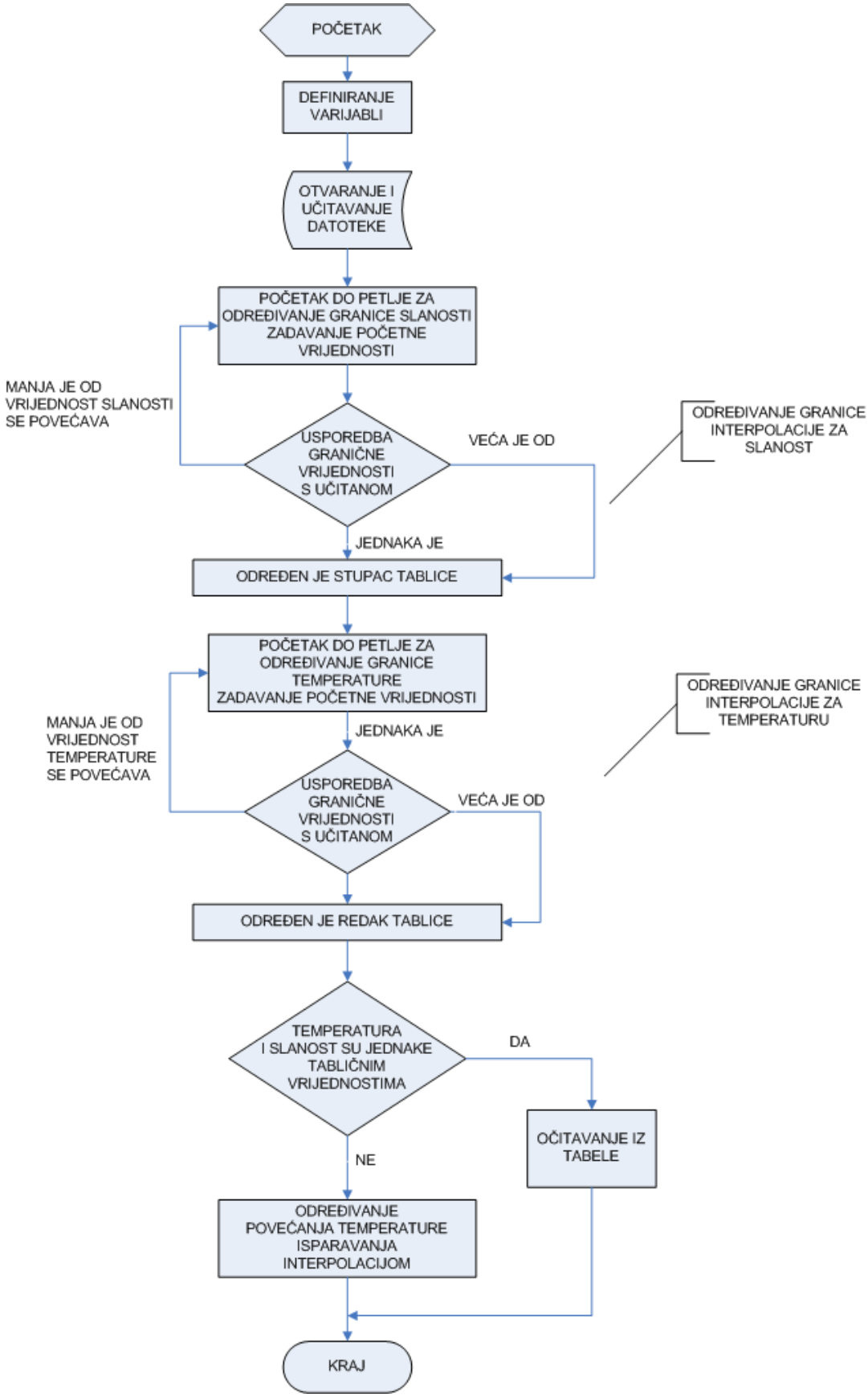

**Slika 4.3.** Blok dijagram potprograma za određivanje latentne topline isparivanja morske vode

**Slika 4.4.** Blok dijagram potprograma za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti morske vode

**Slika 4.5.** Blok dijagram potprograma za određivanje specifičnog toplinskog kapaciteta morske vode




**Slika 4.6.** Blok dijagram potprograma za određivanje dinamičkog i kinematičkog viskoziteta morske vode



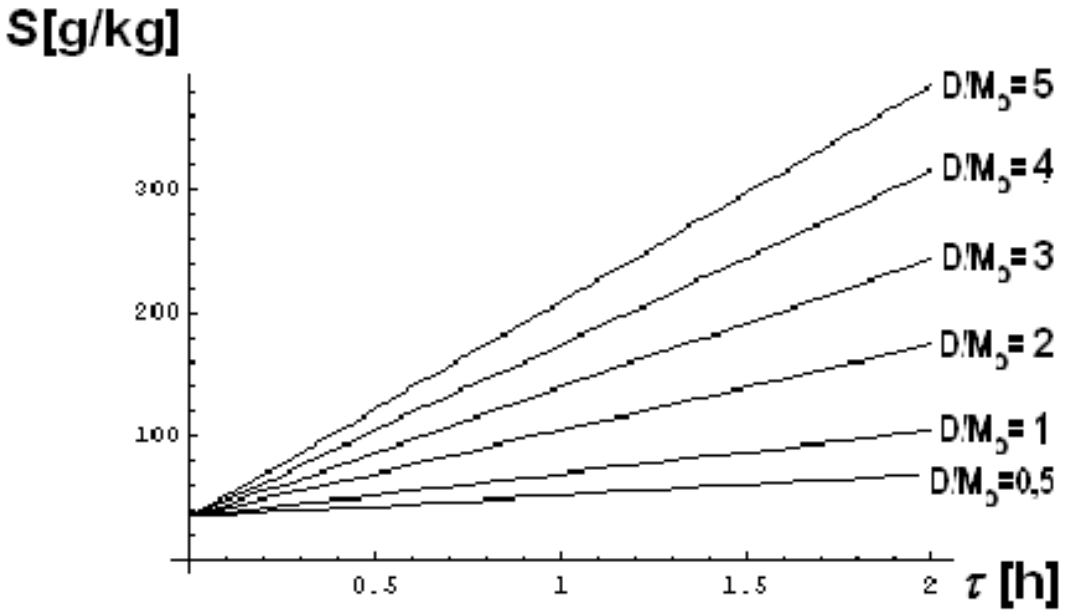

**Slika 4.7.** Blok dijagram potprograma za određivanje povećanja temperature zasićenja

## 4.3. Numerička rješenja i grafičke interpretacije matematičkih modela

U poglavlju 3.7.3 dani su izrazi promjene koncentracije soli $\xi$. Umjesto koncentracije izrazi se mogu svesti na slanost, što je pogodnije za praktičnu primjenu, jer se radi o mjerljivoj vrijednosti[3]. Izraz 3.7.37 tako postaje

$$S = S_o\left(1 + \frac{D}{M_o}\tau\right) , \qquad (4.3.1)$$

gdje je $S_o$ [g/kg] početna slanost[4], a $S$ slanost nakon $\tau$ sati. Grafička interpretacija izraza 4.3.1 izrađena je pomoću alata *Mathematica 5.0*[5].




**Slika 4.8.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$

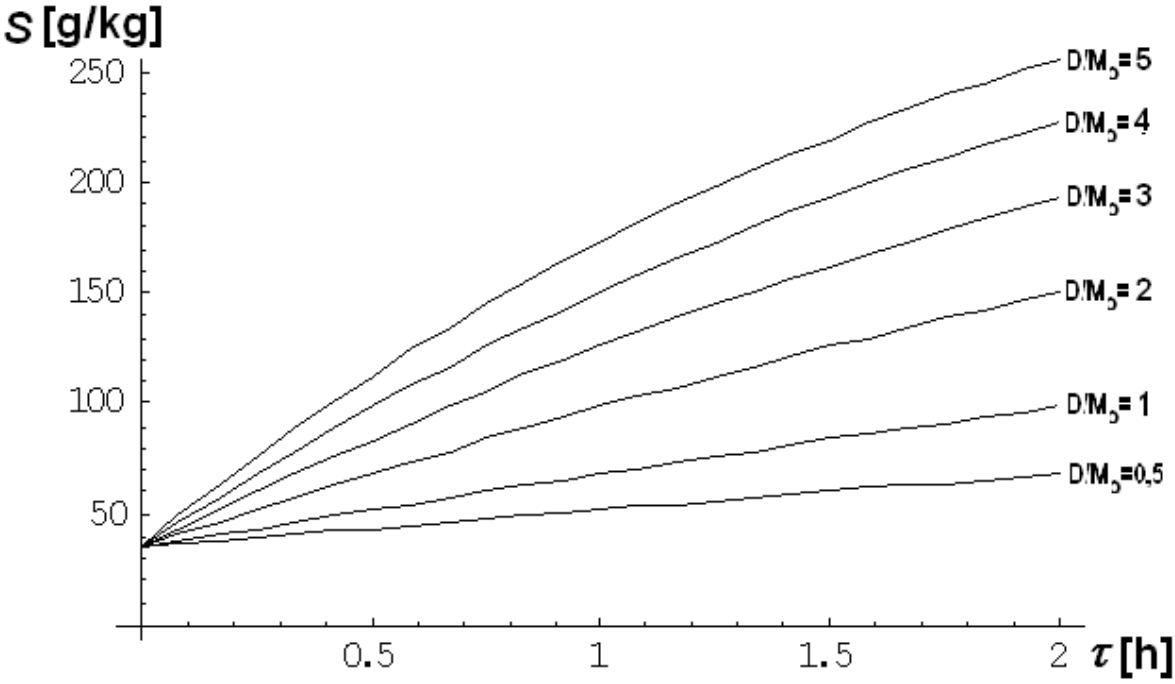
Na slici je prikazano šest linearnih ovisnosti slanosti za prikazane odnose $D/M_o$. Početna slanost je 35 g/kg koliko iznosi uobičajena vrijednost u većini svjetskih mora.

Poput izraza 3.7.37 i u izrazu 3.7.33 može se koncentracija zamijeniti slanošću te postaje

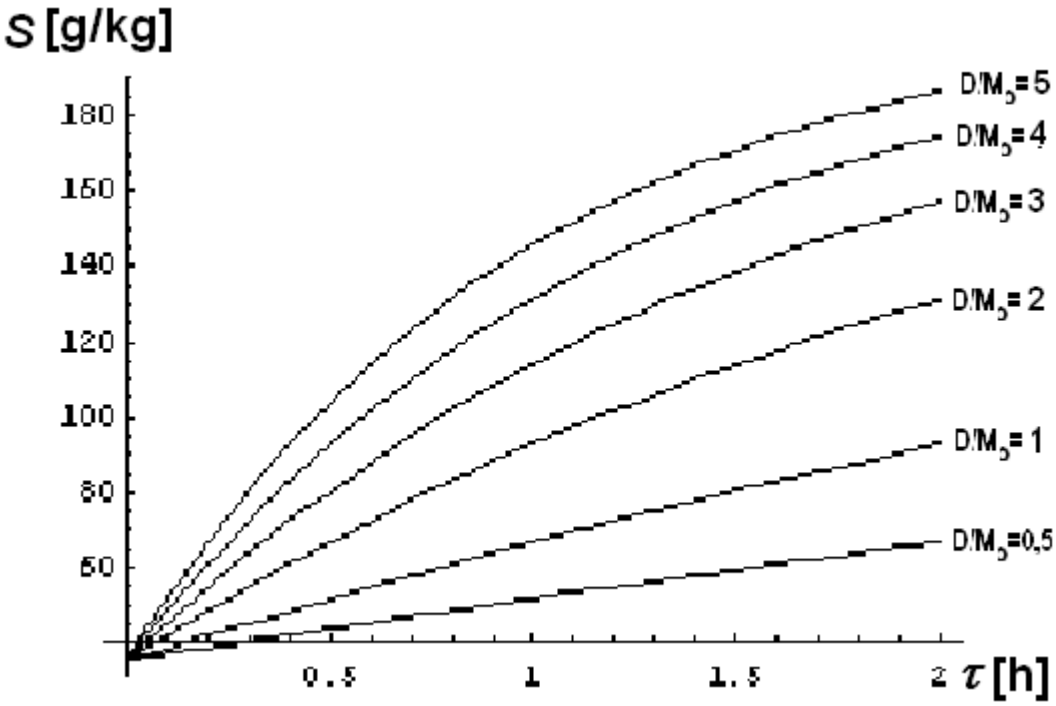
$$S = \frac{S_o}{\varepsilon}\left(1 + \varepsilon - e^{-\tau\frac{\varepsilon D}{M_o}}\right) . \qquad (4.3.2)$$

[3] Slanost se mjeri indirektnim putem, tj. mjerenjem električne vodljivosti.
[4] Srednja vrijednost svjetskih mora obično se uzima kao 35 g/kg.
[5] Korištene su varijante 5.0 i 4.7.

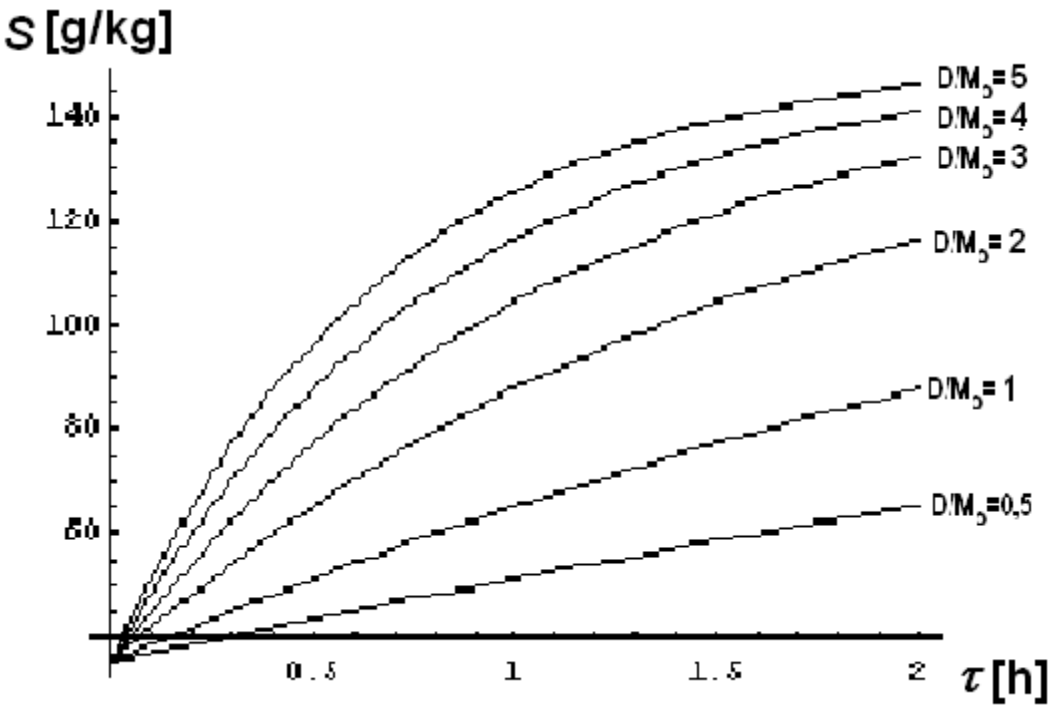
Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$, tj. grafička interpretacija izraza 4.3.2 također je izrađena pomoću alata *Mathematica 5.0*. Izračun počinje s najčešćom slanošću morske vode $S_o$=35 i izveden je za nekoliko odnosa $D/M_o$, od 0,5 do 5 uz promjenu $\varepsilon$ od 0,1 do 0,7.



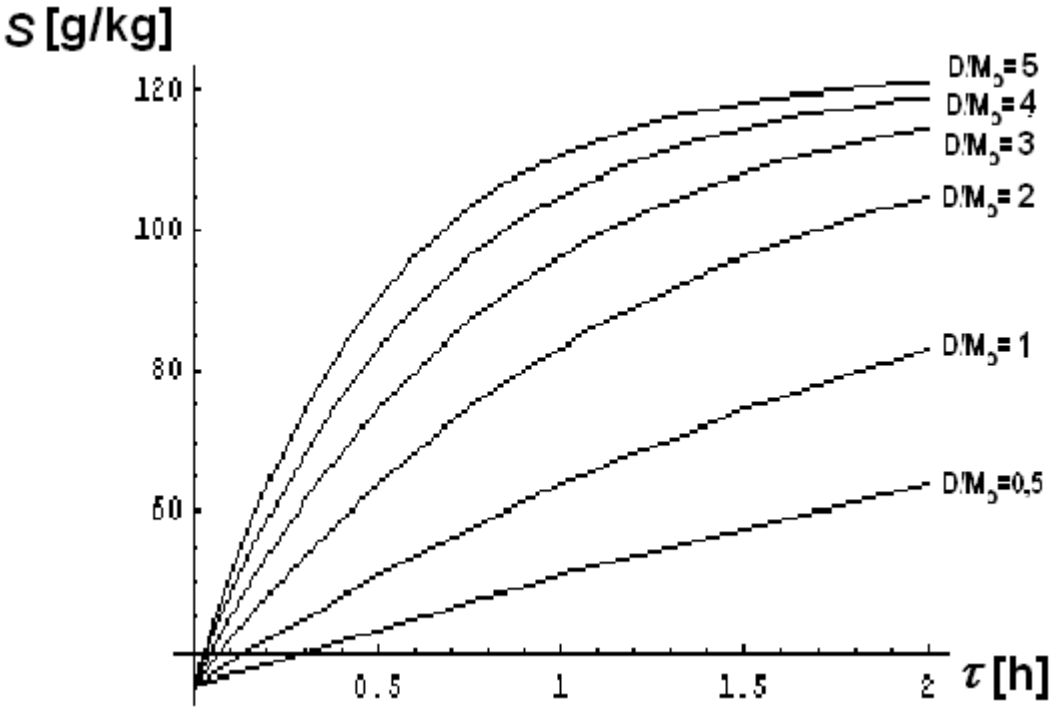

**Slika 4.9.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,1



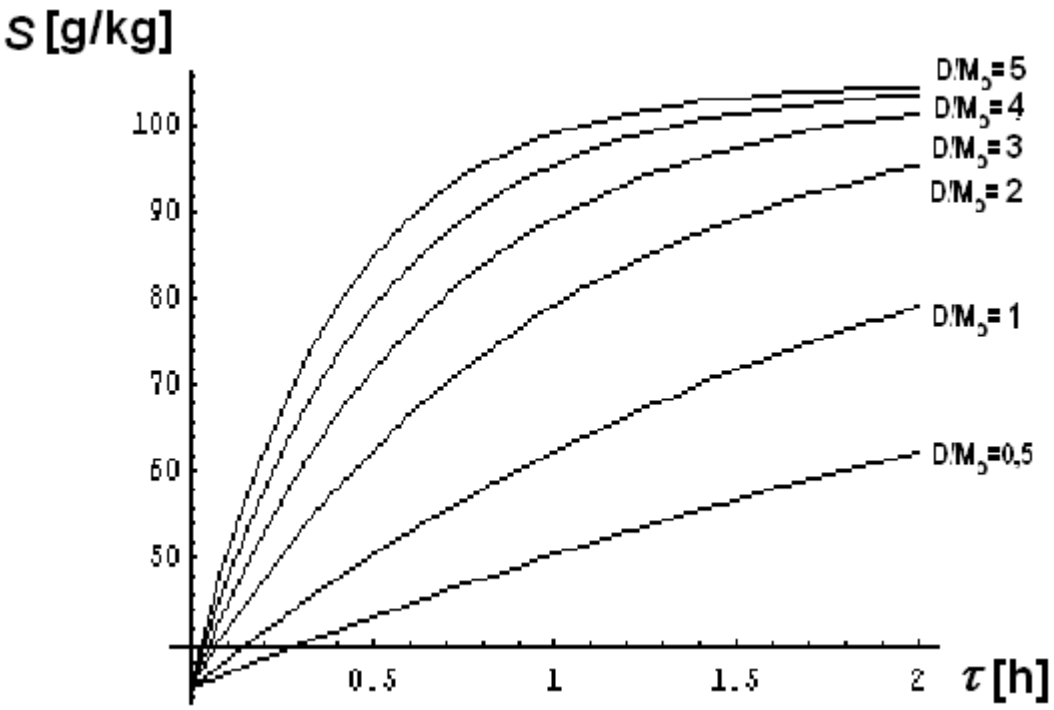

**Slika 4.10.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,2



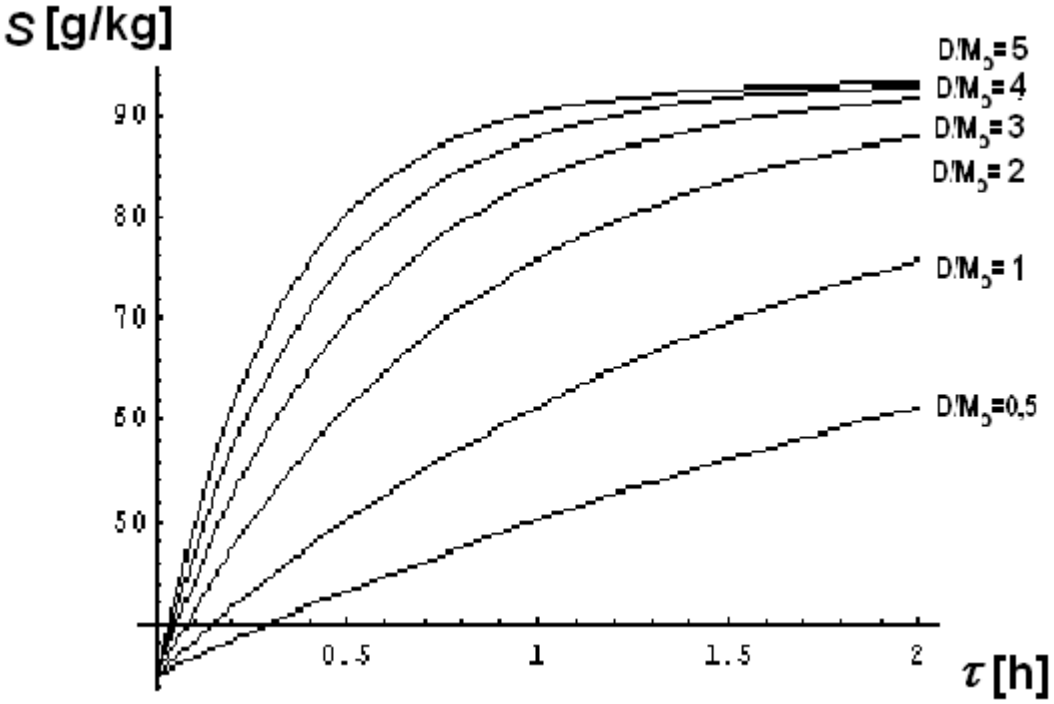

**Slika 4.11.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=0,3



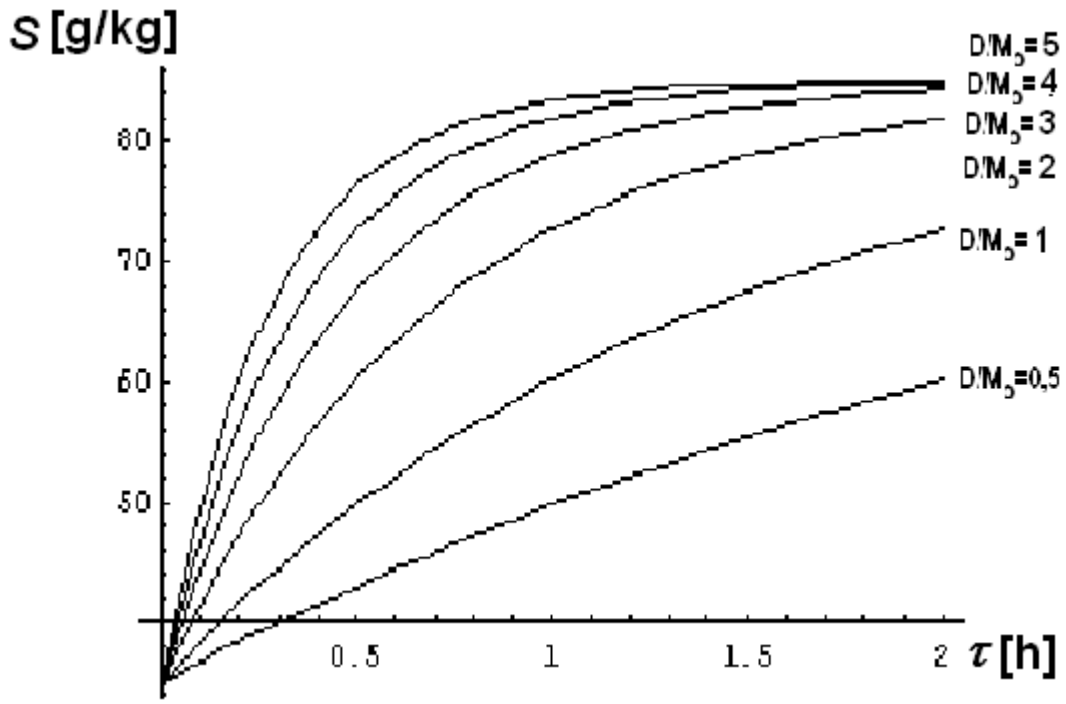

**Slika 4.12.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=0,4




**Slika 4.13.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=0,5

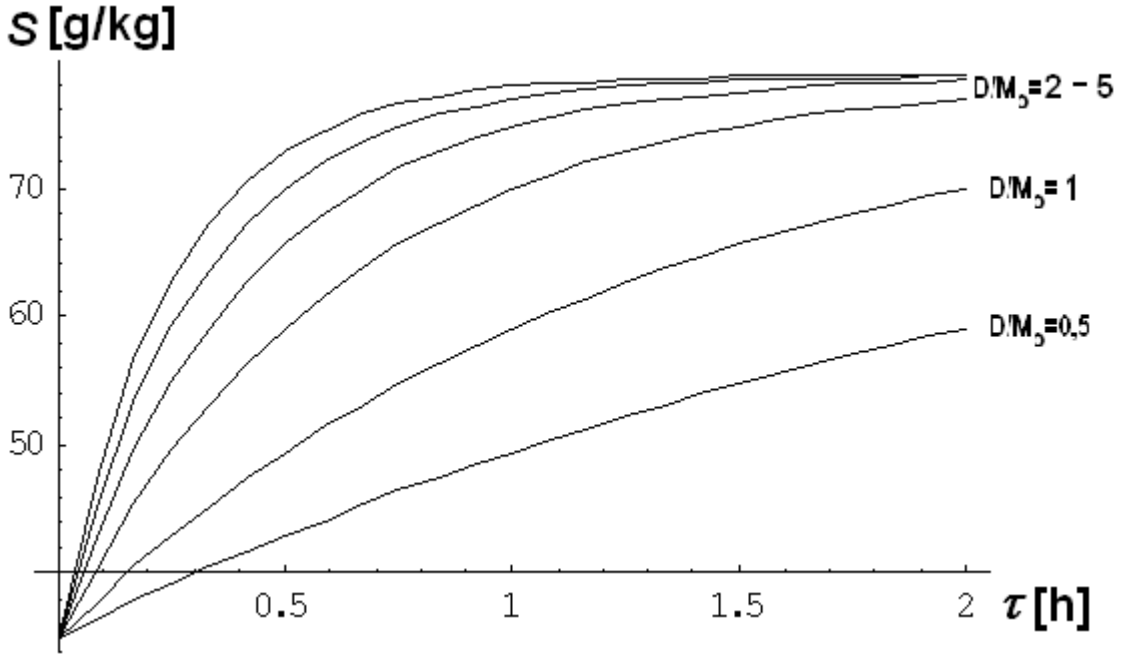



**Slika 4.14.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=0,6

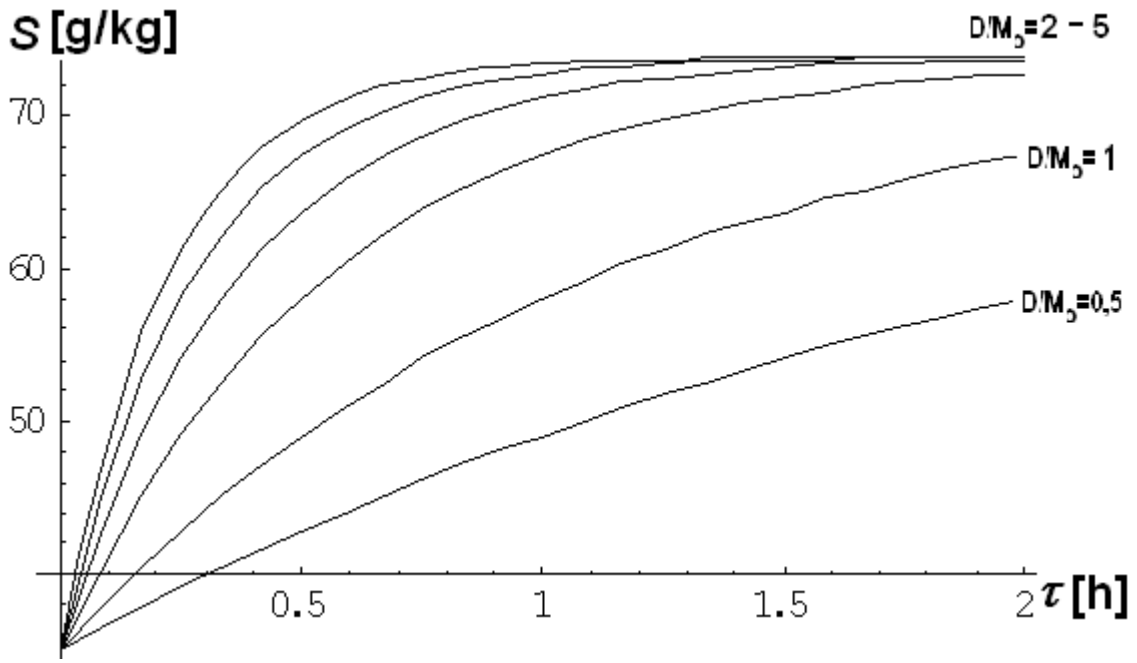



**Slika 4.15.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=0,7

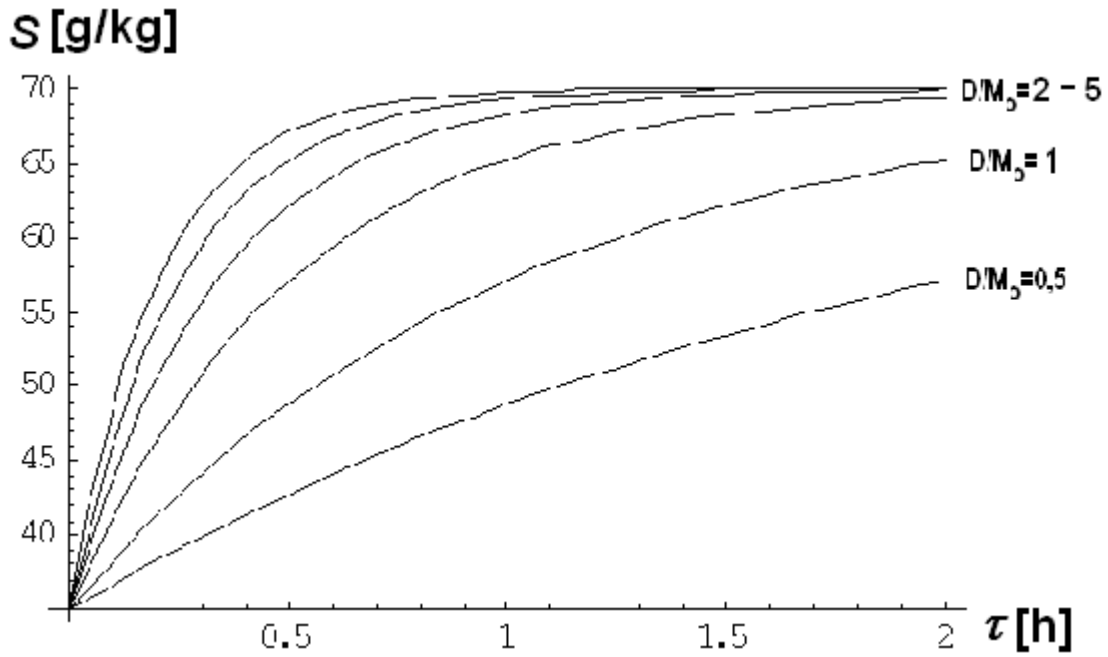
Ako se za najvišu vrijednost isparene vode u odnosu na dovedenu masu prema izrazu 3.7.8 uzme 0,3, tj. 30%, iz izraza 3.7.10 slijedi gornja vrijednost $\varepsilon_{max}$=2,33. Izračun također počinje s najčešćom slanošću morske vode $S_o$=35 i izveden je za nekoliko odnosa $D/M_o$, od 0,5 do 5 uz promjenu $\varepsilon$ od 0,8 do $\varepsilon_{max}$.



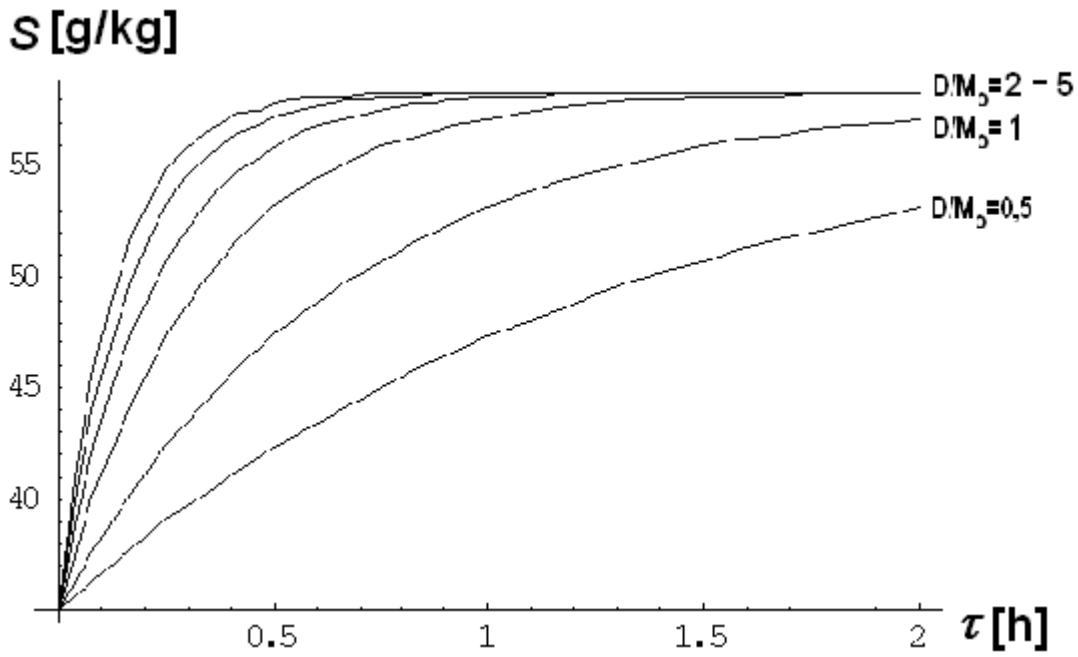

**Slika 4.16.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=0,8



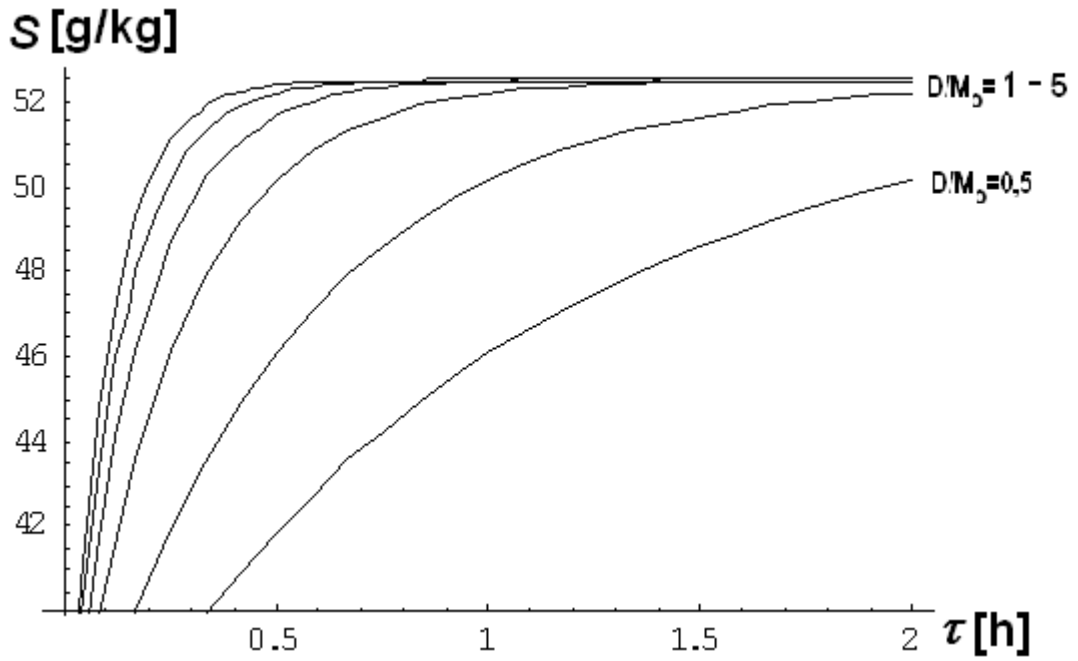

**Slika 4.17.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=0,9



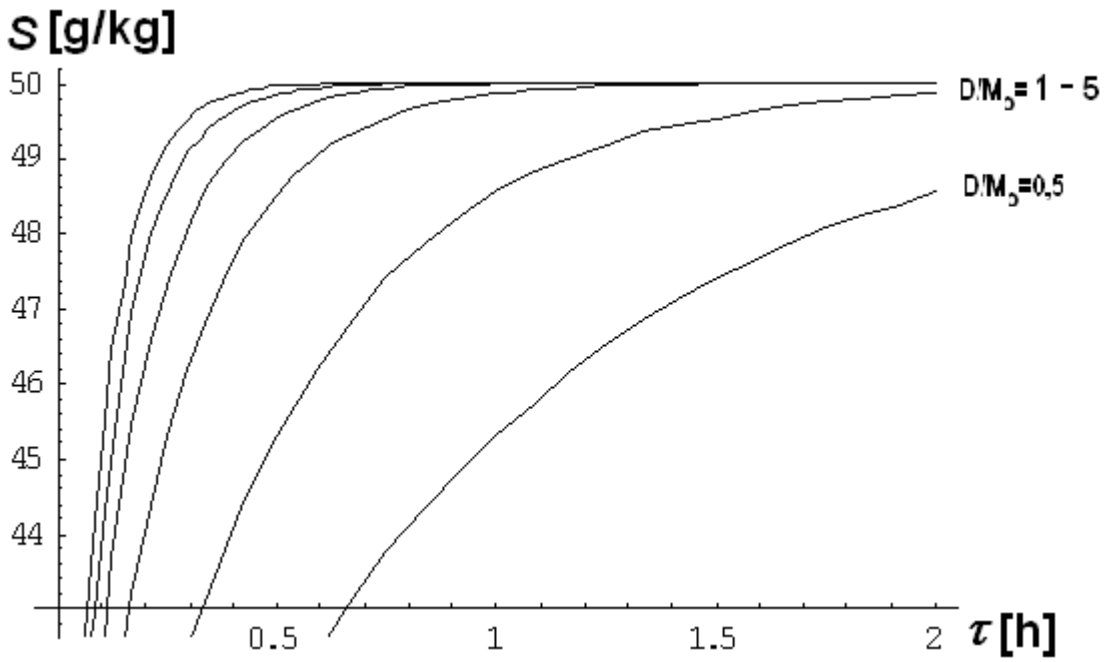

**Slika 4.18.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=1,0




**Slika 4.19.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=1,5

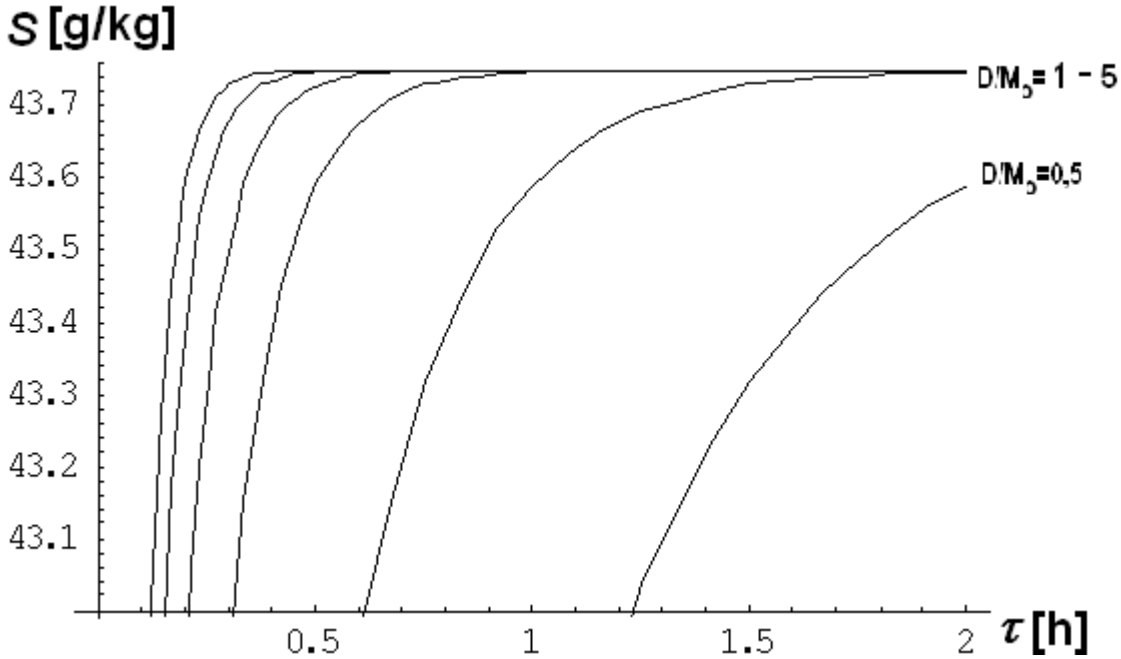



**Slika 4.20.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=2,0

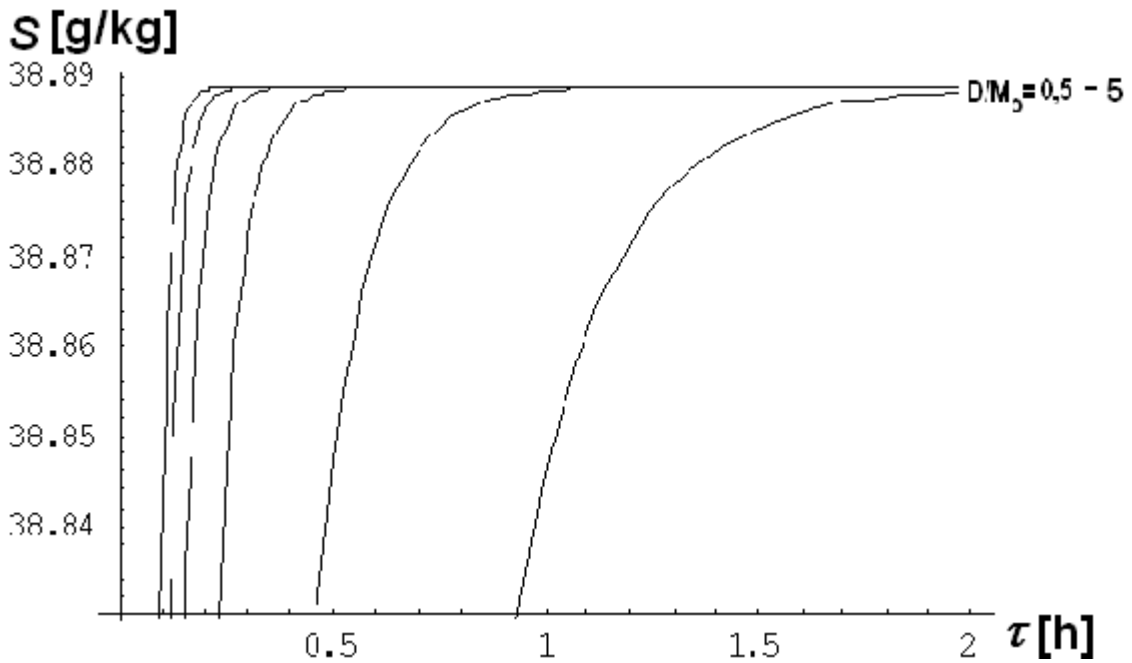



**Slika 4.21.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=2,33

Na slikama od 4.16 do 4.21 prikazane su ovisnosti do uobičajene gornje granice isparene vode $k$=0,3 (30%), tj. do $\varepsilon$=2,33. Postupak se ipak vodi na način da je udio isparene vode od 10 do 20%, odnosno $\varepsilon$=4 i $\varepsilon$=9. Ti su dijagrami ovisnosti prikazani na sljedećim slikama.



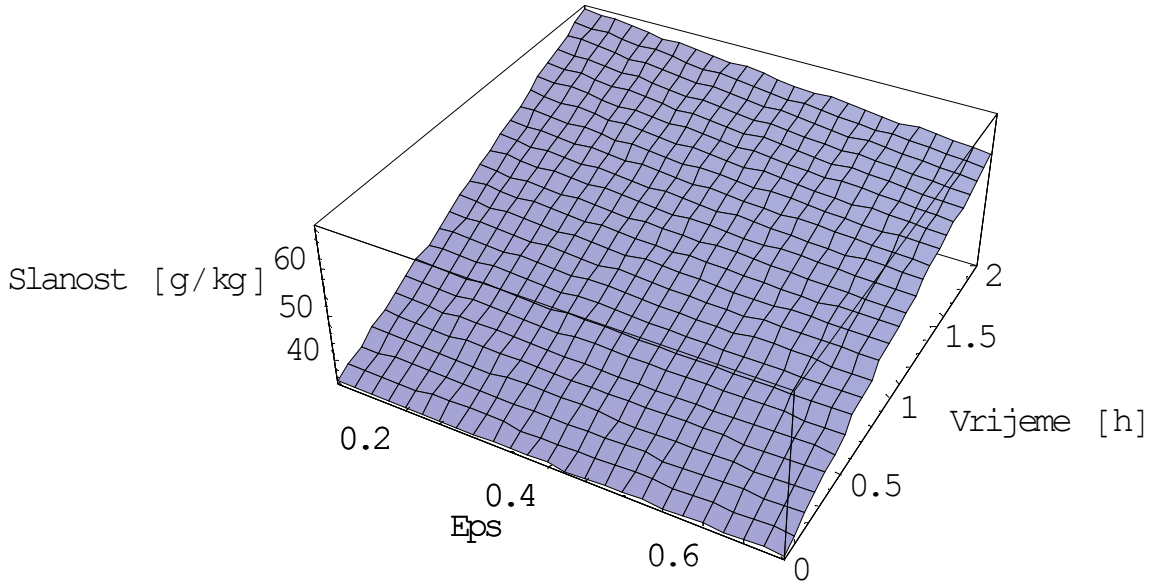

**Slika 4.22.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=4,0

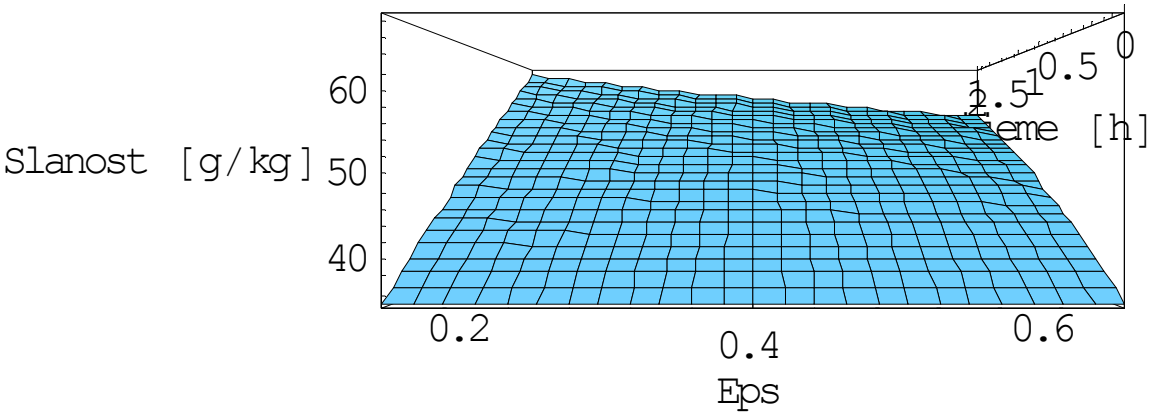



**Slika 4.23.** Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ i $\varepsilon$=9,0

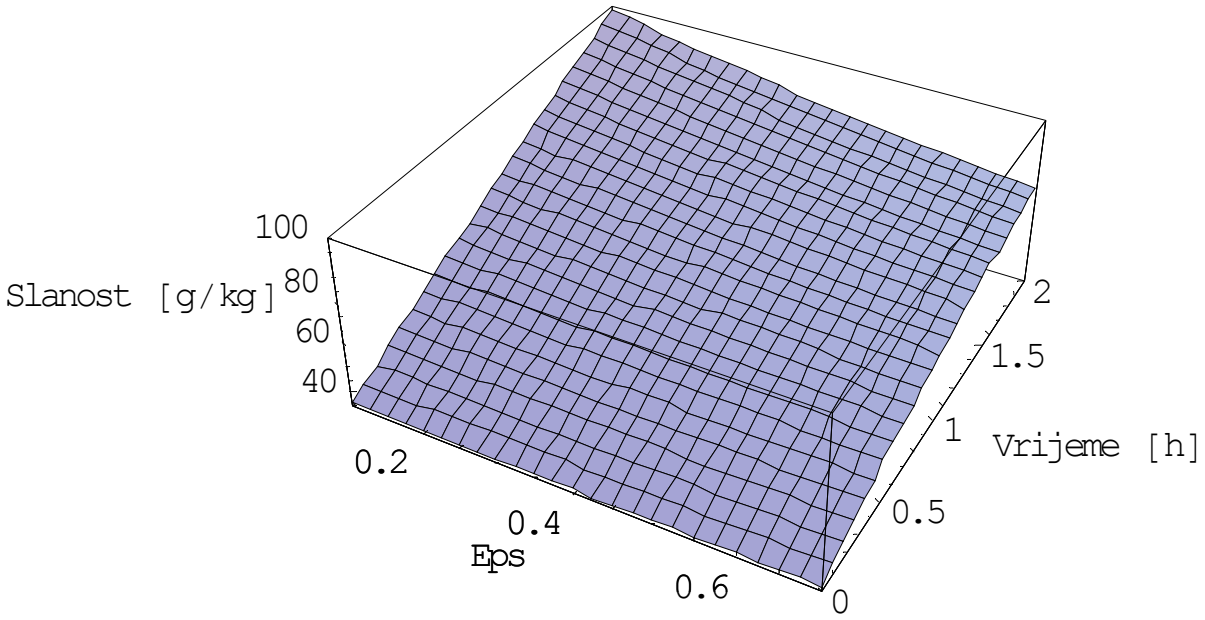
Dijagrami na slikama od 4.9 do 4.23 pokazuju eksponencijalnu ovisnost slanosti o vremenu isparavanja. Uočljivo je da se kod manjih vrijednosti $D/M_o$ radi o gotovo linearnoj ovisnosti dok je kod uređaja koji su jače toplinski opterećeni te proizvode veće količine pare, tj. veći je odnos $D/M_o$, očita eksponencijalna ovisnost.

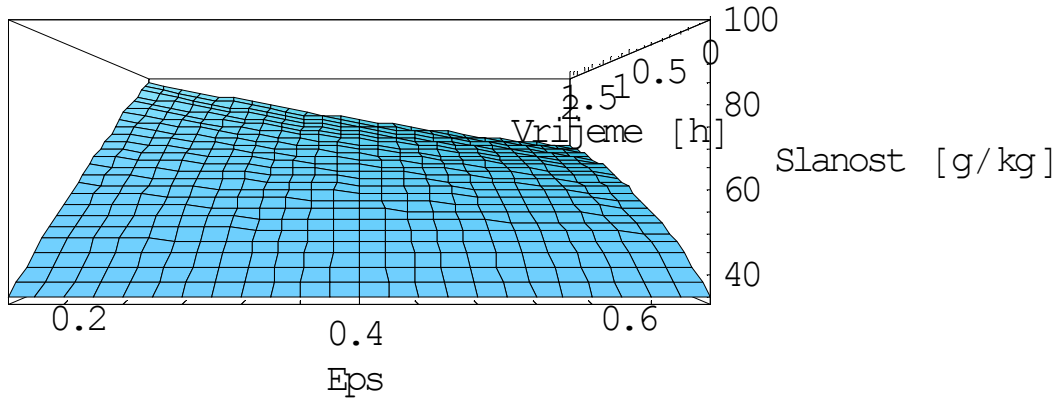
Umjesto ovakvog, dvodimenzionalnog, prikaza na sljedećim je slikama dantrodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za iste odnose $D/M_o$.



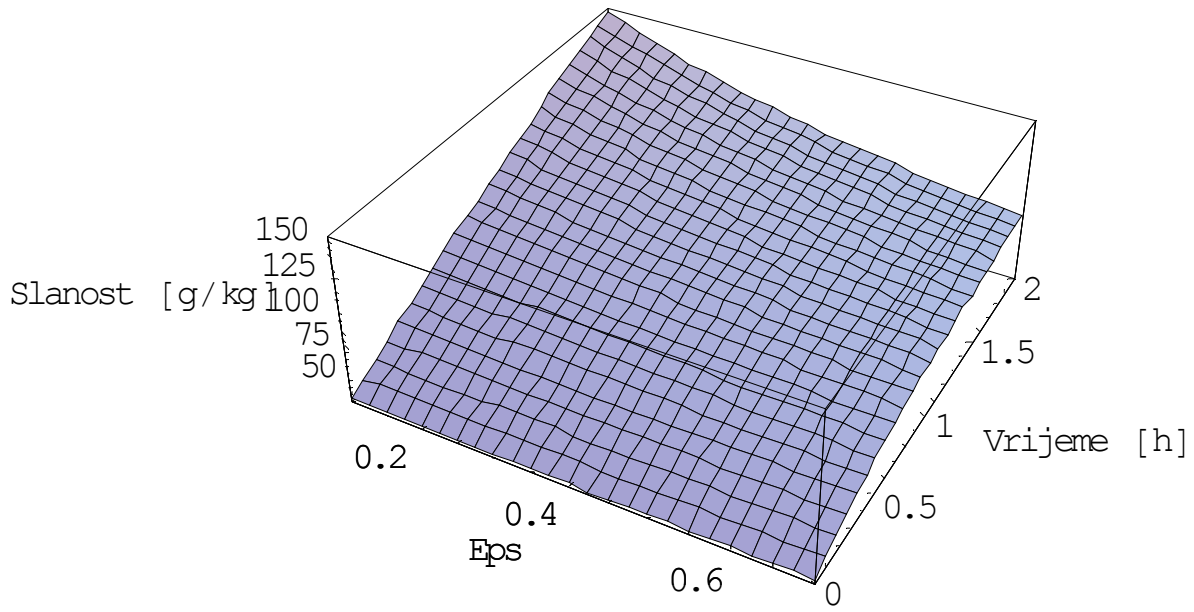



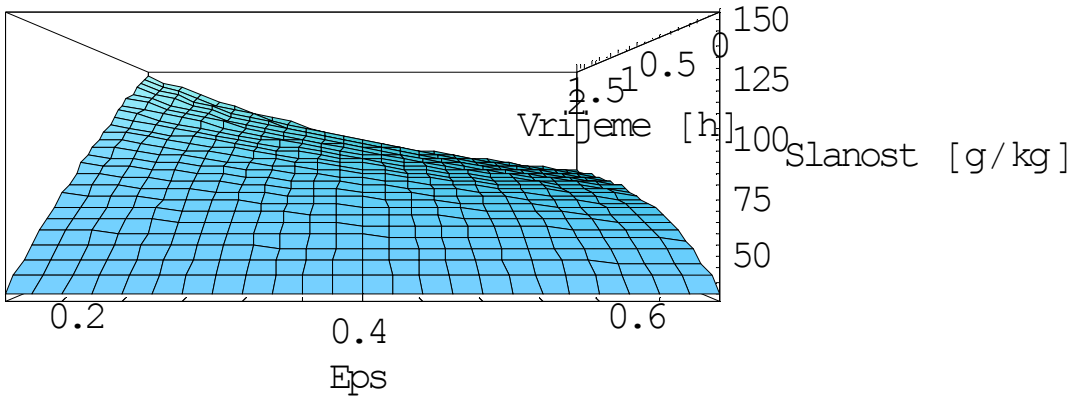

**Slika 4.24.** Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=0,5



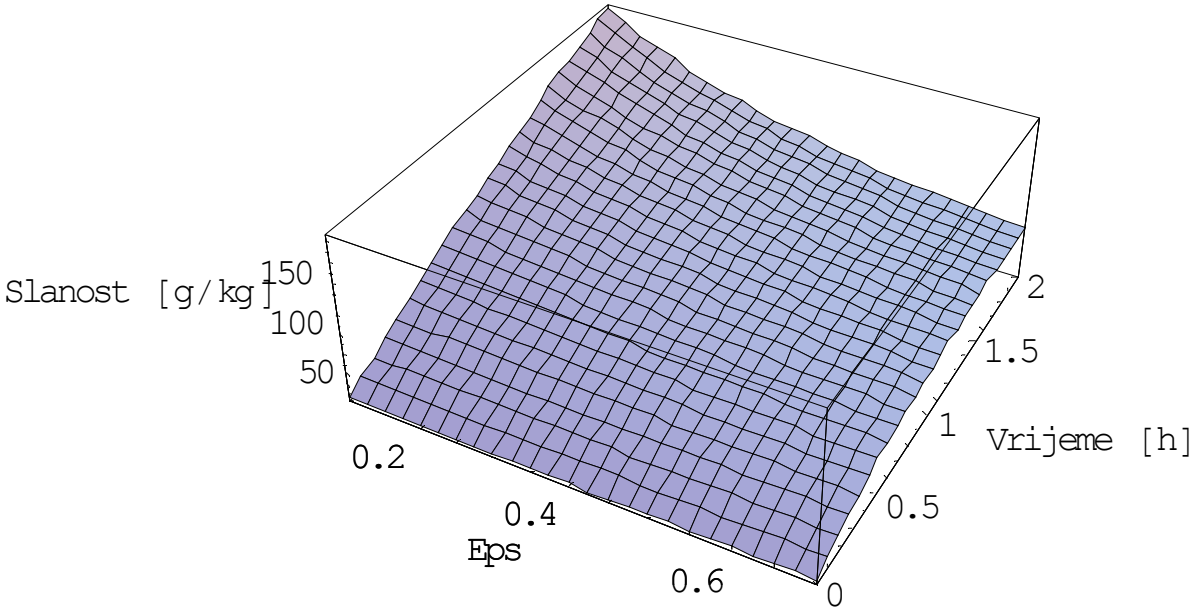



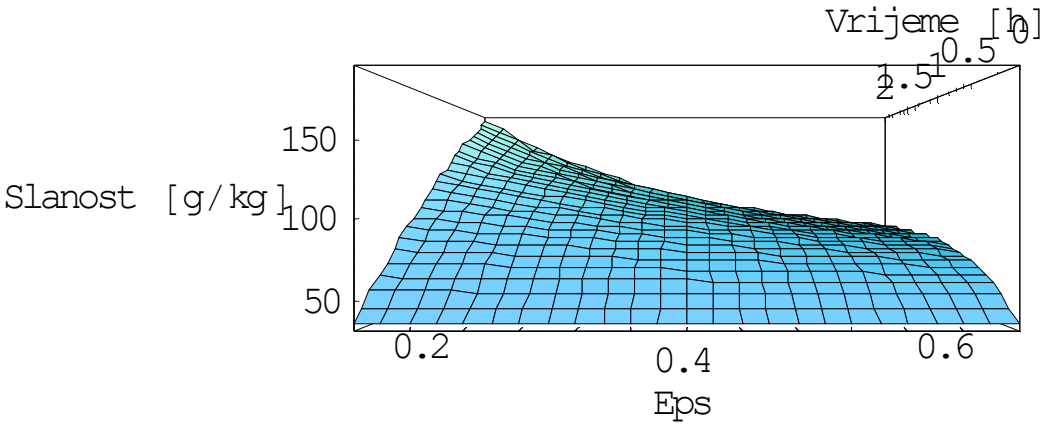

**Slika 4.25.** Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=1



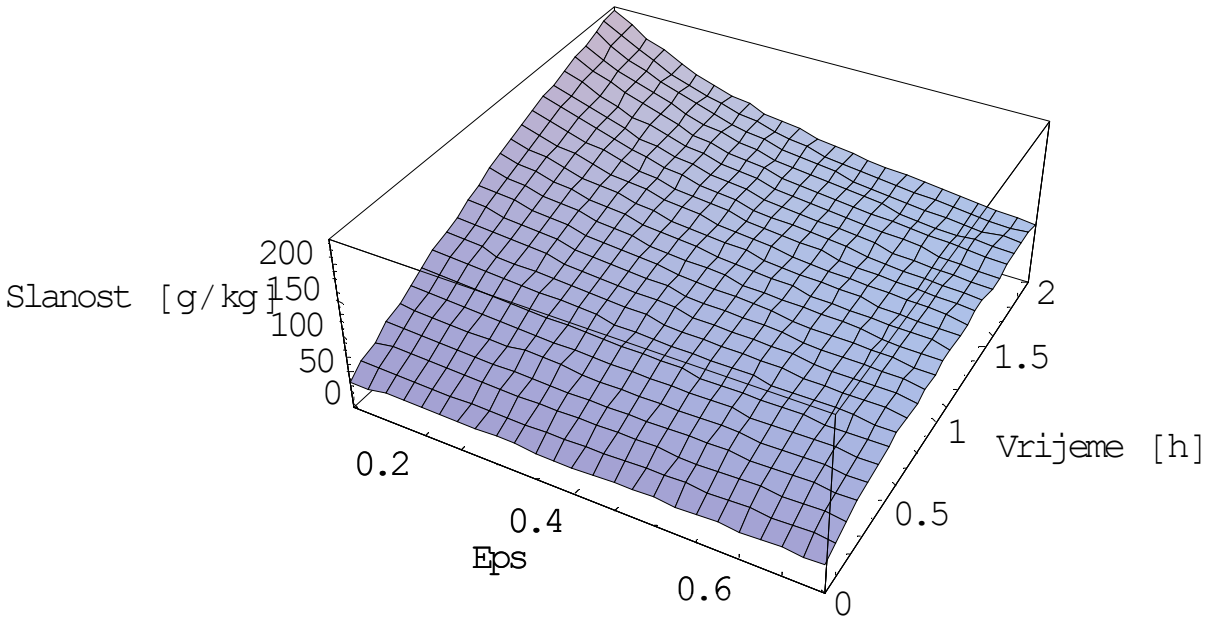



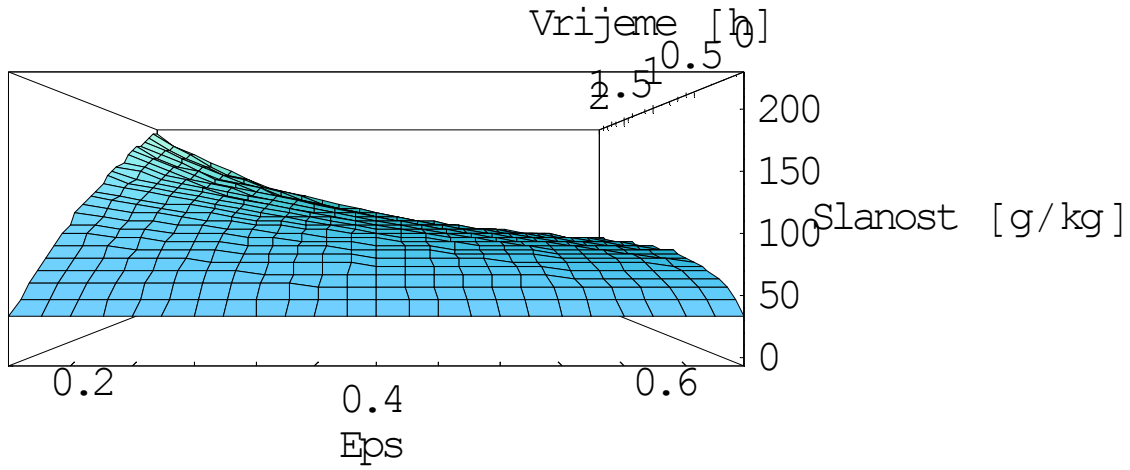

**Slika 4.26.** Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=2



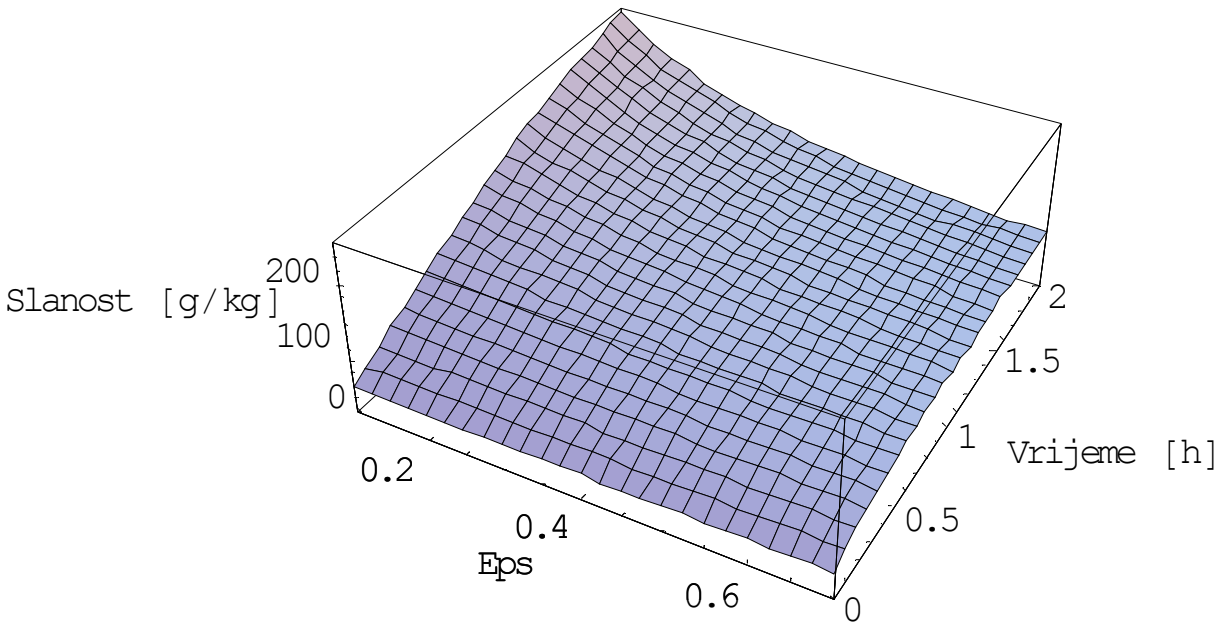



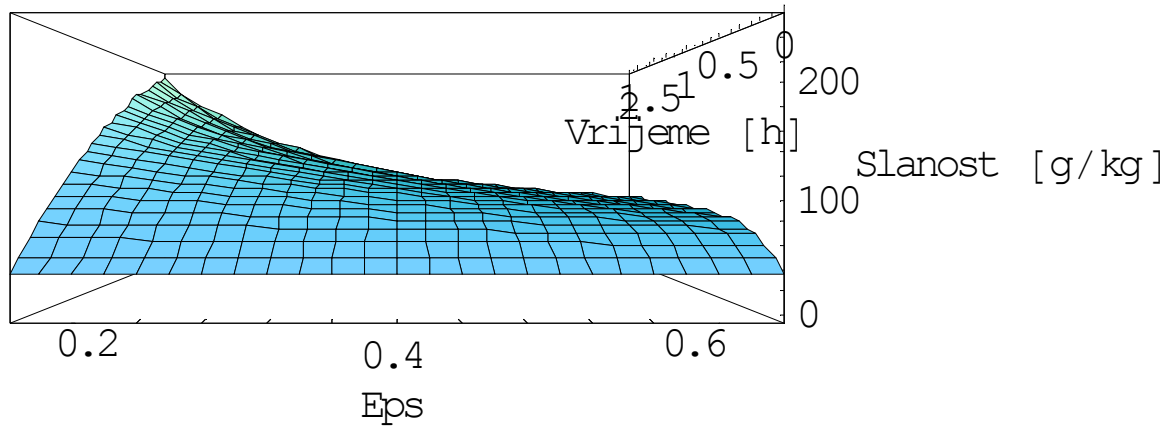

**Slika 4.27.** Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=3




**Slika 4.28.** Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=4

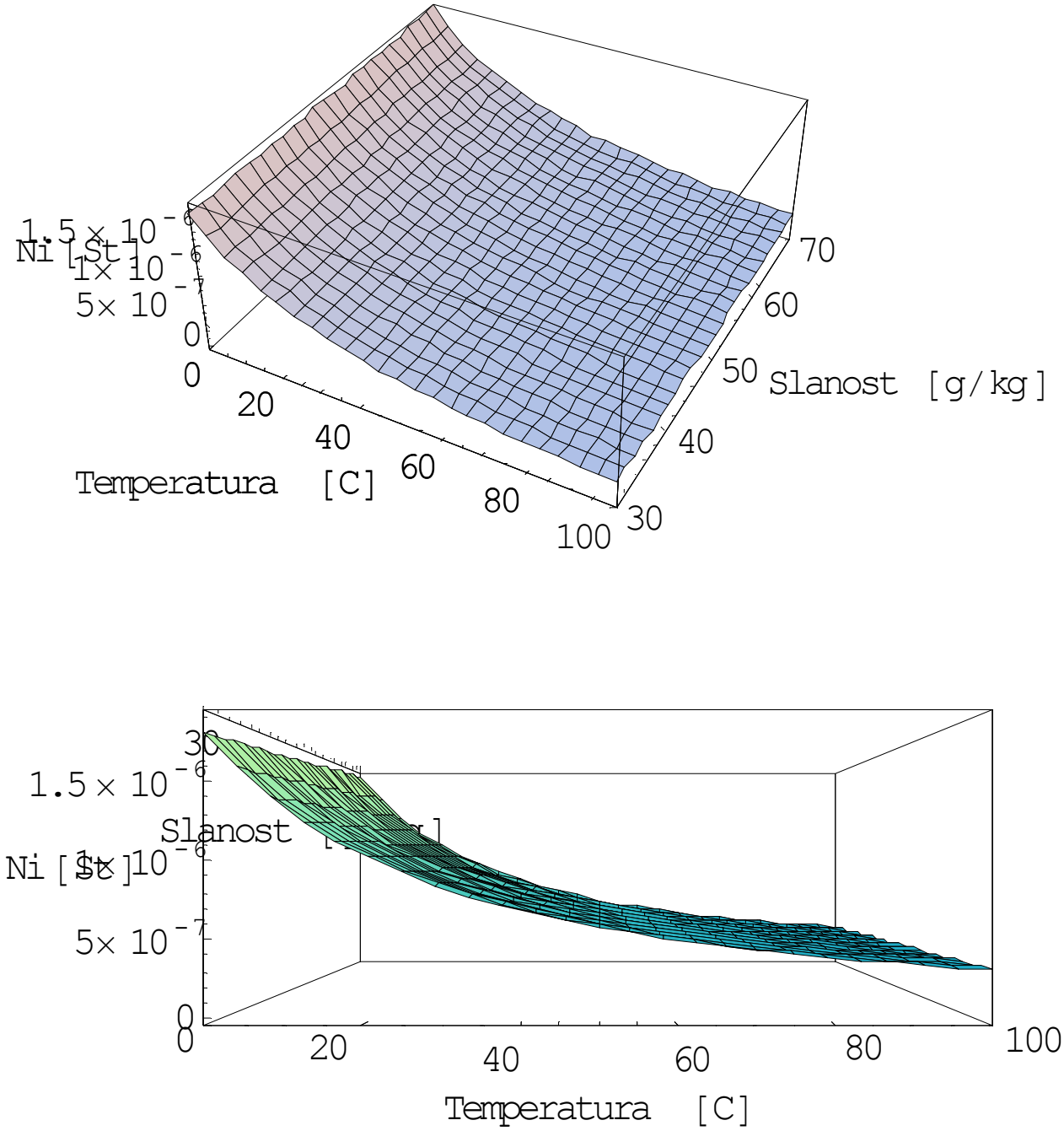


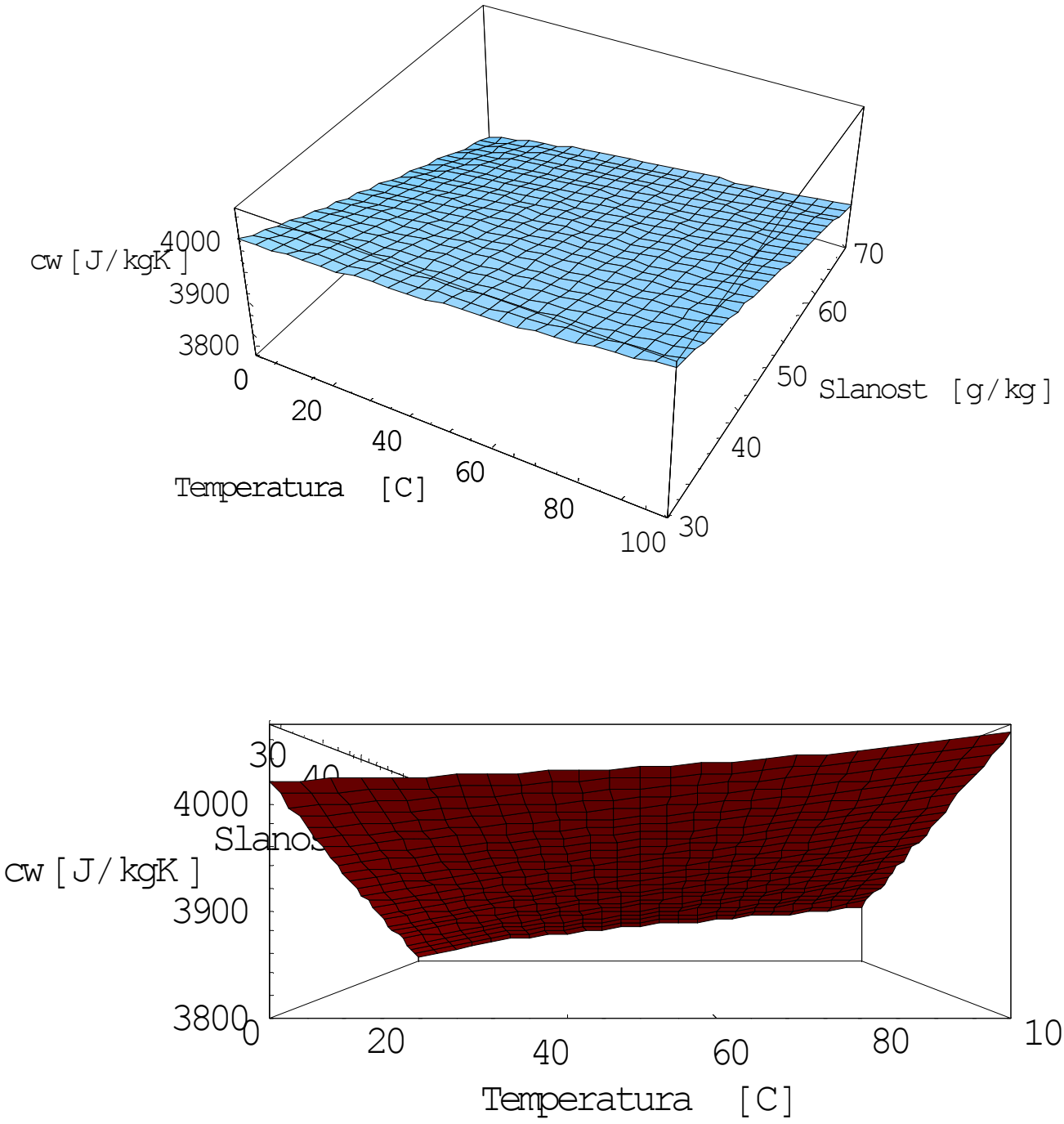

**Slika 4.29.** Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=5

U potpoglavlju 3.5 obrađena su fizikalna svojstva morske vode. Grafička interpretacija predmetnih svojstava također je izrađena pomoću *Mathematice 5.0*.

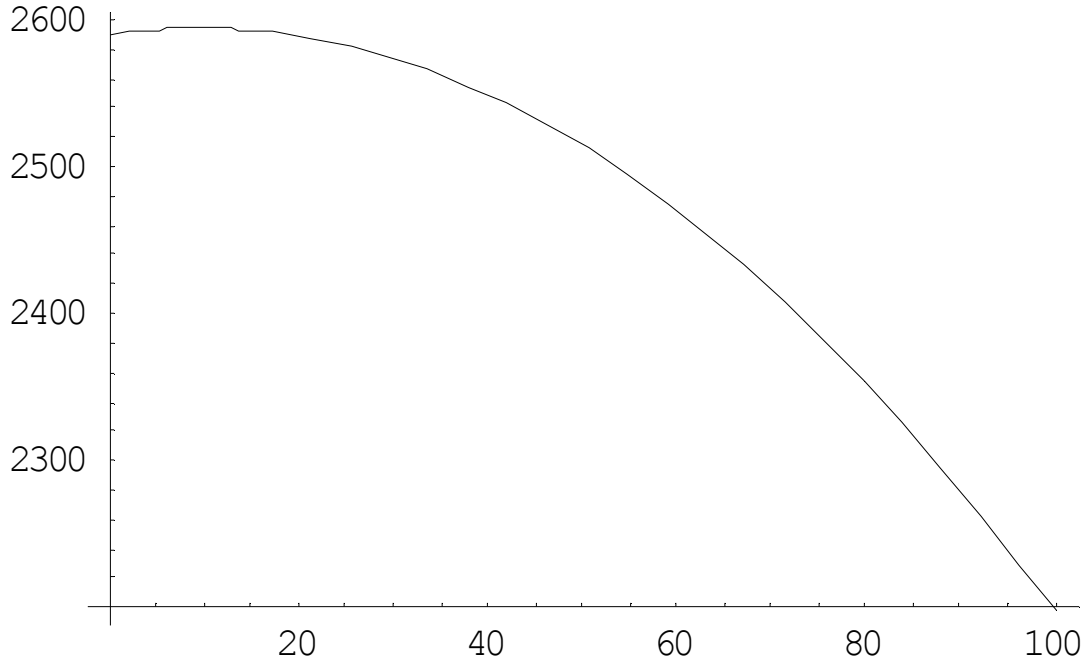
Grafički prikazi toplinskih svojstava slane otopine također su izrađeni aplikacijama u *Mathematici 5.0.*



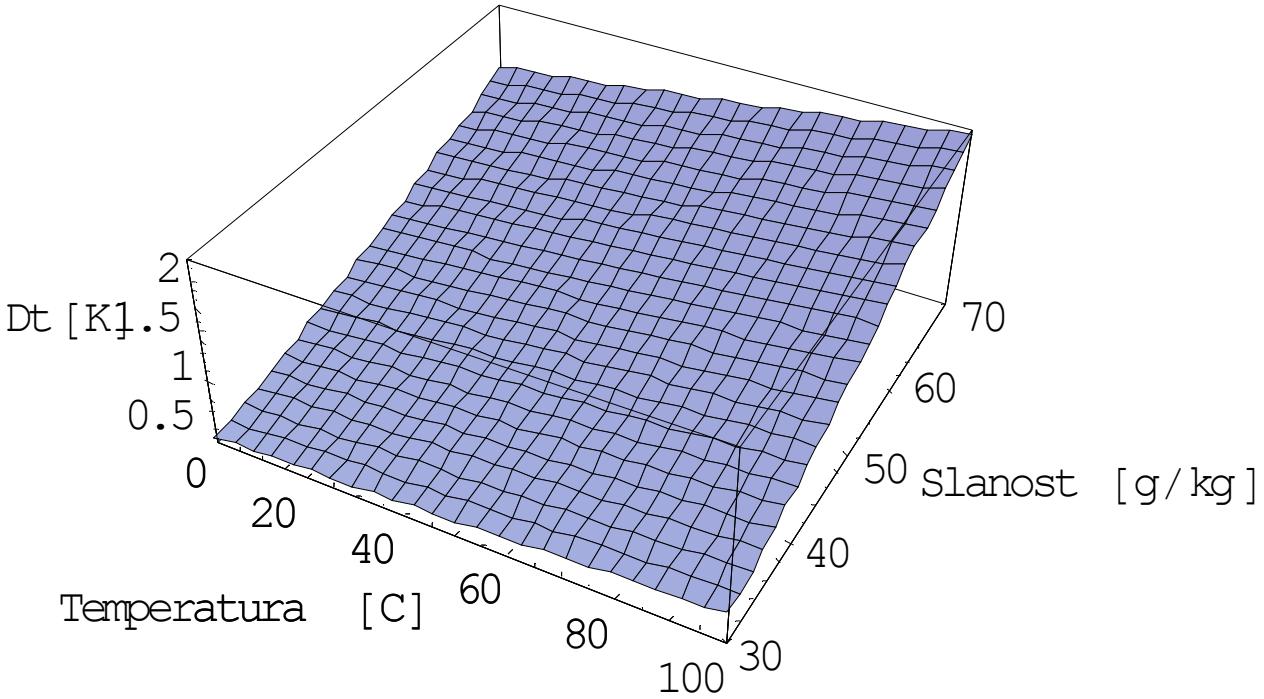

**Slika 4.30.** Trodimenzionalni prikaz ovisnosti kinematičkog viskoziteta o temperaturi i slanosti

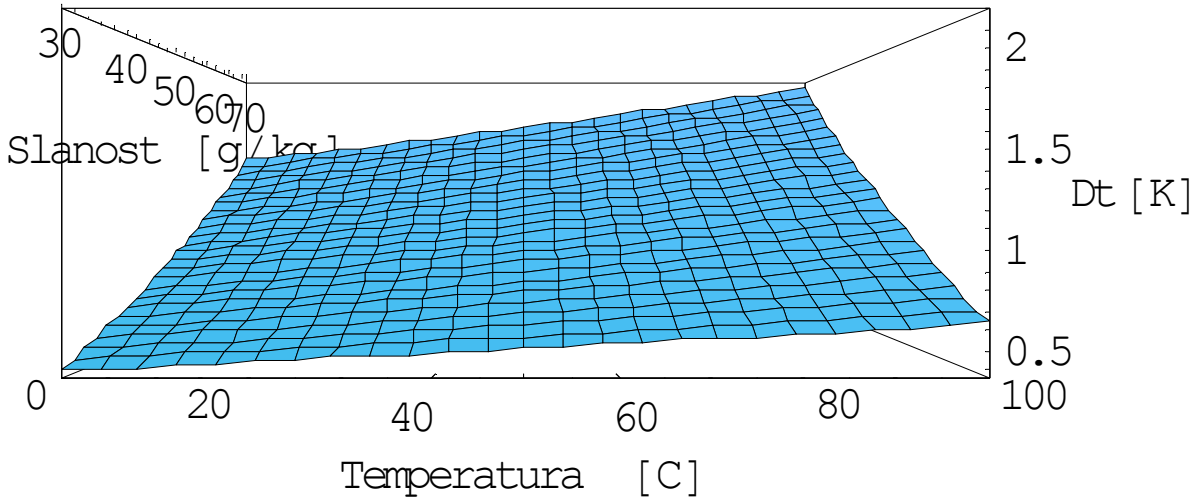



**Slika 4.31.** Trodimenzionalni prikaz ovisnosti specifičnog toplinskog kapaciteta slane otopine o temperaturi i slanosti

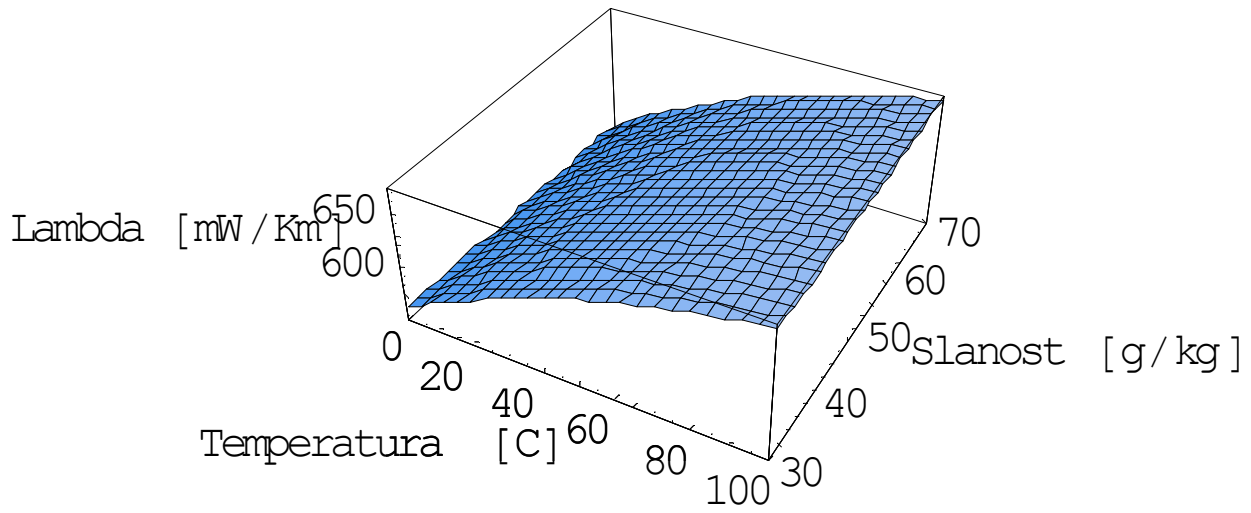


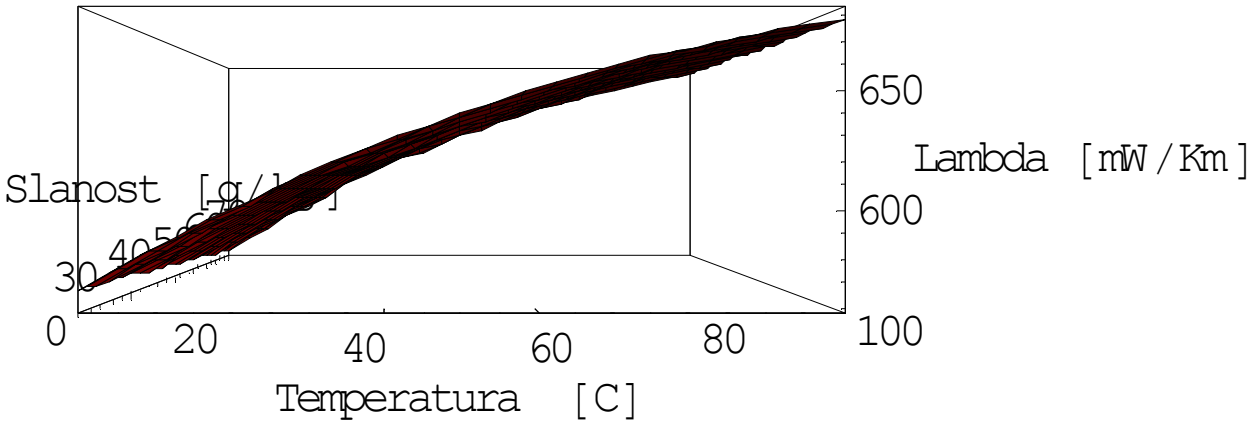

**Slika 4.32.** Dijagram ovisnosti latentne topline isparavanja slane otopine o temperaturi



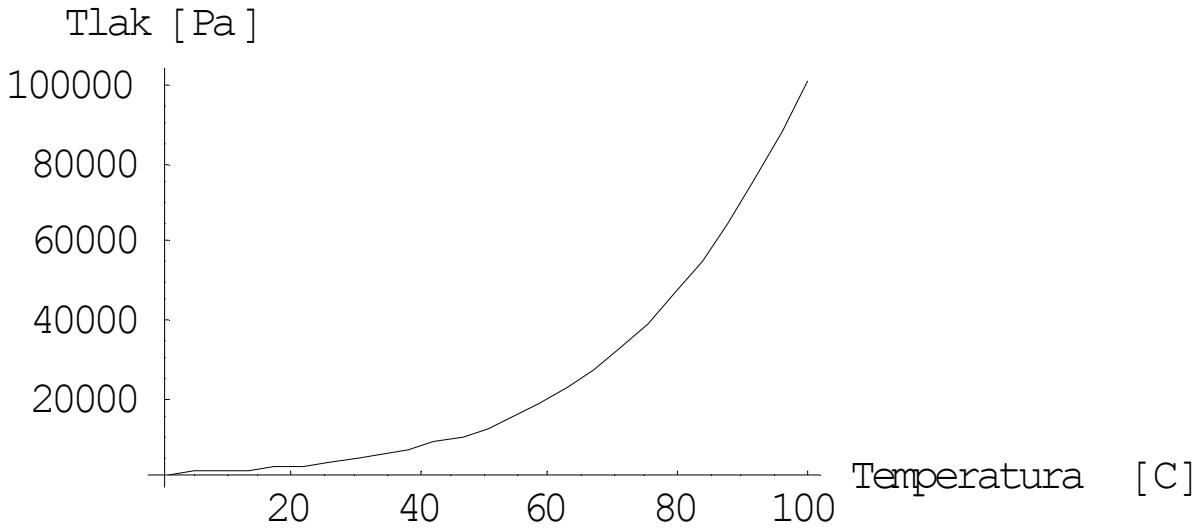




**Slika 4.33.** Trodimenzionalni prikaz ovisnosti povišenja temperature zasićenja morske vode u odnosu na slatku vodu istog tlaka o temperaturi i slanosti

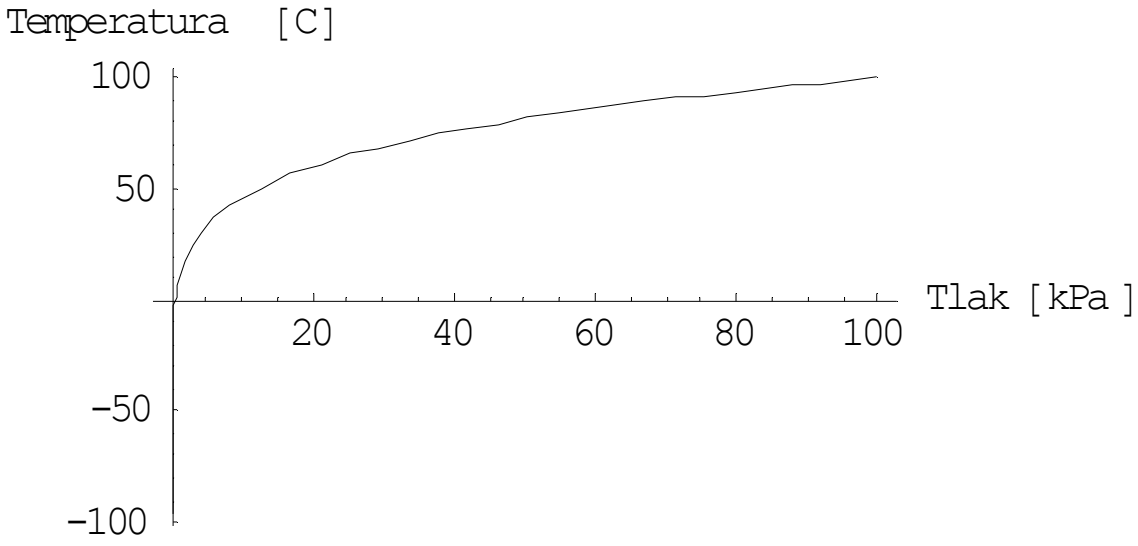


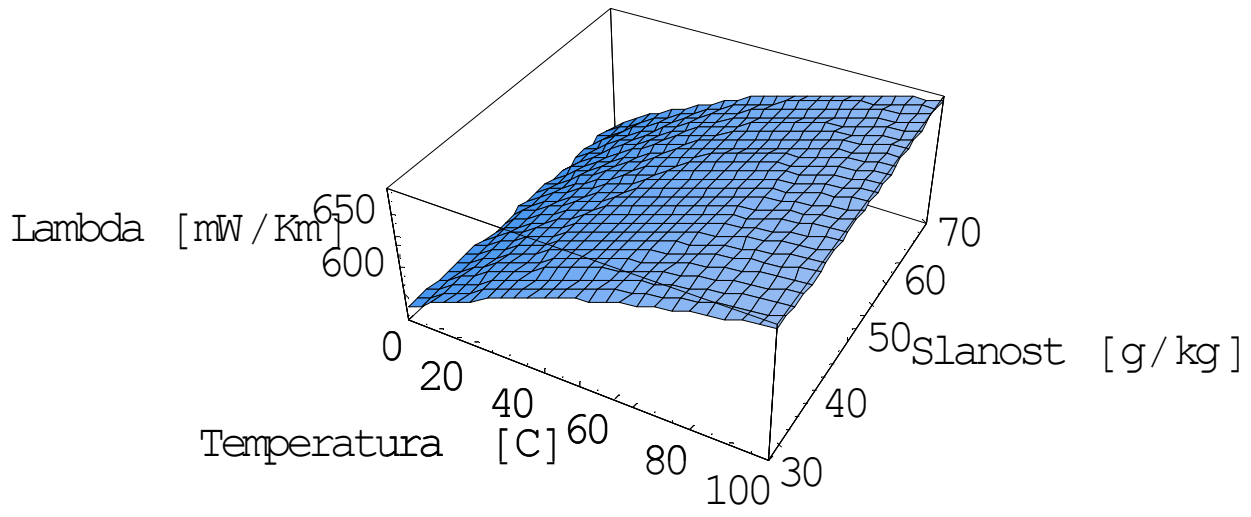

**Slika 4.34.** Trodimenzionalni prikaz ovisnosti koeficijenta toplinske vodljivosti slane otopine o temperaturi i slanosti

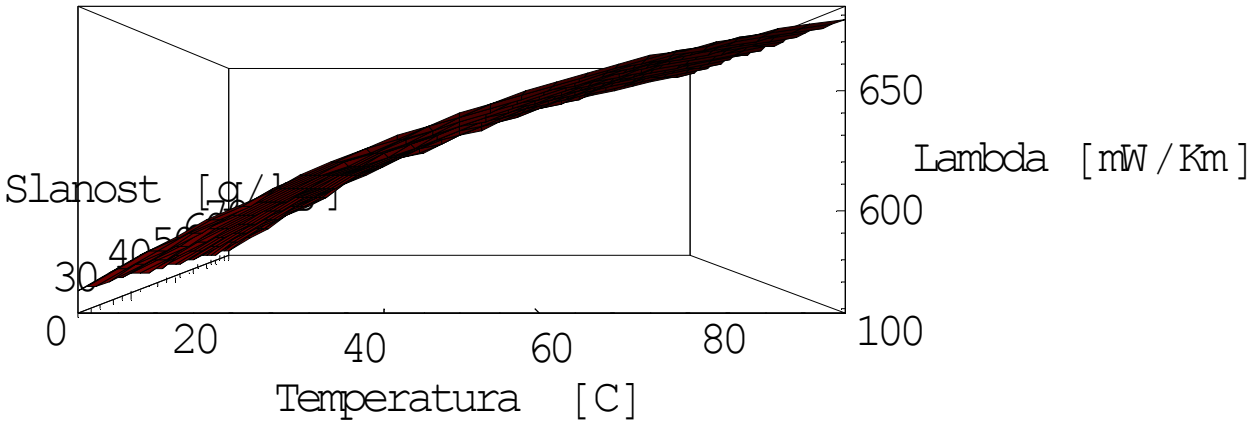



**Slika 4.35. P**rikaz ovisnosti temperature zasićenja slatke vode o tlaku



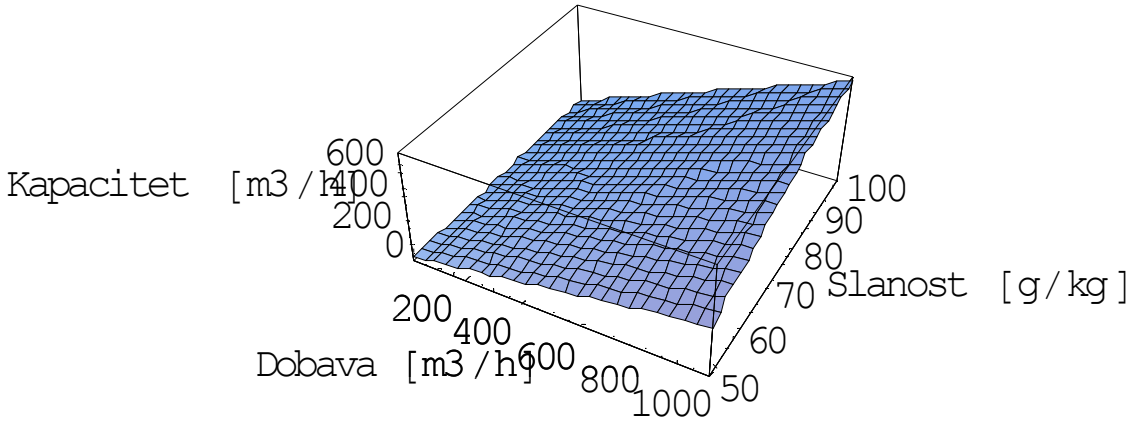

**Slika 4.36. P**rikaz ovisnosti tlaka zasićenja slatke vode o temperaturi

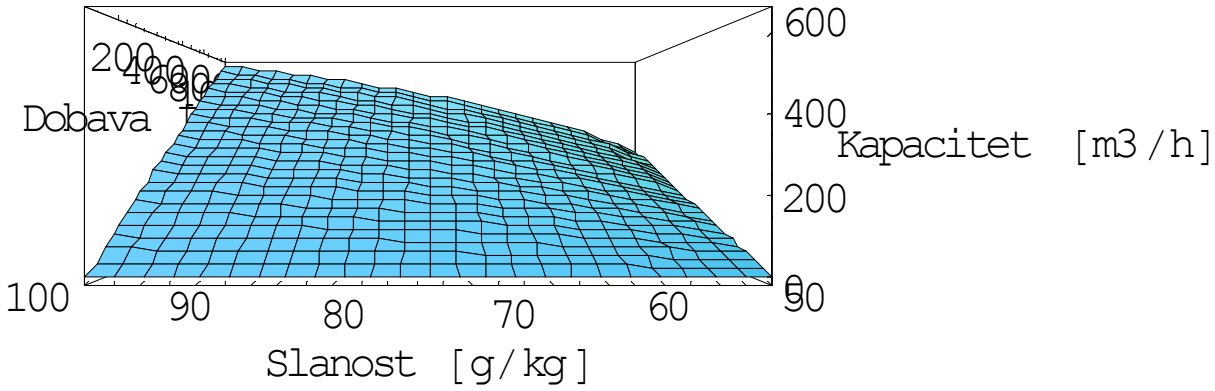



**Slika 4.37.** Trodimenzionalni prikaz ovisnosti koeficijenta toplinske vodljivosti slane otopine o temperaturi i slanosti

Prema izrazu 3.7.66, uvrštavajući umjesto koncentracije krutih tvari u vodi $\xi$, slanost vode $S$, dobije se grafička interpretacija prikazana u na slici 4.38.




**Slika 4.38.** Trodimenzionalni prikaz ovisnosti kapaciteta uređaja o količini napojne morske vode i željenoj gornjoj granici slanosti rasoline

# 5. VREDNOVANJE REZULTATA MODELA I PRIMJENA

U radu je dano više matematičkih modela. Matematički modeli prikazani u poglavlju 2. izvedeni su kao sredstvo za usporedbu izvedbi desalinizacijskih postrojenja koja se susreću u praksi. Izrazi uspoređuju količinu utrošene energije za jediničnu proizvodnju destilirane vode i mogu se iskoristiti u razvoju daljnjih modela cijene proizvedene vode. Za razvoj modela cijene proizvedene vode potrebno je, osim cijene energije, poznavati i cijenu uređaja, radne snage i potrošnog materijala.

Matematički modeli svojstava morske i slatke vode, dani u poglavlju 3. iskorišteni su za razvoj numeričkih rješenja pomoću aplikacija u *MS Fortran Powerstation* i *Mathematica 5.0*. Vrijednosti prikazane grafički u poglavlju 4. usklađene su s vrijednostima u objavljenoj znanstvenoj i stručnoj literaturi. Izrađeni informacijski modeli odnose se na sljedeća svojstva morske vode: gustoću, dinamički viskozitet, kinematički viskozitet, koeficijent toplinske vodljivosti, specifični toplinski kapacitet, toplinu isparavanja, te povišenje temperature zasićenja u odnosu na slatku vodu istog tlaka. Zbog zadnjeg fizikalnog svojstva morske vode izrađen je model ovisnosti tlaka i temperature zasićenja slatke vode prema Antonineovoj relaciji.

Izrazi koji su korišteni u informacijskim modelima i čiji su rezultati dani tablično u poglavlju 3. odstupaju prema autorima objavljenih znanstvenih radova, od izmjerenih veličina samo od 1 do 2%.

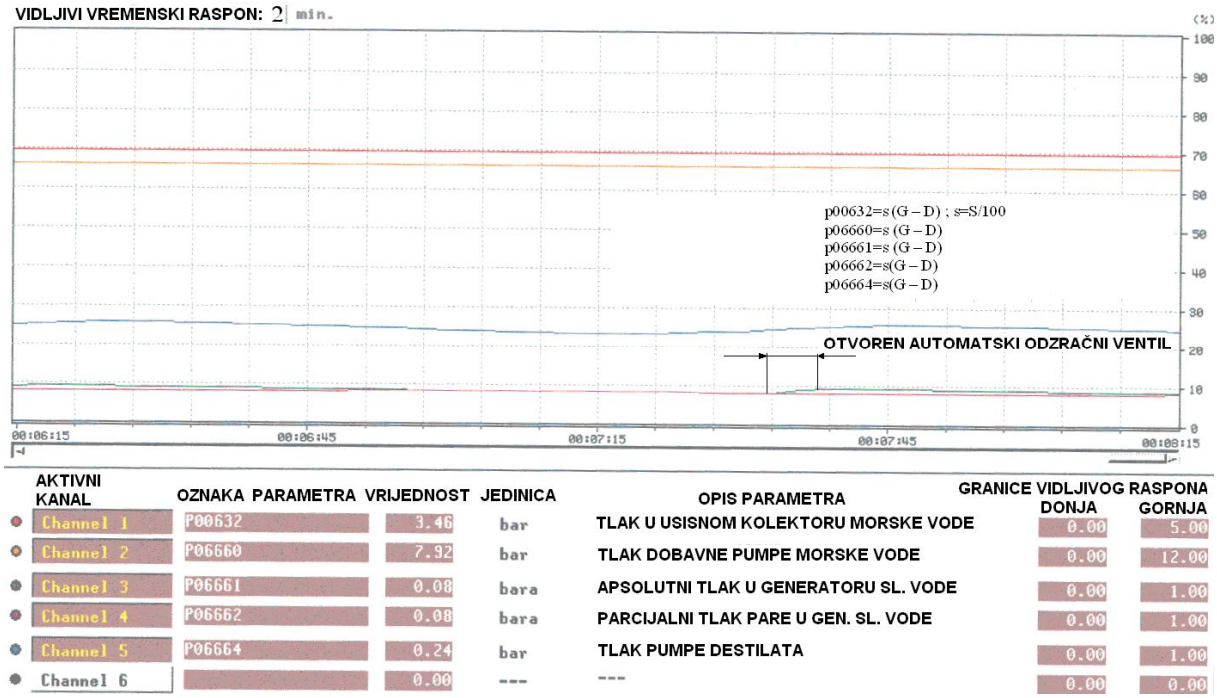
## 5.1. Matematički model jednostupanjskog destilacijskog uređaja

Potpoglavlja 3.1. do 3.4. daju matematičke modele elemenata jednostupanjskog destilacijskog uređaja: isparivača, odjeljivača kapljica, ejektora i kondenzatora. Pumpe dobavne morske vode potrebne za rad uređaja i ejektora, protok ogrjevnog fluida – visokotemperaturne slatke rashladne vode motora te protok rashladne vode kondenzatora nisu modelirani, jer se za uobičajeni rad uređaja s dovoljnom točnošću može uzeti kako su konstantni.

Za potvrdu gornjeg stavka snimljeni su dijagrami promjena karakterističnih veličina na istovjetnom destilacijskom uređaju simulatora brodskog postrojenja kojega proizvodi *NorControl*[1]. Na slici 5.1 su prikazane krivulje karakterističnih

[1] Neki su modeli uspoređeni sa simulatorom proizvođač kojega je *NorControl*, a koji je i renomirani proizvođač upravljačkih sustava brodkih strojeva i uređaja.

tlakova tijekom dvije minute[2]. Vrijednosti na ordinati su dane u postocima te se mogu izračunati prema mjerilu na slici.



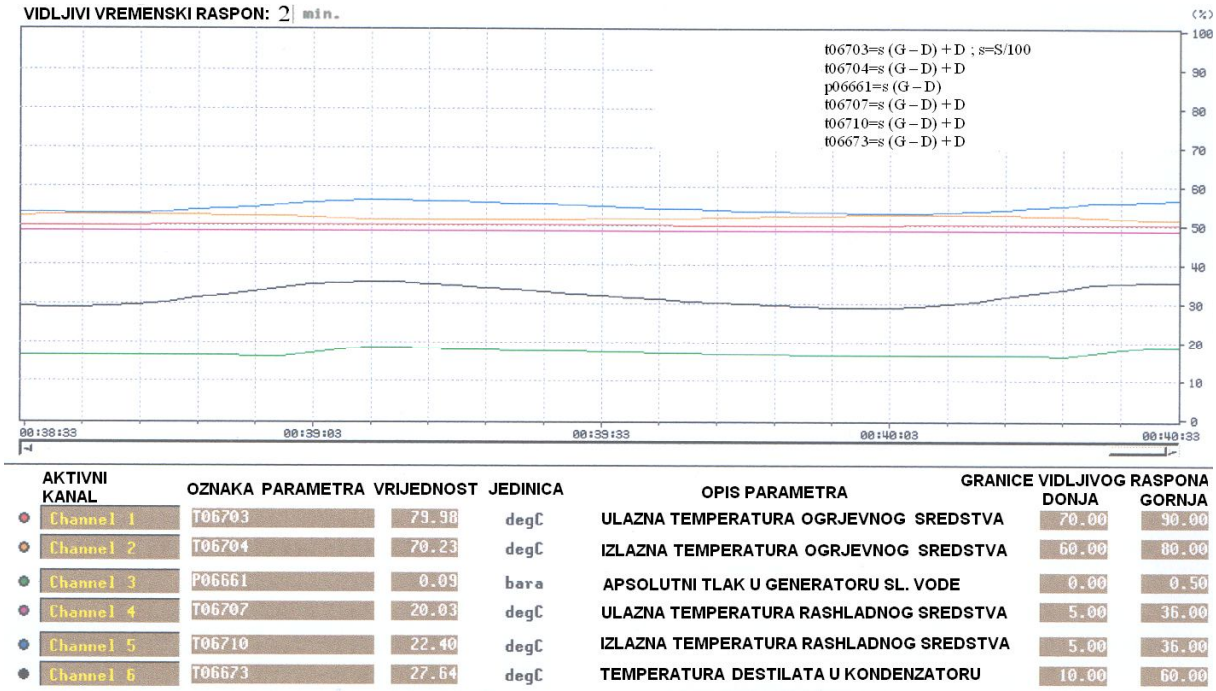

**Slika 5.1.** Ispis karakterističnih tlakova na beskonačnom pisaču

Na snimaču je aktivirano pet kanala te isti, redom odozgo prema dolje, prikazuju: 1) tlak u usisnom kolektoru morske vode [bar] - P00632 (crvena), 2) tlak dobavne pumpe morske vode [bar] - P06660 (oker), 3) apsolutni tlak u generatoru slatke vode [bara] - P06661 (zelena), 4) parcijalni tlak pare u generatoru slatke vode [bara] - P06662 (roza), te 5) tlak pumpe destilata [bar] - P06664 (plava)[3].

Vidljivo je da su tlakovi 1, 2 i 4 konstantni, dok se tlakovi 3 i 5 mijenjaju s vremenom. Apsolutni tlak u generatoru slatke vode znatnije se mijenja tek kod otvaranja automatskog ventila konstantnog tlaka[4], da bi nakon zatvaranja istog linearno opadao uslijed rada ejektora do ponovnog otvaranja ventila. Uslijed takvog rada pojavljuju se manje razlike u vrijednostima tlakova 3 i 4. Razlika između apsolutnog tlaka u generatoru slatke vode i parcijalnog tlaka pare najveća je nakon zatvaranja ventila, kada je u posudi najviše zraka. Zbog takvog rada pojavljuju se oscilacije tlaka 5.

[2] Podešeni vidljivi vremenski raspon.
[3] Zbog uobičajene brodske prakse na ovim je slikama i u objašnjenjima pojam tlak izjednačen s pojmom manometarski tlak, dok se na apsolutni tlak posebno ukazuje.
[4] Ventil je otvoren najviše 10-ak sekundi. Tlak nije konstantan, jer se radi o dvopozicionoj regulaciji. Vrijednost tlaka oscilira između dvaju podešenih granica. U ovom je slučaju podešeno 0,08 i 0,09 bar.

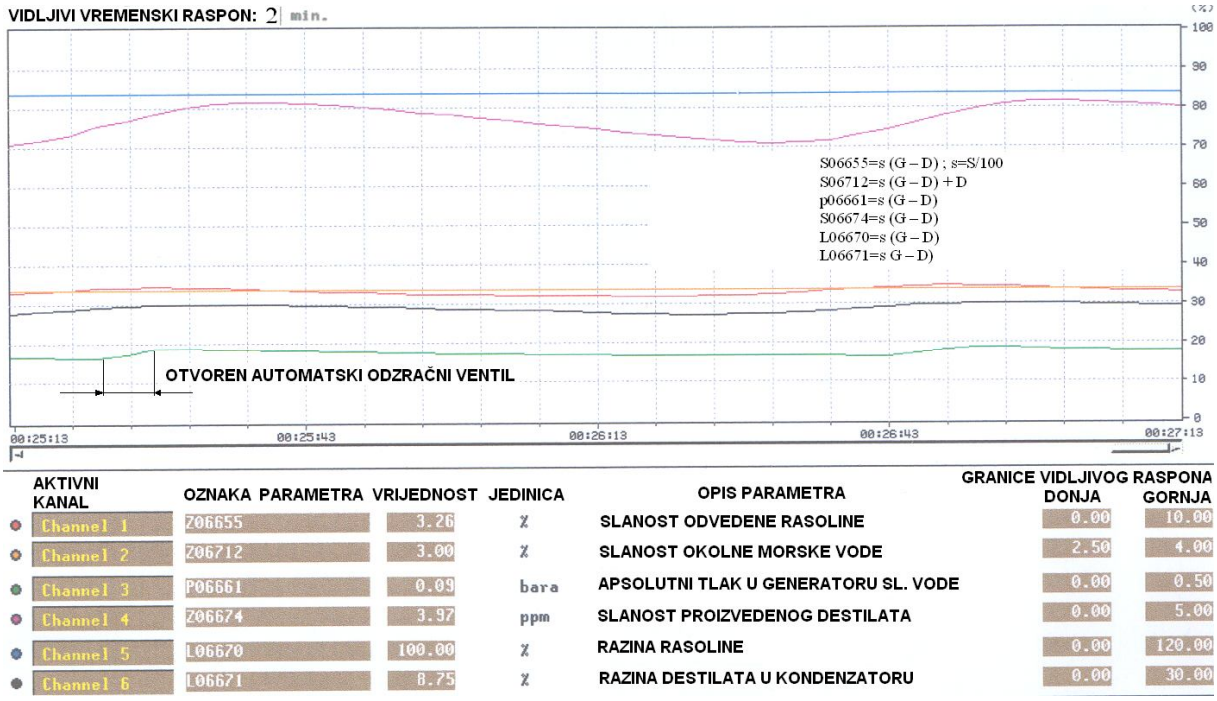
Slika 5.2 prikazuje karakteristične temperature u vremenu. Aktivno je svih šest kanala. U odnosu na prethodni dijagram zadržan je samo apsolutni tlak u generatoru slatke vode[5] kao karakteristična veličina. Preostalih pet kanala, redom odozgo prema dolje, prikazuju: 1) ulaznu temperaturu ogrjevnog sredstva [°C] - T06703 (crvena), 2) izlaznu temperaturu ogrjevnog sredstva [°C] - T06704 (oker), 4) ulaznu temperaturu rashladnog sredstva [°C] - T06707 (roza), 5) izlaznu temperaturu rashladnog sredstva [°C] - T06710 (plava), te 6) temperaturu destilata u kondenzatoru [°C] – T06673 (crna). Vidljivo je da su ulazne temperature konstantne dok se izlazne mijenjaju. Frekvencija promjena podudara se s frekvencijom otvaranja automatskog ventila konstantnog tlaka, odnosno promjenom apsolutnog tlaka u generatoru.




**Slika 5.2.** Ispis karakterističnih temperatura na beskonačnom pisaču

Pri istom režimu rada snimljen je dijagram promjene slanosti i razina, prikazan na slici 5.3. Aktivno je svih šest kanala koji redom odozgo prema dolje prikazuju: 1) slanost odvedene rasoline [%] – Z06655 (crvena), 2) slanost okolne morske vode [%] – Z06712 (oker), 3) apsolutni tlak u generatoru slatke vode [bara] - P06661 (zelena), 4) slanost proizvedenog destilata [ppm] – Z06674 (roza), 5) razinu rasoline [%] – L6670 (plava),te 6) razinu destilata u kondenzatoru [%] – L06671 (crna).

[5] Mjerilo se razlikuje jer je promijenjen vidljivi raspon tj. gornja granica prikaza je 0,5 bara.




**Slika 5.3.** Ispis karakterističnih slanosti i razina na beskonačnom pisaču

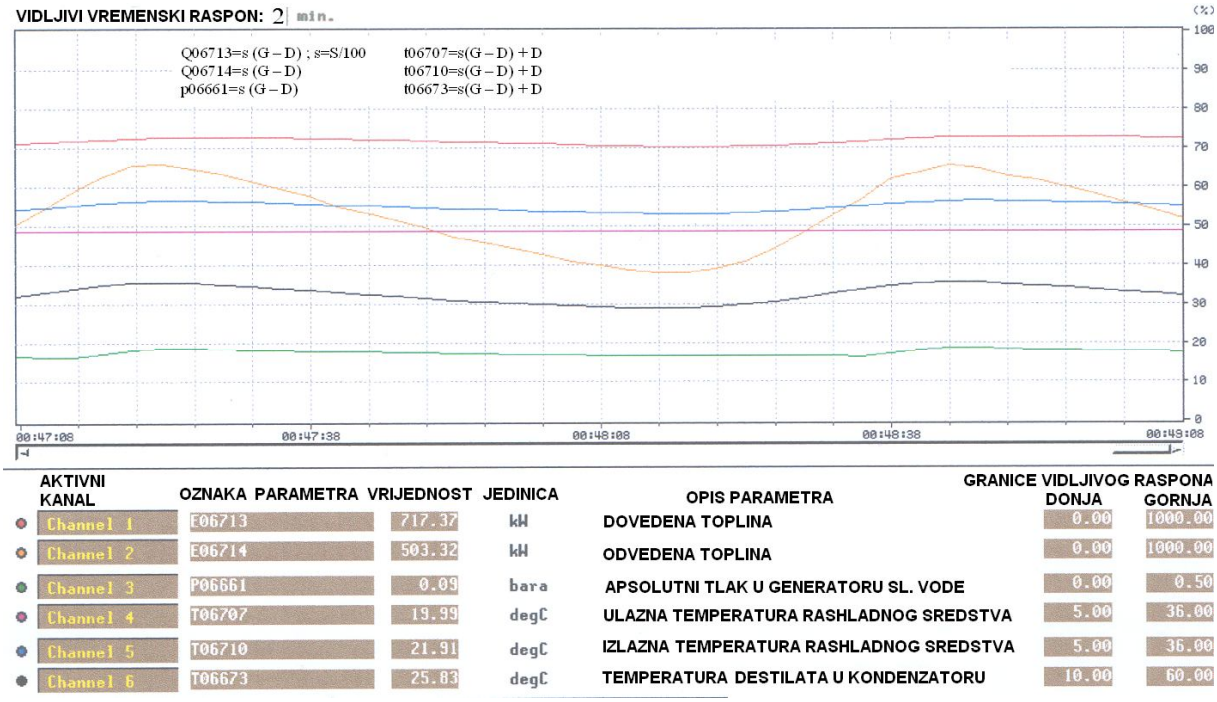
Ulazna je slanost konstantna[6]. Slanost rasoline mijenja se neznatno, a u skladu s time i slanost proizvedenog destilata. Promjena slanosti proizvedenog destilata može se činiti znatnom, no apsolutne su vrijednosti promjene malog reda veličine. Naime, slanosti morske vode i rasoline date su u postocima, dok je slanost destilata prikazana u milijuntnim dijelovima. Također, promjene u slanosti rasoline i destilata, kao i promjene razine destilata u kondenzatoru podudaraju se s promjenama apsolutnog tlaka u generatoru uzrokovanih periodičkim otvaranjem automatskog ventila konstantnog tlaka.

Koeficijenti prijelaza topline kroz izmjenjivačke površine isparivača i kondenzatora određeni su prema preporukama danm u relevantnoj literaturi - VDI Heat Atlas. Izvedeni su za cijevne izmjenjivače sa šahovskim rasporedom. Modeli odjeljivača kapljica i ejektora rasoline te plinova također su preuzeti iz objavljene znanstvene literature.

Dijagram na slici 5.4 prikazuje odnos dovedene i odvedene topline. Temperatura ulazne morske vode u kondenzator je konstantna. Ostale veličine osciliraju u vremenu. Frekvencija se i u ovom slučaju poklapa s frekvencijom otvaranja automatskog ventila konstantnog tlaka. Zbog povećanja apsolutnog tlaka u posudi, raste tlak zasićenja te zbog konstantne temperature rashladne morske vode kondenzatora raste količina odvedene topline. Iz istog se razloga povećava,

[6] Ovakva simulacija ne odstupa previše od realne vrijednosti, jer se, statistički gledano, slanost svjetskih mora malo razlikuje.

iako neznatno, temperatura destilata i izlazna temperatura rashladne morske vode kondenzatora.




**Slika 5.4.** Ispis karakteristične dovedene i odvedene količine topline te temperatura rashladnog sredstva na beskonačnom pisaču

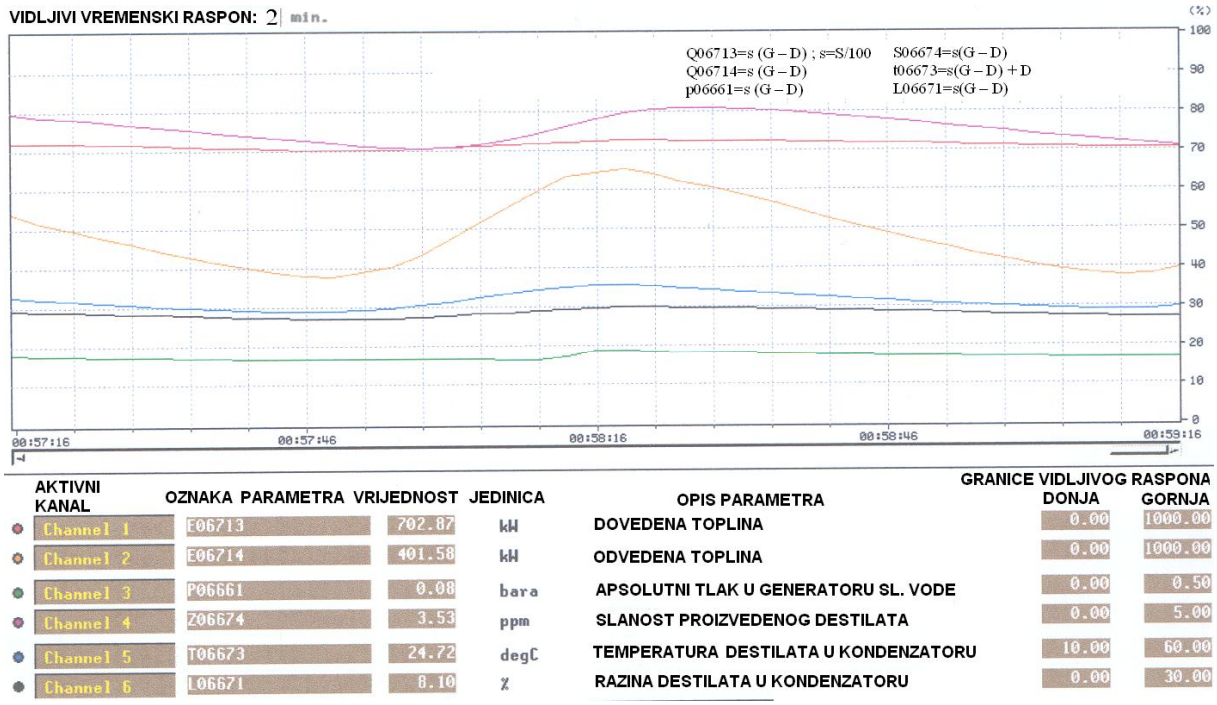
Iz prethodnih je dijagrama uočljiv dominantan utjecaj apsolutnog tlaka u posudi na cjelokupni rad uređaja. Sve promjene radnih parametara uvjetovane su promjenama tlaka do kojih dolazi zbog rada ejektora i periodičnog otvaranja automatskog ventila konstantnog tlaka.

Osim utjecaja tlaka, analiziran je i utjecaj promjene količine odvedene topline koja je mijenjana pritvaranjem prigušnog ventila ugrađenog na cjevovodu rashladne morske vode kondenzatora.

Na slici 5.5 prikazan je dijagram s karakterističnim vrijednostima pri normalnom radu uređaja. Frekvencija promjena podudara se s frekvencijom otvaranja automatskog ventila konstantnog tlaka.

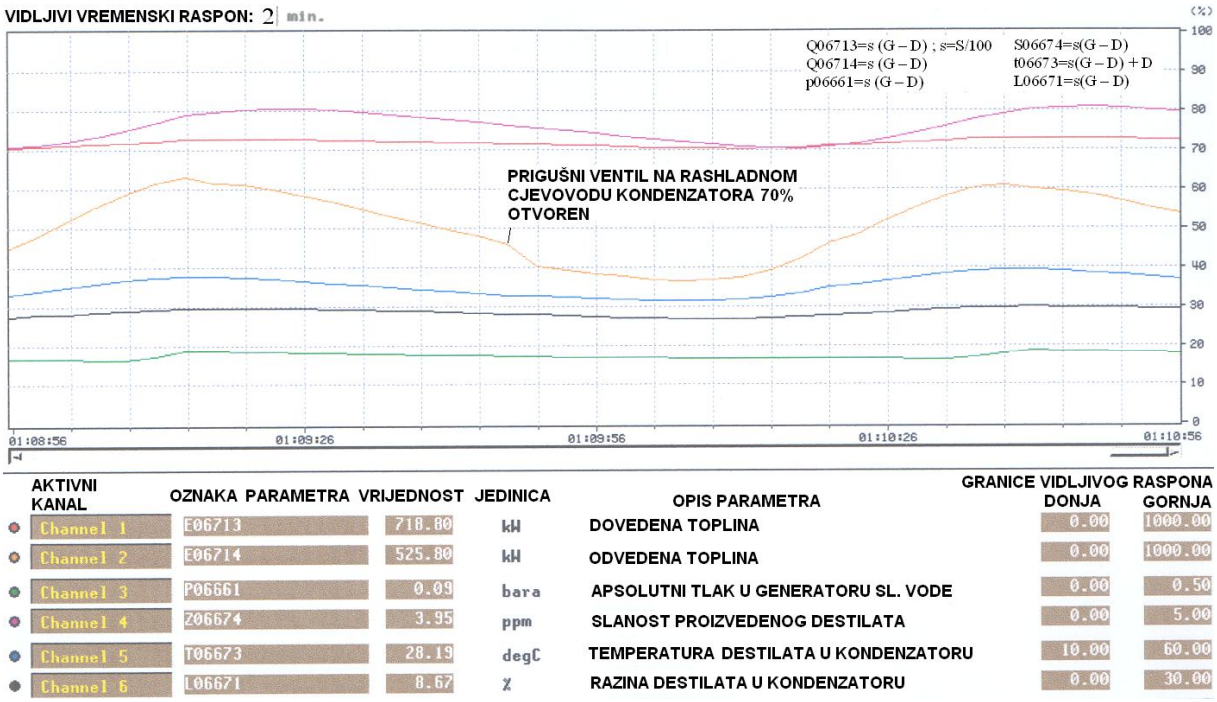
Važno je uočiti kako su odstupanja kvalitete proizvedenog destilata, tj. slanosti te količine proizvedenog destilata neznatna. Pri analizi je snimljeno više dijagrama[7], no zbog obima rada prikazani su dijagrami za slučaj kada je prigušni ventil otvoren 70% (slika 5.6) i 50% (slika 5.7).

[7] Osim dijagrama za normalni rad, snimljni su dijagrami kada je prigušni ventil otvoren 90%, 80%, 70%, 60% i 50%.



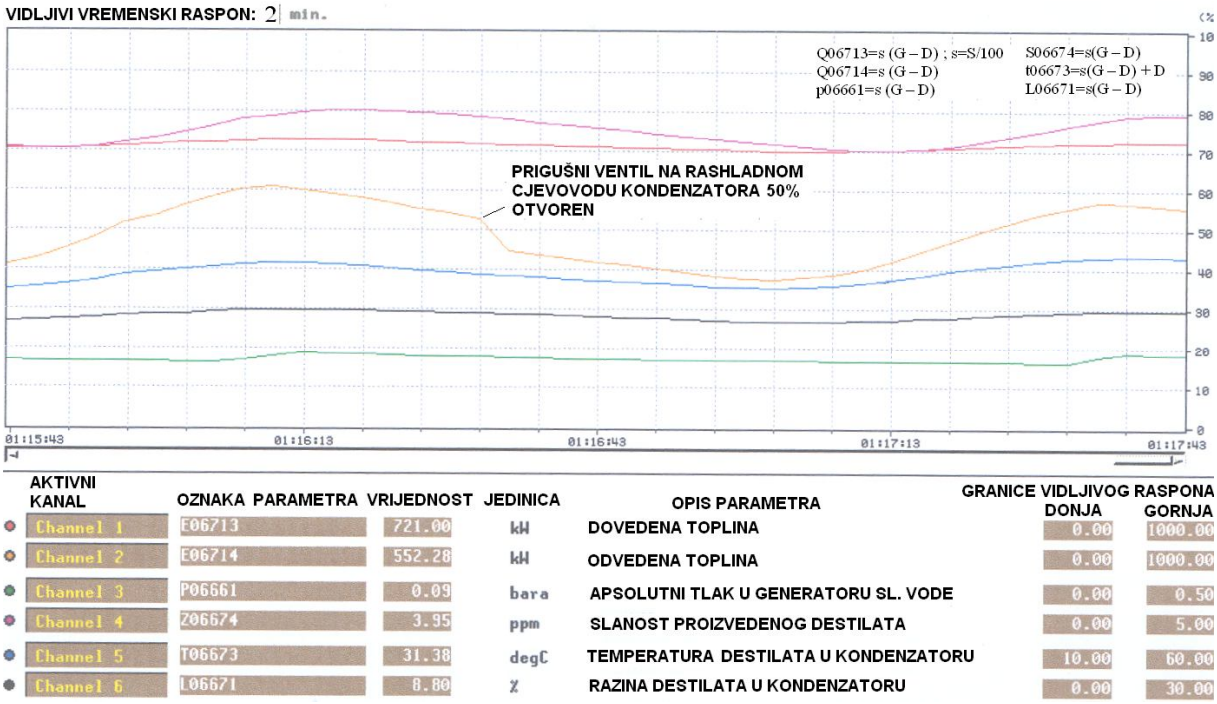

**Slika 5.5.** Ispis karakterističnih veličina za normalan rad uređaja na beskonačnom pisaču

Na dijagramu prikazanom na slici 5.6 se može uočiti veći gradijent promjene količine odvedene topline uslijed pritvaranja prigušnog ventila.




**Slika 5.6.** Ispis karakterističnih veličina za slučaj prigušnog ventila otvorenog 70% na beskonačnom pisaču

Znatnije smanjenje količine odvedene topline uslijed daljnjeg pritvaranja prigušnog ventila primjećuje se i na dijagramu na slici 5.7. Kao najvažnija i to negativna posljedica ovakvog rada, može se uočiti nekvaliteta destilata. Slanost proizvedenog destilata raste s pritvaranjem prigušnog ventila.

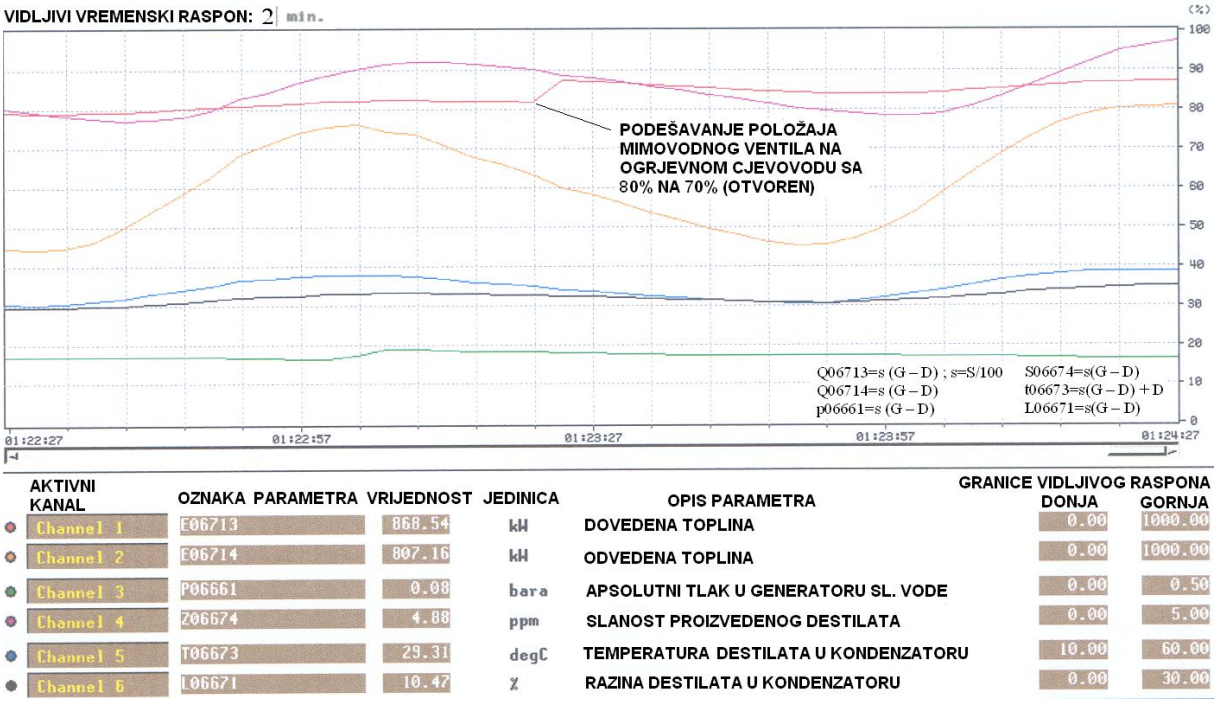



**Slika 5.7.** Ispis karakterističnih veličina za slučaj prigušnog ventila rashladne morske vode otvorenog 50% na beskonačnom pisaču

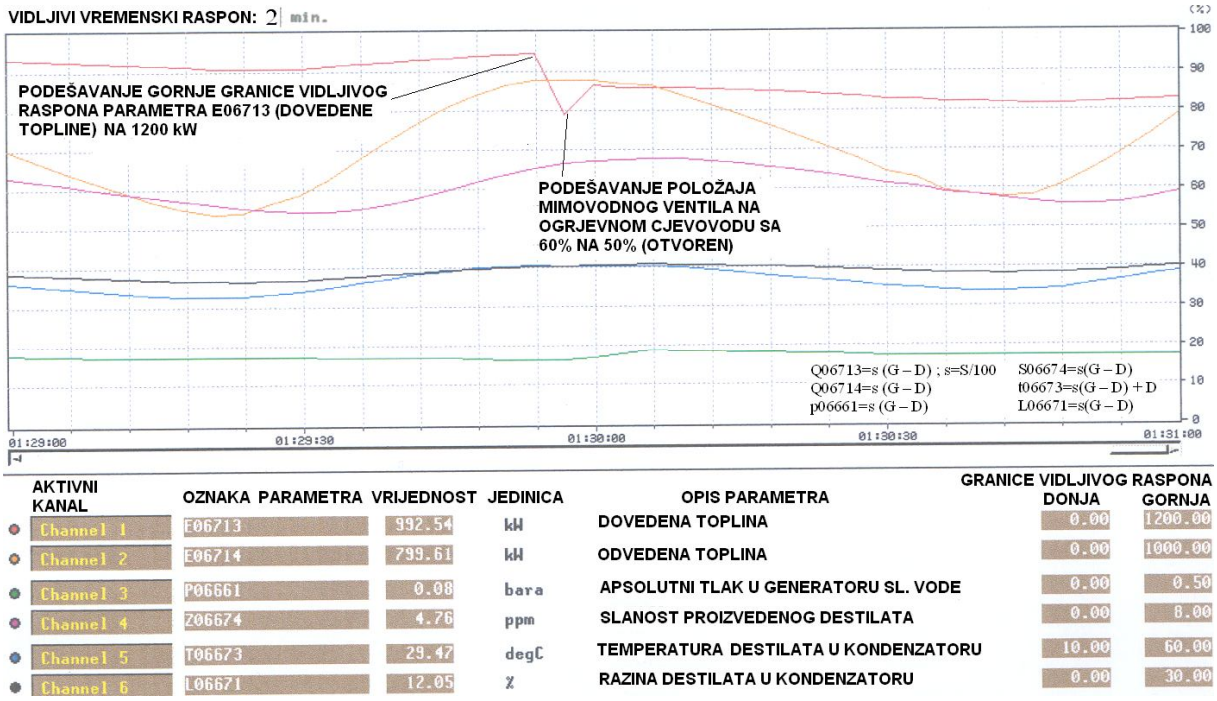
U odnosu na normalan rad prikazan dijagramom na slici 5.5 izvršena je analiza utjecaja promjene količine dovedene topline djelovanjem na mimovodni ventil na cjevovodu ogrjevne slatke vode. Isti se iz potpuno otvorenog položaja, kada u isparivač struji najmanja količina ogrjevne vode, pritvara s 10%-tnim promjenama. Zbog obima rada prikazani su dijagrami s ventilom koji je otvoren 70% i 50%.

Slika 5.8 prikazuje karakteristične veličine kada je ventil otvoren 70%. Uočava se trenutak kada započinje pritvaranje ventila, čime se preusmjerava ogrjevni fluid u isparivač što se očituje povećanjem količine dovedene topline.

Periodično pritvaranje mimovodnog ventila uzrokuje povećanje količine dovedene topline. Na slici 5.9 označen je trenutak promjene vidljivog raspona, jer je tijekom cijelog postupka analize došlo do 40%-tnog povećanja količine dovedene topline. I u ovom se slučaju uočava povećanje nekvalitete destilata. Iako slanost proizvedenog destilata oscilira u skladu s periodičkim otvaranjem automatskog ventila konstantnog tlaka, srednja se vrijednost povećava.




**Slika 5.8.** Ispis karakterističnih veličina za slučaj mimovodnog ventila ogrjevne vode otvorenog 70% na beskonačnom pisaču




**Slika 5.9.** Ispis karakterističnih veličina za slučaj mimovodnog ventila ogrjevne vode otvorenog 50% na beskonačnom pisaču

Iz prethodne analize rada postojećih uređaja može se zaključiti kako je točna pretpostavka o važnom utjecaju tlaka u posudi na ispravan rad. Također, na

slanost proizvedenog destilata utječe bilanca dovedene i odvedene količine topline.

Informacijski model simulira rad uređaja u raznim fazama: (1) upućivanja, odnosno postizanja željenog podtlaka, (2) zagrijavanja i isparavanja morske vode, odvođenja rasoline i plinova te sakupljanja i odvodnje destilata ili ukratko normalnog rada te (3) zaustavljanja.

## 5.2. Matematički model kapaciteta

Podpoglavlje 3.6. daje matematički model stvarnog ili procesnog kapaciteta. Ugrađeni uređaj ima određeni nominalni kapacitet koji će tijekom jedne kalendarske godine dati maksimalnu količinu proizvoda. Metodom intervjua odgovornih osoba koje plove na brodovima moderne tehnologije dana je vrijednost plovidbenih sati broda. Ista je statistički potvrđena u objavljenoj literaturi.

Ukupni godišnji broj radnih sati mora se umanjiti za sate rada izgubljene zbog raznih potrebnih eksploatacijskih postupaka, što je određeno njihovim brojem i pojedinačnim trajanjem. Kako se ukupan broj postupaka održavanja može smanjiti pažljivim vođenjem procesa, metodom intervjua empirijski je određen broj izgubljenih sati rada, te je u skladu s istom dan izraz za procesni godišnji kapacitet uređaja.

Prema željenom procesnom kapacitetu uređaja korisnik treba odabrati nominalni kapacitet.

## 5.3. Matematički model ovisnosti nominalnog kapaciteta o eksploatacijskim uvjetima

U potpoglavlju 3.7. daje se odnos prekidnog i neprekidnog rada destilacijskog uređaja. Usporedba je izvršena matematičkim i grafičkim modelom. Neprekidno isparavanje je jedini način rada uređaja većih nominalnih kapaciteta te se daljnji razvoj modela odnosi samo na takve uređaje.

Uslijed dovođenja topline morska se voda, pojednostavljeno prikazana kao otopina jedne krute tvari (soli), zagrijava do temperature zasićenja, a zatim djelomično isparava. Sastav morske vode, odnosno udio otopljene soli prikazan

je kao koncentracija i prema danom matematičkom modelu ovisi o količini predane toplinske energije. Navedeni odnos predstavlja 'intenzitet isparavanja'.

Promjena koncentracije otopine ovisi o odnosu isparenog udjela vode prema ukupno u proces uvedene morske vode. Model pretpostavlja kako će se proces voditi na način da koncentracija soli u ispuštenoj otopini ne prelazi neku graničnu vrijednost[8]. Ukoliko bi koncentracija poprimila graničnu vrijednost ili je premašila, dolazilo bi do ubrzanog nastanka kamenca na stijenkama isparivačkih cijevi te smanjenja procesnog kapaciteta i povećanja cijene proizvedene vode. Koncentracija soli je ekvivalentna slanosti otopine koja je mjerljiva[9]. Zbog pojednostavljenja izvedbe i uštede, mjerenje slanosti okolne morske vode je nepotrebno te se može uzeti prosječna slanost svjetskih mora. Slanost proizvedenog destilata mjeri se samo zbog kontrole kvalitete 'proizvoda'.

Model pokazuje utjecaj udjela količine topline utrošene na zagrijavanje morske vode do temperature zasićenja i udjela toplinske energije utrošene na isparavanje u ukupnom iznosu utrošene topline na količinu proizvedenog destilata. Odnos navedenih toplina ovisi o apsolutnom tlaku u posudi, tj. podtlaku s kojim se mijenja temperatura zasićenja. Promjena apsolutnog tlaka u posudi modelirana je prema karakteristikama ejektora plinova te se ovaj smanjuje do postizanja optimalne vrijednosti. Dalje ga se održava u željenom rasponu povremenim otvaranjem regulacijskog ventila.

Matematički model intenziteta isparavanja, tj. odnosa količine dovedene toplinske energije, udjela toplinske energije utrošene za zagrijavanje i udjela toplinske energije utrošene za isparavanje s količinom proizvedenog destilata te model promjene apsolutnog tlaka u posudi, također je potvrđen empirijskim podacima proizvođača opreme ugrađene na moderne brodove, podacima proizvođača kontrolne i upravljačke opreme te intervjuima s odgovornim osobama, odnosno časnicima stroja.

## 5.4. Primjena modela

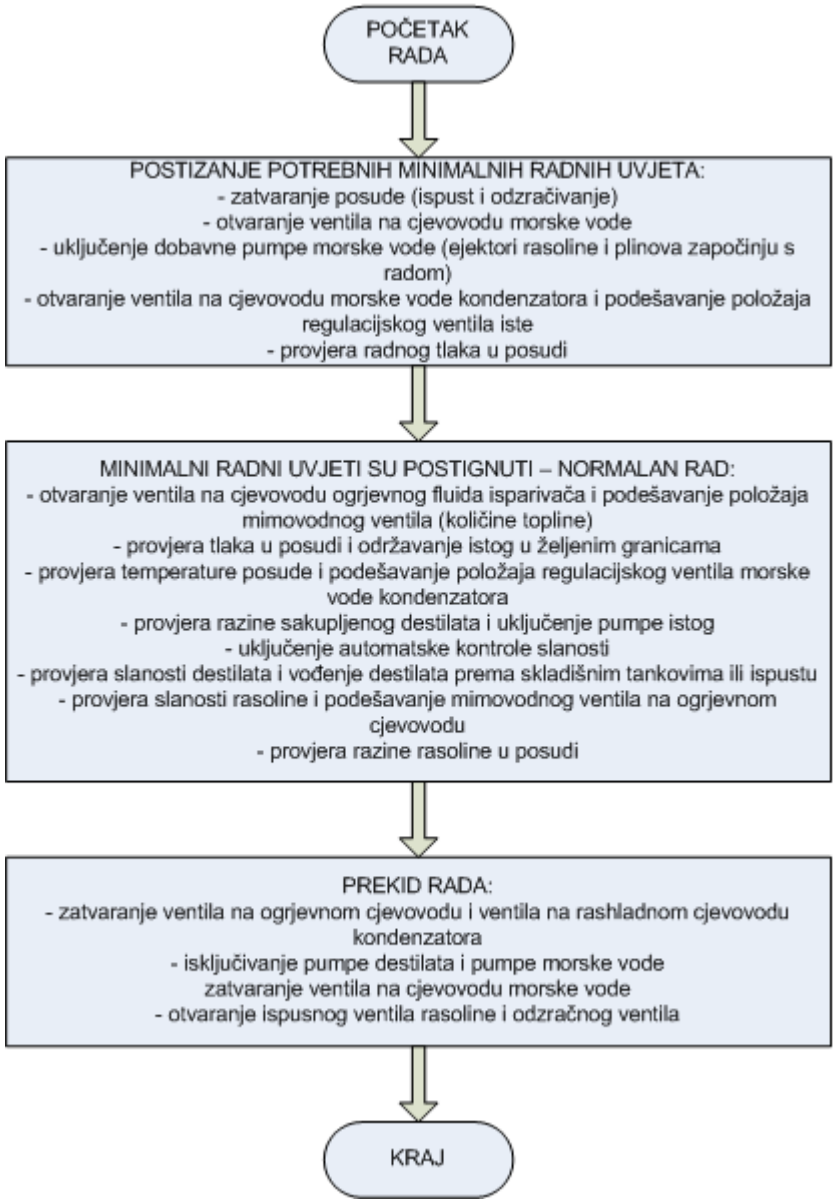
Izrađeni matematički modeli te njihova numerička rješenja mogu se koristiti u postupku projektiranja uređaja, tj. odabira metode desalinizacije te odabira sustava upravljanja, no može biti koristan alat pri odlučivanju u postupcima upravljanja radom postrojenja ukoliko se treba voditi računa o cijeni proizvedene vode ili ukupnom utrošku energije.

[8] Željena koncentracija.
[9] U dosadašnjoj se praksi, tj. u do sada ugrađivanim uređajima, mjeri slanost proizvedenog destilata, no ne i ispuštene rasoline.

Kriteriji važni za odabir metode i tipa uređaja za desalinizaciju obrađeni su u prethodnim poglavljima. Energetska efikasnost postrojenja samo je jedan od njih.

### 5.4.1. Dijagram toka rada destilacijskog uređaja

Kako je prije utvrđeno cjelokupni rad može se podijeliti u tri faze u skladu s čime će i generalni dijagram toka biti prikazan slikom 5.10.




**Slika 5.10.** Blok dijagram rada uređaja za destilaciju

Dijagram toka isti je u slučaju ručnog upravljanja procesom od strane časnika stroja i potpuno automatski vođenog procesa. U drugom slučaju svi ventili moraju biti daljinski upravljani, a izmjerene fizikalne veličine prenose se upravljačkoj jedinici.

Na slici 5.11 detaljno je prikazan dijagram toka pripremne faze do postizanja potrebnog podtlaka. Uključeno je i provjeravanje u radu, odnosno dijagnostika kvarova.

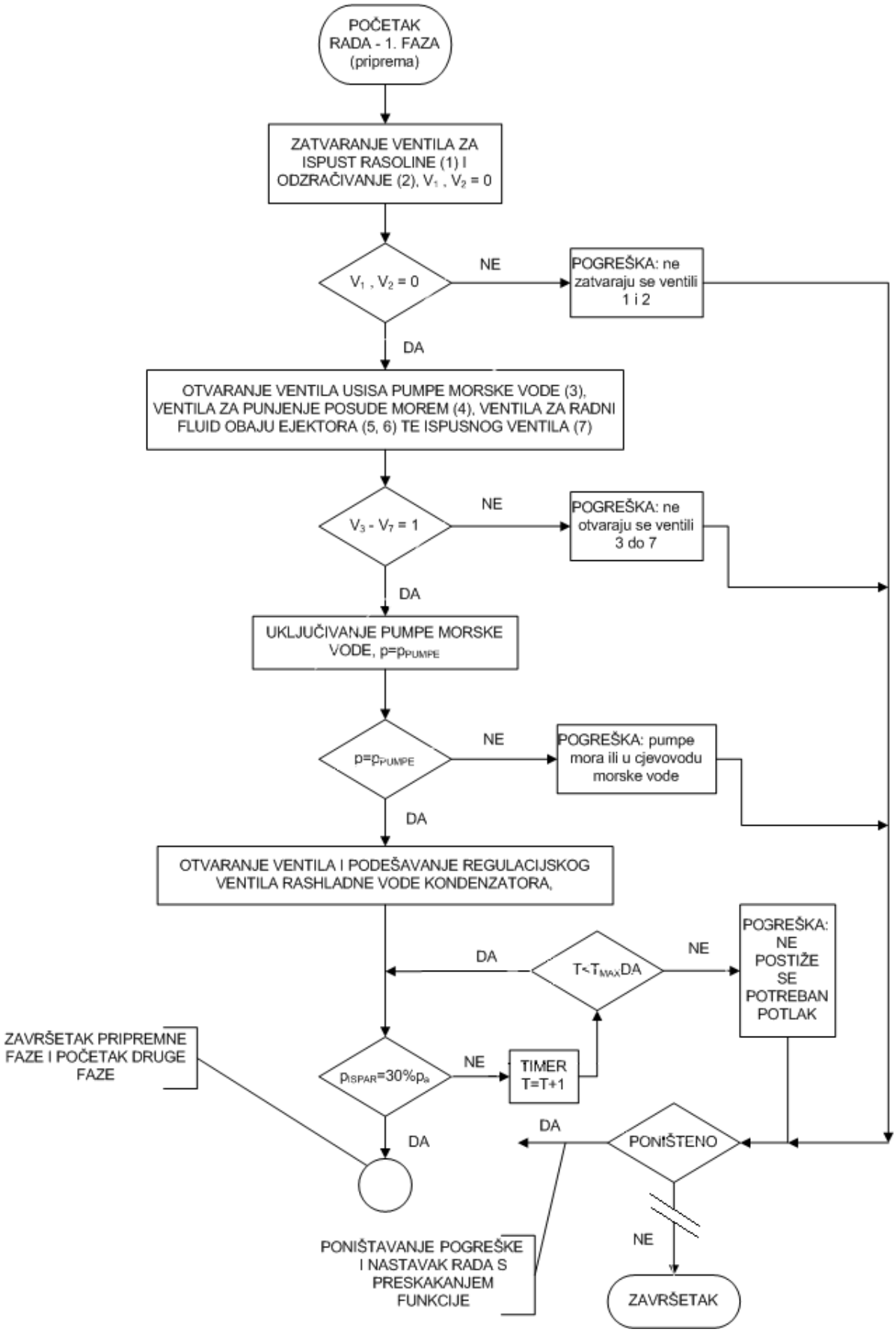
Zbog jednostavnosti, upravljanje položajem zapornih ventila i provjera položaja prikazano je grupno za skupinu ventila. U stvarnosti se to izvodi jedinično. Kada klip aktuatora pojedinog ventila dođe do krajnjeg položaja zatvara strujni krug te upravljačka jedinica prima impuls potvrde. Nadalje, kao potrebna vrijednost za završetak pripremne faze uzet je 30%-tni vakuum u posudi što može biti promijenjeno u skladu sa stvarnim potrebama ili izvedbom uređaja.

U prvoj i drugoj fazi rada moguće je premostiti, tj. poništiti pogreške koje se javljaju u radu. Primjer za takvu potrebu i djelovanje mogao bi biti slučaj kada aktuator ventila dobije 'prazan hod' te se ne indicira postizanje potrebnog položaja, iako je isti u biti otvoren. Bilo bi kontraproduktivno kada u takvom slučaju ne bi postojala mogućnost nastavka rada. Nadalje, moguće se pogreške daljinskih mjernih instrumenata te i u tom slučaju postoji potreba omogućavanja nastavka rada, a potreba provjere rada postrojenja može se ostvariti očitanjem vrijednosti na lokalnom mjernom instrumentu.

Vrijednost slanosti destilata nije dana brojčanom vrijednošću jer ovisi o željama i potrebama korisnika te mogućnostima uređaja i po potrebi se može podešavati.

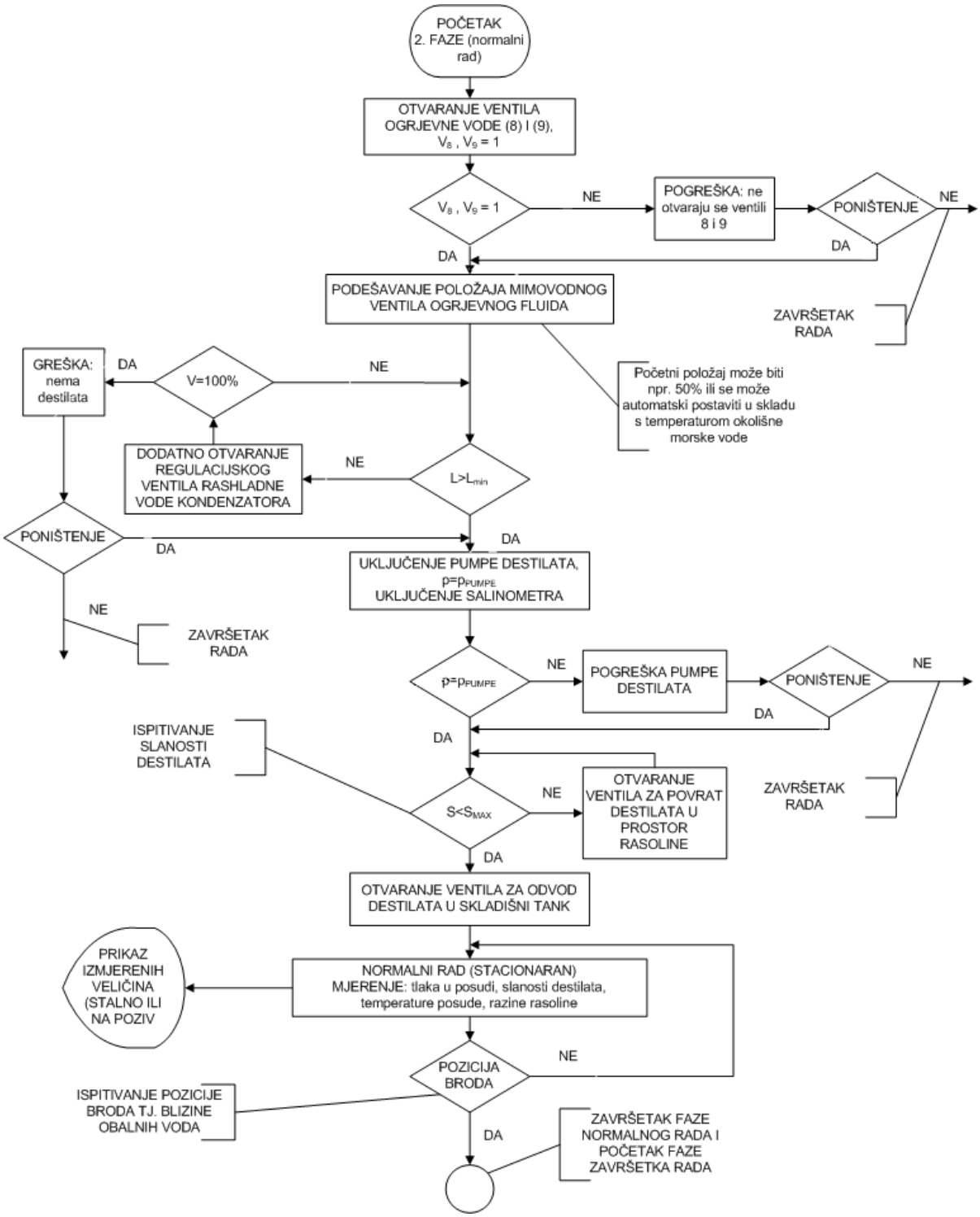
Slika 5.12 prikazuje dijagram toka druge faze, tijekom koje se od minimalnih uvjeta potrebnih za rad postižu normalni radni parametri te nastavlja normalna proizvodnja destilata. Ova je faza razrađena detaljnije u odnosu na prethodnu. Pogreške koje se mogu javljati tijekom početka ove faze također se mogu premostiti. Kada se postignu normalni radni parametri, uređaj nastavlja s normalnim radom. Tijekom tog dijela faze, koja bi statistički gledano trebala najduže trajati, u skladu s izmjerenim vrijednostima radnih parametara upravljačka jedinica vrši regulaciju, tj. upravlja radom, alarmira nenormalna stanja ili dijagnosticira pogreške. Ostvarivanje ovog dijela ovisit će o stvarnoj izvedbi, odnosno broju i vrsti ugrađenih mjernih instrumenata. Kako je prije već navedeno, jedan od načina razmišljanja kod procjene optimalne izvedbe postrojenja dat će rješenje s malim brojem ugrađenih mjernih osjetnika i manjoj početnoj cijeni, ali i mogućim većim troškovima tijekom eksploatacije[10] [111].

[10] Zbog nepreciznog praćenja rada, češćih pogrešaka, višim troškovima održavanja.



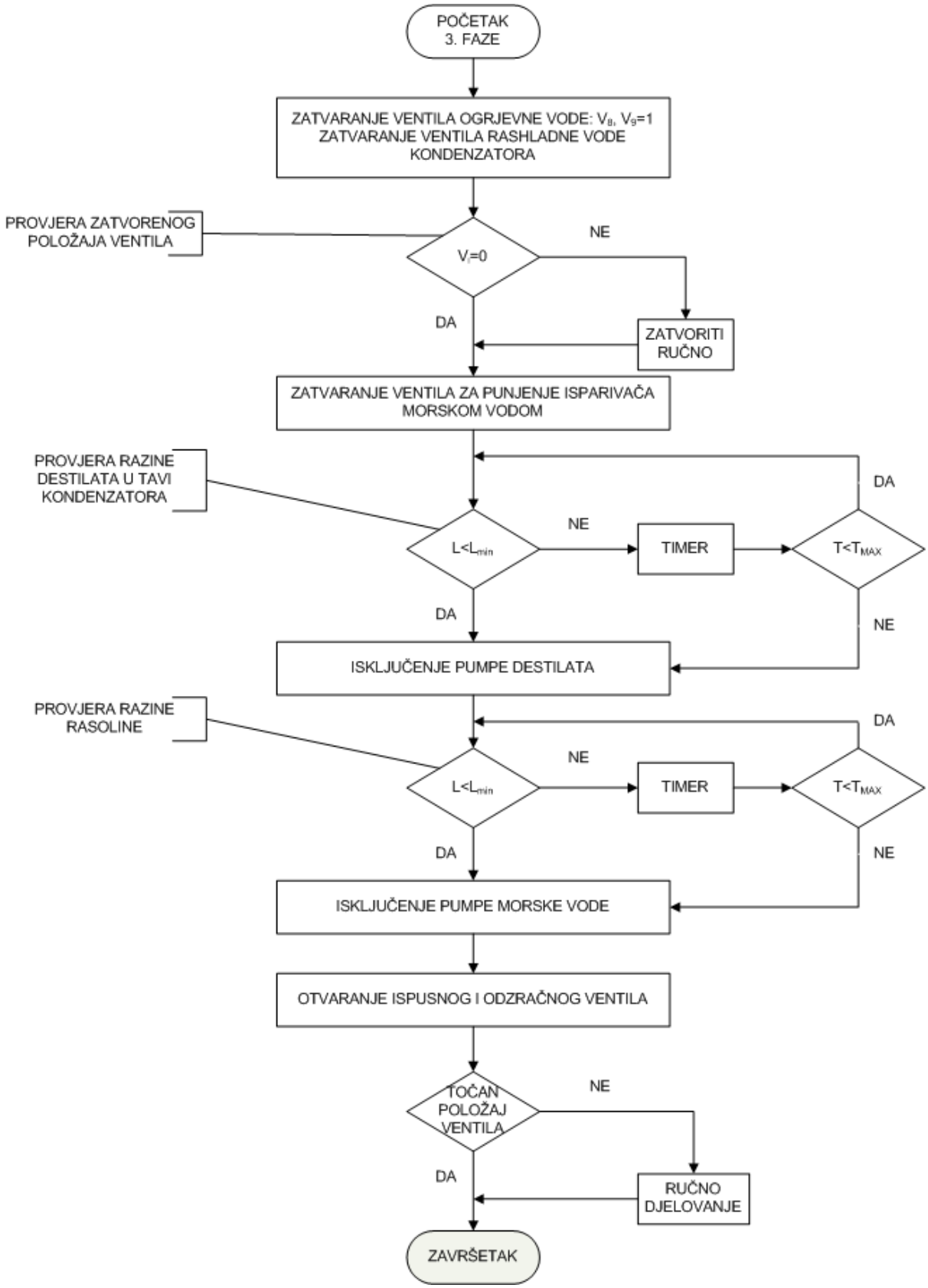

**Slika 5.11.** Blok dijagram prve, pripremne faze

Potpuno suprotno razmišljanje rezultirat će većim brojem mjernih instrumenata, boljim praćenjem rada uređaja i u skladu s time manjim troškovima održavanja, ali većom početnom cijenom.




**Slika 5.12.** Blok dijagram faze postizanja optimalnih karakteristika i normalnog rada

Tijekom treće faze, blok dijagram koje je prikazan na slici 5.13, postupak se vodi s ciljem potpunog pražnjenja posude, odnosno pražnjenja destilata, morske vode ili rasoline te upuštanja zraka, kako bi u posudi nakon zaustavljanja ostao

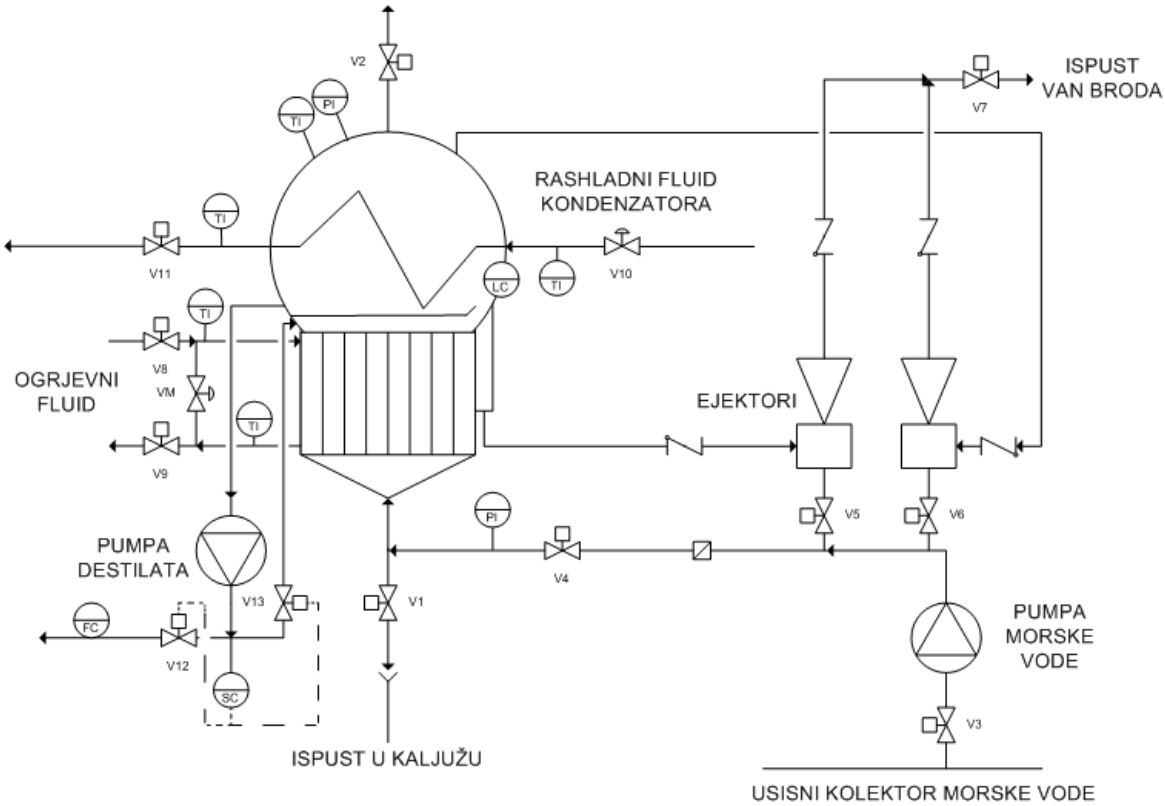



**Slika 5.13.** Blok dijagram treće, završne faze, odnosno faze završetka rada

atmosferski tlak ili tlak jednak tlaku u strojarnici[11].

### 5.4.2. Prijedlog rješenja sustava upravljanja jednostupanjskim destilacijskim postrojenjem

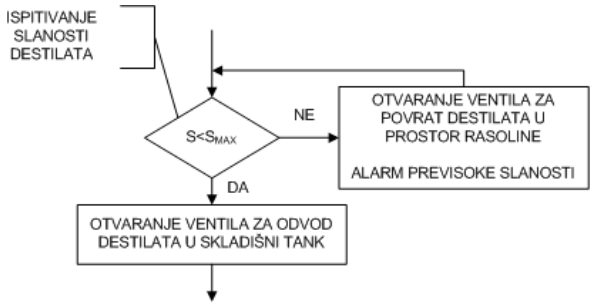
Na slici 5.14. prikazan je uređaj s jednostavnijom, može se reći uobičajenom, izvedbom mjerne tehnike. Indikacija je lokalna, kao i upravljanje uređajem. Automatizirano je djelovanje na ventile 12 i 13 koji su, ovisno o postignutoj slanosti destilata, uvijek u soprotnom položaju. Osim toga, mnoge novije izvedbe imaju i automatsko djelovanje na ventil 2, koji se otvara u slučaju prevelikog podtlaka te u posudu pušta zrak.



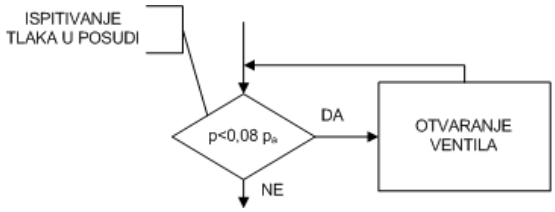

**Slika 5.14.** Shema destilacijskog uređaja s uobičajenim postavom mjernih instrumenata

U skladu s prethodnim stavkom, detalj dijagrama toka prikazanog na slici 5.12 koji se odnosi na normalni rad uređaja, imao bi dvije funkcije koje su prikazane na slici 5.15 i 5.16.

[11] Uobičajeno je da se sustav ventilacije strojarnice projektira kako bi u svim režimima rada održavao predtlak od 50 Pa.

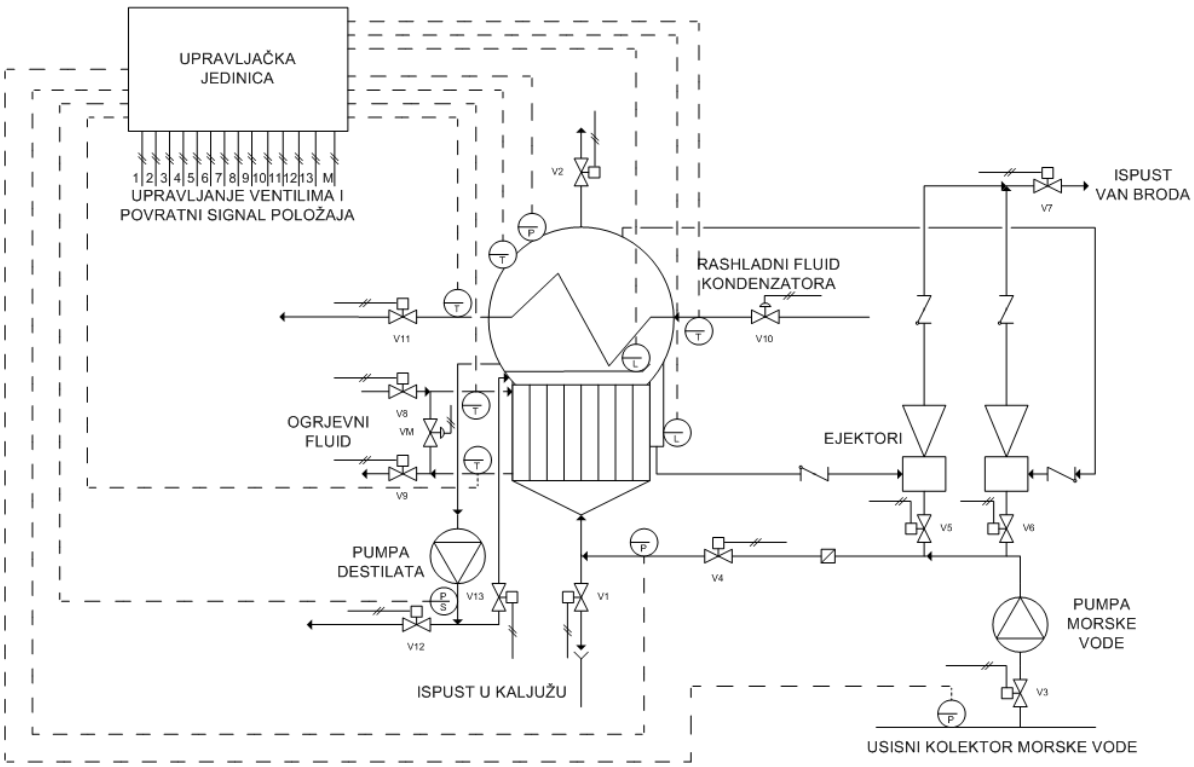



**Slika 5.15.** Dijagram toka funkcije kontrole slanosti i ispuštanja destilata ukoliko je slanost prevelika




**Slika 5.16.** Dijagram toka funkcije kontrole tlaka i puštanja zraka u posudu u slučaju preniskog tlaka

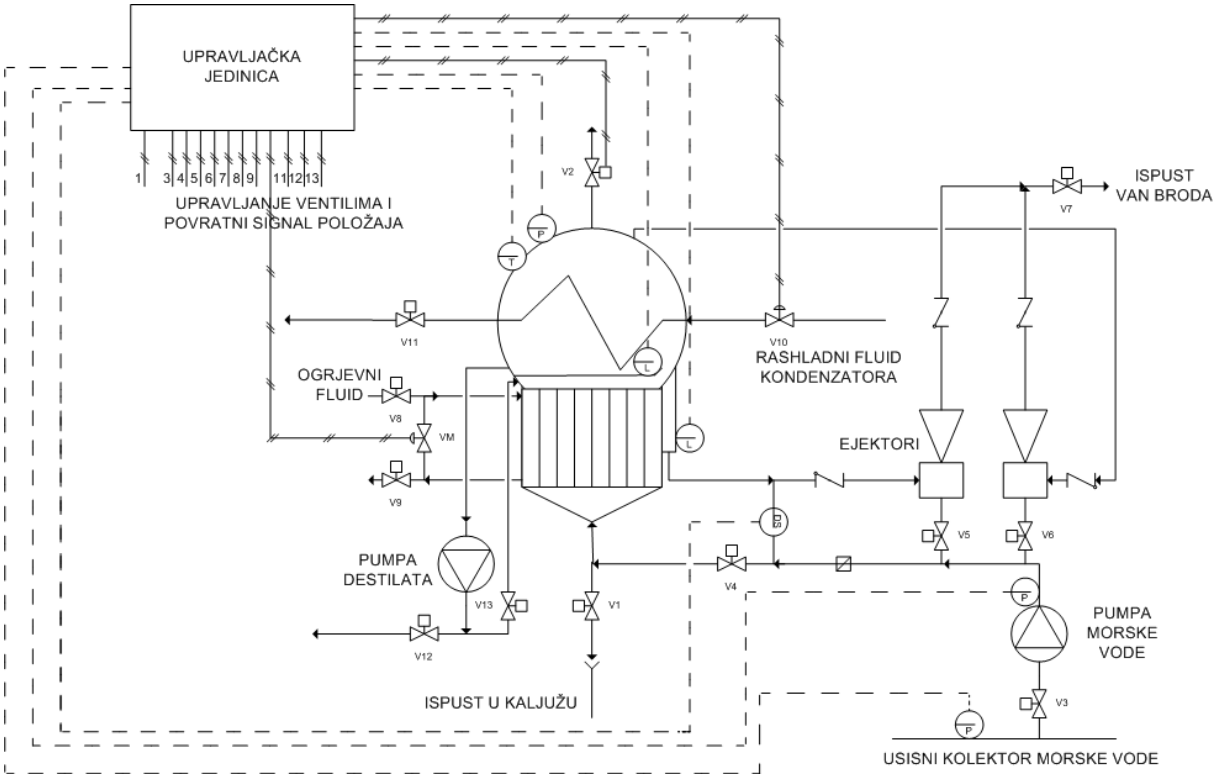
Suprotno od postrojenja prikazanog na slici 5.14 s odgovarajućim funkcijama automatskog djelovanja prikazanim na slikama 5.15 i 5.16, kod kojeg su uštede postignute cijenom koštanja uređaja, uključujući i mjerne instrumente, na slici 5.17 je prikazano postrojenje koje ima, prije svega zbog većeg broja mjernih instrumenata i integriranog informacijskog sustava upravljanja [111], veću cijenu koštanja, ali se uštede postižu optimalnim radom, tj. nižim eksploatacijskim troškovima.




**Slika 5.17.** Shema destilacijskog uređaja s daljinskim automatskim upravljanjem

Potpuno u skladu s matematičkim modelom danim izrazom 3.7.70 je sustav prikazan na slici 5.18. U odnosu na prethodno rješenje broj mjernih instrumenata je smanjen, a s time i cijena. Na prikazanoj su shemi svi ventili daljinski upravljani preko upravljačke jedinice. Dodatno sniženje cijene postiže

se zamjenom istih s loklano upravljanim ventilima, osim u slučaju ventila oznaka V2, V10 i VM.




**Slika 5.18.** Shema destilacijskog uređaja s pojednostavljenim daljinskim automatskim upravljanjem

Intenzitet isparivanja ovisi o količini dovedene topline, odnosno postignutoj temperaturi zagrijavane morske vode ili rasoline te temperaturi zasićenja. Količina dovedene topline regulira se djelovanjem na mimovodni ventil VM. Temperatura zasićenja ovisi o tlaku u posudi, koji ovisi o radu ejektora plinova i djelovanju na ventil V2. Proces kondenzacije također ovisi o temperaturi zasićenja, tj. tlaku u posudi te o količini odvedene topline.

Regulacija tlaka u posudi je dvopozicijska. U upravljačkoj jedinici zadane su dvije vrijednosti tlaka u skladu s kojima se automatski ventil V2 otvara i zatvara. Bilo koji poremećaj bilance u proces uvedene i iz njega izvedene energije rezultirat će povišenjem temperature ljuske posude te je stoga ugrađen osjetnik temperature. Prema očitanom poremećaju upravljačka jedinica djelovat će na ventile VM i V10.

Umjesto mjerenja slanosti proizvedenog destilata, mjeri se razlika slanosti uvedene morske vode i ispuštene rasoline. Prema bilanci masa uvedene morske

vode, ispuštene rasoline i proizvedenog destilata[12] i razlike koncentracije upravljačka jedinica izračunava slanost destilata te može djelovati na ventile V12 i V13 ili naprosto aktivirati alarm previsoke slanosti.

Kao dodatni elementi kontrole ispravnosti rada ili automatskog procesa upućivanja uređaja ugrađeni su osjetnici razine rasoline u isparivaču i destilata u kondenzatoru.

[12] Masa plinova koju iz posude isisava ejektor u biti je zanemariva.

# 6. ZAKLJUČAK

Cilj je istraživanja bio razviti kriterije za odabir optimalnog tipa stacionarnog i brodskog uređaja te metode vođenja procesa desalinizacije, razviti matematički model i numeričko rješenje procesa desalinizacije, odnosno izraditi simulaciju procesa te konačno odabrati sustav upravljanja procesom koji bi trebao omogućiti vođenje procesa na učinkovit i ekološki prihvatljiv način.

U svrhu ostvarenja prvog cilja identificirane su i analizirane metode desalinizacije te u skladu s njima, izvedbe postrojenja. Metode i izvedena postrojenja razlikuju se prema načinu djelovanja na molekule vode i soli, tj. vodenu otopinu soli, no prema obliku energije potrebne za rad mogu se podijeliti u dvije skupine: (1) postrojenja kojima je potreban samo mehanički rad za pogon uređaja koji cirkuliraju radni fluid ili fluide, što se u većini slučajeva ostvaruje električnom energijom i (2) postrojenja kojima je uz prvi oblik energije za rad potrebna i toplinska energija.

Dano je nekoliko modela procjene efikasnosti postrojenja, no u skladu s prethodnim stavkom, kao najtočnija metoda procjene desalinizacijskog postrojenja evidentirana je efikasnost kao odnos utrošene ukupne energije po jediničnoj masi proizvoda, tj. destilata.

Sve spomenute metode i postrojenja mogu se ugrađivati na plovne objekte i koristiti na kopnu, kao samostalna postrojenja ili dio nekog većeg industrijskog procesa. Stoga se u radu daju kriteriji koje je potrebno razmatrati u procesu odabira najprihvatljivijeg rješenja. Uzimajući u obzir oblik energije dostupan na većini brodova, kao najprihvatljivije rješenje i dalje je destilacijska metoda. Zbog radne temperature ogrjevnog fluida na brodovima s dizelmotornim postrojenjem, uređaj mora biti vakuumski. Ovime je ostvaren prvi cilj istraživanja.

Kako bi se izradio matematički model procesa destilacije, izvršena je analiza jednostupanjskog, vakuumskog, destilacijskog uređaja i danti su matematički modeli svih bitnih dijelova. Takav se uređaj sastoji od dvaju izmjenjivača topline: isparivača i kondenzatora. Između njih redovito se ugrađuje odjeljivač kapljica. Podtlak u posudi i pražnjenje preostale rasoline ostvaruje se radom jedne ili dviju mlaznih pumpi. U radu nisu modelirane dobavne pumpe morske vode, rashladne vode kondenzatora, ogrjevne vode zagrijača niti pumpe destilata. Pretpostavljeno je kako je njihov rad stacionaran za dane uvjete plovidbe. Također, dani su matematički modeli koeficijenata izmjene topline u izmjenjivačima. Izmjena topline se vrši uz promjenu faze što komplicira proces. Prema objavljenoj literaturi dani su matematički modeli svojstava morske vode: gustoće, dinamičkog i kinematičkog viskoziteta, koeficijenta toplinske vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta, topline isparavanja, te povišenja temperature zasićenja u odnosu na slatku vodu. Zbog posljednjeg, prema

Antoineovoj je jednadžbi izrađen model ovisnosti temperature o tlaku zasićenja za slatku vodu.

Jedan od najvažnijih kriterija za odabir postrojenja, svakako je kapacitet. Neki od vanjskih utjecaja dovode do smanjenja kapaciteta te je u radu dan matematički model procesnog kapaciteta i evidentirani čimbenici za optimalan rad. Utvrđeno je kako se za procjenu efikasnosti uređaja treba koristiti procesni kapacitet, jer se ukupno vrijeme rada mora umanjiti za vrijeme utrošeno za potrebe održavanja.

U daljnjem razmatranju procesa destilacije pristup je bio makroskopski, odnosno razmatrao se utjecaj sveukupnih termodinamičkih procesa na izlazne vrijednosti. Uspoređeni su procesi s prekidnim i neprekidnim punjenjem, kakav se u praksi, za veće kapacitete, jedino i koristi. Grafički su prikazani procesi promjene koncentracije u vodi otopljene soli. Morska voda, kao vodena otopina većeg broja soli, aproksimirana je vodenom otopinom kuhinjske soli NaCl. U modelu se pretpostavlja destilat bez ikakvog udjela soli. Zbog nesavršenosti tehnoloških rješenja stvarni se proces razlikuje pa je u destilatu ipak prisutan relativno mali udio soli, no sa stanovišta bilance masa, pogreška je gotovo zanemariva. Ovaj matematički model, uzimajući prethodno objašnjeno pojednostavljenje da proizvedeni destilat nema udjela soli, polazi od jednostavne činjenice da postoji ovisnost količine proizvedenog destilata o razlici koncentracije otopljenih soli u napojnoj vodi i odvedenom destilatu. Izrada ovog matematičkog modela je drugi i glavni cilj istraživanja.

Matematički model ovisnosti kapaciteta uređaja o količini iskorištene toplinske energije, željenoj gornjoj vrijednosti koncentracije soli u ispuštenoj rasolini, tlaku u posudi, odnosu dovedene i isparene vode te nekim fizikalnim svojstvima morske vode, omogućuje istraživanje eksploatacijskih uvjeta na rad uređaja te u konačnici cijenu proizvedene vode. Osim toga, predloženi model može biti osnova za izradu informacijskog sustava upravljanja uređajem na optimalan način.

Prema matematičkim modelima izrađena su numerička rješenja i aplikacije u programskim jezicima *MS Fortran Powerstation* i *Mathematica 5.0*. Aplikacije u jeziku *Mathematica 5.0* daju i grafičku interpretaciju ovisnosti promatranih veličina. Aplikacije su dane za sva, u procesima isparivanja i kondenzacije, bitna fizikalna svojstva morske vode, kao i za prije spomenutu ovisnost tlaka o temperaturi zasićenja slatke vode. Nadalje, dana je ovisnost promjene tlaka u posudi prema modernim izvedbama, gdje od početka rada tlak u posudi opada u ovisnosti o ejektoru plinova, no nakon postizanja normalnog radnog tlaka sustav upravljanja kratkotrajno otvara ventil i u posudu pušta okolni zrak kako apsolutni tlak u posudi ne bi bio prenizak.

Iako su matematički modeli izrađeni prema svoj dostupnoj relevantnoj znanstvenoj literaturi izvršena je njihova provjera. Provjera je djelomično

izvršena usporedbom s podacima, također objavljenim u literaturi ili poslovnim knjigama brodara, a djelomično kroz intervjue s odgovornim osobama na brodu, što u ovom slučaju znači iskusnim časnicima stroja, upraviteljima te inspektorima brodarskih kompanija i lučkih kapetanija. Također, kao potvrda ispravnosti modela iskorišten je simulator strojarnice renomiranog proizvođača informacijskih sustava upravljanja strojarnicom. Snimljeni dijagrami potvrdili su očekivanja o ovisnosti kapaciteta postrojenja o eksploatacijskim faktorima.

Prema dobijenom matematičkom modelu izrađen je algoritam upravljanja uređajem. Analizirano je postojeće stanje, u smislu ugrađenih mjernih instrumenata i automatike, a zatim predloženo nekoliko rješenja koja bi na račun većeg investicijskog ulaganja trebala kroz duže vrijeme dati nižu cijenu proizvoda. U potpunosti automatiziran sustav uređaj bi automatski upućivao u rad i dovodio do normalnih radnih veličina, upravljao radom kod približno stacionarnih uvjeta tijekom plovidbe te zaustavljao rad, kada bi se brod približio obali, tj. uplovio u zagađene vode. Zadnje je predloženo rješenje izrađeno u skladu s ponuđenim matematičkim modelom. Time je ostvaren treći cilj istraživanja.

Znanstveni doprinos ovoga rada sastoji su u definiranju teoretskih postavki za izradu matematičkih modela pogodnih i potrebnih za numeričko modeliranje i izradu programskih aplikacija procesa destilacije morske vode, znanstvenoj analizi utjecajnih čimbenika na efikasnost i odvijanje procesa, definiranju teoretskih i praktičnih postavki za izradu matematičkog modela ovisnosti kapaciteta destilacijskog postrojenja o eksploatacijskim uvjetima te stvaranju osnova za poboljšanje uređaja, odnosno informacijskog sustava upravljanja procesom. Prethodno spomenuto, potvrđeno objavljenim podacima i intervjuima s odgovornim osobama, predstavlja izvorni znanstveni doprinos. Razvijeni modeli mogu poslužiti u praktičnoj primjeni, u svrhu projektiranja uređaja te u svrhu optimizacije troškova poslovanja, odnosno cijene proizvedene vode.

Daljnja poboljšanja matematičkog modela mogla bi uključivati precizniji utjecaj slanosti dovedene morske vode i postignute temperature na brzinu nastanka kamenca u kanalima isparivača te rezultirajućeg povećanja otpora strujanja. Pored toga, poboljšani matematički model kondenzatora trebao bi uključivati utjecaj nekondenzibilnih plinova, za čiju bi izradu trebalo izvršiti mjerenja na stvarnim uređajima zbog potvrde. Isto vrijedi za model odjeljivača kapljica.

Također, poboljšanje modela može su ostvariti i njegovim proširenjem na višestupanjske uređaje te druge izvedbe destilacijskih uređaja, ali u najširem smislu čak i na druge metode desalinizacije.

Nastavak istraživanja trebao bi se sastojati od eksperimentalnog prikupljanja podataka s ugrađenih brodskih uređaja u različitim okruženjima i pod različitim radnim uvjetima. Za izradu programske aplikacije za optimizaciju rada i upravljanja radom postrojenja s ciljem smanjenja cijene proizvedene vode ili s

bilo kojim drugim ciljem, a u skladu sa željama krajnjeg korisnika, potrebne su stvarne cijene opreme, energenata, potrošnog materijala i radnih sati operatera, što predstavlja pravi poticaj za daljnji znanstveni rad.

# 7. PRILOZI

## 7.1. Popis literature

[1] Abbott, M. M., Van Ness, H. C., *Theory and Problems of Hermodynamics*, New York, McGraw-Hill Book Company, 1976.

[2] Afgan, N., Schlünder, E. U., *Heat Exchangers: Design and Theory Sourcebook*, Washington, Scripta Book Company, 1974.

[3] Bošnjaković, F., *Nauka o toplini, 3. dio*, Zagreb, Tehnička knjiga, 1986.

[4] Caocci, O., *Macchine Marine, 1*, 2. izd., Padova, Cedam, 1960.

[5] Carnahan, B., Luther, H. A., Wilkes, J. O., *Applied Numerical Methods*, New York, John Wiley & Sons, 1969.

[6] Demidovich, B. P., Maron, I. A., *Computational Mathematics*, 4. izd., Moskva, MIR Publishers, 1987.

[7] Dobran, F., *Theory of Puctured Multiphase Mixtures*, Berlin, Springer Verlag, 1991.

[8] Đorđević, B., Valent, V., Šerbanović, S., *Termodinamika i termotehnika*, Beograd, IRO Građevinska knjiga, 1987.

[9] Eckert, E. R. G., Drake, R. M., *Analysis of Heat and Mass Transfer*, New York, McGraw-Hill Book Company, 1972.

[10] Garg, H. P., *Advances in Solar Energy Technology, 1*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1987.

[11] Holden, W. S., *Water Treatment and Examination*, London, J. & A. Churchill, London, 1970.

[12] Kedenburg, B. H., *Erzeugung von Kesselspeisewasser aus Seewasser*, Verden,Verlag Der Betriebsökonom, 1952.

[13] Lior, N., *Measurements and Control in Water Desalination*, Amsterdam, Elsevier, 1986.

[14] Mersmann, A., *Stoffübertragung*, Berlin, Springer-Verlag, 1986.

[15] Minton, P. E., *Handbook on Evaporation Technology*, New Jersey, Noyes Publications, 1986.

[16] Rant, Z., *Isparivanje i uparivanje*, Zagreb, Tehnička knjiga, 1965.

[17] Gregorig, R., *Wärmeaustausch und Wärmeaustauscher*, Frankfurt, 1973.

[18] Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Ganić, E. N., *Handbook on Heat Transfer Fundamentals*, 2nd ed., New York, McGraw-Hill Book Company, 1985.

[19] Veziroglu, T. N., Bergles, A. E., *Multi-Phase Flow and Heat Transfer III*, Amsterdam, Elsevier, 1984.

[20] Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., New York, John Wiley & Sons, 1984.

[21] Žitkov, N. P., Berezin, I. S., *Numerička analiza (Numeričke metode)*, Beograd, Naučna knjiga, 1963.

[22] Van Stralen, S. J. D., *The Growth Rate of Vapour Bubbles in Superheated pure Liquids and Binary Mixtures, Part I: Theory*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 11, (1968), str. 1467-1489.

[23] Van Stralen, S. J. D., *The Growth Rate of Vapour Bubbles in Superheated pure Liquids and Binary Mixtures, Part II: Experimental results*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 11 (1968), str.1491-1512.

[24] Florschuetz, L. W., Khan, A. R., *Growth Rates of Free Vapour Bubbles in Binary Liquid Mixtures at uniform Superheats*, 4th Int. Heat Transfer Conf., Versailles, 6: B7.3, 1970.

[25] Van Wijk, W. R., Vos, A. S., Van Stralen, S. J. D., *Heat Transfer to Boiling Binary Liquid Mixtures*, Chemical Engineering Science, 5 (1956), str. 68-80.

[26] Coogan, C. H., Brewster, P. S., *A Simplified Analitycal Model of a Flash Evaporator Stage Having Channel Flow*, Journal of Engineering for Induppy, Transactions of the ASME, 1972, str. 897-903.

[27] Al-Ansari, A. D., Owen, I., *Thermal and Hydrodynamic Analysis of the Condensation and Evaporation Processes in Horizontal Tube Desalination Plant*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 42 (1999), str. 1633-1644.

[28] Muthunayagam, A. E., Ramamurthi, K., Paden, J. R., *Modelling and Experiments on Vaporization of Saline Water at Low Temperatures and Reduced Pressures*, Applied Thermal Engineering, 25 (2005), 5-6, str. 941-952.

[29] Muthunayagam, A. E., Ramamurthi, K., Paden, J. R., *Low temperature flash vaporization for desalination*, Desalination, 180 (2005), 1-3, str. 25-32.

[30] Armenta-Deu, C., *Effects of Temperature and Salt Concentration on Distilled Water Production*, Renewable Energy, 25 (2002), 2, str. 281-292.

[31] Armenta-Deu, C., *Water Distillation: A Prototype to Determine Flow Rate Gains Temperature and Salt Concentration Changes in Pressurised System*, Renewable energy, 29 (2004), 9, str.1557-1568.

[32] Rahman, H., Hawlander, M. N. A., Malek, A., *An Experiment with a Single-effect Submerged Vertical Tube Evaporator in Multi-effect Desalination*, Desalination, 156 (2003), str. 91-100.

[33] El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M., Mandani, F., *Performance of Parallel Feed Multiple Effect Evaporation System for Seawater Desalination*, Applied Thermal Engineering, 20 (2000), 17, str. 1679-1706.

[34] Sommariva, C., Borsani, R., Tasca, A., *Distillate Purity from MSF: The Theoretical Design and a Real Case Behavior*, Desalination, 81(1991), str. 309-320.

[35] Cosandey, J. O., Günther, A., von Rohr, P. R., *Transport of Salts and Micron-sized Particles Entrained from a Boiling Water Pool*, Experimental Thermal and Fluid Science, 27(2003), 8, str. 877-889.

[36] Cosandey, J. O., Günther, A., von Rohr, P. R., *Entrainment of Soluble and Non Soluble Tracers from a Boiling Water Surface*, Nuclear Engineering and Design, 208 (2001), 1, str. 87-97.

[37] Ettouney, H., *Brine Entrainment in Multistage Flash Desalination*, Desalination, 182(2005), 1-3, str. 87-97.

[38] Paradissiadis, I., Widmer, F., *Berechnung des Entrainments in Verdampfferanlagen*, Chemical Engineering Process., 18 (1984), str. 249-253.

[39] Iljushchenko, V. V., Rosen, A. M., Golub, S. I., *General Approach to the Drop Entrainment Calculation in Heat and Mass-transfer Apparatus*, Desalination, 81 (1991), 1-3, str. 383-390.

[40] Sterman, L. S., Lavigin, V. M., Rojnatovsky, V. D., *The Quality of the Distillate of Desalination Plants with a Washing Device*, Desalination, 45(1983), 1-3, str. 253-261.

[41] Plassmeier, K. G., *Entrainment-tests on Vife*, Desalination, 38 (1981), str.153.

[42] Genthner, K., Seifert, A., *A Calculation Method for Condensers in Multi-Stage Evaporators with Non-condensable Gases*, Desalination, 81 (1991), str. 349-366.

[43] Genthner, K. Seifert, A., *A Model for Stagewise Calculation of noncondensable Gases in Multi-Stage Evaporators*, Desalination, 81 (1991), str. 333-347.

[44] Rifert, V. G., et al., *Heat Exchange Intensification at Condensation inside tubes of Film-type Evaporator of Desalination Installations*, Desalination, 81 (1991), str.367-381.

[45] Wu, T., Vierow, K., *Local Heat Transfer Measurements of Steam/Air Mixtures in Horizontal Condenser Tubes*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 49 (2006), 15-16, str. 2491-2501.

[46] Oh, S., Revankar, S. T., *Experimental and Theoretical Investigation of Film Condensation with Noncondensable Gas*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 49 (2006), 15-16, str. 2523-2534.

[47] Salam, B., McNeil, D. A., Burnside, B. M., *Pressure Drop Measurements in a Low Pressure Steam Condenser with a Horizontal Bundle of Staggered Tubes*, Applied Thermal Engineering, 24 (2004), 8-9, str.1365-1379.

[48] Soltan, B. K., Saffar-Avval, M., Damangir, E., *Minimizing Capital and Operating Costs of Shell and Tube Condensers Using Optimum Baffle Spacing*, Applied Thermal Engineering, 24 (2004), 17-18, str. 2801-2810.

[49] Bourouni, K., Chaibi, M. T., *Modelling of Heat and Mass Transfer in a Horizontal-tube Falling-film Condenser for Brackish Water Desalination in Remote Areas*, Desalination, 166 (2004), str.17-24.

[50] Kalendar, A. Y., Griffiths, A. J., *Performance Study of Enhanced and Smooth Surface Tubes in a System Condenser of a Multistage Flash Desalination Unit*, Desalination, 134 (2001), str. 269-283.

[51] Moalem, D., Sideman, S., *Theoretical Analysis of a Horizontal Condenser-evaporator Tube*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 19 (1976), 3, str. 259-270.

[52] Rane, M. V., Tandale, M. S., *Water-to-water Heat Transfer in Tube–tube Heat Exchanger: Experimental and Analytical Study*, Applied Thermal Engineering, 25 (2005), 17-18, str. 2715-2729.

[53] Cipollina, A., Sommariva, C., Micale, G., *Efficiency Increase in Thermal Desalination Plants by Matching Thermal and Solar Distillation: Theoretical Analysis*, Desalination, 183 (2005), 1-3, str.127-136.

[54] Gräter, F., Dürrbeck, M., Rheinländer, J., *Multi-effect Still for Hybrid Solar/fossil Desalination of Sea and Brackish Water*, Desalination, 138 (2001), 1-3, str.111-119.

[55] Bouchekima, et al., *Performance Study of the Capillary Film Solar Distiller*, Desalination, 116 (1998), 2-3, str.185-192.

[56] Hawlader, M. N. A., et al., *Solar Assisted Heat Pump Desalination System*, Desalination, 168 (2004), str. 49-54.

[57] Al-Kharabsheh, S., Yogi Goswami, D., *Analysis of an Innovative Water Desalination System Using Low-grade Solar Heat*, Desalination, 156 (2003), 1-3, str. 323-332.

[58] Kudish, A. I., et al., *Simulation Study on a Solar Desalination System Utilizing an Evaporator/condenser Chamber*, Energy Conversion and Management, 44 (2003), 10, str. 1653-1670.

[59] Nishikawa, H., et al., *Triple Eeffect Evacuated Solar Still System for Getting Water from Seawater*, Applied Thermal Engineering, 18 (1998), str. 1067-1075.

[60] Tchinda, R., Kaptouom E., Njomo, D., *Heat and Mass Transfer Processes in a Solar Still with an Indirect Evaporator-condenser*, Energy Conversion and Management, 41 (2000), 1, str. 93-107.

[61] Vieira, M. E., Duarte, P. O. O., Buarque, H. L. B., *Determination of the Void Fraction and Drift Velocity in a Two-phase flow with a Boiling Solar Collector*, Solar Energy, 69 (2000), 4, str. 315-319.

[62] Dayem, A. M. A., *Experimental and Numerical Performance of a Multi-effect Condensation-evaporation Solar Water Distillation System*, Energy, Article in Press, Corrected Proof, Available online 4 April 2006.

[63] Zurigat, Y. H., Abu-Arabi, M. K., *Modelling and Performance Analysis of a Regenerative Solar Desalination Unit*, Applied Thermal Engineering, 24 (2004), 7, str. 1061-1072.

[64] Clausen, N. E., *Development of a Plate Evaporator/condenser for the Mechanical Vapour Compression Process*, Desalination, 81 (1991), str. 399-406.

[65] Steinegger, R., *Energy Management in Evaporation Processes: Mechanical Vapour Compression Combined with Cogeneration of Heat and Power*, Sulzer Technical Review, 64 (1982), 1, str. 8-11.

[66] Choi, H. S., et al., *Performance Improvement of Multiple-effect Distiller with Thermal Vapor Compression System by Exergy Analysis*, Desalination, 182 (2005), 1-3, str. 239-249.

[67] Park, I. S., Park, S. M., Ha, J. S., *Design and Application of Thermal Vapor Compressor for Multi-effect desalination plant*, Desalination, 182 (2005), 1-3, str. 199-208.

[68] El-Dessouky, H., et al., *Multistage Flash Desalination Combined with Thermal Vapor Compression*, Chemical Engineering and Processing, 39 (2000), 4, str. 343-356.

[69] Hamed, O. A., et al., *Thermal Performance and Exergy Analysis of a Thermal Vapor Compression Desalination System*, Energy Conversion and Management, 37 (1996), 4, str. 379-387.

[70] Darwish, M. A., Fathalah, K. A., Aly, S. E., *Comparative Study Between Vapor Compression and Multi Effect Boiling Desalination Systems*, Desalination, 45 (1983), 2, str. 77-80.

[71] Aly, S. E., *Gas Turbine Total Energy Vapour Compression Desalination System*, Energy Conversion and Management, 40 (1999), 7, str. 729-741.

[72] Darwish, M. A., El-Dessouky, H., *The Heat Recovery Thermal Vapour-Compression Desalting System: A Comparison with Other Thermal Desalination processes*, Applied Thermal Engineering, 16 (1996), 6, str. 523-537.

[73] Campbell, R. L. Emerson, T. H., *A New Water and Power Combination: Vacuum Vapor Compression Seawater Distillation and Natural Gas Fuel Cells*, Desalination, 99 (1994), 2-3 , str. 447-458.

[74] Szücs, L., *A Controlled Flash Evaporator Operated by a Vapour Compressor*, Desalination, 45 (1983), 1-3, str. 13-14.

[75] Hoffman, D., *Second Generation Low Temperature Vapor Compression Plants*, Desalination, 23 (1966), 1-3 , str. 449-454.

[76] Aybar, H. S., *Analysis of a Mechanical Vapor Compression Desalination System*, Desalination, 142 (2002), 2 , str. 181-186.

[77] Yumrutas, R., Kunduz, M., Kanoglu, M., *Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration Systems*, Exergy, An International Journal, 2 (2002), 4, str. 266-272.

[78] Zimerman, Z., *Development of Large Capacity High Efficiency Mechanical Vapor Compression (MVC) Units*, Desalination, 96 (1994), 1-3, str. 51-58.

[79] Spena, A.: *Optimal Design of a Combined Desalination, Food Freezing and Power Generation Plant*, Heat and Technology (Calore e Tecnologia), 7 (1989), 1, str. 111-119.

[80] Ophir, A., *Low Temperature, Multi-effect Distillation for Cogeneration Yielding the Most Efficient Sea Water Desalination System*, Desalination, 84 (1991), str. 85-101.

[81] Darwish, M. A., *The Cogeneration-desalting Plant with Combined Cycle: a Computer Program*, Desalination, 127 (2000), str. 27-45.

[82] Crerar, A. J., Pritchard, C. L., *Wavepowered Desalination: Experimental and Mathematical Modelling*, Desalination, 81 (1991), str. 391-398.

[83] Low, S. C., Tay, J, H., *Vacuum Desalination Using Waste Heat from a Steam Turbine*, Desalination, 81 (1991), str. 321-331.

[84] Nisan, S., et al., *Sea-water-Desalination with Nuclear and Other Energy Sources: the EURODESAL Project*, Nuclear Engineering and Design, 221 (2003), 1-3, str. 251-275.

[85] Vlachos, G. Th., Kaldellis, J. K., *Application of Gas-turbine Exhaust Gases for Brackish Water Desalination: a Techno-economic Evaluation*, Applied Thermal Engineering, 24 (2004), 17-18, str. 2487-2500.

[86] Slesarenko, V., *Sea Water Desalination In Thin Film Plants*, Desalination, 81 (1991), str. 407-417.

[87] Baumgartner, T., Jung, D., Sizmann, R., *Open Multiple Effect Desalination with Low Temperature Process Heat*, Desalination, 81 (1991), str. 299-307.

[88] Darwish, M. A., *Thermal Analysis of Multi-Stage Flash Desalting Systems*, Desalination, 85 (1991), str. 59-79.

[89] Hamed, O. A., Aly, S., *Simulation and Design of MSF Desalination Processes*, Desalination, 80 (1991), str. 1-14.

[90] Jakobsen, B., *Freshwater Generators-Freshwater Production by Heat Recovery*, B&W-MAN Diesel A/S, 1982.

[91] Valbak, O., Thoren, S., *Freshwater Distillers-an Important Element in the Cooling Water System on Board, An Economic View*, Alfa-Laval, 1989.

[92] Heaton, R., Wade, N. M., *Desalination Plant Selection*, International Maritime Engineering Conference-Bahrain, 84 (1985), str.129-138, Marine Management Ltd for Trans. IMarE(C)

[93] Linninikov, O. D., Podbereznyi, V. L., Rodina, I. V., *Inhibition of Scale Formation from Natural Salt Waters. Inhibitor Effect on Chemical Composition of the Forming Scale*, Desalination, 82 (1991), str. 359-363.

[94] Martynova, O. I., et al., *Alkaline Scale Formation Reppiction in Desalination Plants by Means of Antiscalant Additives*, Desalination, 83 (1991), str. 55-63.

[95] Al-Gobaisi, D. M. K., Barakzai, A. S., El-Nashar, A. M., *An Overview of Modern Control Ppategies for Optimizing Thermal Desalination Plants*, Desalination, 84 (1991), str. 3-43

[96] Gilchrist, A., *Sea Water Distillers*, Transactions Inst. Mar. Eng., 88 (1976), Series A, Part 1, str. 33-41.

[97] Wade, N.M., *The Effect of the recent Energy Cost Increase on the Relative Water Cost from RO and Distillation Plant*, Desalination, 81 (1991), str. 3-18.

[98] Rayner, R. F., Powell, R. P., *Marine Environmental Site Surveys for Desalination Plant and Power Station Development*, International Maritime Engineering Conference-Bahrain, 84 (1985), str. 123-126, Marine Management Ltd for Trans. IMarE(C)

[99] VDI Heat Atlas, 2. English ed., Düsseldorf, VDI Verlag, 1991.

[100] Tarifa, E. E., Scenna, N. J., *A Dynamic Simulator for MSF Plants*, Desalination, 138 (2001), str. 349-364.

[101] El-Dessouky, H., Ettouney, H., Alatiqi, I., Al-Nuwaibit, G., *Evaluation of Steam jet Ejectors*, Chemical Engineering and Processing, 41 (2002), str. 551-561.

[102] Hodgkiess, T., Chia, P. S., *Assessment of Lower-alloy Stainless Steels for Use in Dessalination Plant*, Desalination, 84 (1991), str. 267-278.

[103] Hassan, A., Aziz, S., Radif, A., Said, S., Al-Sum, E., A., *Corrosion Experience Data Bank System for Desalination and Power Plants (Corex)*, Desalination, 84 (1991), str. 251-266.

[104] http://www.pfst.hr/data/materijali/Ekologija%20mora%20-%20%20Predavanje%204.pdf

[105] Lalić, D., Kolombo, M., *Upravljanje projektima u procesnoj industriji*, Zagreb, NIP Privredni vjesnik, 1990.

[106] Lalić, D., Kolombo, M., *Produktivnost u procesnoj industriji*, Zagreb, NIRO Privredni vjesnik, 1987.

[107] Schäfer, M., *Computational Engineering: Introduction to Numerical Methods*, Berlin, Springer Verlag, 2006.

[108] Knak, Ch., *Diesel Motor Ships Engines and Machinery*, Copenhagen, G-E-C GAD Publishers, 1979.

[109] Bošković, D., *Brodske pomoćne mašine, Deo II, Uređaji i sistemi, Knj. I.*, Split, Vojna štamparija, 1969.

[110] Martinović, D., *Modeliranje brodskih pomoćnih sustava s gledišta sigurnosti poriva broda,* doktorska disertacija, Rijeka, D. Martinović, 2009.

[111] Tudor, M., *Modeliranje integriranog informacijskog sustava nadzora brodskih procesa s gledišta održavanja,* doktorska disertacija, Rijeka, M. Tudor, 2006.

## 7.2. Popis oznaka i simbola

| | | |
|---|---|---|
| $A$ | površina | $m^2$ |
| $c$ | specifični toplinski kapacitet | J/kgK |
| $c$ | brzina ppujanja | m/s |
| $D_z$ | ukupna debljina žičanog odvlaživača u smjeru ppujanja | m |
| $D$ | kapacitet desalinizatora, količina destilata | kg/s, t/h, t/dan |
| $d$ | promjer | m |
| $E_{CO}$ | omjer povučene rasoline i pare | ppm |
| $E$ | utrošak energije | W |
| $e$ | efikasnost destilacijskog poppojenja | $Jskg^{-1}$ |
| $F$ | faktor utjecaja tlaka | - |
| $f_A$ | faktor udjela praznine | - |
| $G$ | specifično isparivanje u uređaju | $kg/hm^2$ |
| $g$ | ubrzanje sile gravitacije | $m/s^2$ |
| $h_{isp}$ | visina isparivača | m |
| $h$ | entalpija | J/kg |
| $k_f$ | koeficijent oblika odjeljivača | - |
| $L$ | ukupna duljina | m |
| $l$ | duljina | m |
| $M$ | maseni protok morske vode | kg/s |
| $m$ | maseni protok | kg/s |
| $N$ | ukupni broj | - |
| $n$ | broj (procesa, radnji) | - |
| $p$ | tlak | Pa |
| $Q$ | toplina | W |
| $Q_o$ | rashladni učin | W |
| $R$ | radni omjer | - |
| $r$ | latentna toplina isparivanja | J/kg |
| $R_f$ | faktor zaprljanja cijevi kondenzatora | $m^2K/W$ |

| | | |
|---|---|---|
| $S$ | slanost | g/kg |
| $s$ | specifična površina | $m^2/m^3$ |
| $s_1$, $s_2$ | geometrija šahovskog rasporeda cijevi | mm |
| $T$ | apsolutna temperatura | K |
| $T_{uk}$ | ukupni vremenski period | h |
| $t$ | temperatura | °C |
| $V$ | ukupni volumen | $m^3$ |
| $v$ | brzina ppujanja | m/s |
| $X$ | udio soli | ppm |
| $x$ | sadržaj pare | - |
| $y$ | maseni udio NaCl u vodi | % |
| | | |

Grčki simboli

| | | |
|---|---|---|
| $\alpha$ | koeficijent prijelaza topline konvekcijom | $W/m^2K$ |
| $\delta$ | debljina | m |
| $\varepsilon_P$ | udio praznine | - |
| $\varepsilon$ | omjer | - |
| $\varepsilon_e$ | stupanj iskoristivosti ejektora | - |
| $\eta$ | stupanj iskoristivosti | - |
| $\eta_d$ | dinamički viskozitet | Pas |
| $\eta_S$ | efikasnost separatora kapljica | - |
| $\lambda$ | koeficijent toplinske vodljivosti materijala | W/mK |
| $\rho$ | gustoća | $kg/m^3$ |
| $\nu$ | kinematički viskozitet | $m^2/s$ |
| $\xi$ | koncentracija | g/kg |
| $\tau$ | vrijeme | s, h |
| $\psi$ | udio praznine presjeka isparivača | - |

Indeksi

| | | |
|---|---|---|
| *aps* | apsolutni (tlak) | |

| | | |
|---|---|---|
| *b* | boiling, zasićenje | |
| *C* | cooling, rashladni medij | |
| *Ci* | inlet – ulaz rashladnog medija | |
| *Co* | outlet – izlaz rashladnog medija | |
| *D* | destilat, toplina isparavanja | |
| *d* | odvlaživač | |
| *dop* | dopušteno | |
| *Edestp* | električna energija za rad pumpe destilata | |
| *Edobp* | električna energija za rad dobavne pumpe | |
| *Ekondp* | električna energija za rad pumpe kondenzata | |
| *EMp* | elektromotor pumpe | |
| *EMV* | električna energija za rad pumpe morske vode | |
| *EVTp* | električna energija za rad pumpe VT vode | |
| *ej,potl* | ejektora za stvaranje podtlaka – ejektora plinova | |
| *ej,ras* | ejektora rasoline | |
| *el* | električna energija | |
| *F* | toplina grijanja fluida | |
| *g* | godišnji | |
| *H, h* | heating, medij za grijanje | |
| *Hi* | inlet – ulaz ogrjevnog medija | |
| *Ho* | outlet – izlaz ogrjevnog medija | |
| *iskor* | iskorišteno | |
| *isp* | isparavanje | |
| *ispar* | isparivač | |
| *istis* | istiskivanje | |
| *k* | konvektivno | |
| *kr* | kratkotrajni | |

| | | |
|---|---|---|
| *kond* | kondenzata | |
| *L* | liquid, tekuća faza | |
| *lam* | laminarno | |
| *log* | logaritamski | |
| *m* | maseni | |
| *mj* | mjehuričasto | |
| *max* | maksimalni | |
| *n* | neprekidno | |
| *ost* | ostalo | |
| *P* | para | |
| *Pl* | plinovi | |
| *p* | prekidno | |
| *proc* | procesni | |
| *punj* | punjenje | |
| *R* | rasolina | |
| *rad* | rada, u pogonu | |
| *S* | sekundarni (fluid) | |
| *Sw, SW* | sea water – morska voda | |
| *SWi* | morska voda za isparivač | |
| *SWer* | morska voda za ejektor rasoline | |
| *SWep* | morska voda za ejektor plinova | |
| *s* | stijenka cijevi | |
| *sd* | srednjeg dugog trajanja | |
| *slob* | slobodna površina | |
| *snop* | snop cijevi | |
| *sr* | srednji | |
| *stv* | stvarni | |
| *turb* | turbulentno | |
| *u* | unutarnji | |
| *upu* | upućivanje | |
| *ukup* | ukupno | |

| | | |
|---|---|---|
| *v* | vanjski | |
| *VT* | visokotemperaturna slatka rashladna voda | |
| *zagr* | zagrijavanje | |
| *želj* | željeno | |
| *0* | početno stanje | |

Bezdimenzionalne značajke

| | | |
|---|---|---|
| *Re* | Reynoldsova | $= \frac{cd_u}{\nu}$ |
| *Nu* | Nusseltova | $= \frac{\alpha d_u}{\lambda}$ |
| *Pr* | Prandtlova | $= \frac{c_p \nu \rho}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$ |

## 7.3 Popis slika


| Redni broj slike u tekstu | Opis slike | Stranica teksta |
|---|---|---|
| **2.1** | Elektrokemijska metoda s polupropusnim membranama | **15** |
| **2.2** | Kontinuirani rad višestupanjskog elektrokemijskog desalinizacijskog postrojenja | **16** |
| **2.3** | Naizmjeničan rad elektrokemijskog desalinizacijskog postrojenja | **16** |
| **2.4** | Izvedba s promjenjivim smjerom električne struje | **17** |
| **2.5** | Ravnotežni fazni dijagram voda – kuhinjska sol | **18** |
| **2.6** | Prikaz procesa proizvodnje slatke vode metodom zamrzavanja | **20** |
| **2.7** | Prikaz eksergetski učinkovitijeg procesa proizvodnje slatke vode metodom zamrzavanja | **21** |
| **2.8** | Shematski prikaz destilacijske metode | **22** |
| **2.9** | Višestupanjski adijabatski uređaj | **23** |
| **2.10** | Višestupanjski uređaj s istosmjernim napajanjem | **25** |
| **2.11** | Višestupanjski uređaj s protusmjernim napajanjem | **25** |
| **2.12** | Jednostupanjski uređaj s uronjenim ogrjevnim elementom | **26** |
| **2.13** | Višestupanjski uređaj s uronjenim ogrjevnim elementom | **27** |
| **2.14** | Višestupanjski uređaj s uronjenim ogrjevnim elementom i predgrijavanjem radnog fluida | **28** |
| **2.15** | Uređaj s rekompresijom pare | **29** |
| **2.16** | Sunčani kolektor za destilaciju | **30** |
| **2.17** | Jednostupanjski uređaj koji radi na principu reverzibilne osmoze | **30** |
| **2.18** | Višestupanjski uređaj koji radi na principu reverzibilne osmoze | **31** |

| | | |
|---|---|---|
| **2.19** | Četverostupanjski destilacijski uređaj | **37** |
| **2.20** | Četverostupanjski destilacijski uređaj s rekompresijom pare | **37** |
| **2.21** | Bazična izvedba postrojenja koje proizvodi paru za destilaciju te druge potrebe | **38** |
| **2.22** | Kogeneracijsko postrojenje s parnom turbinom i četverostupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare | **39** |
| **2.23** | Kogeneracijsko postrojenje s plinskom turbinom i četverostupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare | **40** |
| **2.24** | Kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom i četverostupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare | **41** |
| **2.25** | Kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom i višestupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare koje koristi i niskotemperaturnu otpadnu toplinu dizelskog procesa | **42** |
| **2.26** | Kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom i višestupanjskim destilacijskim uređajem s rekompresijom pare i rashladnim uređajima za klimatizaciju te čuvanje hrane | **43** |
| **2.27** | Kogeneracijsko postrojenje s plinskom i parnom turbinom te višestupanjskim adijabatskim destilacijskim uređajem | **44** |
| **2.28** | Kondenzator destilacijskog uređaja hlađen morskom vodom – prije ili poslije centralnih rashladnika slatke vode | **45** |
| **2.29** | Odnos radnih sati svjetske flote i temperature okolišne morske vode | **46** |
| **2.30** | Kondenzator destilacijskog uređaja hlađen niskotemperaturnom slatkom vodom | **48** |
| **2.31** | Shematski prikaz destilacijskog uređaja s kondenzatorom hlađenim morskom vodom koju dobavlja zasebna pumpa | **49** |
| **3.1** | Shema jednostupanjskog vakuumskog generatora slatke vode | **50** |

| | | |
|---|---|---|
| **3.2** | Shematski prikaz isparivača | **51** |
| **3.3**. | Geometrija vertikalnih, šahovski raspoređenih cijevi i kontrolni volumen ogrjevne slatke vode; strelica pokazuje smjer strujanja ogrjevnog fluida | **55** |
| **3.4** | Režimi strujanja u vertikalnoj cijevi | **57** |
| **3.5** | Režimi uzlaznog strujanja u vertikalnoj cijevi | **61** |
| **3.6** | Prikaz strujanja kroz ejektor | **62** |
| **3.7** | Kapaciteti ejektora zraka | **64** |
| **3.8** | Shematski prikaz strujanja u cijevnom kondenzatoru | **66** |
| **3.9**. | Geometrija šahovski raspoređenih horizontalnih cijevi, kontrolni volumen pare i kondenzata te njihov smjer strujanja | **68** |
| **3.10** | Kondenzacija na vanjskoj stjenci jedne cijevi | **71** |
| **3.11** | Kondenzacija na snopu cijevi | **71** |
| **3.12** | Proces isparivanja u $h$-$\xi$ dijagramu | **81** |
| **3.13** | Proces isparivanja u $h$-$\xi$ dijagramu za slučaj odvođenja pare | **83** |
| **3.14** | Proces isparivanja u $h$-$\xi$ dijagramu za slučaj optoka rasoline | **85** |
| **3.15** | Proces isparivanja u $h$-$\xi$ dijagramu za slučaj predgrijavanja svježe rasoline | **87** |
| **3.16** | Isparivač s ulazom i izlazom masa | **88** |
| **4.1** | Geometrija posude | **100** |
| **4.2** | Blok dijagram potprograma za određivanje gustoće morske vode | **102** |
| **4.3** | Blok dijagram potprograma za određivanje latentne topline isparivanja morske vode | **102** |
| **4.4** | Blok dijagram potprograma za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti morske vode | **103** |
| **4.5** | Blok dijagram potprograma za određivanje specifičnog toplinskog kapaciteta morske vode | **104** |
| **4.6** | Blok dijagram potprograma za određivanje dinamičkog i kinematičkog viskoziteta morske | |

| | | |
|---|---|---|
| | vode | **105** |
| **4.7** | Blok dijagram potprograma za određivanje povećanja temperature zasićenja | **106** |
| **4.8** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$ | **107** |
| **4.9** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,1 | **108** |
| **4.10** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,2 | **108** |
| **4.11** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,3 | **109** |
| **4.12** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,4 | **109** |
| **4.13** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,5 | **110** |
| **4.14** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,6 | **110** |
| **4.15** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,7 | **111** |
| **4.16** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,8 | **111** |
| **4.17** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=0,9 | **112** |
| **4.18** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=1,0 | **112** |
| **4.19** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=1,5 | **113** |
| **4.20** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=2,0 | **113** |
| **4.21** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=2,33 | **114** |
| **4.22** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=4,0 | **114** |
| **4.23** | Ovisnost slanosti u posudi o vremenu isparavanja za različite odnose $D/M_o$i $\varepsilon$=9,0 | **115** |
| **4.24** | Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za | |

| | | |
|---|---|---|
| | $D/M_o\varepsilon$=0,5 | **116** |
| **4.25** | Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=1 | **117** |
| **4.26** | Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=2 | **118** |
| **4.27** | Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=3 | **119** |
| **4.28** | Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=4 | **120** |
| **4.29** | Trodimenzionalni prikaz izraza 4.3.2 za $D/M_o\varepsilon$=5 | **121** |
| **4.30** | Trodimenzionalni prikaz ovisnosti kinematičkog viskoziteta o temperaturi i slanosti | **122** |
| **4.31** | Trodimenzionalni prikaz ovisnosti specifičnog toplinskog kapaciteta slane otopine o temperaturi i slanosti | **123** |
| **4.32** | Dijagram ovisnosti latentne topline isparivanja slane otopine o temperaturi | **122** |
| **4.33** | Trodimenzionalni prikaz ovisnosti povišenja temperature zasićenja morske vode u odnosu na slatku vodu istog tlaka o temperaturi i slanosti | **125** |
| **4.34** | Trodimenzionalni prikaz ovisnosti koeficijenta toplinske vodljivosti slane otopine o temperaturi i slanosti | **126** |
| **4.35** | Prikaz ovisnosti temperature zasićenja slatke vode o tlaku | **127** |
| **4.36** | Prikaz ovisnosti tlaka zasićenja slatke vode o temperaturi | **127** |
| **4.37** | Trodimenzionalni prikaz ovisnosti koeficijenta toplinske vodljivosti slane otopine o temperaturi i slanosti | **128** |
| **4.38** | Trodimenzionalni prikaz ovisnosti kapaciteta uređaja o količini napojne morske vode i željenoj gornjoj granici slanosti rasoline | **129** |
| **5.1** | Ispis karakterističnih tlakova na beskonačnom pisaču. | **131** |

| | | |
|---|---|---|
| **5.2** | Ispis karakterističnih temperatura na beskonačnom pisaču | **132** |
| **5.3** | Ispis karakterističnih slanosti i razina na beskonačnom pisaču | **133** |
| **5.4** | Ispis karakteristične dovedene i odvedene količine topline te temperatura rashladnog sredstva na beskonačnom pisaču | **134** |
| **5.5** | Ispis karakterističnih veličina za normalan rad uređaja na beskonačnom pisaču | **135** |
| **5.6** | Ispis karakterističnih veličina za slučaj prigušnog ventila rashladne morske vode otvorenog 70% na beskonačnom pisaču | **135** |
| **5.7** | Ispis karakterističnih veličina za slučaj prigušnog ventila rashladne morske vode otvorenog 50% na beskonačnom pisaču | **136** |
| **5.8** | Ispis karakterističnih veličina za slučaj mimovodnog ventila ogrjevne vode otvorenog 70% na beskonačnom pisaču | **137** |
| **5.9** | Ispis karakterističnih veličina za slučaj mimovodnog ventila ogrjevne vode otvorenog 50% na beskonačnom pisaču | **137** |
| **5.10** | Blok dijagram rada uređaja za destilaciju | **140** |
| **5.11** | Blok dijagram prve, pripremne faze | **142** |
| **5.12** | Blok dijagram druge faze, faze postizanja optimalnih karakteristika i normalnog rada | **143** |
| **5.13** | Blok dijagram treće, završne faze, odnosno faze završetka rada | **144** |
| **5.14** | Shema destilacijskog uređaja s uobičajenim postavom mjernih instrumenata | **145** |
| **5.15** | Dijagram toka funkcije kontrole slanosti i ispuštanja destilata ukoliko je ista prevelika | **146** |
| **5.16** | Dijagram toka funkcije kontrole tlaka i puštanja zraka u posudu u slučaju preniskog tlaka | **146** |
| **5.17** | Shema destilacijskog uređaja s daljinskim automatskim upravljanjem | **146** |

| | | |
|---|---|---|
| **5.18** | Shema destilacijskog uređaja s pojednostavljenim daljinskim automatskim upravljanjem | **147** |

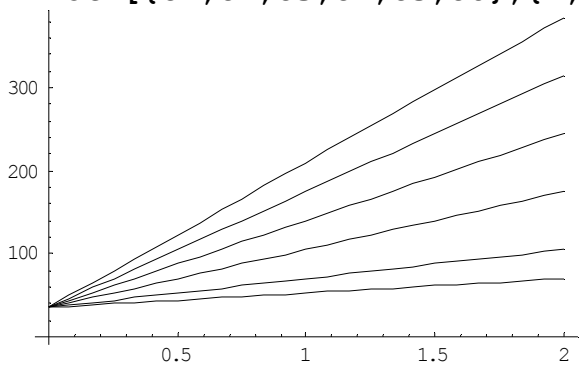

## 7.4. Popis tablica


| **Redni broj tablice u tekstu** | **Opis tablice** | **Stranica teksta** |
|---|---|---|
| **2.1** | Srednji utrošak energije destilacijskih postrojenja | **28** |
| **2.2** | Odnos masenih protoka u ovisnosti o temperaturnim razlikama | **47** |
| **3.1** | Gustoća vodene otopine soli $\rho$ [kg/m$^3$] | **72** |
| **3.2** | Dinamički viskozitet vodene otopine soli $\eta$ [cP=10$^{-3}$Pas] | **74** |
| **3.3** | Specifični toplinski kapacitet vodene otopine soli $c$ [kJ/kgK] | **75** |
| **4.1** | Dimenzije posude | **101** |

## 7.5. Ispis programa

1. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.1

```
So=35
 35
 S1=So(1+0.5  T)
 35 (1+0.5 T)
 S2=So(1+1 T)
 35 (1+T)
 S3=So(1+2 T)
 35 (1+2 T)
 S4=So(1+3  T)
 35 (1+3 T)
 S5=So(1+4  T)
 35 (1+4 T)
 S6=So(1+5 T)
 35 (1+5 T)
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```

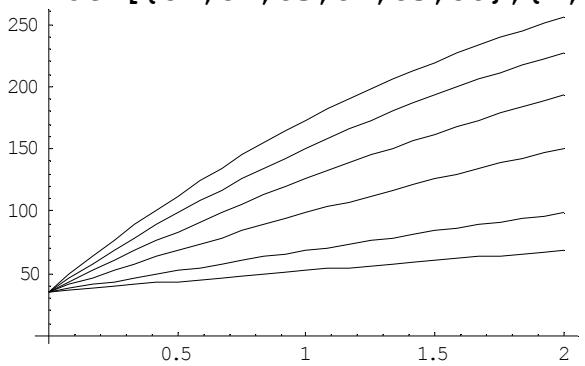



```
 -Graphics-
```

2. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,1

```
So=35
Eps=0.1
 35
 0.1
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.05 T
 350. (1.1 - e^(-0.05 T))
 P=- 1 T Eps
 -0.1 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 350. (1.1 - e^(-0.1 T))
 P=- 2 T Eps
 -0.2 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 350. (1.1 - e^(-0.2 T))
 P=- 3 T Eps
 -0.3 T
```

```
S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```
$350.(1.1-e^{-0.3T})$
```
P=- 4 T Eps
-0.4 T
S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```
$350.(1.1-e^{-0.4T})$
```
P=- 5 T Eps
-0.5 T
 S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```
$350.(1.1-e^{-0.5T})$
```
Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```



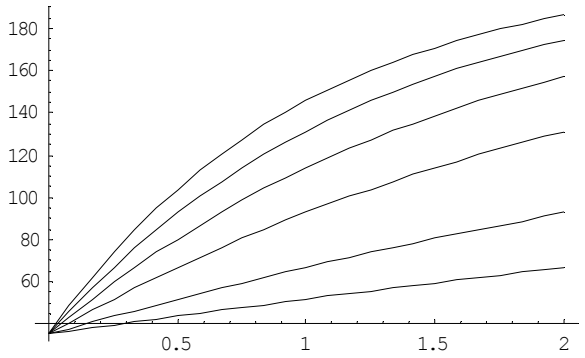

```
-Graphics-
```

3. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,2

```
So=35
Eps=0.2
 35
 0.2
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.1 T
```
$175.(1.2-e^{-0.1T})$
```
 P=- 1 T Eps
 -0.2 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```
$175.(1.2-e^{-0.2T})$
```
 P=- 2 T Eps
 -0.4 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```
$175.(1.2-e^{-0.4T})$
```
 P=- 3 T Eps
 -0.6 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```
$175.(1.2-e^{-0.6T})$
```
 P=- 4 T Eps
 -0.8 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```
$175.(1.2-e^{-0.8T})$
```
 P=- 5 T Eps
 -1. T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$175.(1.2-e^{-1.T})$

```
Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

4. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,3

```
So=35
Eps=0.3
 35
 0.3
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.15 T
```

$116.667\,(1.3-e^{-0.15T})$

```
 P=- 1 T Eps
 -0.3 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$116.667\,(1.3-e^{-0.3T})$

```
 P=- 2 T Eps
 -0.6 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$116.667\,(1.3-e^{-0.6T})$

```
 P=- 3 T Eps
 -0.9 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$116.667\,(1.3-e^{-0.9T})$

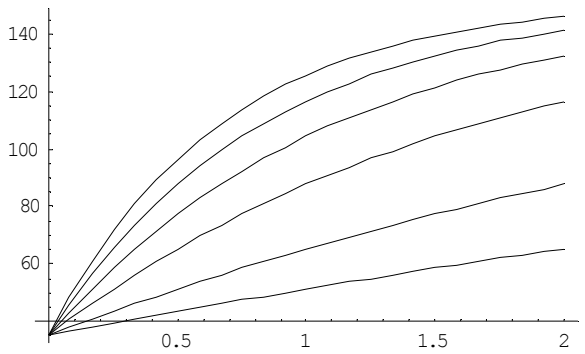
```
 P=- 4 T Eps
 -1.2 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$116.667\,(1.3-e^{-1.2T})$

```
 P=- 5 T Eps
 -1.5 T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$116.667\,(1.3-e^{-1.5T})$

```
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

5. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,4

```
So=35
Eps=0.4
 35
 0.4
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.2 T
```

$87.5\,(1.4-e^{-0.2T})$

```
 P=- 1 T Eps
 -0.4 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$87.5\,(1.4-e^{-0.4T})$

```
 P=- 2 T Eps
 -0.8 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$87.5\,(1.4-e^{-0.8T})$

```
 P=- 3 T Eps
 -1.2 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$87.5\,(1.4-e^{-1.2T})$

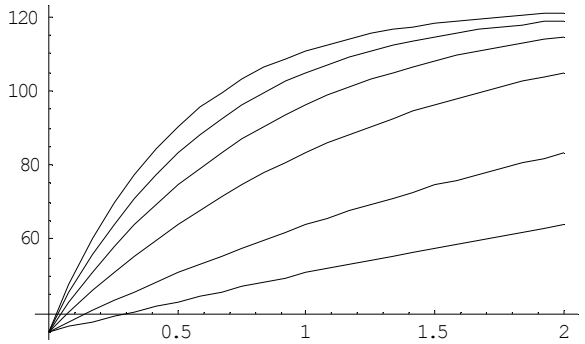
```
 P=- 4 T Eps
 -1.6 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$87.5\,(1.4-e^{-1.6T})$

```
 P=- 5 T Eps
 -2. T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$87.5\,(1.4-e^{-2.T})$

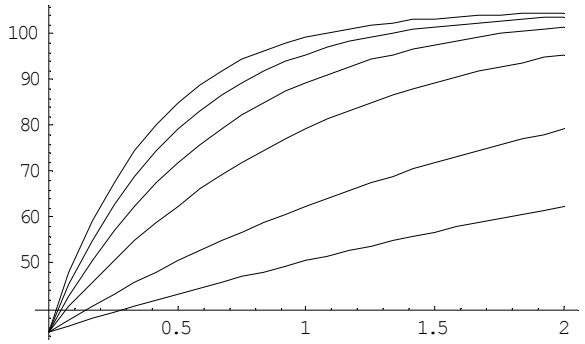
```
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

6. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,5

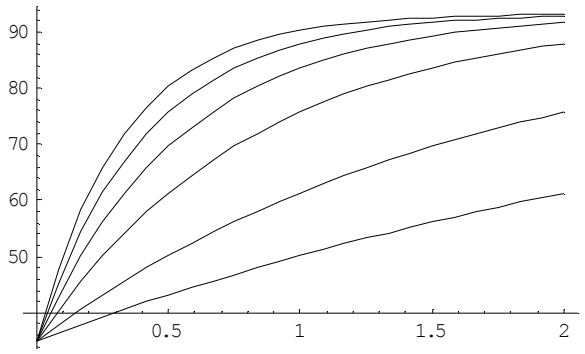
```
So=35
Eps=0.5
 35
 0.5
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.25 T
 70. (1.5 - e^(-0.25 T))
 P=- 1 T Eps
 -0.5 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 70. (1.5 - e^(-0.5 T))
 P=- 2 T Eps
 -1. T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 70. (1.5 - e^(-1. T))
 P=- 3 T Eps
 -1.5 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 70. (1.5 - e^(-1.5 T))
 P=- 4 T Eps
 -2. T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 70. (1.5 - e^(-2. T))
 P=- 5 T Eps
 -2.5 T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 70. (1.5 - e^(-2.5 T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

7. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,6

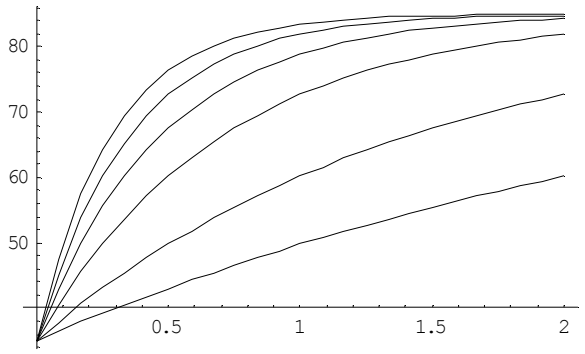
```
So=35
Eps=0.6
 35
 0.6
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.3 T
 58.3333 (1.6- e^(-0.3T))
 P=- 1 T Eps
 -0.6 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 58.3333 (1.6- e^(-0.6T))
 P=- 2 T Eps
 -1.2 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 58.3333 (1.6- e^(-1.2T))
 P=- 3 T Eps
 -1.8 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 58.3333 (1.6- e^(-1.8T))
 P=- 4 T Eps
 -2.4 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 58.3333 (1.6- e^(-2.4T))
 P=- 5 T Eps
 -3. T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 58.3333 (1.6- e^(-3.T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

8. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,7

```
So=35
Eps=0.7
 35
 0.7
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.35 T
 50. (1.7 - e^(-0.35 T))
 P=- 1 T Eps
 -0.7 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 50. (1.7 - e^(-0.7 T))
 P=- 2 T Eps
 -1.4 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 50. (1.7 - e^(-1.4 T))
 P=- 3 T Eps
 -2.1 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 50. (1.7 - e^(-2.1 T))
 P=- 4 T Eps
 -2.8 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 50. (1.7 - e^(-2.8 T))
 P=- 5 T Eps
 -3.5 T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 50. (1.7 - e^(-3.5 T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

9. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,8

```
So=35
Eps=0.8
 35
 0.8
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.4 T
```

$43.75\,(1.8-e^{-0.4T})$

```
 P=- 1 T Eps
 -0.8 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$43.75\,(1.8-e^{-0.8T})$

```
 P=- 2 T Eps
 -1.6 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$43.75\,(1.8-e^{-1.6T})$

```
 P=- 3 T Eps
 -2.4 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$43.75\,(1.8-e^{-2.4T})$

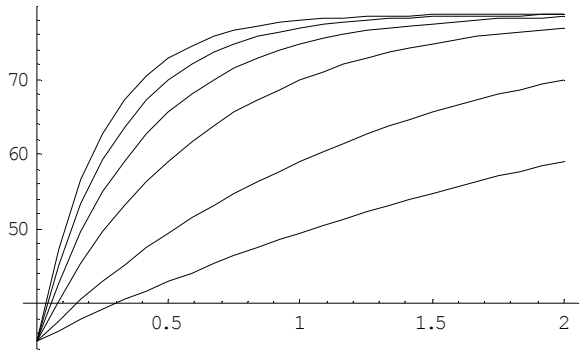
```
 P=- 4 T Eps
 -3.2 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$43.75\,(1.8-e^{-3.2T})$

```
 P=- 5 T Eps
 -4. T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$43.75\,(1.8-e^{-4.T})$

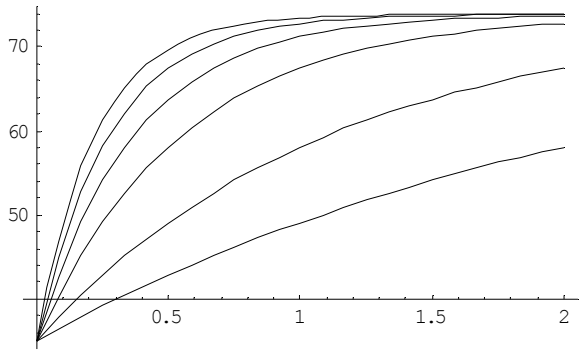
```
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

10. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=0,9

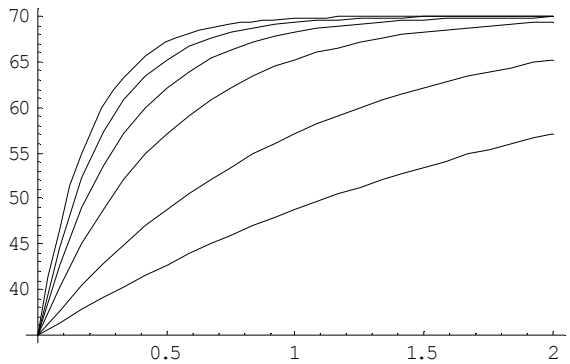
```
So=35
Eps=0.9
 35
 0.9
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.45 T
 38.8889 (1.9- e^(-0.45T))
 P=- 1 T Eps
 -0.9 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 38.8889 (1.9- e^(-0.9T))
 P=- 2 T Eps
 -1.8 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 38.8889 (1.9- e^(-1.8T))
 P=- 3 T Eps
 -2.7 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 38.8889 (1.9- e^(-2.7T))
 P=- 4 T Eps
 -3.6 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 38.8889 (1.9- e^(-3.6T))
 P=- 5 T Eps
 -4.5 T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 38.8889 (1.9- e^(-4.5T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

11. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=1,0

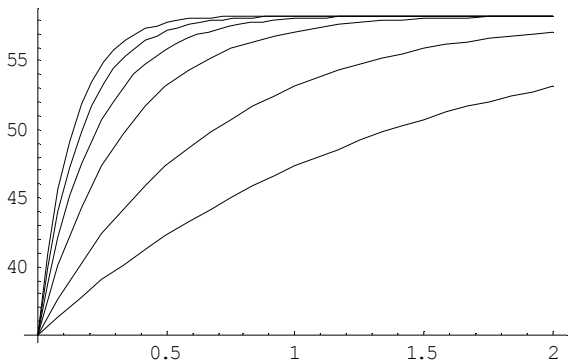
```
So=35
Eps=1
 35
 1
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.5 T
 35 (2 - e^(-0.5T))
 P=- 1 T Eps
 -T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 35 (2 - e^(-T))
 P=- 2 T Eps
 -2 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 35 (2 - e^(-2T))
 P=- 3 T Eps
 -3 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 35 (2 - e^(-3T))
 P=- 4 T Eps
 -4 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 35 (2 - e^(-4T))
 P=- 5 T Eps
 -5 T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 35 (2 - e^(-5T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

12. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=1,5

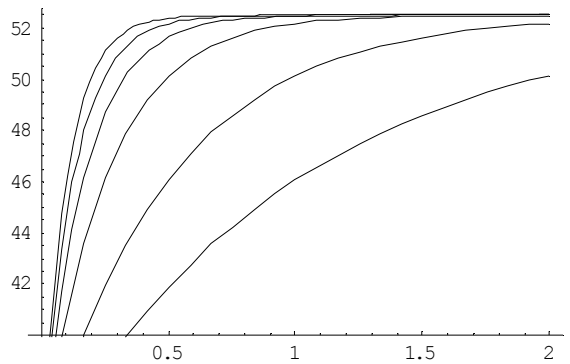
```
So=35
Eps=1.5
 35
 1.5
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -0.75 T
 23.3333 (2.5 - e^(-0.75 T))
 P=- 1 T Eps
 -1.5 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 23.3333 (2.5 - e^(-1.5 T))
 P=- 2 T Eps
 -3. T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 23.3333 (2.5 - e^(-3. T))
 P=- 3 T Eps
 -4.5 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 23.3333 (2.5 - e^(-4.5 T))
 P=- 4 T Eps
 -6. T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 23.3333 (2.5 - e^(-6. T))
 P=- 5 T Eps
 -7.5 T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 23.3333 (2.5 - e^(-7.5 T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

13. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=2,0

```
So=35
Eps=2.0
 35
 2.
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -1. T
 17.5 (3. - e^(-1.T))
 P=- 1 T Eps
 -2. T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 17.5 (3. - e^(-2.T))
 P=- 2 T Eps
 -4. T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 17.5 (3. - e^(-4.T))
 P=- 3 T Eps
 -6. T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 17.5 (3. - e^(-6.T))
 P=- 4 T Eps
 -8. T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 17.5 (3. - e^(-8.T))
 P=- 5 T Eps
 -10. T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 17.5 (3. - e^(-10.T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

14. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=2,33

```
So=35
Eps=2.33
 35
 2.33
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -1.165 T
```

$15.0215\,(3.33 - e^{-1.165\,T})$

```
 P=- 1 T Eps
 -2.33 T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$15.0215\,(3.33 - e^{-2.33\,T})$

```
 P=- 2 T Eps
 -4.66 T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$15.0215\,(3.33 - e^{-4.66\,T})$

```
 P=- 3 T Eps
 -6.99 T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$15.0215\,(3.33 - e^{-6.99\,T})$

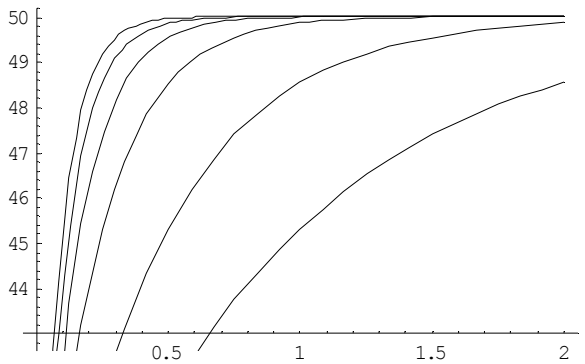
```
 P=- 4 T Eps
 -9.32 T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$15.0215\,(3.33 - e^{-9.32\,T})$

```
 P=- 5 T Eps
 -11.65 T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
```

$15.0215\,(3.33 - e^{-11.65\,T})$

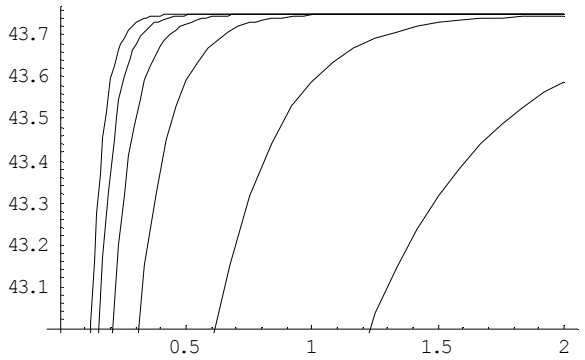
```
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

15. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=4,0

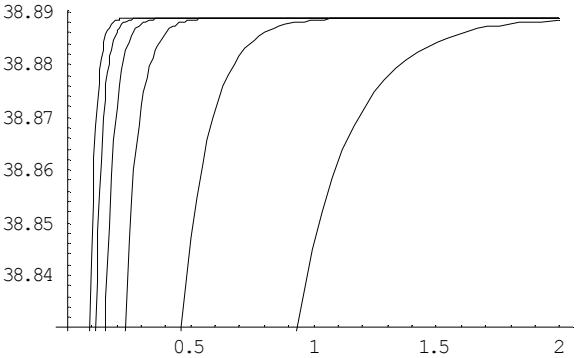
```
So=35
Eps=4.0
 35
 4.
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -2. T
 8.75 (5.- e^(-2.T))
 P=- 1 T Eps
 -4. T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 8.75 (5.- e^(-4.T))
 P=- 2 T Eps
 -8. T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 8.75 (5.- e^(-8.T))
 P=- 3 T Eps
 -12. T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 8.75 (5.- e^(-12.T))
 P=- 4 T Eps
 -16. T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 8.75 (5.- e^(-16.T))
 P=- 5 T Eps
 -20. T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 8.75 (5.- e^(-20.T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```




-Graphics-

16. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, $\varepsilon$=9,0

```
So=35
Eps=9.0
 35
 9.
 P=- 0.5 T Eps
S1=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 -4.5 T
 3.88889 (10. - e^(-4.5T))
 P=- 1 T Eps
 -9. T
 S2=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 3.88889 (10. - e^(-9.T))
 P=- 2 T Eps
 -18. T
 S3=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 3.88889 (10. - e^(-18.T))
 P=- 3 T Eps
 -27. T
 S4=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 3.88889 (10. - e^(-27.T))
 P=- 4 T Eps
 -36. T
 S5=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 3.88889 (10. - e^(-36.T))
 P=- 5 T Eps
 -45. T
  S6=So(1+Eps-E^P)/ Eps
 3.88889 (10. - e^(-45.T))
 Plot [{S1,S2,S3,S4,S5,S6},{T,0,2}]
```



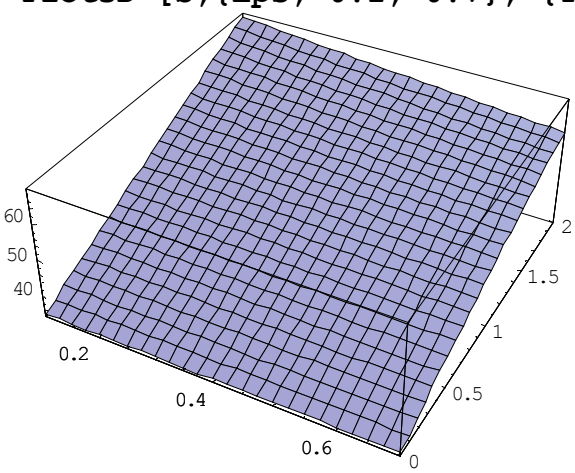

-Graphics-

17. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, 3D prikaz, $M/D_o$ =0,5

```
So=35
 35
S=So(1+Eps-E^(- 0.5 T Eps))/ Eps
```

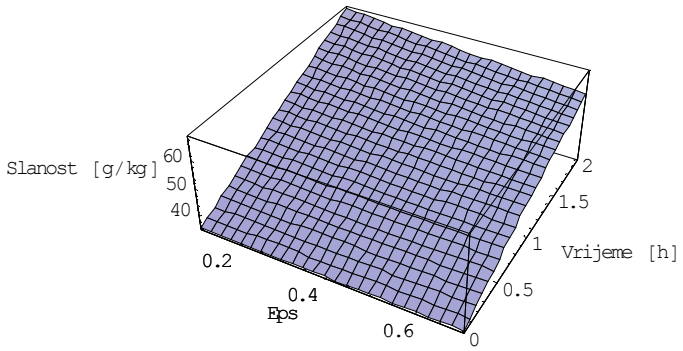
$$\frac{35\,(1 - e^{-0.5\,\mathrm{Eps}\,T} + \mathrm{Eps})}{\mathrm{Eps}}$$

```
Plot3D [S,{Eps, 0.1, 0.7}, {T,0,2}]
```



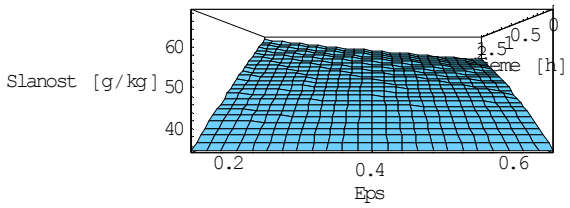

-SurfaceGraphics-

```
Show[%,AxesLabel→{"Eps","Vrijeme[h]","Slanost[g/kg]"}]
```




-SurfaceGraphics-

```
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```



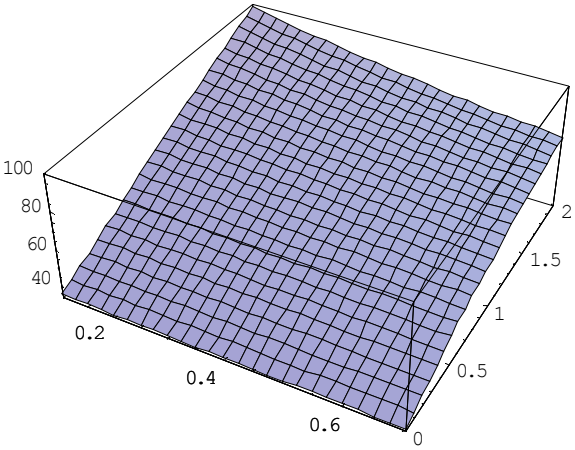

```
-SurfaceGraphics-
```

18. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, 3D prikaz, $M/D_o$ =1

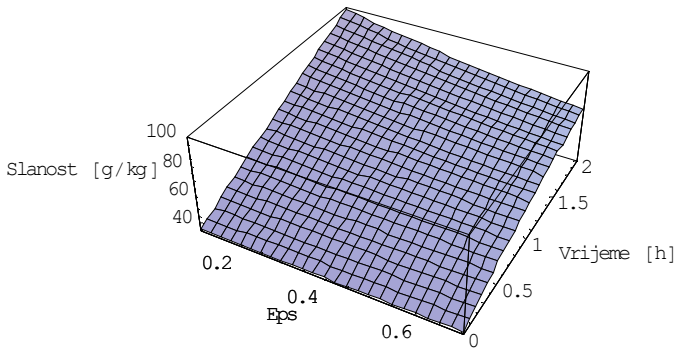
```
So=35
 35
S=So(1+Eps-E^(- 1 T Eps))/ Eps
```

$$\frac{35\,(1 - e^{-\mathrm{Eps}\,T} + \mathrm{Eps})}{\mathrm{Eps}}$$

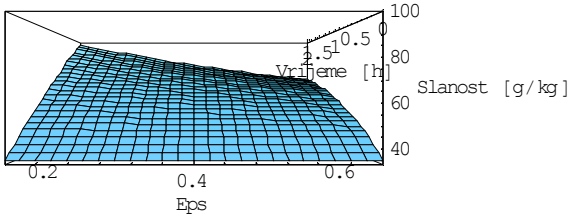
```
Plot3D [S,{Eps, 0.1, 0.7}, {T,0,2}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,AxesLabel→{"Eps","Vrijeme[h]","Slanost[g/kg]"}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```



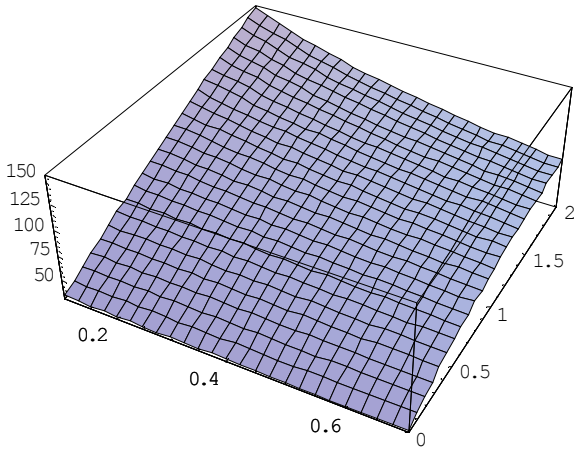

```
-SurfaceGraphics-
```

19. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, 3D prikaz, $M/D_o$ =2

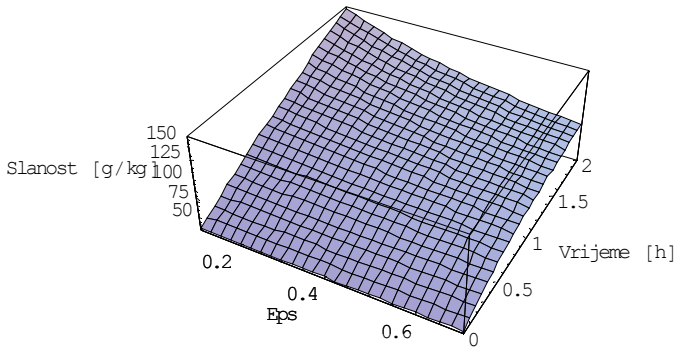
```
So=35
 35
S=So(1+Eps-E^(- 2 T Eps))/ Eps
```

$$\frac{35\,(1 - e^{-2\,\mathrm{Eps}\,T} + \mathrm{Eps})}{\mathrm{Eps}}$$

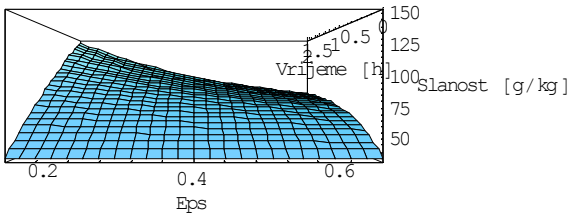
```
Plot3D [S,{Eps, 0.1, 0.7}, {T,0,2}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,AxesLabel→{"Eps","Vrijeme[h]","Slanost[g/kg]"}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```



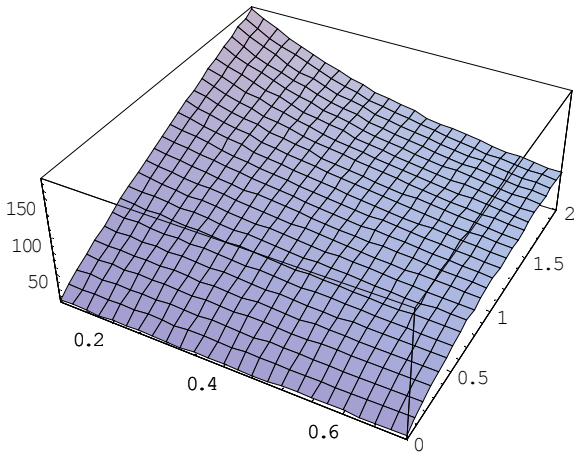

-SurfaceGraphics-

20. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, 3D prikaz, $M/D_o$ =3

```
So=35
 35
S=So(1+Eps-E^(- 3 T Eps))/ Eps
```

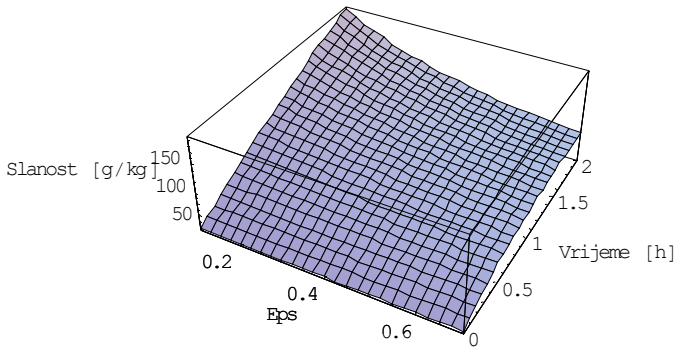
$$\frac{35\,(1 - e^{-3\,\mathrm{Eps}\,T} + \mathrm{Eps})}{\mathrm{Eps}}$$

```
Plot3D [S,{Eps, 0.1, 0.7}, {T,0,2}]
```



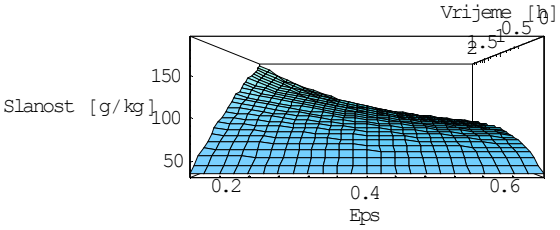

-SurfaceGraphics-

```
Show[%,AxesLabel→{"Eps","Vrijeme[h]","Slanost[g/kg]"}]
```




-SurfaceGraphics-

```
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```



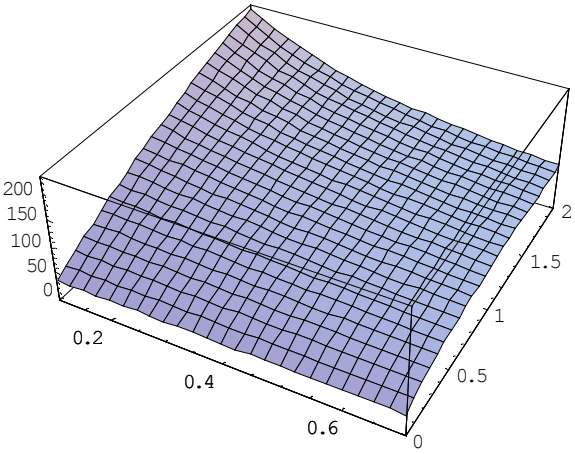

-SurfaceGraphics-

21. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, 3D prikaz, $M/D_o$ =4

```
So=35
 35
S=So(1+Eps-E^(- 4 T Eps))/ Eps
```

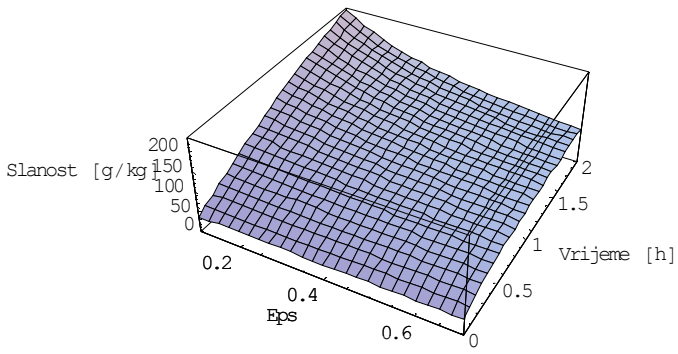
$$\frac{35\,(1 - e^{-4\,\mathrm{Eps}\,T} + \mathrm{Eps})}{\mathrm{Eps}}$$

```
Plot3D [S,{Eps, 0.1, 0.7}, {T,0,2}]
```



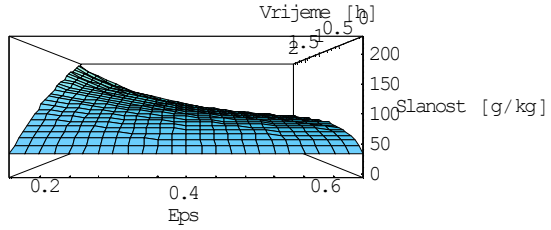

-SurfaceGraphics-

```
Show[%,AxesLabel→{"Eps","Vrijeme[h]","Slanost[g/kg]"}]
```




-SurfaceGraphics-

```
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```



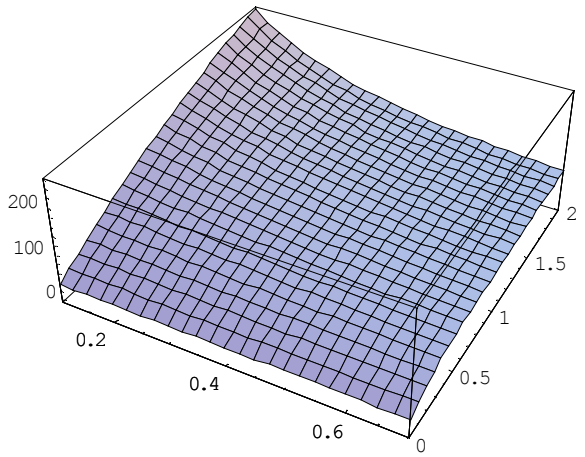

```
-SurfaceGraphics-
```

22. Mathematica 5.0 – izraz 4.3.2, 3D prikaz, $M/D_o$ =5

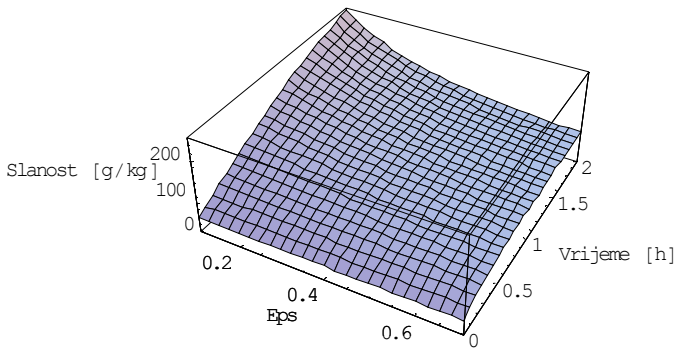
```
So=35
 35
S=So(1+Eps-E^(- 5 T Eps))/ Eps
```

$$\frac{35\,(1 - e^{-5\,Eps\,T} + Eps)}{Eps}$$

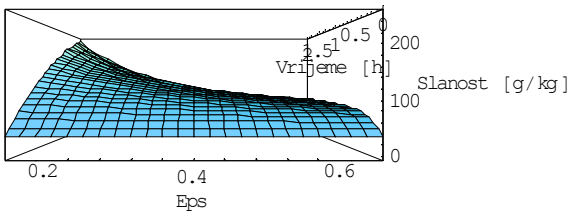
```
Plot3D [S,{Eps, 0.1, 0.7}, {T,0,2}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,AxesLabel→{"Eps","Vrijeme[h]","Slanost[g/kg]"}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```




-SurfaceGraphics-

23. Mathematica 5.0 – izraz 3.5.6 prema 3.5.1 i 3.5.5, kinematički viskozitet morske vode, aplikacija najprije izračunava gustoću (RO[kg/m$^3$]), dinamički viskozitet (etaT[Pas]) te zatim kinematički viskozitet (Ni[St])

**A=(2 t-200)/160**

$$\frac{1}{160}(-200+2\,t)$$

**B=(2 s-150)/150**

$$\frac{1}{150}(-150+2\,s)$$

**G1=0.5**

0.5

**G2=B**

$$\frac{1}{150}(-150+2\,s)$$

**G3=2 B^2-1**

$$-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}$$

**A1=4.032219 G1+0.115313 G2+3.26 10^(-4) G3**

$$2.01611+0.000768753\,(-150+2\,s)+0.000326\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)$$

**A2=-0.108199 G1+1.571 10^(-3) G2-4.23 10^(-4) G3**

$$-0.0540995+0.0000104733\,(-150+2\,s)-0.000423\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)$$

**A3=-0.012247 G1+1.74 10^(-3) G2-9 10^(-6) G3**

$$-0.0061235+0.0000116\,(-150+2\,s)-\frac{9\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)}{1000000}$$

**A4=6.92 10^(-4) G1-8.7 10^(-5) G2-5.3 10^(-5) G3**

$$0.000346-5.8\times10^{-7}\,(-150+2\,s)-0.000053\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)$$

**F1=0.5**

0.5

**F2=A**

$$\frac{1}{160}(-200+2\,t)$$

**F3=2 A^2-1**

$$-1+\frac{(-200+2\,t)^2}{12800}$$

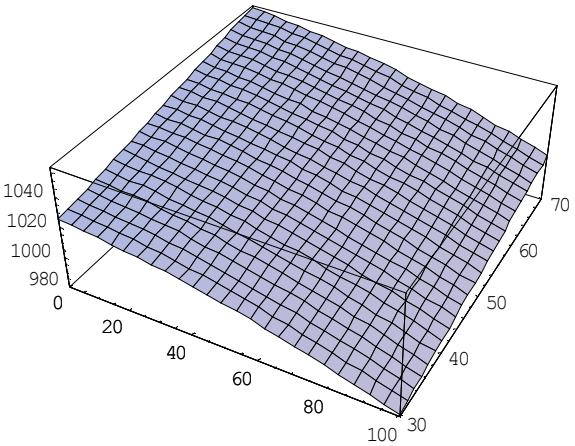
**F4=4 A^3 - 3A**

$$-\frac{3}{160}(-200+2\,t)+\frac{(-200+2\,t)^3}{1024000}$$

**RO=(A1 F1+A2 F2+A3 F3+A4 F4) 10^3**

$$1000\left(0.5\left(2.01611+0.000768753\,(-150+2\,s)+0.000326\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)\right)+\frac{1}{160}\left(-0.0540995+0.0000104733\,(-150+2\,s)-0.000423\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)\right)(-200+2\,t)+\left(-0.0061235+0.0000116\,(-150+2\,s)-\frac{9\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)}{1000000}\right)\left(-1+\frac{(-200+2\,t)^2}{12800}\right)+\left(0.000346-5.8\times10^{-7}\,(-150+2\,s)-0.000053\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)\right)\left(-\frac{3}{160}\,(-200+2\,t)+\frac{(-200+2\,t)^3}{1024000}\right)\right)$$

**Plot3D [RO,{t,0,100},{s,30,70}]**




-SurfaceGraphics-

**AA=1-0.000619 s+0.000003 s^2**

**BB=1+0.000942 s-0.000015 s^2**

**Eksp=(t-20)(1.37060 AA+0.000832 BB (t-20))/(t+109)**

$$1-0.000619\,s+3.\times10^{-6}\,s^2$$

$$1+0.000942\,s-0.000015\,s^2$$

$$\frac{1}{109+t}\left(\left(1.3706\left(1-0.000619\,s+3.\times10^{-6}\,s^2\right)+0.000832\left(1+0.000942\,s-0.000015\,s^2\right)(-20+t)\right)(-20+t)\right)$$

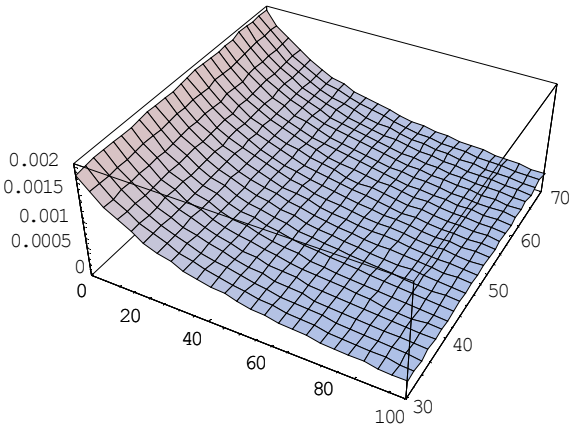
**eta20=1.002+0.001652 s+0.0000083 s^2**

$$1.002+0.001652\,s+8.3\times10^{-6}\,s^2$$

**etaT=(eta20/10^Eksp) 10^(-3)**

$$10^{-3-\frac{\left(1.3706\left(1-0.000619\,s+3.\times10^{-6}\,s^2\right)+0.000832\left(1+0.000942\,s-0.000015\,s^2\right)(-20+t)\right)(-20+t)}{109+t}}\left(1.002+0.001652\,s+8.3\times10^{-6}\,s^2\right)$$

```
Plot3D [etaT,{t,0,100},{s,30,70}]
```

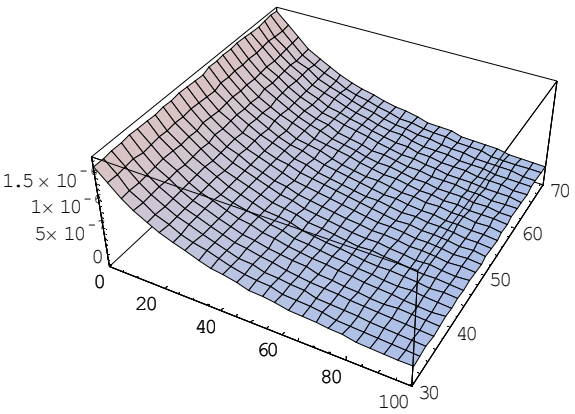



```
-SurfaceGraphics-
ni=etaT/RO
```

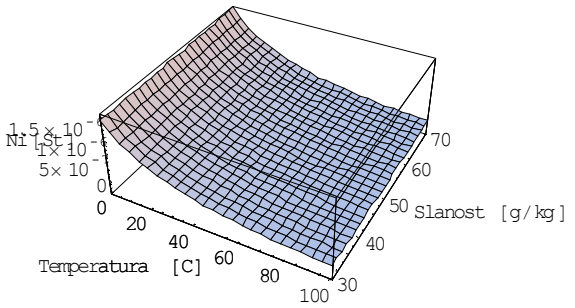
$$\left(10^{-6-\frac{(1.3706\,(1-0.000619\,s+3.\times10^{-6}\,s^2)+0.000832\,(1+0.000942\,s-0.000015\,s^2)\,(-20+t))\,(-20+t)}{109+t}}\,(1.002+0.001652\,s+8.3\times10^{-6}\,s^2)\right)\Big/$$

$$\left(0.5\left(2.01611+0.000768753\,(-150+2\,s)+0.000326\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)\right)+\frac{1}{160}\left(-0.0540995+0.0000104733\,(-150+2\,s)-0.000423\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)\right)(-200+2\,t)+\left(-0.0061235+0.0000116\,(-150+2\,s)-\frac{9\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)}{1000000}\right)\left(-1+\frac{(-200+2\,t)^2}{12800}\right)+\left(0.000346-5.8\times10^{-7}\,(-150+2\,s)-0.000053\left(-1+\frac{(-150+2\,s)^2}{11250}\right)\right)\left(-\frac{3}{160}\,(-200+2\,t)+\frac{(-200+2\,t)^3}{1024000}\right)\right)$$

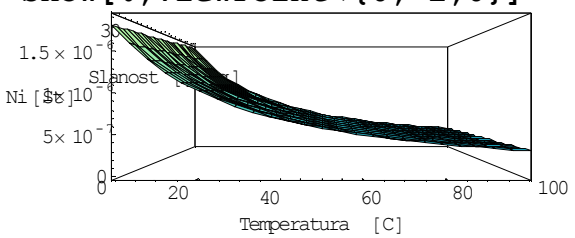
```
Plot3D [ni,{t,0,100},{s,30,70}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,AxesLabel→{"Temperatura[C]","Slanost[g/kg]","Ni[St]"}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```




```
-SurfaceGraphics-
```

24. Mathematica 5.0 – izraz 3.5.13 za izračunavanje specifičnog toplinskog kapaciteta morske vode

```
A=5.328-9.76 10^(-2) s+4.04 10^(-4) s^2
```

$5.328 - 0.0976\,s + 0.000404\,s^2$

```
B=-6.913 10^(-3)+7.351 10^(-4) s-3.15 10^(-6) s^2
```

$-0.006913 + 0.0007351\,s - 3.15\times10^{-6}\,s^2$

```
CC=9.6 10^(-6)-1.927 10^(-6) s+8.23 10^(-9) s^2
```

$9.6\times10^{-6} - 1.927\times10^{-6}\,s + 8.23\times10^{-9}\,s^2$

```
DD=2.5 10^(-9)+1.666 10^(-9) s-7.125 10^(-12) s^2
```

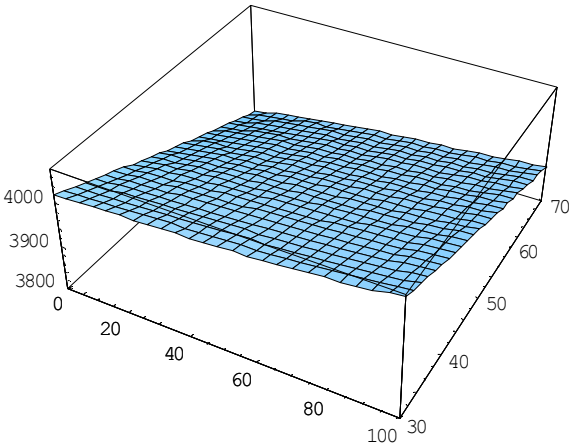
$2.5\times10^{-9} + 1.666\times10^{-9}\,s - 7.125\times10^{-12}\,s^2$

```
T=t+273.15
```

```
273.15 +t
Cw=(A+B T+CC T^2+DD T^3) 10^3
```

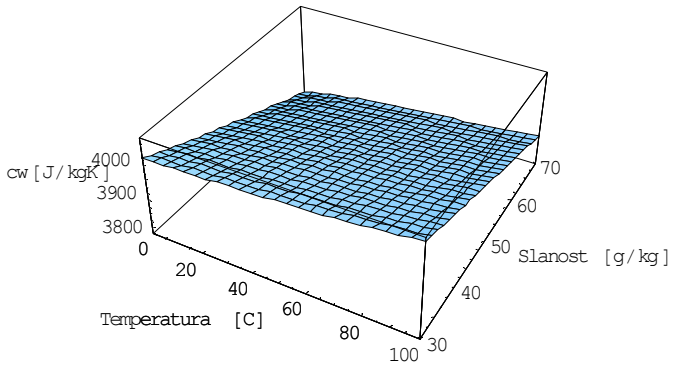
$$1000\,(5.328 - 0.0976\,s + 0.000404\,s^2 + (-0.006913 + 0.0007351\,s - 3.15\times10^{-6}\,s^2)\,(273.15+t) + (9.6\times10^{-6} - 1.927\times10^{-6}\,s + 8.23\times10^{-9}\,s^2)\,(273.15+t)^2 + (2.5\times10^{-9} + 1.666\times10^{-9}\,s - 7.125\times10^{-12}\,s^2)\,(273.15+t)^3)$$

```
Plot3D [Cw,{t,0,100},{s,30,70}]
```

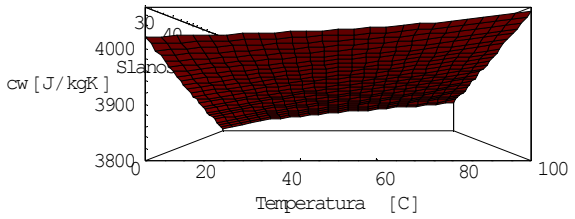



```
-SurfaceGraphics-
```

```
Show[%,AxesLabel→{"Temperatura[C]","Slanost[g/kg]","cw[J/kgK]"
}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```



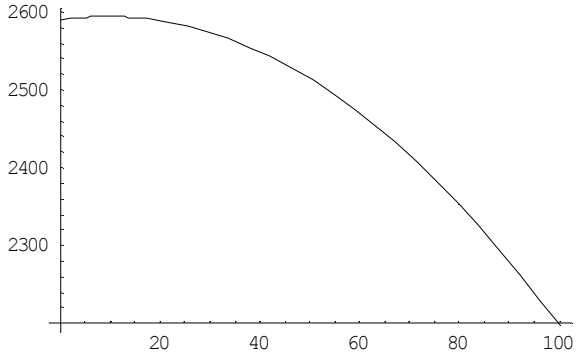

```
-SurfaceGraphics-
```

25. Mathematica 5.0 – izraz 3.5.7 za izračunavanje latentne topline isparivanja

```
R=2589.583+0.9156 t-4.8343 t^2/100
```

$2589.58 + 0.9156\,t - 0.048343\,t^2$

```
Plot [R, {t,0,100}]
```




-Graphics-

26. Mathematica 5.0 – izraz 3.5.15 za izračunavanje povišenja temperature zasićenja morske vode u odnosu na slatku vodu istog tlaka

```
B=(6.71+6.34 t /100+9.74 t^2/100000)/1000
```

$$\frac{6.71 + 0.0634\,t + 0.0000974\,t^2}{1000}$$

```
CC=(22.238+9.59 t/1000+9.42 t^2/100000) 10^(-8)
```

$$\frac{22.238 + 0.00959\,t + 0.0000942\,t^2}{100000000}$$

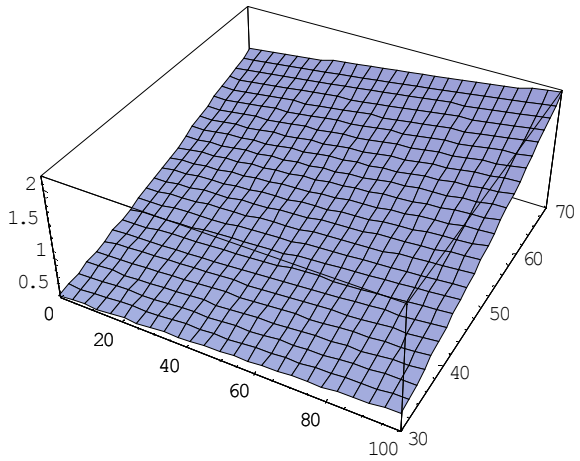
```
X=s 1000
```

1000 s

```
Deltat=X(B+CC X)/1000
```

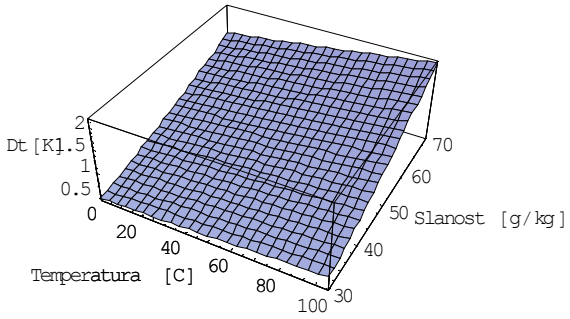
$$s\left(\frac{s\,(22.238 + 0.00959\,t + 0.0000942\,t^2)}{100000} + \frac{6.71 + 0.0634\,t + 0.0000974\,t^2}{1000}\right)$$

```
Plot3D [Deltat,{t,0,100},{s,30,70}]
```

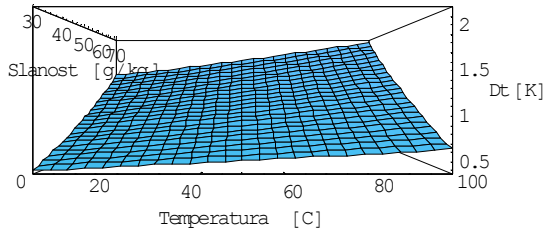



-SurfaceGraphics-

```
Show[%,AxesLabel→{"Temperatura[C]","Slanost[g/kg]","Dt[K]"}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```




```
-SurfaceGraphics-
```

27. Mathematica 5.0 – izraz 3.5.9 i 3.5.10 za izračunavanje koeficijenta toplinske vodljivosti vodene otopine soli

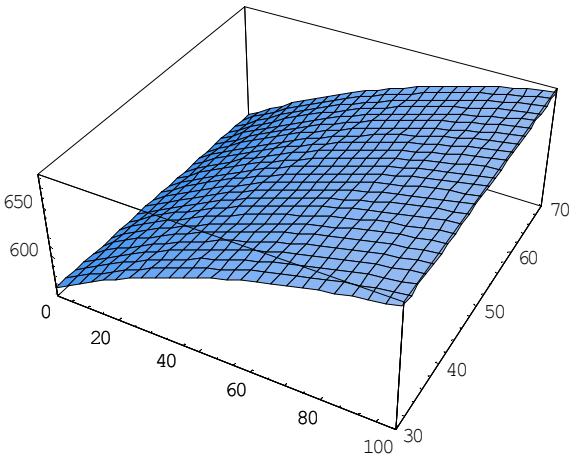
```
T=t+273.15
 273.15 +t
 Eksp=(Log[0.24+s 0.0002]+(2.3-(343.5+s 0.37)/T) (1-T/(647+s
0.03))^0.333)
```

$$\left(2.3-\frac{343.5+0.37\,s}{273.15+t}\right)\left(1-\frac{273.15+t}{647+0.03\,s}\right)^{0.333}+\mathrm{Log}[0.24+0.0002\,s]$$

```
 Lambda=1000 E^Eksp
```

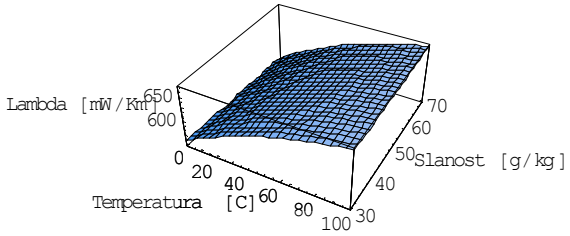
$$1000\,e^{\left(2.3-\frac{343.5+0.37\,s}{273.15+t}\right)\left(1-\frac{273.15+t}{647+0.03\,s}\right)^{0.333}(0.24+0.0002\,s)}$$

```
 Plot3D[Lambda,{t,0,100},{s,30,70}]
```

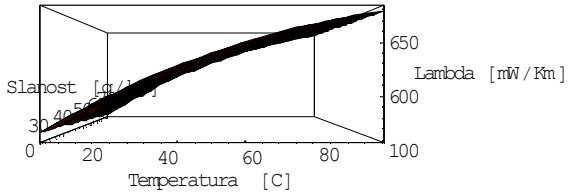



```
-SurfaceGraphics-
```

```
Show[%,AxesLabel→{"Temperatura[C]","Slanost[g/kg]","Lambda[mW/
Km]"}]
```




```
-SurfaceGraphics-
Show[%,ViewPoint→{0,-2,0}]
```




```
-SurfaceGraphics-
```

28. Mathematica 5.0 – izraz 3.5.17 za izračunavanje ovisnosti tlaka zasićenja slatke vode o temperaturi

```
expon=8.07131-1730.63/(233.426+T)
```

$$8.07131-\frac{1730.63}{233.426+T}$$

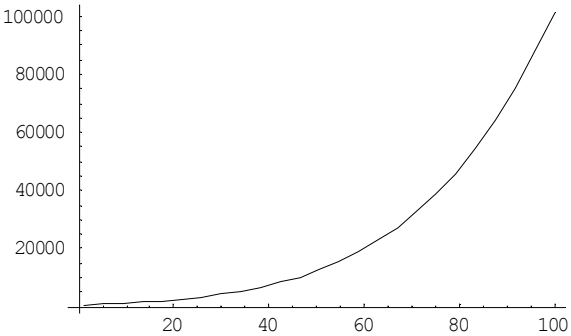
```
pvp=10^expon
```

$$10^{8.07131-\frac{1730.63}{233.426+T}}$$

```
pvppa=133.322 pvp
```

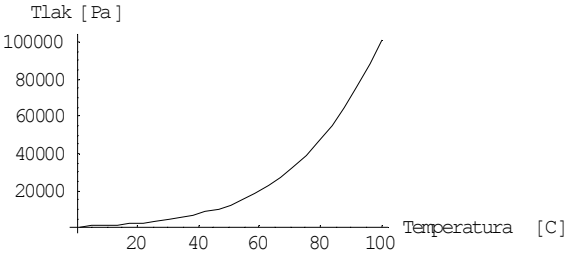
$$133.322\,10^{8.07131-\frac{1730.63}{233.426+T}}$$

```
Plot[pvppa,{T,1,100}]
```




```
-Graphics-
```

```
Show[%,AxesLabel→{"Temperatura[C]","Tlak[Pa]"}]
```




-Graphics-

29. Mathematica 5.0 – izraz 3.5.18 za izračunavanje ovisnosti temperature zasićenja slatke vode o tlaku

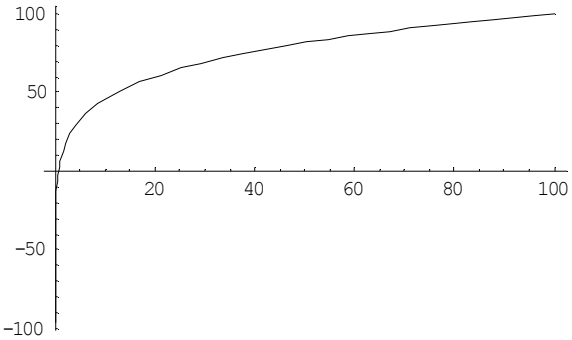
```
Ts=3985.44/(16.5362-Log[ps])+38.9974
```

$$38.9974 + \frac{3985.44}{16.5362 - \mathrm{Log}[ps]}$$

```
Ts=Ts-273.15
```

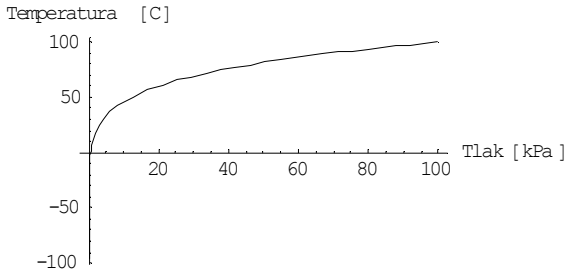
$$-234.153 + \frac{3985.44}{16.5362 - \mathrm{Log}[ps]}$$

```
Plot[Ts,{ps,0,100}]
```




-Graphics-

```
Show[%,AxesLabel→{"Tlak[kPa]","Temperatura[C]"}]
```




-Graphics-

30. Mathematica 5.0 – izraz 3.7.60 za izračunavanje ovisnosti kapaciteta uređaja o količini napojne morske vode i željenoj gornjoj granici slanosti rasoline

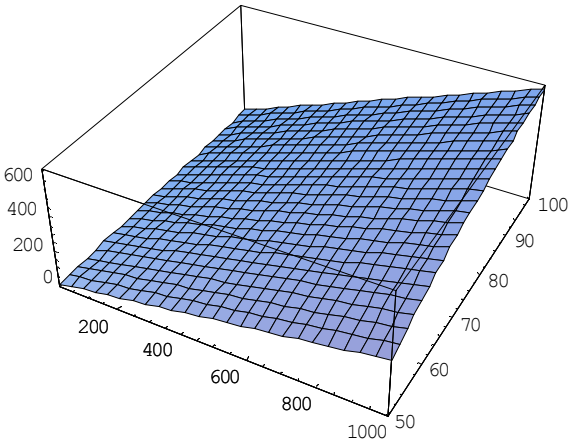
```
So=35
```

```
Dpare=M(Sželj-So) / Sželj
```

35

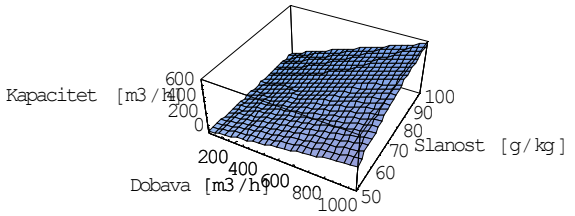
$$\frac{M(-35+Sželj)}{Sželj}$$

```
Plot3D[Dpare,{M,5,1000},{Sželj,50,100}]
```



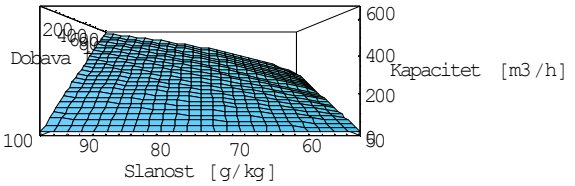

-SurfaceGraphics-

```
Show[%,AxesLabel→{"Dobava[m3/h]","Slanost[g/kg]","Kapacitet[m3
/h]"}]
```




-SurfaceGraphics-

```
Show[%,ViewPoint→{-2,0,0}]
```




-SurfaceGraphics-

31. Primjer programa u MS Fortran Powerstation za izračunavanje svojstava morske vode

```
!     program za izračunavanje svojstava morske vode (gustoće,specifičnog
!     toplinskog kapaciteta, toplinske vodljivosti, povećanja temperature
!     isparavanja u odnosu na slatku vodu te dinamičkog i kinematičkog
!    viskoziteta za zadanu temperaturu morske vode TE (u stupnjevima Kelvina) i
¡    slanost SL (u g/kg)

      program seaprop
      dimension ro(10,10),bpe(10,10)
!     bpe - boiling point elevation tj. povećanje temperature isparavanja u odnosu
!     na slatku vodu
          real TEC,TE,SL,t,s,droi,droj,roj1,roj2,rox,t0,s0
          real pr1,pr2,pr3,pr4,hcap
          real prl1,fakt1,fakt2,ekspon,alambda
          double precision bpeX,dbpei,dbpej,bpe1,bpe2
          double precision eta20,pre1,pre2,fakte1,fakte2,ekspon1,etat,viskoz
          integer i,j,i0,j0
          e=2.718281828
      open(1,file='ulaz1.dat')
      open(2,file='ulaz3.dat')
      write(*,*)'Ulazni podaci: temperatura-TE i slanost-SL'
      read(*,*)TE,SL
      write(*,*)TE,SL
      read(1,*)((ro(i,j),j=1,8),i=1,9)
          read(2,*)((bpe(i,j),j=1,8),i=1,5)

$DEBUG
!     izračunavanje temperature morske vode u stupnjevima Celsiusa
      TEC=TE-273.
          write(*,*)TEC
!     izračunavanje gustoće morske vode iz učitane tabele

      do 10 i=1,9
      t=20.+(i-1)*10.
      if (t-TEC) 10,20,20
10     continue
20     if (t.eq.TEC)then
       i0=i
      else
       i0=i-1
      endif
      do 30 j=1,8
```

```
      s=10.+(j-1)*20.
      if (s-SL) 30,40,40
30     continue
40     if (s.eq.SL)then
       j0=j
      else
       j0=j-1
      endif
      t0=20.+(i0-1)*10.
      s0=10.+(j0-1)*20.
      if (t0.eq.T.and.s0.eq.SL) then
       rox=ro(i0,j0)
      else
          droj=(SL-s0)/20.
          roj1=ro(i0,j0)+(ro(i0,j0+1)-ro(i0,j0))*droj
          roj2=ro(i0+1,j0)+(ro(i0+1,j0+1)-ro(i0+1,j0))*droj
          droi=(TEC-t0)/10.
          rox=roj1+(roj2-roj1)*droi
      endif
      write(*,*)'Gustoca morske vode'
      write(*,*)rox

!     izračunavanje specifičnog toplinskog kapaciteta prema empirijskom izrazu

      pr1=5.328-9.76*SL*10.**(-2)+4.04*10.**(-4)*SL**2
      pr2=(-6.91*10.**(-3)+7.351*SL*10.**(-4)-3.15*SL**2*10.**(-6))*TE
      pr3=(9.6*10.**(-6)-1.927*SL*10.**(-6)+8.23*SL**2*10.**(-9))*TE**2
      pr4=(2.5*10.**(-9)+1.666*SL*10.**(-9)-7.125*SL**2*10.**(-12))*TE**3
      hcap=pr1+pr2+pr3+pr4
      write(*,*)'Specificna toplina morske vode'
      write(*,*)hcap

!     izračunavanje  toplinske vodljivosti (W/mK) prema empirijskom izrazu

      prl1=alog(0.24+SL*0.0002)
          fakt1=2.3-(343.5+SL*0.37)/TE
          fakt2=1.-TE/(647.+SL*0.03)
          ekspon=prl1+fakt1*fakt2**0.333
          alambda=1000*e**ekspon
      write(*,*)'Koeficijent toplinske vodljivosti morske vode'
      write(*,*)alambda

!     izračunavanje  povećanja temperature isparavanja u odnosu na slatku vodu u
(K)
```

```
      do 50 j=1,8
      s=20.+(j-2.)*20.
      if (s-SL) 50,60,60
50     continue
60     if (s.eq.SL) then
        j0=j
      else
        j0=j-1
      endif

      do 70 i=1,5
      t=20.+(i-1.)*20.
      if (t-TEC) 70,80,80
70     continue
80     if (t.eq.TEC) then
        i0=i
      else
        i0=i-1
      endif

      t0=20.+(i0-1.)*20.
      s0=20.+(j0-2.)*20.

      if (t0.eq.TEC.and.s0.eq.SL) then
        bpeX=bpe(i0,j0)
      else

          dbpej=(SL-s0)/20.
          bpe1=bpe(i0,j0)+(bpe(i0,j0+1)-bpe(i0,j0))*dbpej
          bpe2=bpe(i0+1,j0)+(bpe(i0+1,j0+1)-bpe(i0+1,j0))*dbpej
          dbpei=(TEC-t0)/20.
          bpex=bpe1+(bpe2-bpe1)*dbpei
      endif

      write(*,*)'Povisenje temperature isparavanja'
      write(*,*)bpeX

!     izračunavanje  dinamičkog i kinematičkog viskoziteta prema
!     empirijskom izrazu

      eta20=1.002+0.001652*SL+0.0000083*SL**2.

          if (TEC.ne.20) then
```

```
        pre1=1.3706*(1.-0.000619*SL+0.000003*SL**2)
        pre2=0.000832*(1.+0.000943*SL-0.000015*SL**2.)*(TEC-20.)
        fakte1=pre1+pre2
        fakte2=(TEC-20.)/(TEC+109.)
        ekspon1=fakte1*fakte2
        etat=eta20/10.**ekspon1
    else
         etat=eta20
    endif

!   pretvaranje cP u Pas

    etat=etat*10.**(-3.)
    write(*,*)'Dinamicki viskozitet morske vode'
    write(*,*)etat

!   izračunavanje kinematičkog viskoziteta

    viskoz=etat/rox
    write(*,*)'Kinematički viskozitet morske vode'
    write(*,*)viskoz

    stop
    end
```

## 7.6. Životopis

Predrag Kralj rođen je 10. rujna 1963. u Rijeci. U Rijeci je završio osnovnu i srednju školu, matematičko-informatičko usmjerenje. Diplomirao je 1988. godine na brodostrojarskom smjeru sveučilišnog studija strojarstva Tehničkog fakulteta u Rijeci.

Kao stipendista, zapošljava se u BI "3. maj", Rijeka, gdje u Jedinici za klasifikacijske i sistemske nacrte Tehničkog ureda brodogradilišta radi od 1. siječnja 1989. do 31.12.1989. godine. U jesen 1989. godine upisuje znanstveni poslijediplomski studij pri Tehničkom fakultetu Rijeka. Studij za znanstveno usavršavanje, modul "Brodska energetska postrojenja", pri Tehničkom fakultetu u Rijeci, završio je 1996. godine, obranom magistarskog rada.

Od 1.01.1990. godine zaposlen je kao asistent na Pomorskom fakultetu u Rijeci. Na Pomorskom fakultetu radio je u suradničkim zvanjima mlađeg asistenta i asistenta te nastavnim zvanjima predavača, višeg predavača i profesora visoke škole. Pored redovitih radnih obveza, bio je vanjski suradnik Tehničkog fakulteta u Rijeci, gdje je izvodio laboratorijske vježbe iz kolegija *Brodski sistemi, pomoćni strojevi i uređaji*.

Tijekom svog rada na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci izvodio je nastavu iz više kolegija: Nauka o čvrstoći, Osnove brodskih sustava, Eksploatacija brodskih sustava mikroklime, Eksploatacija brodskih rashladnih uređaja, Eksploatacija brodskih strojnih sustava, dok danas održava predavanja i vježbe iz kolegija: 1) *Brodski strojni sustavi* i 2) *Brodski rashladni uređaji* na smjeru *Brodostrojarstvo*, 3) *Brodski strojni sustavi* na smjeru *Nautika i tehnologija pomorskog prometa* te 4) *Brodski pogonski sustavi* na smjeru *Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu*. Bio je i vanjski suradnik, u svojstvu nositelja kolegija *Brodski rashladni sustavi* Odjela za promet i pomorstvo Sveučilišta u Zadru. Sudjelovao je u ustrojavanju strojarskih laboratorija za simulaciju brodske strojarnice ili brodskih uređaja. Sudjeluje u izvođenju nastave na specijalističkim programima izobrazbe za posebna ovlaštenja pomoraca. Autor je nekoliko dijelova internih skripti za potrebe spomenutih programa izobrazbe. Objavio je na webu nastavne materijale potrebne za izvođenje kolegija na kojima predaje. Član je nekoliko strukovnih udruga.

Autor je ili koautor 20 znanstvenih i dva stručna rada objavljena u zbornicima radova znanstvenih skupova i kongresa te časopisa u zemlji i inozemstvu. Recenzirao je tri znanstvena rada. Bio je suradnik na projektu “Utjecaj zahtjeva zaštite okoliša na energetske sustave broda” Zavoda za pomorsko strojarstvo i energetiku Pomorskog fakulteta u Rijeci odobrenom od strane Ministarstva znanosti i tehnologije u listopadu 1996. godine pod brojem 112003. Glavni istraživač projekta bio je red. prof. dr. sc. Dragan Martinović. Od 2002. bio je suradnik na projektu 0112009 “Prihvatljivost porivnog sustava po energiji, sigurnosti, ekologiji i održavanju” Ministarstva znanosti i tehnologije RH.

Glavni istraživač navedenog projekta bio je izv. prof. dr. sc. Enzo Tireli. Bio je suradnik je na znanstvenom projektu 112-1121722-1712 "Energetski sustavi broda, alternativna goriva i smanjenje emisija štetnih tvari". Glavni je istraživač na ovom projektu bio također dr. sc. Enzo Tireli, ali u zvanju redovitog profesora. Surađivao je na znanstvenom projektu 112-1121722-3314 "Informacijsko-komunikacijske tehnologije u inteligentnim pomorskim sustavima". Glavni istraživač ovog projekta bio je izv. prof. dr. sc.Vinko Tomas.

Aktivno se služi engleskim jezikom, a pasivno njemačkim i talijanskim jezikom.

Oženjen je i otac jednoga djeteta.