

# Dinamički odziv sustava na promjenu razine kondenzata

---

**Briški, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:704985>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marko Briški**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ante Marušić, mag. ing.

Student:

Marko Briški

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. Dr. sc. Anti Marušiću na pruženoj pomoći pri izradi ovog rada, te na strpljivosti i razumijevanju.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tokom studiranja.

Marko Briški

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
 Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Briški** JMBAG: **0035229145**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dinamički odziv sustava na promjenu razine kondenzata**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Process dynamics response during the change of the condensate level**

Opis zadatka:

Kao jedna od osnovnih komponenti kružnih procesa, kondenzator, odnosno njegovi radni parametri značajno utječu na rad samog procesa. Dok je kod desnokretnih kružnih procesa razina kondenzata u kondenzatoru aktivno regulirana, kod ljevokretnih procesa razina se samostalno održava i ne mijenja značajno tijekom rada sustava. Ipak, kod nekih specifičnih sustava pri određenim rubnim uvjetima može doći do promjene razine kondenzata koja može značajno utjecati na rad cijelog sustava. Korištenjem detaljnog matematičkog modela termo-hidrauličkih procesa unutar kondenzatora moguće je napraviti simulaciju promjena radnih parametara uslijed promjene razine kondenzata.

U okviru ovog zadatka potrebno je:

1. Izvesti detaljan matematički model termo-hidrauličkih procesa unutar kondenzatora izvedbe cijev u plaštu.
2. Implementirati matematički model u Matlab/Simulink® okruženje te napraviti simulacije rada kondenzatora prilikom oscilacija razine kondenzata u normalnim radnim uvjetima i u uvjetima prepunjenosti sustava radnim medijem.
3. Analizirati kako oscilacije razine kondenzata utječu na ostatak sustava.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
 2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
 3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
 2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
 3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Ante Marušić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
1.1	Važnost dinamike procesa .....	1
1.2	Izmjenjivači topline.....	1
1.3	Kondenzator .....	2
1.3.1	Kondenzacija.....	2
1.4	Uloga kondenzatora u desnokretnom procesu sa parom.....	2
1.5	Uloga kondenzatora u rashladnim procesima .....	4
1.6	Tipovi kondenzatora .....	4
1.6.1	Shell & tube kondenzatori .....	4
1.6.2	Kondenzatori zrak – radna tvar .....	5
1.6.3	Kondenzator cijev u cijevi .....	6
1.6.4	Evaporativni kondenzator .....	7
1.7	Dizalice topline .....	7
2	MATEMATIČKI MODEL.....	9
2.1	Jednadžba očuvanja mase kondenzata .....	9
2.1.1	Promjena površine presjeka kondenzata .....	12
2.1.2	Promjena ukupne površine izronjenih cijevi.....	14
2.1.3	Promjena površine između pare i kondenzata.....	15
2.1.4	Početni uvjeti .....	17
2.2	Jednadžba očuvanja energije kondenzata .....	18
2.2.1	Promjena ukupne površine potopljenih cijevi.....	20
2.2.2	Početni uvjet.....	21
2.3	Jednadžba očuvanja energije pare .....	21
2.3.1	Početni uvjet.....	23
2.4	Jednadžba očuvanja mase pare .....	24
2.4.1	Početni uvjeti .....	24
2.5	Pretpostavke .....	25
2.5.1	Izotermni rubni uvjet.....	25
2.6	Gubici prema okolišu .....	25
3	Analiza rezultata .....	26
3.1	1. Slučaj: Normalni uvjeti rada .....	26
3.2	2. Slučaj: Ekstremni uvjeti rada .....	29
4	Zaključak .....	33

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1	Shema jednostavnog Rankineovog procesa .....	3
Slika 1.2	Rankineov proces u T-s dijagramu, s međupregrijanjem.....	3
Slika 1.3	Rankineov proces u T-s dijagramu, sa međupregrijanjem .....	4
Slika 1.4	Shell & tube izmjenjivač .....	5
Slika 1.5	Vanjska jedinica klima uređaja, sa kondenzatorom zrak – radna tvar .....	5
Slika 1.6	Temperaturni profil temperatura po dužini kondenzatora.....	6
Slika 1.7	Kondenzator cijev u cijevi.....	6
Slika 1.8	Shema sustava sa evaporativnim kondenzatorom .....	7
Slika 1.9	Proces u dizalici topline .....	8
Slika 2.1	Prikaz bitnih površina na skici presjeka kondenzatora .....	11
Slika 2.2	Ovisnost poprečne površine kondenzata o razini kondenzata.....	14
Slika 2.3	Promjena ukupne površine izronjenih cijevi u ovisnosti o razini kondenzata. ....	15
Slika 2.4	Ovisnost površine na granici kondenzata o postotku potopljenog volumena. ....	17
Slika 2.5	Prikaz toplinskih tokova na skici presjeka kondenzatora.....	18
Slika 2.6	Dijagram ovisnosti Ukupne površine uronjenih cijevi o visini kondenzata.....	21
Slika 3.1	Vremenska promjena otvorenosti izlaznog ventila za 1. slučaj .....	26
Slika 3.2	Vremenska promjena visine kondenzata za 1. slučaj .....	27
Slika 3.3	Vremenska promjena temperature kondenzata i pare za 1. slučaj .....	27
Slika 3.4	Vremenska promjena tlaka u kondenzatoru za 1. slučaj .....	28
Slika 3.5	Vremenska promjena toplinskih tokova za 1. slučaj.....	28
Slika 3.6	Vremenska promjena otvorenosti izlaznog ventila za 2. slučaj .....	29
Slika 3.7	Vremenska promjena visine kondenzata za 2. slučaj .....	30
Slika 3.8	Vremenska promjena temperature kondenzata i pare za 2. slučaj .....	30
Slika 3.9	Vremenska promjena tlaka u kondenzatoru za 2. slučaj .....	31
Slika 3.10	Vremenska promjena toplinskih tokova za 2. slučaj.....	32

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$M_k$	[kg]	ukupna masa kondenzata
$M_{kon}$	[kg]	kondenzirana masa
$\dot{m}_i$	[kg/s]	izlazna protočna masa kondenzata
$A(z_k)$	[m <sup>2</sup> ]	površina poprečnog presjeka kondenzata
$\rho_k$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća izlaznog kondenzata
$z_k$	[m]	visina kondenzata
$k_{c,p}$	[kW/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prolaza topline između kapljevine u cijevi i pare izvan cijevi
$A_{c,izr}(z_k)$	[m <sup>2</sup> ]	ukupna površina izronjenih cijevi
$T_p$	[K]	temperatura pare
$T_{w,sr}$	[K]	srednja temperatura rashladne vode
$\alpha_{gk}$	[kW/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prijenosa topline između pare i kondenzata
$T_k$	[K]	temperatura kondenzata
$r$	[kJ/kg]	specifična toplina isparavanja/kondenzacije
$\alpha_k$	[kW/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prijelaza topline na strani kondenzata
$\dot{m}_{ul}$	[kg/s]	ulazna protočna masa pare
$A_{gk}(z_k)$	[m <sup>2</sup> ]	površina granice između pare i kondenzata
$\dot{H}_p$	[kJ]	entalpija pare
$\dot{H}_k$	[kJ]	entalpija kondenzata
$\dot{H}_{izl}$	[kJ]	entalpija izlaznog kondenzata
$A_{sp}$	[m <sup>2</sup> ]	površina svijetlog presjeka ventila
$y_v$	[-]	konstanta otvorenosti ventila
$\Delta p$	[Pa]	razlika tlakova u kondenzatoru i izlaznom vodu
$L$	[m]	duljina kondenzatora
$A_0$	[m <sup>2</sup> ]	površina presjeka kondenzatora
$A_{p,c,pot}(z_k)$	[m <sup>2</sup> ]	površina presjeka potopljenih cijevi
$\varphi_k$	[°]	središnji kut kondenzatora
$R_k$	[m]	polumjer kondenzatora
$\alpha_k$	[°]	pomoćni kut za izračun
$n_{cp}$	[-]	broj potopljenih cijevi
$r_c$	[m]	polumjer cijevi kondenzatora
$A_{p,gr}(z_k)$	[m <sup>2</sup> ]	površina presjeka graničnih cijevi
$n_{cr}(z_k)$	[-]	broj cijevi u redu
$\varphi$	[°]	središnji kut cijevi
$\alpha$	[°]	pomoćni kut za izračun kod cijevi
$z_c(z_k)$	[m]	visina kondenzata na cijevi
$A_{c,uk}$	[m <sup>2</sup> ]	ukupna površina svih cijevi
$A_{c,pot}(z_k)$	[m <sup>2</sup> ]	ukupna površina potopljenih cijevi
$n_c$	[-]	broj cijevi



$M_{k01}$	[kg]	početna masa kondenzata prvog slučaja
$M_{k02}$	[kg]	početna masa kondenzata drugog slučaja
$V_{k01}$	[m <sup>3</sup> ]	početni volumen kondenzata prvog slučaja
$V_{k02}$	[m <sup>3</sup> ]	početni volumen kondenzata drugog slučaja
$V_k$	[m <sup>3</sup> ]	volumen kondenzatora
$\dot{\Phi}_{kond}$	[kW]	toplinski tok kondenzacije
$\dot{\Phi}_{pothl}$	[kW]	toplinski tok pothlađenja kondenzata
$\dot{\Phi}_i$	[kW]	toplinski tok izlazne mase
$h'$	[kJ/kg]	specifična entalpija kondenzata
$k_{cpot}$	[kW/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prolaza topline između kondenzata i rashladne vode
$A_c$	[m <sup>2</sup> ]	površina plašta jedne cijevi
$H_{k01}$	[kJ]	početna entalpija kondenzata za drugi slučaj
$H_{k02}$	[kJ]	početna entalpija kondenzata za drugi slučaj
$h_{k0}$	[kJ/kg]	početna specifična entalpija
$h_{ul}$	[kJ/kg]	ulazna specifična entalpija pare
$\dot{\Phi}_{gk}$	[kW]	toplinski tok koji se izmjenjuje na granici pare i kondenzata
$\dot{m}_{kond}$	[kg/s]	maseni tok kondenzacije
$H_{p01}$	[kJ]	početna entalpija prvog slučaja
$H_{p02}$	[kJ]	početna entalpija drugog slučaja
$M_{p01}$	[kg]	početna masa pare prvog slučaja
$M_{p02}$	[kg]	početna masa pare drugog slučaja
$V_{p01}$	[m <sup>3</sup> ]	početni volumen pare prvog slučaja
$V_{p02}$	[m <sup>3</sup> ]	početni volumen pare drugog slučaja
$\rho_{ul}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	ulazna gustoća pare
$V_{kond}$	[m <sup>3</sup> ]	ukupni volumen kondenzatora

## **SAŽETAK**

Kondenzatori su izmjenjivači topline, koji se koriste za promjenu agregatnog stanja iz plina u tekućinu. Koriste za izbacivanje viška topline, te su zbog toga ključne komponente u svim kružnim procesima. U desnokretnim procesima, razina kondenzata je, u pravilu, aktivno regulirana, za razliku od manjih ljevokretnih procesa u kojima se sama održava.

U radu je izveden detaljan matematički model termo – hidrauličkih procesa u kondenzatoru ljevokretnog procesa izvedbe cijev u plaštu. Model je implementiran u Matlab/Simulink okruženju, te su napravljene simulacije rada pri normalnim uvjetima i pri uvjetima ekstremne napunjenosti sustava.

U završnom dijelu analizirani su rezultati simulacija i dobiveni su podaci o tome kako promjena razine kondenzata utječe na ostale parametre rada sustava u normalnim i rubnim uvjetima.

Ključne riječi: kondenzator, ljevokretni kružni proces, desnokretni kružni proces matematički model,

**SUMMARY**

Condensers are heat exchangers which are used for changing the aggregate state from vapor to liquid. They are used in cooling cycles because they can exchange more heat while changing the aggregate state and in thermodynamic cycles for removing the excess heat. Thermodynamic cycles with vapor have systems for regulating the height of the condensate, while in cooling cycles, the height of the condensate is self regulating.

In this paper, a detailed mathematical model of thermo-hydraulic processes in *shell&Tube* condenser of a cooling cycle was developed. The model was implemented in a Matlab/Simulink environment, and simulations of operation under normal conditions and under system overload conditions were made.

In the final part, the results of the simulations were analyzed, and data was obtained on how the change in the condensate level affects the other parameters of the system's operation in normal and marginal conditions.

Key words: condenser, cooling cycle, thermodynamic cycle, mathematical model

# 1 UVOD

## 1.1 Važnost dinamike procesa

Dinamika procesa je važan dio svih tehničkih disciplina, radi razumijevanja ponašanja dinamičkih sustava. Pomaže u razumijevanju načina na koji sustav reagira na vremenske promjene, te pruža uvid u prijelazno i stacionarno ponašanje procesa. To znanje je osobito bitno za dizajniranje sustava koji rade u promjenjivim režimima rada. Simulacije pomažu u identifikaciji potencijalnih problema u fazi dizajna, čime se smanjuje rizik od potrebnih modifikacija nakon implementacije sustava. Također se koriste za testiranje regulacije sustava i podešavanje regulatora (npr. PID regulatora).

## 1.2 Izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline su uređaju koji omogućuju prijenos toplinske energije između dvije ili više struja fluida različitih temperatura. Imaju širok spektar namjene, u procesnoj industriji, u proizvodnji električne energije, proizvodnoj industriji, klimatizaciji, transportu itd. Izmjenjivači topline se mogu podijeliti po slijedećim kriterijima:

-povratu topline

- Rekuperacija,
- Regeneracija;

-procesu prijenosa topline

- Direktni kontakt,
- Indirektni kontakt;

-geometriji i konstrukciji

- Pločasti,
- Shell & tube;

-mehanizmu prijenosa topline

- Jednofazni,
- Dvofazni;

-rasporedu tokova

- Paralelni,

- Protutočni,
- Križni.

### 1.3 Kondenzator

Izmjenjivači topline koji će se razmatrati u ovom zadatku su shell&tube kondenzatori. Za tu vrstu izmjenjivača topline je specifično to što se prijenos topline odvija uz promjenu agregatnog stanja radnog medija, što omogućuje prijenos veće količine topline na manjoj temperaturnoj razlici, zbog toga što se toplina „sprema“ u latentnoj toplini potrebnoj za promjenu agregatnog stanja. Zbog svog efikasnog dizajna, kondenzatori su važan dio desnokretnih procesa sa parom, ljevokretnih rashladnih procesa i sastavni su dio procesa u procesnoj industriji.

Kada zasićena para dođe u kontakt sa površinom niže temperature, dolazi do kondenzacije, odnosno promjene agregatnog stanja iz parnog u tekuće stanje.

#### 1.3.1 Kondenzacija

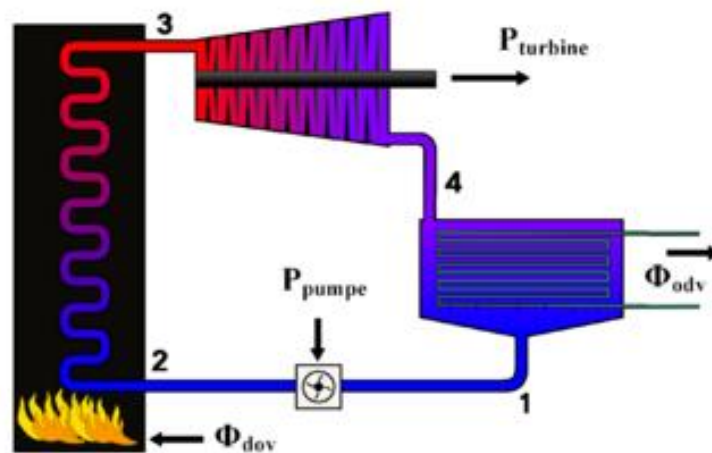
Najčešći tip kondenzacije u izmjenjivačima topline je površinska kondenzacija, u kojoj hladna površina, temperature niže od temperature zasićenja dolazi u kontakt sa parom. Postoje dva tipa površinske kondenzacije. Filmska kondenzacija je tip kondenzacije u kojem nastali kondenzat stvara filmski sloj oko hladne površine. Kod kapljične kondenzacije, na površini cijevi formiraju se mikroskopske kapljice koje ne pokrivaju cijelu hladnu površinu. Nepokrivenost cijele hladne površine rezultira većim koeficijentom prijelaza topline nego kod filmske kondenzacije. Pošto su uvjeti za nastanak kapljične kondenzacije teško održivi, kondenzatori su dizajnirani da rade u uvjetima filmske kondenzacije.

### 1.4 Uloga kondenzatora u desnokretnom procesu sa parom

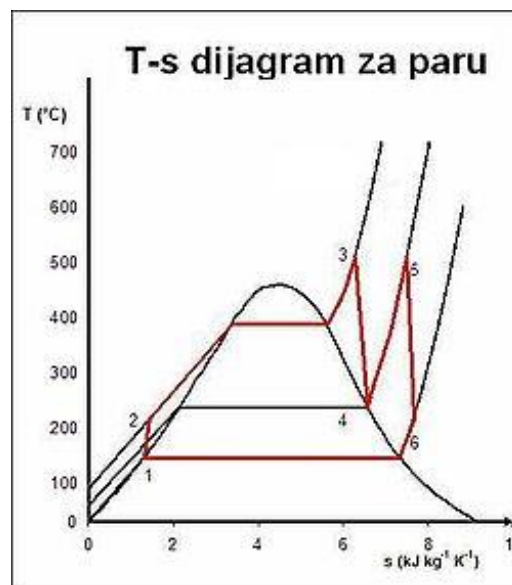
Desnokretni procesi su procesi u kojima se toplina ulaže za podizanje energetskog stanja sustava, iz kojeg se dobiva rad. Jedan ciklus desnokretnog procesa sa parom izgleda tako da napojna voda najprije ulazi u generator pare koji je veliki izmjenjivač topline u kojem se troši energija goriva, koje može biti plin, ugljen, nuklearna energija, mazut, itd. za isparavanje vode, pri konstantnom tlaku. Para se zatim dodatno pregrijava pri konstantnom tlaku, te ulazi u turbinu. U turbini para povećava svoj volumen bez izmjene topline sa okolinom (postoje toplinski gubici u turbini), do kondenzatorskog tlaka, koji je najniži mogući. pri čemu stvara

rad u vidu vrtnje generatora. Nakon ekspanzije para kondenzira u kondenzatoru, pri čemu izbacuje višak dovedene topline, da bi mogla nastaviti kružni proces.

Kondenzator u desnokretnim procesima s parom osigurava kondenzaciju pare koja izlazi iz turbine kako bi se ona mogla ponovno zagrijati i iskoristiti u sustavu, čime se povećava efikasnost sustava. Kondenzacija pare nakon izlaska iz turbine predstavlja najveći gubitak energije u sustavu. Taj gubitak može se smanjiti korištenjem grijača napojne vode i zraka koji ulaze u generator pare. Latentna toplina pare koja izlazi iz turbine se troši na zagrijavanje rashladne vode, koja se najčešće dovodi iz rijeke koja teče u blizini konstrukcije elektrane.



Slika 1.1 Shema jednostavnog Rankineovog procesa

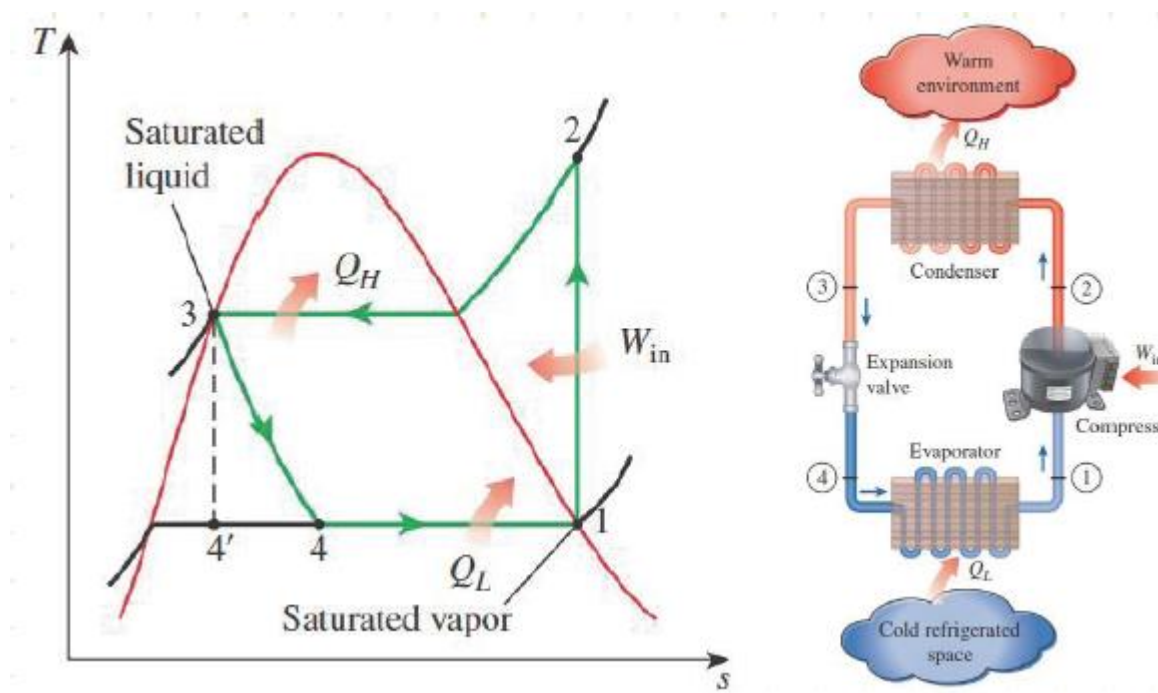


Slika 1.2 Rankineov proces u T-s dijagramu, s međupregrijanjem

## 1.5 Uloga kondenzatora u rashladnim procesima

Primarna funkcija kondenzatora u rashladnim procesima je oduzimanje topline parnoj radnoj tvari radi prelaska iz plinovitog u kapljevito stanje, a to se postiže prijenosom topline iz radnog medija na rashladni spremnik koji može biti zrak ili voda, ovisno o izvedbi sustava.

U sustavima koji su izvedeni kao hladnjaci ili klima uređaji kondenzator odbacuje toplinu radne tvari koja je preuzela tu toplinu iz hlađenog prostora, što je neophodno za rad rashladnih sustava. Kondenzator pomaže pri održavanju određenog tlaka kondenzacije, koji je bitan za pravilan rad kompresora i ostalih komponenata sustava i time održava određen standard efikasnosti sustava.



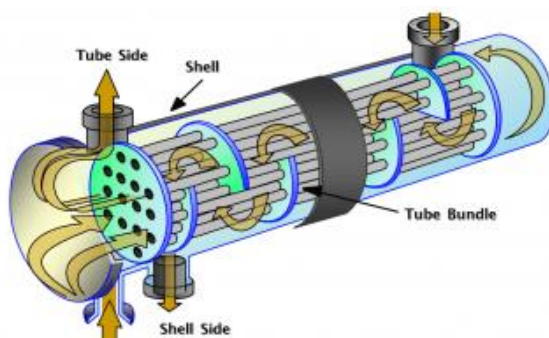
Slika 1.3 Rankineov proces u T-s dijagramu, sa međupregrijanjem

## 1.6 Tipovi kondenzatora

### 1.6.1 Shell & tube kondenzatori

Shell & tube izmjenjivači topline spadaju u kategoriju najviše korištenih izmjenjivača topline u industriji, zbog čvrstog dizajna i efikasnog prijenosa topline. Sastoje se od vanjske ljuske u kojoj je smješten snop cijevi. Kroz snop cijevi teče jedna struja fluida, a druga izvan snopa cijevi, u plaštu izmjenjivača. Prijenos topline između dvije struje fluida, vrši se preko stjenke cijevi koja je najčešće napravljena od čelika. Na kondenzacijskom dijelu je filmska kondenzacija, a u potopljenom djelu, slobodna konvekcija.

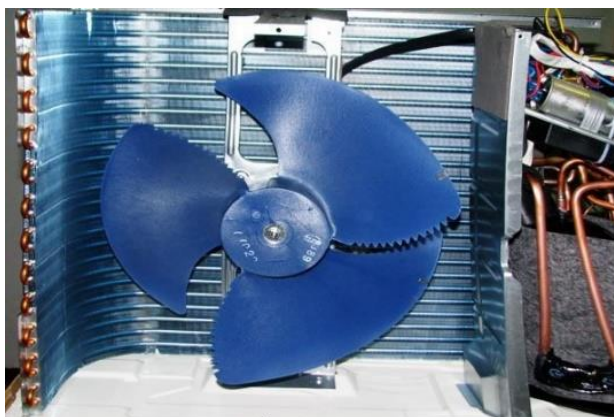
Shell & tube izmjenjivači, najčešće su izvedeni kao kondenzatori i isparivači, što znači da jedna od dvije struje mijenja agregatno stanje. Promjenom agregatnog stanja u prijenosu topline se povećava efikasnost postrojenja, jer se toplina „sprema“ u latentnoj toplini, zbog čega se može puno više energije prenjeti na manjoj temperaturnoj razlici. Kondenzatori i isparivači mogu biti izvedeni tako da struja koja mijenja agregatno stanje bude unutar cijevnog snopa ili izvan (u ljusci). U ovom zadatku razmatrat će se shell & tube kondenzator u kojem će struja koja kondenzira strujat kroz ljusku



Slika 1.4 Shell & tube izmjenjivač

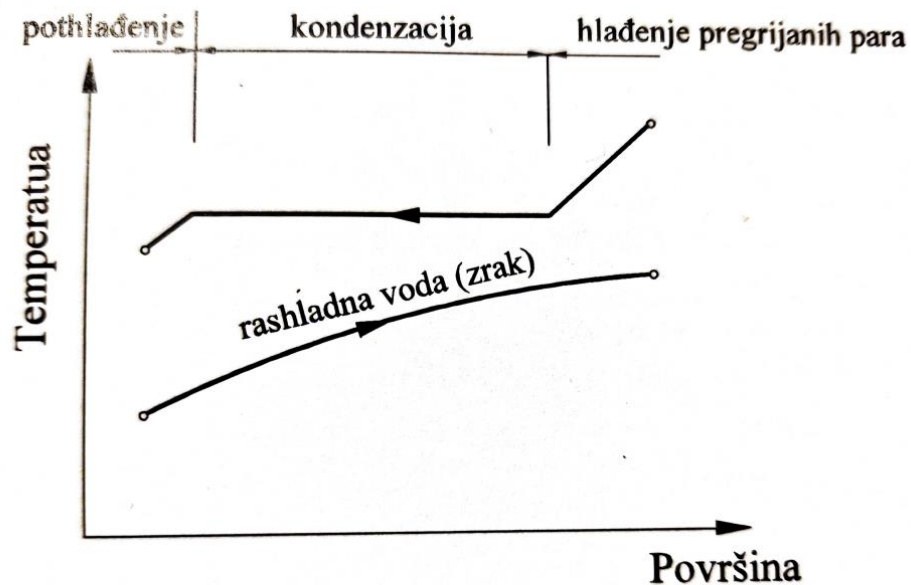
### 1.6.2 Kondenzatori zrak – radna tvar

Kondenzatori, koji predaju toplinu zraku izvedeni su kao snop cijevi, kroz koje prolazi radna tvar na kojima se nalaze orebrenja radi povećanja izmjenjivačke površine. Ventilator nastavlja zrak na snop cijevi, što omogućava prijenos topline s radne tvari na zrak. Radna tvar se napaja kroz gornji otvor kondenzatora, zbog kontinuiranog toka težeg kondenzata uslijed djelovanja sile gravitacije. Unutar cijevi je filmska kondenzacija, a na vanjskim orebrenjima turbulentno strujanje zraka (koje povećava izmjenu topline).



Slika 1.5 Vanjska jedinica klima uređaja, sa kondenzatorom zrak – radna tvar





### **Temperaturni profil temperatura na kondenzatoru**

Slika 1.6 Temperaturni profil temperatura po dužini kondenzatora (V. Soldo/Podloge za predavanja iz predmeta Dizalice topline sa obnovljivim izvorima energije/2024.)

#### **1.6.3 Kondenzator cijev u cijevi**

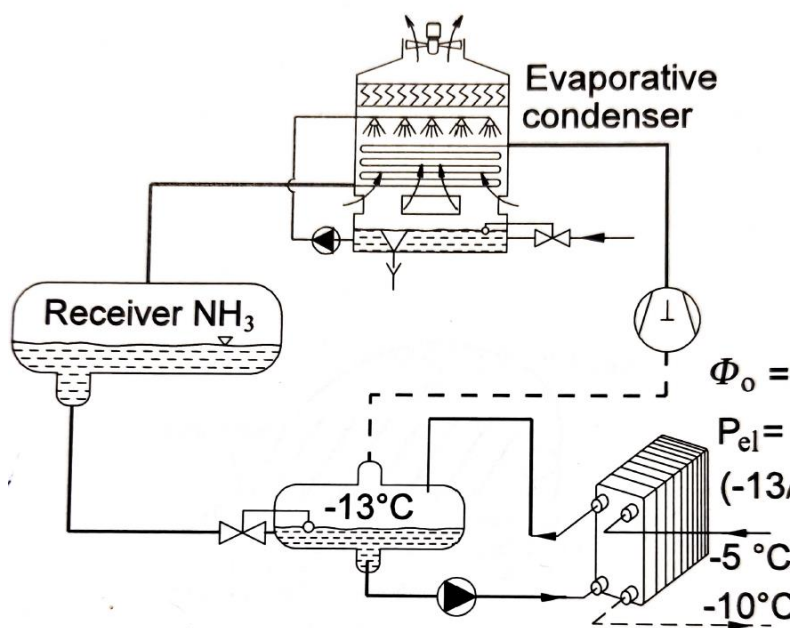
Kondenzator za grijanje vode. Voda je u cijevima, a radna tvar oko cijevi. Radna tvar kondenzira filmskom kondenzacijom, a voda struji turbulentno oko cijevi. Cijevi su savijene u spiralni snop. Ulaz radne tvari je uvijek sa gornje strane.



Slika 1.7 Kondenzator cijev u cijevi

### 1.6.4 Evaporativni kondenzator

Tip kondenzatora koji se najčešće koristi u industriji. Koristi princip hlađenja zrakom i evaporacijom vode. Vodu koju je potrebno hladiti, raspršuje se pomoću sapnica na izmjenjivačkim površinama, preko kojih nastupava zrak. Izmjena topline između vode i zraka manjim djelom se odvija konvekcijom, a većim djelom putem ishlapljivanja vode.



Slika 1.8 Shema sustava sa evaporativnim kondenzatorom (V. Soldo/Podloge za predavanja iz predmeta Dizalice topline sa obnovljivim izvorima energije/2024.)

### 1.7 Dizalice topline

Dizalice topline su sustavi koji se koriste u grijanju i hlađenju prostora. Prenose toplinu iz vanjskog okoliša u unutarnji prostor, putem radnog medija. Sastoje se od 4 glavne komponente: isparivač, kompresor, kondenzator i prigušni ventil.

Kada dizalica topline radi u režimu grijanja, radna tvar isparavanjem preuzima toplinu iz vanjskog okoliša, tlači se u kompresoru na kondenzatorski tlak, te u kondenzatoru, kondenzacijom predaje toplinu rashladnoj vodi, kojom se grije prostor. Radna tvar se nakon toga prigušuje na isparivački tlak i proces se nastavlja.

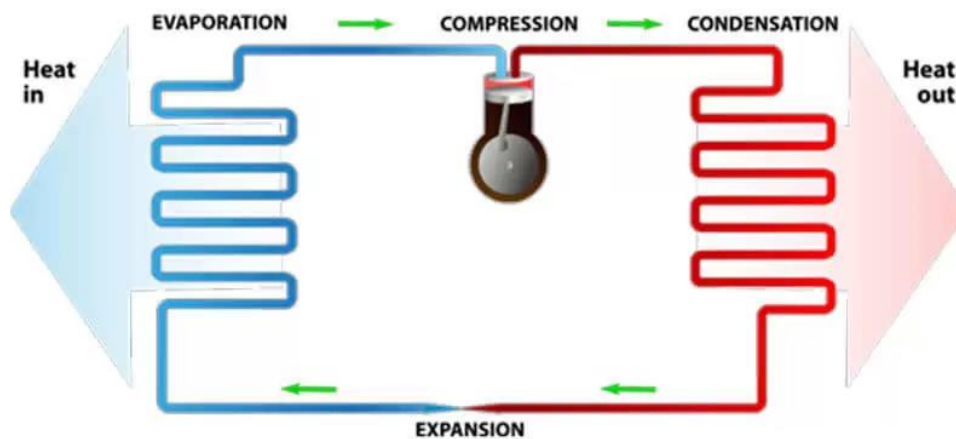
Ako dizalica topline radi u režimu hlađenja, kondenzator i isparivač mijenjaju funkcije, te radna tvar isparava izmjenom topline sa rashladnom vodom, kojom se hladi prostor, tlači se na kondenzatorski tlak, te u kondenzatoru kondenzira predajući toplinu vanjskom zraku. Nakon toga se prigušuje na isparivački tlak i tako se nastavlja proces.

Postoje 2 tipa dizalica topline s obzirom na vanjski toplinski spremnik:

- Zračne – za toplinski spremnik koristi vanjski zrak
- Geotermalne – za toplinski spremnik koriste podzemnu vodu, koja je konstantne temperature

Dizalice topline su vrlo efikasan izvor topline, COP im se kreće od 3.5 do 5, što znači da se dobilo 3.5 do 5 puta više energije od rada kojeg se uložilo.

Također su i povoljne za okoliš, jer imaju niski ugljični otisak, koji je ovisan samo o procesu izrade i načinu proizvodnje električne energije za pogon kompresora.



Slika 1.9 Proces u dizalici topline

## 2 MATEMATIČKI MODEL

U kondenzatoru je fluid prisutan u dva različita agregatna stanja, kao suho zasićena para i pothlađena kapljevina. Spomenute faze nisu u termodinamičkoj ravnoteži, stoga je potrebno postaviti jednadžbe očuvanja mase i energije za svaku fazu posebno. U nastavku slijedi raspisivanje jednadžbi i postavljanje početnih uvjeta za njihovo rješavanje.

### 2.1 Jednadžba očuvanja mase kondenzata

Polazna jednadžba očuvanja mase glasi:

$$\frac{dM_k}{dt} = \frac{dM_{kon}}{dt} - \dot{m}_i \quad (1)$$

$M_k$  – ukupna masa kapljevine

$M_{kon}$  – kondenzirana masa

$\dot{m}_i$  – izlazna protočna masa kondenzata

Može se zapisati da je

$$\frac{dM_k}{dt} = A(z_k) \cdot \rho_k \cdot L \quad (2)$$

$A(z_k)$  – promjenjiva poprečna površina kondenzata

$\rho_k$  – gustoća izlaznog kondenzata

$z_k$  – visina kondenzata

Pri čemu je:

$$\frac{dM_{kon}}{dt} = \frac{k_{c,p} \cdot A_{c,izr}(z_k) \cdot (T_p - T_{w,sr})}{r} + \frac{\alpha_{gk} \cdot A_{gk}(z_k) \cdot (T_p - T_k)}{r} \quad (3)$$

$\frac{k_{c,p} \cdot A_{c,izr}(z_k) \cdot (T_p - T_{c,sr})}{r}$  – maseni protok kondenzacije uslijed izmjene topline između pare i stjenki cijevi

$\frac{\alpha_{gk} \cdot A_{gk}(z_k) \cdot (T_p - T_k)}{r}$  – maseni protok kondenzacije uslijed izmjene topline između pare i kondenzata preko slobodne površine, koji nemaju istu temperaturu

$k_{c,p}$  – koeficijent prolaza topline između pare i kapljevine u cijevi na slobodnoj površini

$A_{c,izr}(z_k)$  – ukupna površina izronjenih cijevi koja ovisi o visini kondenzata

$T_p$  – temperatura pare

$T_{w,sr}$  – srednja temperatura vode koja se zagrijava u kondenzatoru

$\alpha_{gk}$  – koeficijent prijenosa topline između pare i kondenzata

$T_k$  – temperatura kondenzata

$r$  – specifična toplina isparavanja/kondenzacije

Pri čemu se koeficijent izmjene topline na slobodnoj površini računa iz izraza:

$$\alpha_k = \frac{\dot{m}_{ul}}{A_{gk}} \cdot \frac{\dot{H}_k - \dot{H}_p}{\left(1 + \frac{\dot{H}_k - \dot{H}_{izl}}{r}\right)} \cdot \frac{1}{T_p - T_k} \quad (4)$$

$$\alpha_{gk} = \alpha_k \cdot \left(1 + \frac{\dot{H}_k - \dot{H}_{izl}}{r}\right) \quad (5)$$

Gdje je:

$\alpha_k$  – koeficijent prijelaza topline na strani kondenzata

$\dot{m}_{ul}$  – ulazni maseni protok

$A_{gk}(z_k)$  – površina granice kondenzata

$\dot{H}_k$  – entalpija kondenzata

$\dot{H}_p$  – entalpija pare

$\dot{H}_{izl}$  – izlazna entalpija

$r$  – specifična toplina kondenzacije

$T_p$  – temperatura pare

$T_k$  – temperatura kondenzata

$\alpha_{gk}$  – koeficijent prijelaza topline na granici kondenzata

Izlazni maseni protok može se zapisati kao

$$m_i = A_{sp} \cdot \rho_k \cdot y_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_k}} \quad (6)$$

$A_{sp}$  – svijetli presjek ventila

$y_v$  – konstanta otvorenosti ventila

$\rho_k$  – gustoća izlaznog kondenzata

$\Delta p$  – razlika tlakova u kondenzatoru i izlaznom vodu

Uvrštavanjem (3) i (6) u (1) i izražavanjem  $\frac{dM_k}{dt}$  dobije se izraz za promjenu visine kondenzata.

$$\frac{dM_k}{dt} = \left[ \frac{k_{c,p} \cdot A_{c,izr}(z_k) \cdot (T_p - T_{c,sr})}{r} + \frac{\alpha_{gk} \cdot A_{gk}(z_k) \cdot (T_p - T_k)}{r} \right] \cdot A_{sp} \cdot \rho_k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_k}} \quad (7)$$

Sa poznatom masom kondenzata može se izračunati trenutna poprečna površina kondenzata iz izraza:

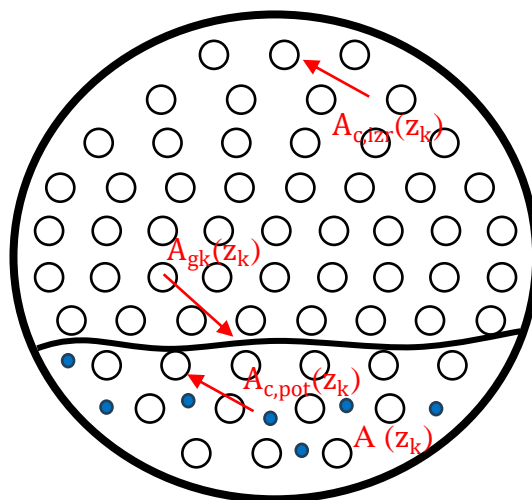
$$M_{kond} = \rho_k \cdot A(z_k) \cdot L \quad (8)$$

Gdje je:

$M_{kond}$  – masa kondenzata

$L$  – duljina kondenzatora

$\rho_k$  – gustoća kondenzata



Slika 2.1 Prikaz bitnih površina na skici presjeka kondenzatora

### 2.1.1 Promjena površine presjeka kondenzata

Da bi se izračunao volumen kondenzata u kondenzatoru, napisan je kod koji izračunava površinu presjeka kondenzata  $A_z$ . Kada se ta površina presjeka kondenzata pomnoži sa duljinom kondenzatora  $L$  dobije se trenutni volumen kondenzata u kondenzatoru. Pri računanju te površine uzeti su u obzir poprečni presjeci cijevi unutar kondenzatora kroz koje struji voda koja se zagrijava kondenzacijom radne tvari.

Poprečna površina kondenzata se računa iz izraza:

$$A(z_k) = A_0 - A_{p,c,pot}(z_k) \quad (9)$$

Gdje je:

$A(z_k)$  – površina presjeka kondenzata

$A_0$  – površina presjeka kondenzatora

$A_{p,c,pot}(z_k)$  – površina presjeka potopljenih cijevi

Površina presjeka kondenzatora računa se iz izraza:

$$A_0 = \frac{\varphi_k}{360} \cdot \pi \cdot R_k^2 + R_k^2 \cdot \cos(\alpha_k) \cdot \sin(\alpha_k) \quad (10)$$

Gdje je:

$\varphi_k$  – središnji kut kondenzatora, ovisan o visini kondenzata

$R_k$  – polumjer kondenzatora

$\alpha_k$  – pomoćni kut za izračun

Središnji kut kondenzatora računa se iz izraza:

$$\varphi_k = 180 + 2 \cdot \alpha_k \quad (11)$$

Pomoćni kut za izračun računa se iz izraza:

$$\alpha_k = \arcsin\left(\frac{z_k - R_k}{R_k}\right) \quad (12)$$

Gdje je:

$z_k$  – visina kondenzata

$R_k$  – polumjer kondenzator

Površina presjeka potopljenih cijevi računa se iz izraza:

$$A_{p,c,pot}(z_k) = n_{cp}(z_k) \cdot r_c^2 \cdot \pi + A_{p,gr}(z_k) \cdot n_{cr}(z_k) \quad (13)$$

Gdje je:

$A_{p,c,pot}(z_k)$  - Površina presjeka potopljenih cijevi

$n_{cp}(z_k)$  – broj potopljenih cijevi

$r_c$  – polumjer cijevi kondenzatora

$A_{p,gr}(z_k)$  – površina graničnih cijevi, koje nisu cijele potopljene

$n_{cr}(z_k)$  – broj cijevi u redu

Površina graničnih cijevi, računa se iz izraza:

$$A_{p,gr}(z_k) = \frac{\varphi}{360} \cdot \pi \cdot r_c^2 + r_c^2 \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \quad (14)$$

Gdje je:

$\varphi$  – središnji kut cijevi

$r_c$  - polumjer cijevi

$\alpha$  – pomoćni kut za izračun kod cijevi

Pomoćni kut za izračun kod cijevi računa se iz izraza:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{z_c(z_k) - r_c}{r_c}\right) \quad (15)$$

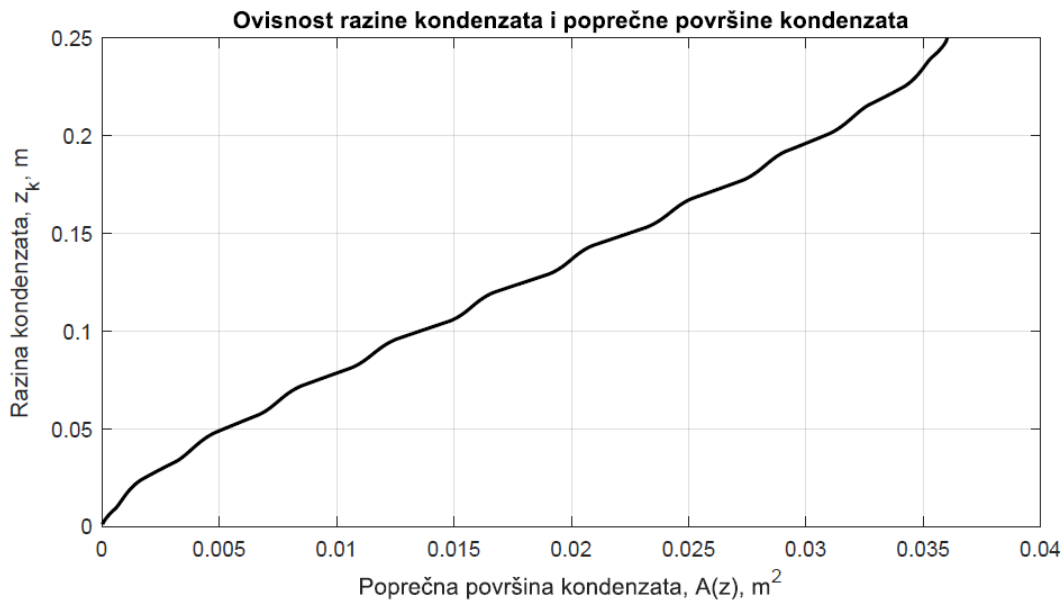
Gdje je:

$z_c(z_k)$  – visina kondenzata na cijevi

$r_c$  – polumjer cijevi

Na slijedećem dijagramu prikazana je promjena površine presjeka kondenzata po cijeloj visini kondenzatora.





**Slika 2.2 Ovisnost poprečne površine kondenzata o razini kondenzata**

### 2.1.2 Promjena ukupne površine izronjenih cijevi

Za izračunavanje toplinskog toka koji se izmjenjuje između pare i vode u cijevima, potrebna je vrijednost ukupne površine izronjenih cijevi, koja se mijenja u ovisnosti o razini kondenzata u kondenzatoru. Za izračunavanje te površine napisan je kod koji prema vrijednosti razine kondenzata i geometrijskim karakteristikama kondenzatora izračunava ukupnu površinu izronjenih cijevi.

Ukupna površina izronjenih cijevi računa se iz izraza:

$$A_{c,izr}(z_k) = A_{c,uk} - A_{c,pot}(z_k) \quad (16)$$

Gdje je:

$A_{c,izr}(z_k)$  – ukupna površina izronjenih cijevi

$A_{c,uk}$  – površina svih cijevi

$A_{c,pot}(z_k)$  – ukupna površina potopljenih cijevi

Ukupna površina cijevi računa se iz izraza:

$$A_{c,uk} = n_c \cdot r_c^2 \cdot \pi \cdot L \quad (17)$$

Gdje je:

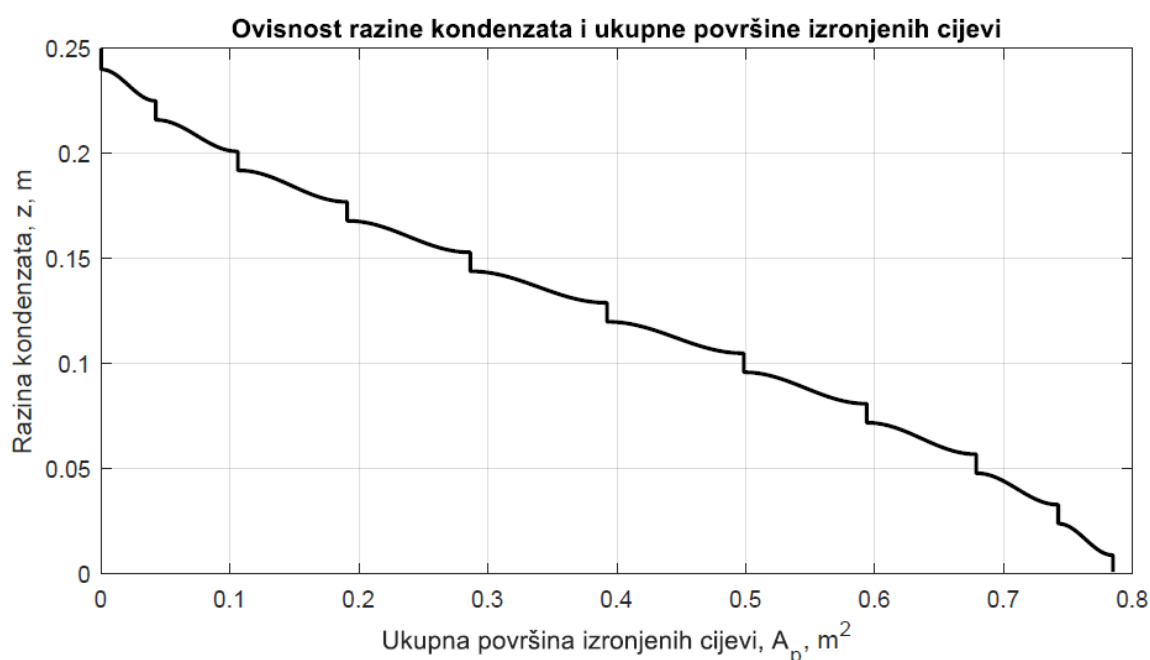
$n_c$  – broj cijevi

$r_c$  – polumjer cijevi

$L$  – duljina kondenzatora

Izračun ukupne površine potopljenih cijevi bit će pojašnjen u nastavku.

Na slijedećem dijagramu prikazana je promjena ukupne površine izronjenih cijevi u ovisnosti o razini kondenzata.



**Slika 2.3** Promjena ukupne površine izronjenih cijevi u ovisnosti o razini kondenzata.

### 2.1.3 Promjena površine između pare i kondenzata

Promjenom visine kondenzata, mijenja se i površina na granici pare i kondenzata, koja je potrebna za izračunavanje toplinskog toka koji se izmjenjuje između pare i pothlađenog kondenzata, koji nisu u toplinskoj ravnoteži. Ta površina je između redova cijevi veća, nego kada je granica kondenzata ravnini s redom cijevima. Ona se izračunava kao površina kvadra, od koje su oduzeti dijelovi manjih kvadara, ovisno u kojem dijelu je granica kondenzata. Za izračunavanje ove površine također je napisan kod koji ju računa prema visini kondenzata i geometrijskim karakteristikama kondenzatora.

Izraz za promjenu površine između pare i kondenzata napisan je u dva oblika, ovisno o tome jeli granica kondenzata između redova cijevi ili u redu cijevi.

Ako je granica kondenzata između redova cijevi, izraz za površinu glasi:

$$A_{gk}(z_k) = 2 \cdot R_k \cdot \sin \left[ \arccos \left( \frac{R_k - z_k}{R_k} \right) \right] \cdot L \quad (18)$$

Gdje je:

$A_{gk}(z_k)$  – površina granice između pare i kondenzata

$R_k$  – polumjer kondenzatora

$z_k$  – visina kondenzata

$L$  – duljina kondenzatora

Ako je granica kondenzata u redu cijevi, izraz za površinu glasi:

$$A_{gk}(z_k) = 2 \cdot R_k \cdot \sin \left[ \arccos \left( \frac{R_k - z_k}{R_k} \right) \right] \cdot L - 2 \cdot n_{cr}(z_k) \cdot r_c \cdot \sin \left[ \arccos \left( \frac{r_c - z_c}{r_c} \right) \right] \cdot L \quad (19)$$

Gdje je:

$R_k$  – polumjer kondenzatora

$z_k$  – visina kondenzata

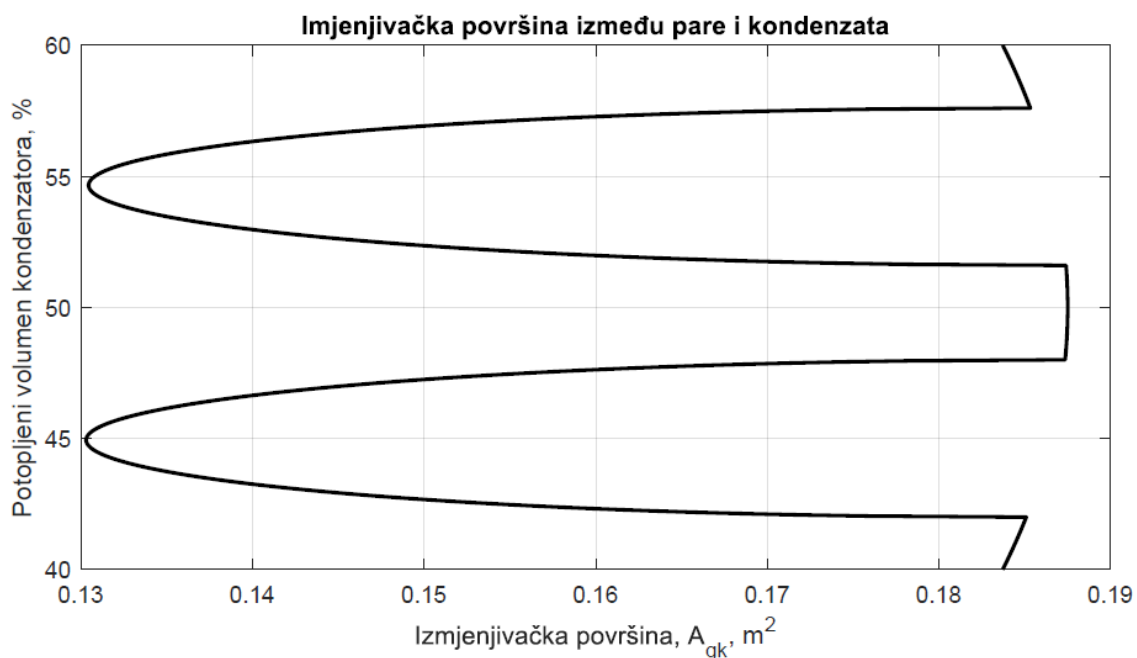
$L$  – duljina kondenzatora

$n_{cr}(z_k)$  – broj cijevi u redu

$r_c$  – polumjer cijevi

$z_c(z_k)$  – visina kondenzata na graničnoj cijevi

Na dijagramu u nastavku prikazana je promjena površine granice kondenzata u rasponu od 40% do 60% potopljenosti kondenzatora.



**Slika 2.4** Ovisnost površine na granici kondenzata o postotku potopljenog volumena.

### 2.1.4 Početni uvjeti

Za rješavanje integrala pod (7), potrebno je postaviti početne uvijete. Početni uvjeti se dobivaju iz uvjeta napunjenosti kondenzatora. Prvi uvjet je za normalan rad kondenzatora, gdje je visina kondenzata  $z_k=0.057$  m, a drugi uvjet je kada je sustav prepun, pri visini kondenzatora  $z_k = 0.184$  m

$$M_{01}=V_{k01} \cdot \rho_k \quad (20)$$

$$M_{02}=V_{k02} \cdot \rho_k \quad (21)$$

Gdje su:

$M_{01}$  – početna masa kondenzata za prvi uvjet

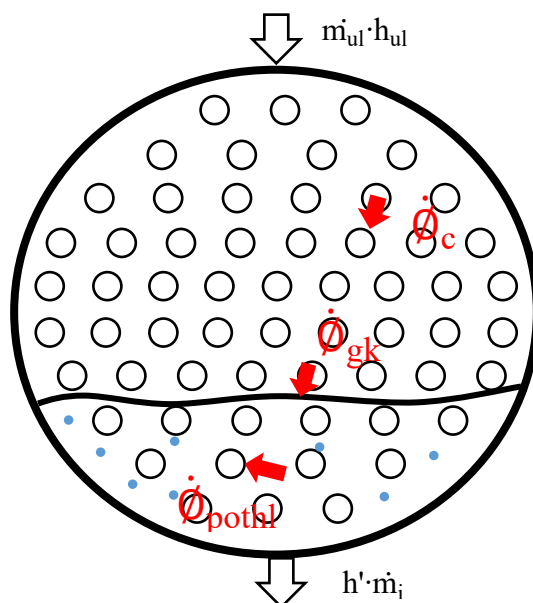
$M_{02}$  – početna masa kondenzata za drugi uvjet

$V_{k01}$  – volumen kondenzata za prvi slučaj

$V_{k02}$  – volumen kondenzata za drugi slučaj

$\rho_k$  – početna gustoća kondenzata

## 2.2 jednadžba očuvanja energije kondenzata



Slika 2.5 Prikaz toplinskih tokova na skici presjeka kondenzatora

Kako je vidljivo na *Slika 2.5*, kondenzatu se toplinski tok dovodi kondenzacijom od pare i izmjenom topline na granici kondenzata između pare i kondenzata, a odvodi se pothlađivanjem od rashladnog medija, preko potopljenih cijevi i sa masom koja napušta sustav. Stoga se jednadžba očuvanja energije može napisati u obliku:

$$\frac{dH_k}{dt} = \dot{\varnothing}_{\text{kond}} - \dot{\varnothing}_{\text{pothl}} - \dot{\varnothing}_i \quad (22)$$

(9)

Gdje je:

$\frac{dH_k}{dt}$  – vremenska promjena ukupne entalpije kondenzata

$\dot{\varnothing}_{\text{kond}}$  – toplinski tok kondenzacije

$\dot{\varnothing}_{\text{pothl}}$  – toplinski tok pothlađenja kondenzata

$\dot{\varnothing}_i$  – toplinski tok koji izlazi sa izlaznom masom

Vremenska promjena entalpije kondenzata može se zapisati u obliku:

$$\frac{dH_k}{dt} = \frac{d(M_k \cdot h')}{dt} \quad (23)$$

Gdje je  $\frac{d(M_k \cdot h_k)}{dt}$  složena derivacija mase i entalpije

Toplinski tok kondenzacije može se zapisati kao:

$$\dot{\Phi}_{\text{kond}} = \dot{M}_{\text{kond}} \cdot h' \quad (24)$$

Gdje je:

$\dot{M}_{\text{kond}}$  – masa pare koja kondenzira iz ()

$h'$  – specifična entalpija kondenzata

Toplinski tok pothlađenja kondenzata može se zapisati kao:

$$\dot{\Phi}_{\text{pothl}} = k_{\text{cpot}} \cdot A_{\text{cp}}(z_k) \cdot (T_k - T_{w,\text{sr}}) \quad (25)$$

Gdje je:

$k_{\text{cpot}}$  – koeficijent prolaza topline između kapljevine i rashladne vode

$A_{\text{cp}}(z_k)$  – površina potopljenih cijevi

$T_k$  – temperatura kondenzata

$T_{w,\text{sr}}$  – srednja temperatura rashladne vode

Izlazni toplinski tok može se zapisati kao:

$$\dot{\Phi}_i = h' \cdot \dot{m}_i \quad (26)$$

Gdje je:

$h'$  – specifična entalpija izlaznog kondenzata

$\dot{m}_i$  – izlazni maseni protok

Uvrštavanjem (23), (24), (25), (26) u (22) i sređivanjem jednadžbe dobije se izraz za promjenu specifične entalpije kondenzata

$$\frac{dh_k}{dt} = \frac{1}{M_k} \cdot [\dot{m}_{\text{kond}} \cdot h' - k_{\text{cpot}} \cdot A_{\text{cp}}(z_k) \cdot (T_k - T_{w,\text{sr}}) - h' \cdot \dot{m}_i - \frac{dM_k}{dt} \cdot h'] \quad (27)$$

### 2.2.1 Promjena ukupne površine potopljenih cijevi

Promjenom visine kondenzata, mijenja se površina uronjenih cijevi, zbog čije promjene se mijenja i toplinski tok pothlađenja kondenzata. Napisan je kod koji izračunava ukupnu površinu uronjenih cijevi u ovisnosti o visini kondenzata. Ukupna površina uronjenih cijevi računa se iz izraza:

$$A_{\text{c,pot}}(z_k) = n_{\text{c,pot}}(z_k) \cdot A_{\text{c}} + n_{\text{c,r}} \cdot \frac{r_{\text{c}} \cdot \pi \cdot \varphi}{180} \cdot L \quad (28)$$

Gdje je:

$A_{\text{c,pot}}$  – površina potopljenih cijevi

$n_{\text{c,pot}}$  broj potpuno potopljenih cijevi

$A_{\text{c}}$  – površina plašta cijevi

$n_{\text{c,r}}$  – broj cijevi u redu koji nije potpuno potopljen

$r_{\text{c}}$  – polumjer cijevi

$\varphi$  – središnji kut cijevi, ovisan o visini kondenzata na cijevi

$L$  – duljina kondenzatora

Površina cijevi računa se iz izraza:

$$A_{\text{c}} = r_{\text{c}}^2 \cdot \pi \cdot L \quad (29)$$

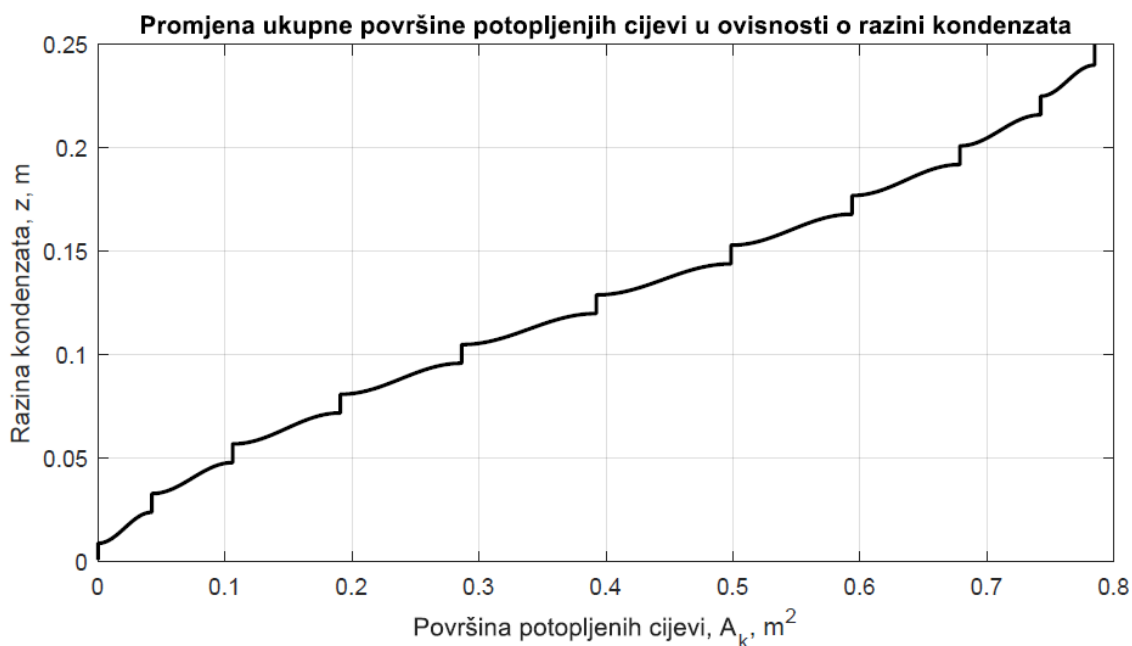
Središnji kut cijevi računa se iz izraza:

$$\varphi = 180^\circ + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{z_{\text{c}}(z_k) - r_{\text{c}}}{r_{\text{c}}}\right) \quad (30)$$

Gdje je:

$z_{\text{c}}(z_k)$  – visina kondenzata na djelomično potopljenoj cijevi

Na dijagramu u nastavku prikazana je promjena površine potopljenih cijevi u ovisnosti o visini kondenzata.



**Slika 2.6** Dijagram ovisnosti Ukupne površine uronjenih cijevi o visini kondenzata

### 2.2.2 Početni uvjet

Za rješavanje jednadžbe (27), potrebno je postaviti početne uvijete, koji će dati informaciju o stanju sustava na početku simulacije. Početni uvijeti se dobivaju iz uvijeta napunjenosti sustava, tako da se početne mase kondenzata pomnože sa početnom entalpijom kondenzata.

Početni uvjeti glase:

$$H_{k01} = M_{k01} \cdot h_{k0} \quad (31)$$

$$H_{k02} = M_{k02} \cdot h_{k0} \quad (32)$$

Gdje je:

$H_{k01}$  – početna entalpija za prvi slučaj

$H_{k02}$  – početna entalpija za drugi slučaj

$M_{k01}$  -početni uvjet mase za prvi slučaj

$M_{k02}$  - početni uvjet mase za drugi slučaj

$h_{k0}$  – početna specifična entalpija

### 2.3 Jednadžba očuvanja energije pare

Jednadžba očuvanja energije može se zapisati u obliku:



$$\frac{d\dot{H}_p}{dt} = \dot{m}_{ul} \cdot h_{ul} - \dot{\Phi}_c - \dot{\Phi}_{gk} - \dot{\Phi}_{kond} \quad (33)$$

Gdje je:

$\frac{d\dot{H}_p}{dt}$  – promjena entalpije pare

$\dot{m}_{ul}$  – ulazni maseni tok

$h_{ul}$  – ulazna specifična entalpija, suhozasićene pare koja se očitava iz coolprop baze

$\dot{\Phi}_{kond}$  – toplinski tok kondenzacije

$\dot{\Phi}_c$  – toplinski tok koji zagrijava vodu u cijevima

$\dot{\Phi}_{gk}$  – toplinski tok koji se izmjenjuje na granici pare i kondenzata

Toplinski tok koji zagrijava vodu u cijevima glasi:

$$\dot{\Phi}_c = k_{c,p} \cdot A_{c,izr}(z_k) \cdot (T_p - T_{w,sr}) \quad (34)$$

Gdje je:

$k_{c,p}$  – koeficijent prolaza topline cijevi između pare i vode

$A_{c,izr}(z_k)$  – ukupna površina izronjenih cijevi

$T_p$  – temperatura pare radne tvari

$T_{w,sr}$  – srednja temperatura rashladne vode

Toplinski tok koji se izmjenjuje na granici pare i kondenzata glasi:

$$\dot{\Phi}_{gk} = \alpha_{gk} \cdot A_{gk}(z_k) \cdot (T_p - T_k) \quad (35)$$

Gdje je:

$\alpha_{gk}$  – koeficijent izmjene topline na granici pare i kondenzata

$A_{gk}(z_k)$  – Površina granice pare i kondenzata

$T_p$  – temperatura pare radne tvari

$T_k$  – temperatura kondenzata radne tvari

Toplinski tok kondenzacije može se zapisati kao:

$$\dot{\Phi}_{\text{kond}} = \dot{m}_{\text{kond}} \cdot h' \quad (36)$$

gdje je:

$\dot{m}_{\text{kond}}$  – maseni tok kondenzacije

$h'$  – entalpija kondenzata na granici zasićenja

izraz za maseni tok kondenzacije glasi

$$\dot{m}_{\text{kond}} = \frac{k_{c,p} \cdot A_{c,izr}(z_k) \cdot (T_p - T_{c,sr})}{r} + \frac{\alpha_{gk} \cdot A_{gk}(z_k) \cdot (T_p - T_k)}{r} \quad (37)$$

Uvrštavanjem (19) i (3) u (18), dobije se sređen izraz jednadžbe očuvanja energije.

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{H}_p}{dt} = & \dot{m}_{ul} \cdot h_{ul} - [ k_{c,p} \cdot A_{c,izr}(z_k) \cdot (T_p - T_{c,sr}) + \alpha_{gk} \cdot A_{gk}(z_k) \cdot (T_p - T_k) ] \\ & - \left[ \frac{k_{c,p} \cdot A_{c,izr}(z_k) \cdot (T_p - T_{c,sr})}{r} + \frac{\alpha_{gk} \cdot A_{gk}(z_k) \cdot (T_p - T_k)}{r} \right] \cdot h' \end{aligned} \quad (38)$$

### 2.3.1 Početni uvjet

Početni uvjeti dobivaju se iz definicijskog izraza za entalpiju.

$$H = M \cdot h \quad (39)$$

gdje je:

$H$  – ukupna entalpija

$M$  – masa

$h$  – specifična entalpija

Početni uvjeti dobivaju se iz uvjeta napunjenosti kondenzatora. Za prvi uvjet napunjenosti, uvjet je  $H_{01}$ , a za drugi uvjet napunjenosti, početni uvjet je  $H_{02}$ .

$$H_{p01} = M_{p01} \cdot h_{ul} \quad (40)$$

$$H_{p02} = M_{p02} \cdot h_{ul} \quad (41)$$

gdje je:

$M_{p01}$  – početna masa pare prvog slučaja

$h_{ul}$  – specifična entalpija ulazne pare

$M_{p02}$  – početna masa pare drugog slučaja

## 2.4 Jednadžba očuvanja mase pare

Jednadžba očuvanja mase može se zapisati u obliku

$$\frac{dM_p}{dt} = \dot{m}_{ul} - \dot{m}_{kond} \quad (42)$$

gdje je:

$\frac{dM_p}{dt}$  – vremenska promjena mase pare

$\dot{m}_{ul}$  – ulazni maseni tok pare

$\dot{m}_{kond}$  – maseni tok kondenzacije

### 2.4.1 Početni uvjeti

Za rješavanje jednadžbe (42), potrebno je postaviti početne uvjete, koji se dobivaju iz uvjeta napunjenosti kondenzatora.

Iz prvog uvjeta napunjenosti kondenzatora, dobiva se početni uvjet količine pare  $M_{p01}$ .

Iz drugog uvjeta napunjenosti kondenzatora, dobiva se početni uvjet količine pare  $M_{p02}$ .

Početni uvjeti se izračunavaju preko jednadžbi:

$$V_{p01} = V_{kond} - V_{k01} \quad (43)$$

$$M_{p01} = V_{p01} \cdot \rho_{ul} \quad (44)$$

$$V_{p02} = V_{kond} - V_{k02} \quad (45)$$

$$M_{p02} = V_{p02} \cdot \rho_{ul} \quad (46)$$

gdje je:

$V_{p01}$  – volumen pare prvog slučaja

$V_{kond}$  – volumen kondenzatora

$V_{k01}$  – volumen kondenzata prvog slučaja

$M_{p01}$  – početna masa pare prvog slučaja

$\rho_{ul}$  – ulazna gustoća

$V_{p02}$  – početni volumen pare drugog slučaja

$V_{k02}$  – početni volumen kondenzata drugog slučaja

$M_{p02}$  – početna masa pare drugog slučaja

## 2.5 Pretpostavke

Kako bi se gore navedene jednadžbe mogle primijeniti za modeliranje simulacije u "Simulinku", bilo je potrebno uvesti neka ograničenja odnosno pretpostavke. Niže su navedena usvojena ograničenja zajedno sa pripadajućim objašnjenjima.

### 2.5.1 Izotermni rubni uvjet

Radi pojednostavljenja modela, pretpostavljen je izotermni rubni uvjet na vanjskim stijenkama izmjenjivačkih cijevi  $T_{w,SR} = 32,5^{\circ}\text{C}$ . Ovaj uvjet nam govori da je temperatura na površini izmjenjivačkih cijevi tijekom cijelog procesa konstantna.

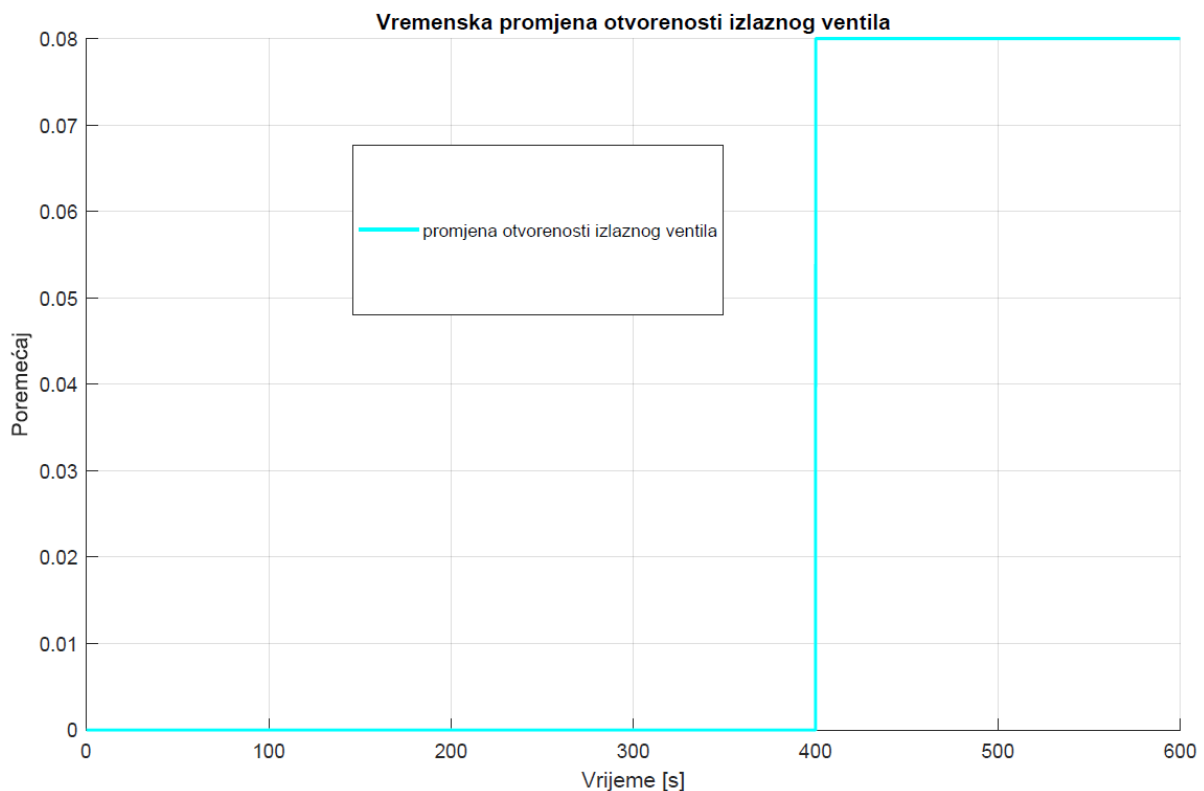
## 2.6 Gubici prema okolišu

Pretpostavljeno je da je kondenzator savršeno izoliran, zbog čega nema izmjene topline sa okolinom.

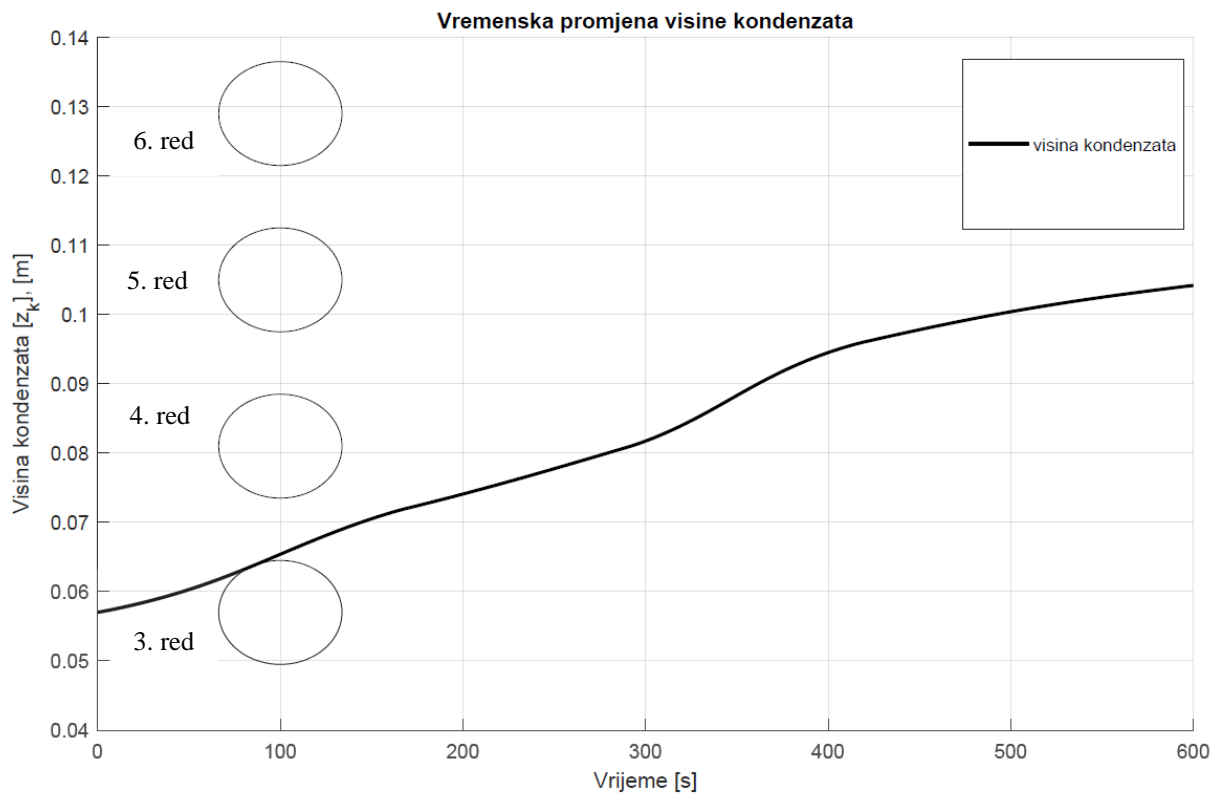
### 3 Analiza rezultata

Izvedene su simulacije za dvije točke rada kondenzatora. Prva točka je u normalnom stanju rada, kada je napunjenost kondenzatora oko 30% a druga u kada je sustav prepunjen te su potopljenje gotovo sve izmjenjivačke cijevi. Simulacije su rađene tako da se mijenjala konstanta otvorenosti izlaznog ventila pri konstantnom ulaznom masenom protoku pare,  $m_{ul}=9$  g/s. Na početku simulacije, ventil je potpuno zatvoren, da dođe do akumulacije mase i porasta visine kondenzata. Nakon 400 sekundi ventil se otvori, te se razina kondenzata počinje spuštati.

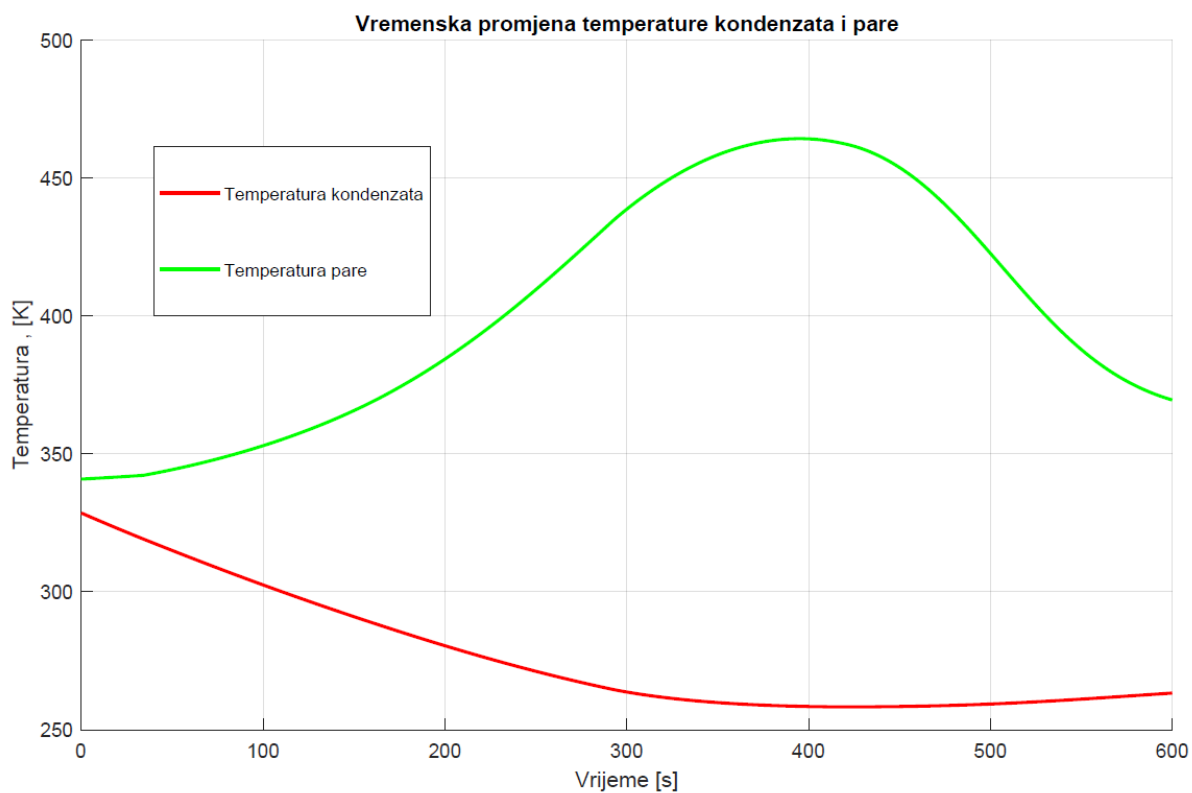
#### 3.1 1. Slučaj: Normalni uvjeti rada



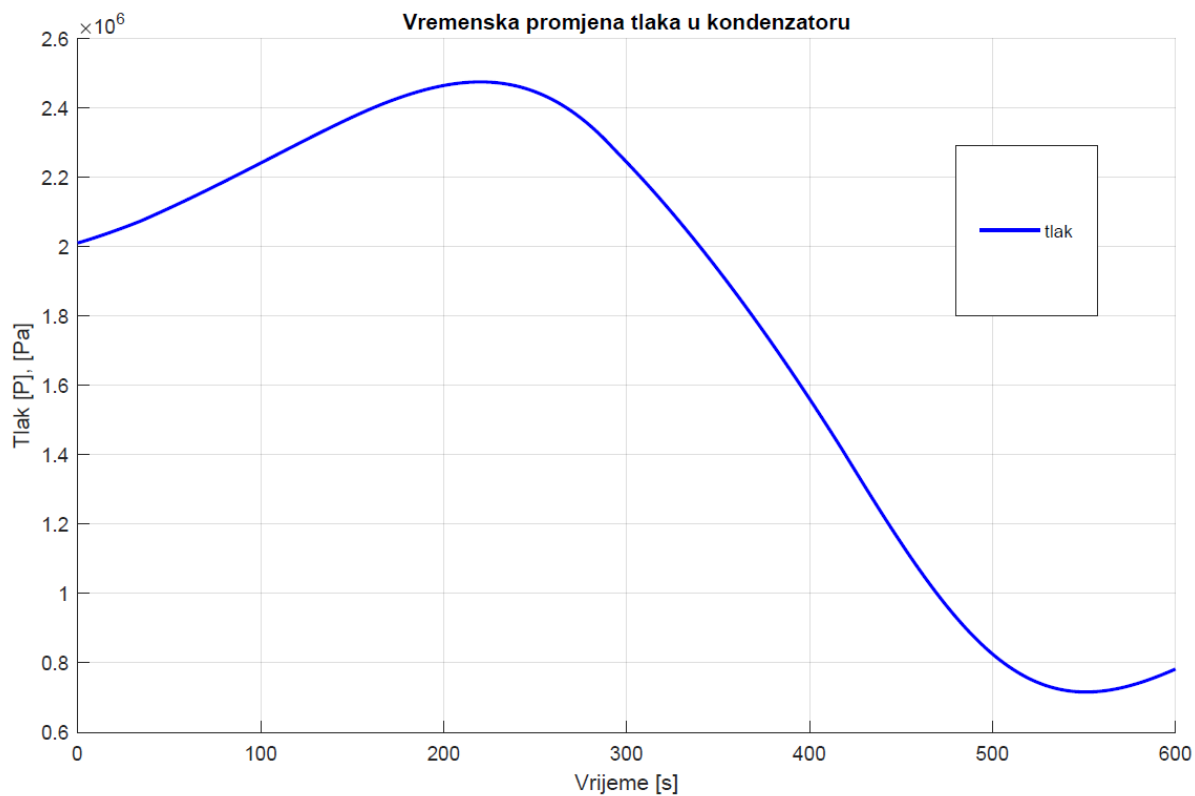
Slika 3.1 Vremenska promjena otvorenosti izlaznog ventila za 1. slučaj



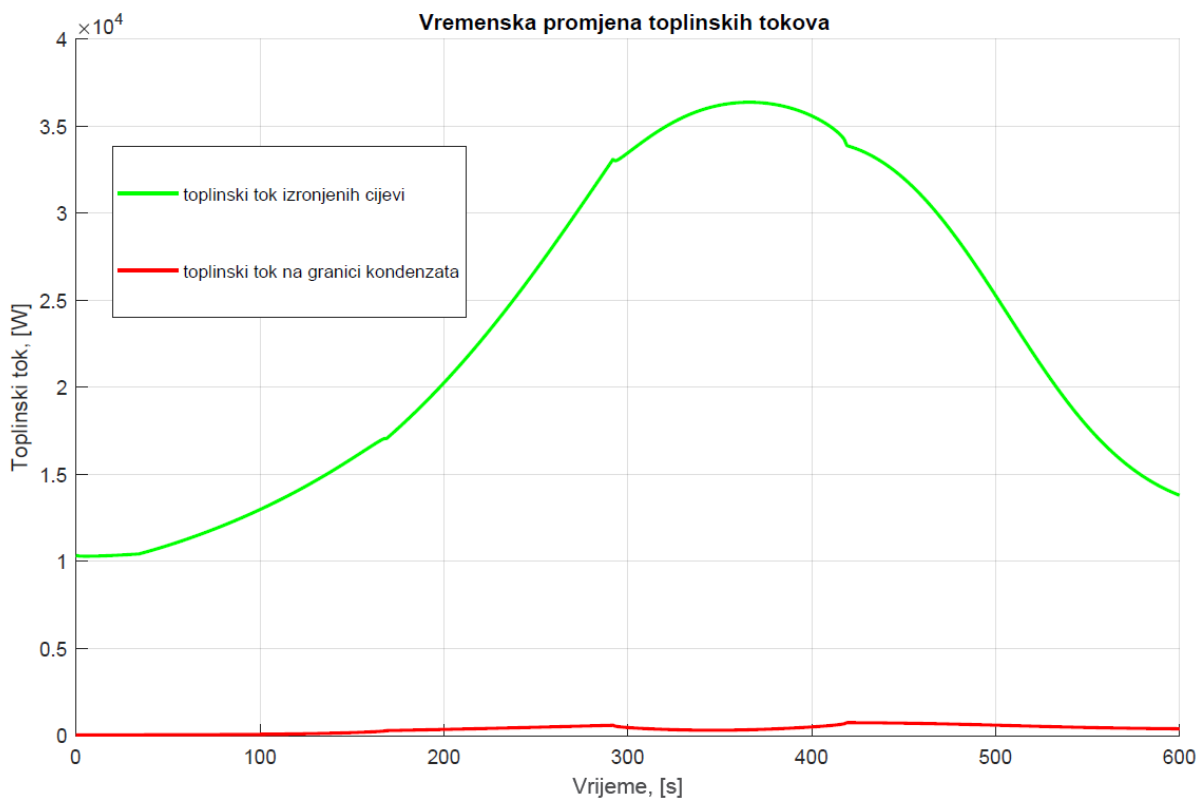
**Slika 3.2** Vremenska promjena visine kondenzata za 1. slučaj



**Slika 3.3** Vremenska promjena temperature kondenzata i pare za 1. slučaj



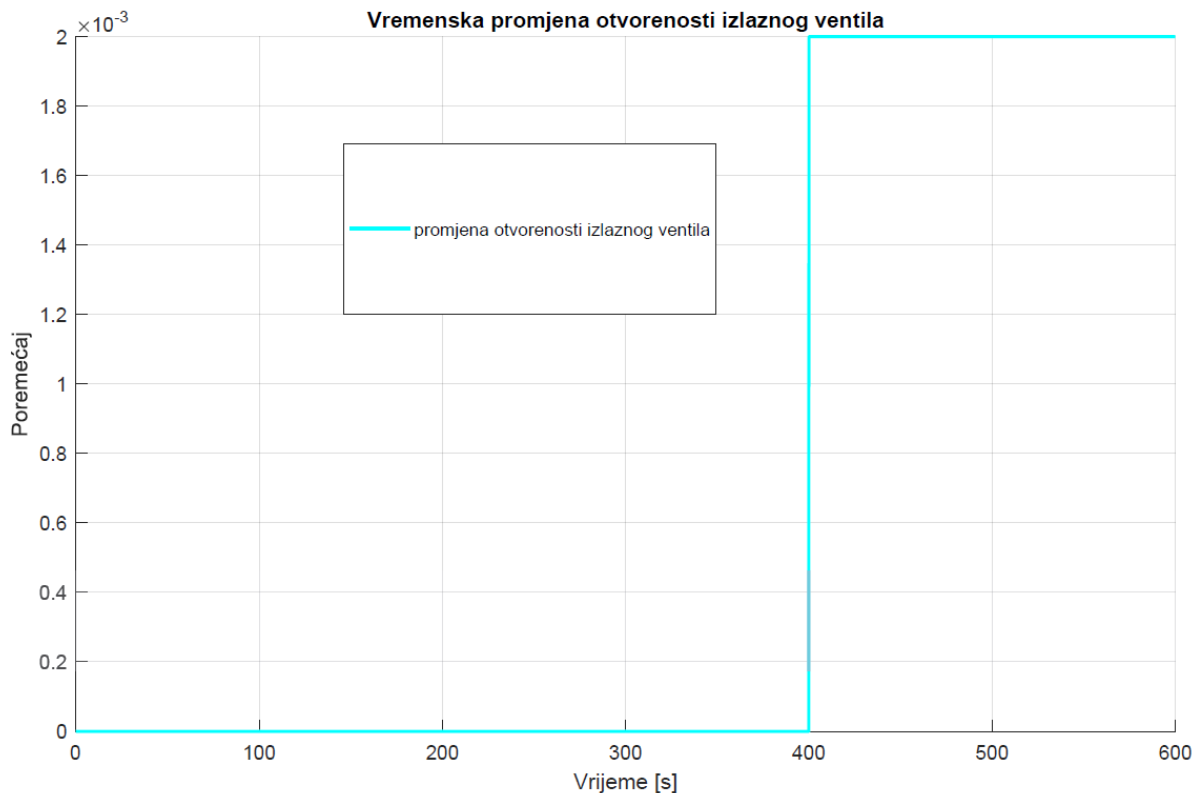
Slika 3.4 Vremenska promjena tlaka u kondenzatoru za 1. slučaj



Slika 3.5 Vremenska promjena toplinskih tokova za 1. slučaj

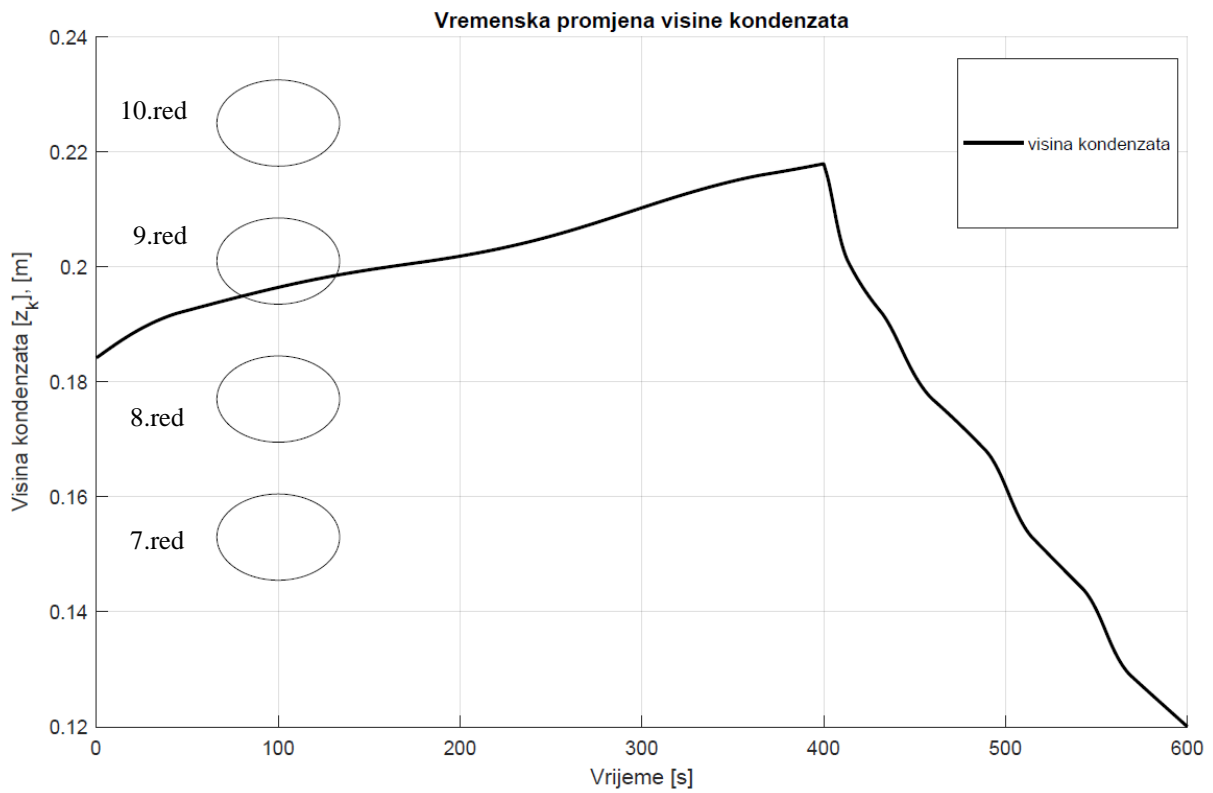
Iz rezultata simulacije prvog slučaja, vidljivo je da u prvom dijelu, kada je zatvoreni izlazni ventil, visina kondenzata naglo raste. Do te pojave dolazi zbog toga što je velika površina izmjenjivačkih cijevi iznad razine kondenzata, te je za zadani protok velik intenzitet kondenzacije. Temperatura pare se povećava, do trenutka prije otvaranja ventila kada počinje naglo padati. Temperatura kondenzata pada radi povećanja površine potopljenih cijevi. Nakon otvaranja izlaznog ventila, visina kondenzata nastavlja rasti sporijim intenzitetom, a temperatura pare pada, zbog čega pada i toplinski tok izronjenih cijevi.

### 3.2 2. Slučaj: Ekstremni uvjeti rada

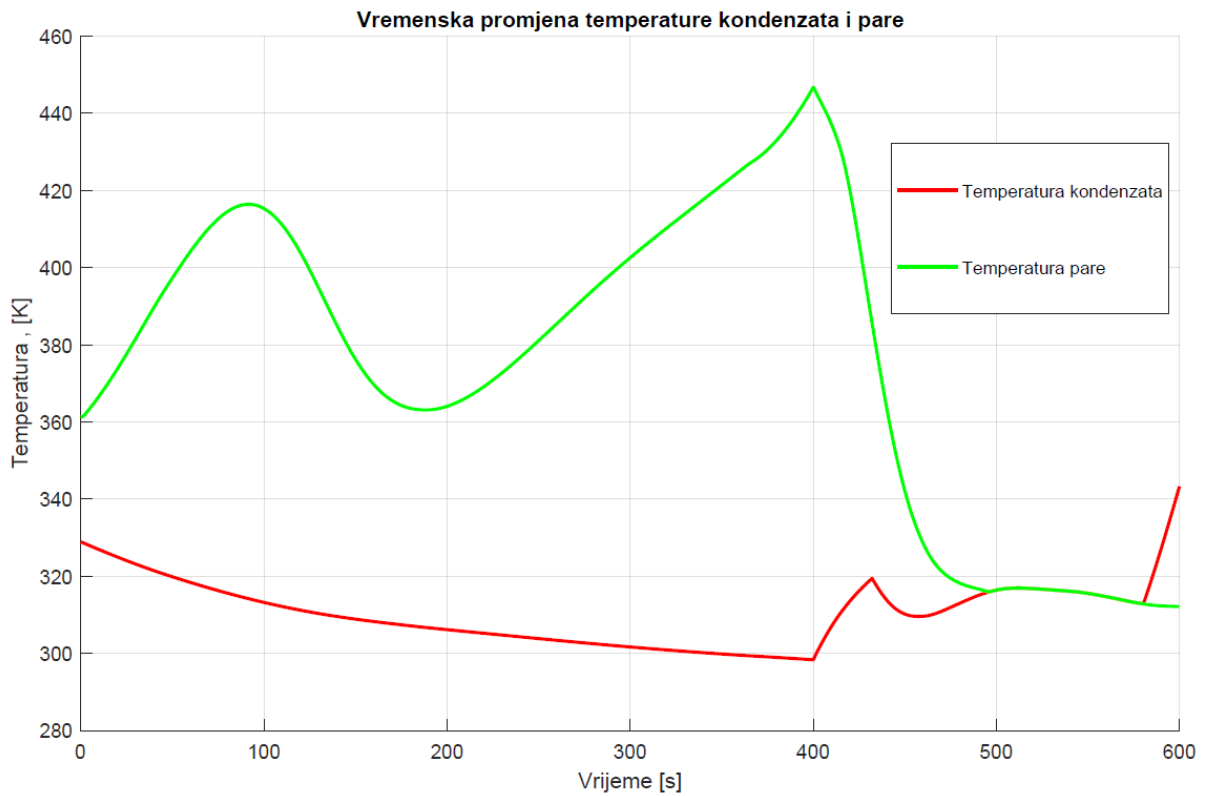


Slika 3.6 Vremenska promjena otvorenosti izlaznog ventila za 2. slučaj



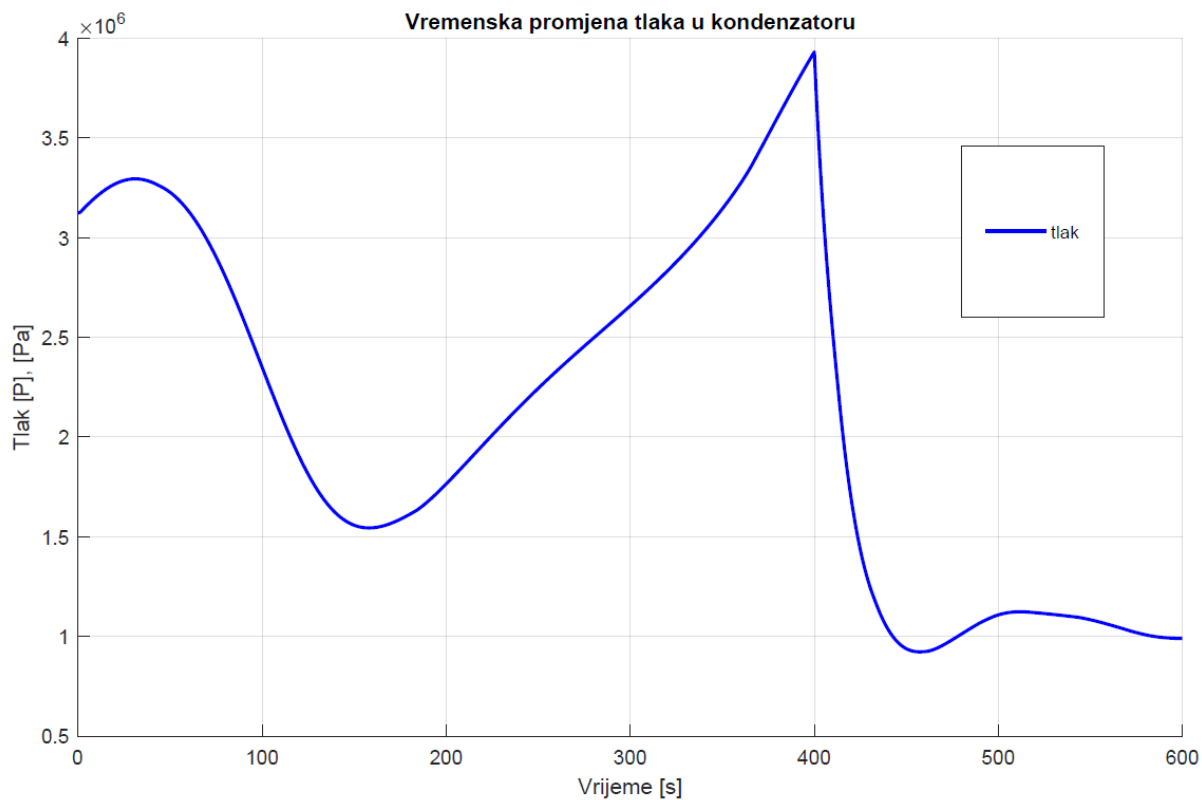


**Slika 3.7 Vremenska promjena visine kondenzata za 2. slučaj**

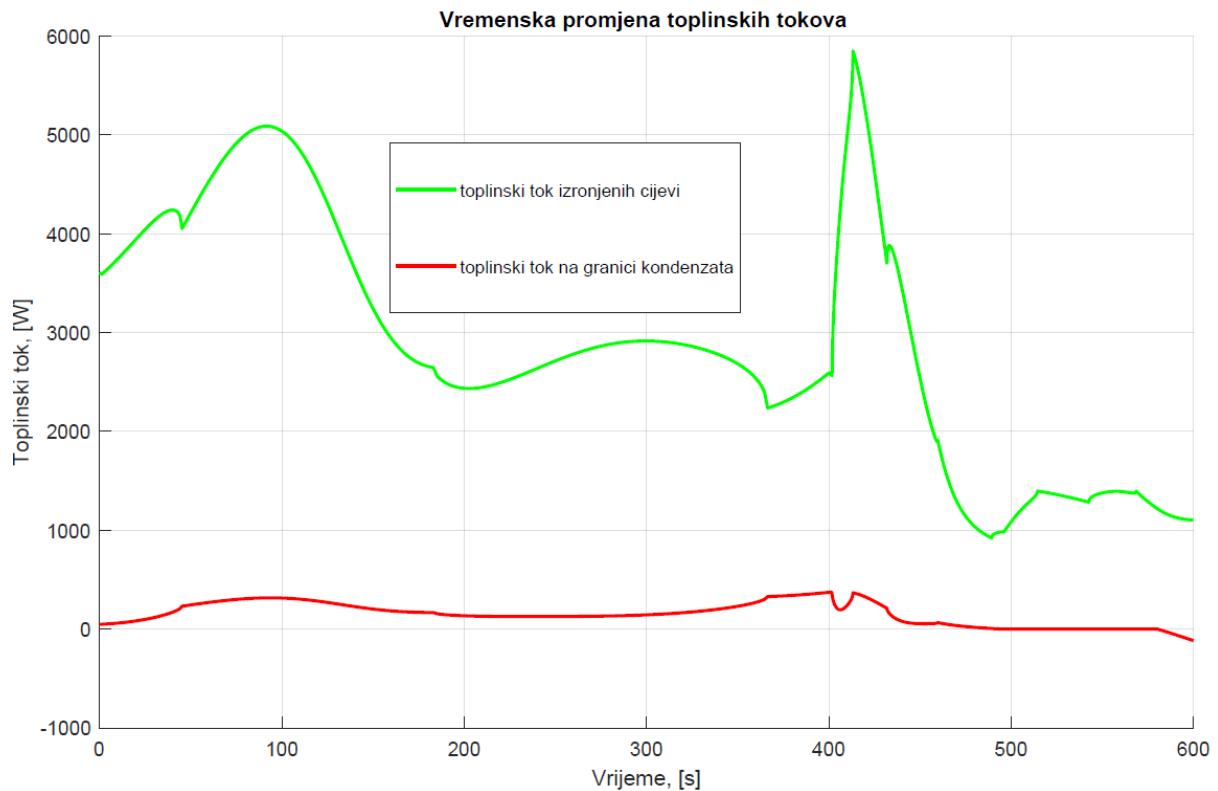


**Slika 3.8 Vremenska promjena temperature kondenzata i pare za 2. slučaj**

Na Slika 3.8 vidljivo je kako razlika temperature pare i kondenzata raste s porastom razine i (tlaka) u kondenzatoru. Navedeno je izravna posljedica smanjene površine kondenzacijskih cijevi u parom ispunjenom dijelu kondenzatora.



Slika 3.9 Vremenska promjena tlaka u kondenzatoru za 2. slučaj



**Slika 3.10 Vremenska promjena toplinskih tokova za 2. slučaj**

U ovom slučaju vidljivo je da na početku simulacije visina kondenzata raste, pri čemu tlak u kondenzatoru i toplinski tokovi neravnotežno mijenjaju vrijednosti. Razlog tome je konstantan maseni ulazni tok, koji želi ući u kondenzator, ali pošto je većina izmjenjivačkih cijevi potopljena ne može se prenijeti dosta toplinskog toka za kondenzaciju. S druge strane većina cijevi nalazi se u potopljenom dijelu kondenzatora i izravno utječu na značajno pothlađivanje kondenzatora. U trenutku otvorenja ventila, visina kondenzata naglo počinje padati, zajedno sa tlakom, a temperature pare i kapljevine postižu ravnotežno stanje. Mala promjena otvorenosti izlaznog ventila uzrokovala je veliku promjenu ostalih parametara sustava.

## 4 Zaključak

U ovome radu izveden je detaljan matematički model termo – hidrauličkih procesa izmjene mase i topline u kondenzatoru tipa cijev u plaštu, te su provedene simulacije rada u normalnim uvjetima i u uvjetima ekstremne napunjenosti kondenzatora. Pri izvedbi simulacije izrađen je geometrijski model kondenzatora i Matlab kod koji izračunava vrijednosti izmjenjivačkih površina u ovisnosti o visini kondenzata.

Zbog korištenih pretpostavaka modela i konstantnog ulaznog protoka mase, model ne opisuje stvarnu situaciju, što se vidi iz naglih padova tlaka. Iako model ne opisuje stvarni sustav, iz simulacija se može vidjeti utjecaj prevelike visine kondenzata. U prvom slučaju, nakon otvaranja izlaznog ventila, visina kondenzata nastavlja rasti, zbog toga što kondenzacija nije „zagušena“ te je tlak u kondenzatoru značajno manji, dok u drugom slučaju, dolazi do naglog pada visine kondenzata potaknutog prevelikom tlakom u kondenzatoru. Također u drugom slučaju je razlika temperatura pare i kondenzata puno veća zbog toga što je mnogo veća površina potopljenih cijevi, pa se kondenzat više ohladi nego u drugom slučaju.

**LITERATURA**

- [1] Soldo V.: Podloge za predavanja iz kolegija „Dizalice topline sa obnovljivim izvorima energije“, „Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2024.
- [2] D. Lončar i A. Marušić, „Interna literatura iz kolegija Dinamika procesa“, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [3] A. Galović, „Termodinamika II“, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [4] MathWorks, „<https://uk.mathworks.com>“