

# Izrada matematičkog modela rada rashladnika vode

---

**Karaga, Ante**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:406275>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-05**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ante Karaga**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Marino Grozdek, dipl. ing.

Student:

Ante Karaga

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Marinu Grozdeku na pristupačnosti i strpljenju, savjetima i pomoći pri izradi ovoga završnog rada.

Ante Karaga



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Karaga**

Mat. br.: **0035189813**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada matematičkog modela rada rashladnika vode**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of water chiller performance**

Opis zadatka:

Za energijski optimalno upravljanje sustavom tehničkog hlađenja s rashladnikom vode kao izvorom rashladnog učina potrebno je poznavanje funkcijske veze između korisnosti ljevokretnog procesa (koja prvenstveno ovisi o temperaturi kondenzacije i isparavanja) i pogonskih parametara rashladnika poput temperature povratnog voda hlađene vode, djelomičnog opterećenja rashladnika vode i temperature okolišnog zraka.

Cilj zadatka je analizirati parametre ljevokretnog rashladnog procesa te utvrditi funkcijsku ovisnost faktora hlađenja (COP) o slijedećim pogonskim parametrima:

- temperatura okolišnog zraka
- temperatura hlađene vode povratnog voda primarnog kruga hlađenja
- djelomično opterećenje rashladnika vode ( $Q/Q_{max}$ )

Analizu je potrebno provesti za rashladnik vode koji se koristi za hlađenje upravne zgrade Hrvatske Elektroprivrede. Za analizu je potrebno koristiti podatke proizvođača te podatke sa CNUS-a, prikupljene u ljeto 2015. godine.

Rad treba sadržavati:

- Opis tehničkih karakteristika rashladnika vode i načina regulacije
- Analizu prikupljenih podataka sa CNUS-a, a koji su bitni za analizu rada rashladnika vode
- Algoritam (npr. u programskom paketu MATLAB) za pronalazak funkcijske ovisnosti faktora hlađenja (COP) o relevantnim pogonskim parametrima
- Diskusiju o potencijalnim problemima pri pronalasku funkcijske ovisnosti, kao na primjer dostupnost pojedinih parametara

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Marino Grozdek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

|  |      |
|--|------|
| POPIS SLIKA .....                              | II   |
| POPIS TABLICA .....                            | III  |
| POPIS OZNAKA .....                             | IV   |
| SAŽETAK .....                                  | VII  |
| SUMMARY .....                                  | VIII |
| 1 RASHLADNI UREĐAJI.....                       | 1    |
| 1.1 Uvod .....                                 | 1    |
| 1.2 Način rada .....                           | 1    |
| 1.3 Iskoristivost sustava.....                 | 4    |
| 2 KOMPONENTE RASHLADNIH SUSTAVA.....           | 6    |
| 2.1 Izmjenjivači topline .....                 | 6    |
| 2.1.1 Zrakom hlađeni kondenzatori .....        | 7    |
| 2.1.2 Vodom hlađeni kondenzatori .....         | 7    |
| 2.1.3 Evaporativni kondenzatori.....           | 7    |
| 2.1.4 Kondenzatori sa rashladnim tornjem ..... | 8    |
| 2.2 Kompresor.....                             | 9    |
| 2.3 Radne tvari u tehnici hlađenja.....        | 13   |
| 3 REGULACIJA RASHLADNIH SUSTAVA .....          | 16   |
| 3.1 Regulatori razine .....                    | 16   |
| 3.2 Regulatori tlaka .....                     | 17   |
| 3.3 Regulator temperature pregrijanja.....     | 18   |
| 3.4 Regulacija kompresora .....                | 19   |
| 4 ANALIZA RASHLADNOG SUSTAVA.....              | 21   |
| 4.1 Općenito o analizi.....                    | 21   |
| 4.2 Program za analizu .....                   | 23   |
| 5 ZAKLJUČAK .....                              | 28   |

---

6 LITERATURA..... 29

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Rashladnik vode sa zračnim hlađenjem [5].....                  | 1  |
| Slika 2. Ljevokretni proces rashladnih uređaja .....                    | 2  |
| Slika 3. Rashladnik vode sa vodom hlađenim kondenzatorom [1] .....      | 4  |
| Slika 4. Zrakom hlađeni kondenzator [8] .....                           | 7  |
| Slika 5. Evaporativni kondenzator [2].....                              | 8  |
| Slika 6. Rashladni toranj [2] .....                                     | 9  |
| Slika 7. Utjecaj veličine štetnog prostora na usisani volumen [3] ..... | 11 |
| Slika 8. Kompresor hermetičke izvedbe [6].....                          | 13 |
| Slika 9. Zasićena područja nekih radnih tvari.....                      | 14 |
| Slika 10. Ventil s plovkom na visokotlačnoj strani [1] .....            | 16 |
| Slika 11. Ventil s plovkom na niskotlačnoj strani [1] .....             | 17 |
| Slika 12. Presostat visokog tlaka [1] .....                             | 18 |
| Slika 13. Termoekspanzijski ventil [7].....                             | 19 |
| Slika 14. Višecilindarski kompresor [3] .....                           | 20 |
| Slika 15. Stupnjevana regulacija dobave [3].....                        | 20 |
| Slika 16. Rezultat metode najmanjih kvadrata.....                       | 24 |
| Slika 17. Ovisnost COP-a o izlaznoj temperaturi vode isparivača.....    | 26 |
| Slika 18. Ovisnost COP-a pri djelomičnom opterećenju .....              | 27 |



## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Preporuka za odabir radnih tvari [1] .....                              | 14 |
| Tablica 2. Radne karakteristike rashladnika [10] .....                             | 23 |
| Tablica 3. Radne karakteristike rashladnika pri djelomičnom opterećenju [10] ..... | 27 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka      | Jedinica     | Opis   |
|-------------|--------------|--|
| $Q_{isp}$   | [ W ]        | Rashladno opterećenje isparivača                     |
| $Q_{kond}$  | [ W ]        | Rashladno opterećenje kondenzatora                   |
| $H_1$       | [ W ]        | Entalpija točke 1                                    |
| $H_2$       | [ W ]        | Entalpija točke 2                                    |
| $H_3$       | [ W ]        | Entalpija točke 3                                    |
| $H_4$       | [ W ]        | Entalpija točke 4                                    |
| $Q_{proj}$  | [ W ]        | Rashladno opterećenje isparivača za projektne uvjete |
| $P_{proj}$  | [ W ]        | Snaga na kompresoru za projektne uvjete              |
| $\Phi_0$    | [ W ]        | Rashladni učinak kompresora                          |
| $P_{tot}$   | [ W ]        | Snaga kompresora                                     |
| $w_t$       | [ J/kg ]     | Specifični rad izentropske kompresije                |
| $w_i$       | [ J/kg ]     | Specifični indicirani rad                            |
| $w_{ef}$    | [ J/kg ]     | Specifični efektivni rad                             |
| $q_0$       | [ J/kg ]     | Specifična toplina isparivanja                       |
| $C_{p,isp}$ | [ J/kgK ]    | Specifični toplinski kapacitet vode u isparivaču     |
| $C_{p,kon}$ | [ J/kgK ]    | Specifični toplinski kapacitet zraka u kondenzatoru  |
| $f$         | [ $s^{-1}$ ] | Frekvencija vrtnje                                   |

|                   |                       |  |
|-------------------|-----------------------|--|
| $m_{isp}$         | [ kg/s ]              | Protok vode u isparivaču                                     |
| $m_{kon}$         | [ kg/s ]              | Protok zraka u kondenzatoru                                  |
| $q_m$             | [ kg/s ]              | Protok radne tvari   |
| $q_m$             | [ kg/s ]              | Protok radne tvari   |
| $V_u$             | [ m <sup>3</sup> /s ] | Volumen usisavanja   |
| $\rho_1$          | [ kg/m <sup>3</sup> ] | Gustoća radne tvari na usisu u kompresor                     |
| $T_{kon,u}$       | [ °C ]                | Temperatura zraka na ulazu u kondenzator                     |
| $T_{kon,i}$       | [ °C ]                | Temperatura zraka na izlazu iz kondenzatora                  |
| $T_{isp,u}$       | [ °C ]                | Temperatura vode na ulazu u isparivač                        |
| $T_{isp,i}$       | [ °C ]                | Temperatura vode na izlazu iz isparivača                     |
| $\Delta T_{proj}$ | [ °C ]                | temperaturna razlika izlaza vode i zraka za projektne uvjete |
| $T_g$             | [°C ]                 | Temperatura ogrjevnog spremnika                              |
| $T_h$             | [°C ]                 | Temperatura rashladnog spremnika                             |
| $p_k$             | [ Pa]                 | Tlak kondenzacije  |
| $p_i$             | [ Pa ]                | Tlak isparivanja   |
| $X$               | [ - ]                 | Omjer snage isparivača                                       |
| $Y$               | [ - ]                 | Omjer razlike temperatura                                    |
| $Z$               | [ - ]                 | Omjer snage kompresora                                       |
| $COP$             | [ - ]                 | Faktor hlađenja  |

---

|                |       |   |
|----------------|-------|---|
| $i$            | [ - ] | Broj cilindara  |
| $\lambda$      | [ - ] | Volumetrijski stupanj djelovanja                                |
| $\lambda_s$    | [ - ] | Volumetrijski stupanj djelovanja zbog štetnog prostora          |
| $\lambda_{pr}$ | [ - ] | Volumetrijski stupanj djelovanja zbog prigušivanja na ventilima |
| $\lambda_q$    | [ - ] | Volumetrijski stupanj djelovanja zbog izmjene topline           |
| $\lambda_h$    | [ - ] | Volumetrijski stupanj djelovanja zbog propuštanja               |
| $\eta_{is-i}$  | [ - ] | Izentropski-indicirani stupanj djelovanja kompresora            |
| $\eta_m$       | [ - ] | Mehanički stupanj djelovanja                                    |
| $\eta_k$       | [ - ] | Ukupni stupanj djelovanja kompresora                            |

## SAŽETAK

U sklopu ovog rada analiziraju se karakteristike rashladnika vode. To su sustavi koji na bazi ljevokretnih kružnih procesa odvede toplinu sa vode koju je potrebno hladiti ostvarujući tako određeni rashladni učinak.

U prvom poglavlju opisan je način rada rashladnog uređaja i navedene su opće energijske postavke koje omogućuju njegovu realizaciju. Također su definirani i parametri o kojima ovisi njegova efikasnost.

U drugom poglavlju navedene su četiri glave komponente sustava, sa posebnim naglaskom na izmjenjivače topline i kompresor. Osim glavnih komponenata, navedena je i sigurnosna, kontrolna i regulacijska armatura. Ukratko je opisan i utjecaj izbora radne tvari na proces i dimenzioniranje.

U trećem poglavlju opisani su regulacijski elementi rashladnog uređaja i način regulacije kompresora koji čini srce svakog sustava.

U sklopu četvrtog poglavlja analiziran je rad rashladnika vode koji se koristi za hlađenje upravne zgrade Hrvatske Elektroprivrede. Pronađena je funkcijska ovisnost o pogonskim parametrima u programskom paketu MATLAB.

Ključne riječi:

hlađenje, rashladnik vode, analiza, MATLAB

## **SUMMARY**

This thesis examines the characteristics of water chillers. These are the systems that remove heat from water and by doing so are achieving a specific cooling effect.

First, cooling systems are introduced along with the fundamental principles that make the system possible and coefficient of performance is defined.

In second chapter four main components of a cooling systems are introduced. Aside from main components, additional safety, control and regulation parts are mentioned. Thermodynamic properties of multiple refrigerants are discussed along with their influence on the system's dimensions.

Third chapter describes regulation components.

Finally, an analysis of water chiller used at the Hrvatska Elektroprivreda building is given. In MATLAB, a chiller performance is defined as a function of entry parameters.

Key words:

cooling, water chillers, analysis, MATLAB

# 1 RASHLADNI UREĐAJI

## 1.1 Uvod

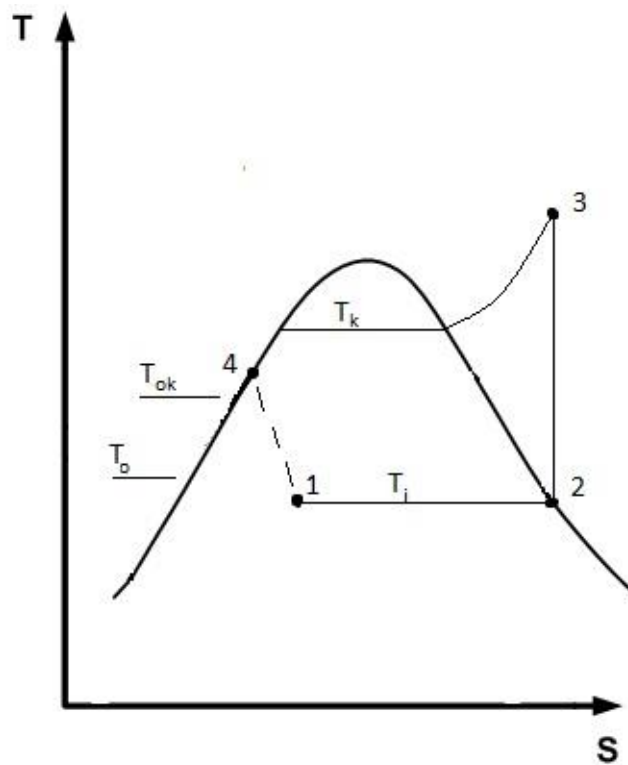
Rashladni uređaji su uređaji koji se koriste u svrhu hlađenja neke tvari ili materije na temperaturu nižu od temperature okoline. Ukoliko je ta tvar voda, tada se radi o rashladniku vode. Imaju široku primjenu u prehrambenoj industriji, medicini, farmaceutskoj industriji, kemijskoj industriji, prostorima za boravak ljudi itd. Njihova široka primjena je razlog zašto se dugi niz godina usavršavao proces.



Slika 1. Rashladnik vode sa zračnim hlađenjem [5]

## 1.2 Način rada

Način rada se bazira na ljevokretnom kružnom procesu. Rashladni uređaji i dizalice topline su po načinu rada identični. Razlika je u tome promatramo li izmjenu topline na kondenzatoru ili na isparivaču kao nama korisnu i primarnu. Ukoliko je cilj hlađenje, koristi se toplina izmijenjena na isparivaču u proračunu za ocjenu efikasnosti sustava. Ako je cilj grijanje, tada se u proračunu za ocjenu efikasnosti koristi toplina izmijenjena na kondenzatoru. Za provedbu procesa je nužna prisutnost dva toplinska spremnika (ogrjevni i rashladni), kompresor i prigušni ventil. Proces se sastoji od četiri faze rada [Slika 2]:



Slika 2. Ljevokretni proces rashladnih uređaja

1. isparivanje - radna tvar stanja 1 ulazi u izmjenjivač topline gdje se toplina, sa medija kojeg je potrebno hladiti, prenosi na radnu tvar. Ona pritom isparuje i prelazi od stanja mokre pare do stanja suhozasićene pare u točki 2. Proces isparivanja se odvija pri konstantom tlaku i temperaturi. Da bi se izmjena topline mogla odvijati, temperatura isparivanja mora biti minimalno oko 5 K niža od temperature hlađenog medija  $T_o$ . Ova faza je najvažnija u smislu da je ona razlog provedbe cijelog procesa, a to je hlađenje. Iznos izmijenjene topline je definiran površinom ispod linije 1-2 u T-s dijagramu i jednak je

$$Q_{\text{isp}} = H_2 - H_1$$

2. kompresija – radna tvar stanja 2 ulazi u kompresor gdje se komprimira do stanja 3. Uloga kompresora je da podigne tlak radne tvari sa tlaka isparivanja  $p_i$  na tlak kondenzacije  $p_k$  kako bi se mogla izvršiti kondenzacija. Stanje 3 je pregrijana para i ona mora biti definirana i sa tlakom i sa temperaturom. Temperatura ne smije biti veća od  $135 \div 140$  °C zbog opasnosti od zapaljenja ulja. Visoke temperature također ubrzavaju njegovo starenje.



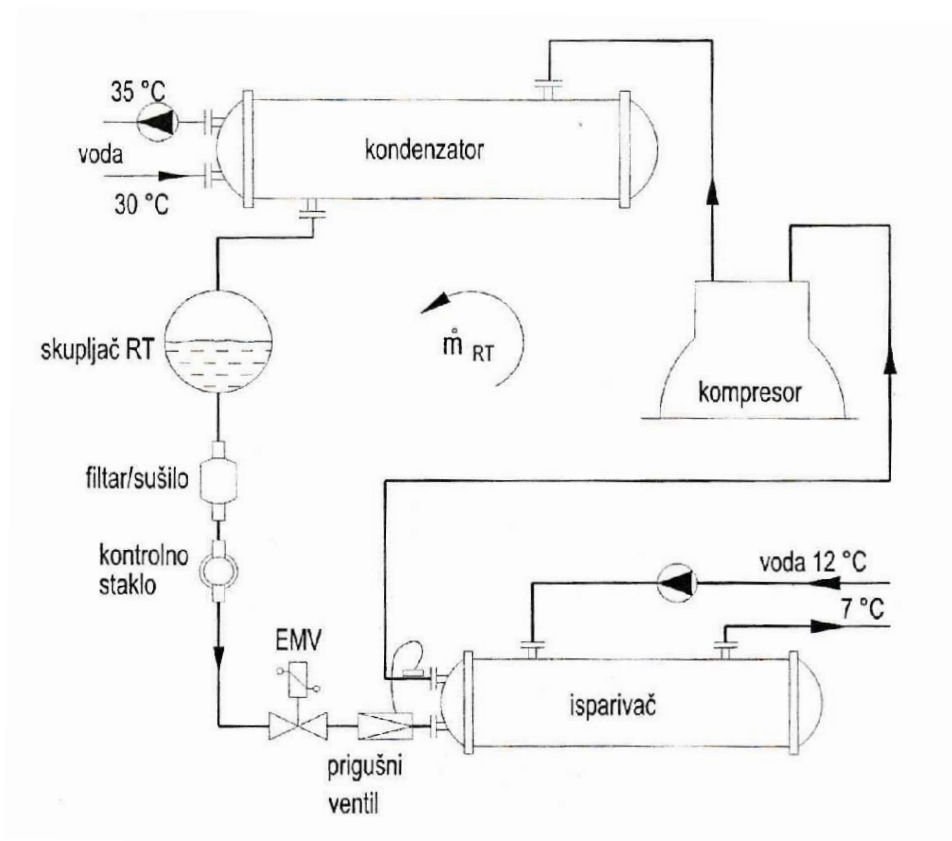
Maksimalni omjer kompresije koji kompresor može postići iznosi  $\frac{p_k}{p_1} = 10 \div 12$ . Ukoliko jedan od ova dva uvjeta nije zadovoljen, proces se mora izvršiti dvostrukom kompresijom. Dva kompresora se serijski spoje, a između njih se postavi jedan međuhladnjak. Potrebna snaga kompresora iznosi

$$P_{tot} = H_3 - H_2$$

3. kondenzacija – radna tvar stanja 3 ulazi u izmjenjivač topline gdje predaje toplinu hladeći se do stanja vrele kapljevine i zatim pothlađuje do stanja 4. Kondenzacija se odvija pri stalnom tlaku. Temperatura u točki 4 je par stupnjeva viša od temperature okoliša  $T_{ok}$ , ukoliko se okoliš koristi kao toplinski spremnik. Razlog pothlađivanja je povećanje efikasnosti sustava budući da se proces pomiče više ulijevo i time povećava toplina izmijenjena na isparivaču. Toplina kondenzacije iznosi

$$Q_{kond} = H_4 - H_3$$

4. prigušivanje – radna tvar se prigušuje sa tlaka kondenzacije na tlak isparivanja. Prigušivanje je neravnotežan proces. Entalpija u točki 4 je jednaka entalpiji u točki 1. Time se zatvara kružni proces.



Slika 3. Rashladnik vode sa vodom hlađenim kondenzatorom [1]

### 1.3 Iskoristivost sustava

Iskoristivost sustava je uvijek definirana kao omjer dobivenog i uloženog. U ljevokretnom kružnom procesu ulažemo rad kako bi energiju prenijeli sa spremnika niže temperature na spremnik više temperature. Treba paziti kojem toplinskom spremniku se daje pridjev ogrjevni a kojem rashladni jer je u ljevokretnom procesu ogrjevni spremnik spremnik niže temperature budući da je on taj koji predaje toplinu potrebnu za isparivanje. Kako u procesu imamo dvije dobivene topline, definiraju se dvije vrste iskoristivosti sustava: faktor hlađenja i faktor grijanja. Faktor grijanja je zanimljiv za dizalice topline, dok se faktor hlađenja koristi za ocjenu rashladnog sustava i računa se prema sljedećem izrazu:

$$COP = \frac{Q_{isp}}{P_{tot}}$$

gdje je  $Q_{isp}$  toplina izmjenjena na isparivaču, a  $P_{tot}$  snaga kompresora.

Budući da sustav funkcionira na bazi kružnog procesa, radna tvar u sustavu je ništa drugo nego posredni medij za prijenos topline. Time se može zaključiti da je maksimalna iskoristivost idealnog sustava definirana samo sa temperaturama toplinskih spremnika i neovisna je o radnoj tvari koju koristimo. Takav sustav će biti opisan povratnim promjenama stanja radne tvari, odnosno promjenama stanja kod kojih nema prirasta entropije. Jedna od tih promjena stanja je izentropska, a druga je izotermna, sa uvjetom da se izmjena topline mora odvijati pri temperaturi toplinskog spremnika. Što je manja temperaturna razlika između dva tijela koja izmjenjuju toplinu, to će ta izmjena topline duže trajati. To znači da će se ovakav proces odvijati beskonačno dugo i naziva se idealni Carnotov proces. Ako se temperatura ogrjevnog spremnika označi sa  $T_g$ , a temperatura rashladnog sa  $T_h$ , onda je faktor hlađenja idealnog Carnotovog procesa definiran sljedećom jednačinom:

$$COP_{max} = \frac{T_g}{T_h - T_g}$$

## 2 KOMPONENTE RASHLADNIH SUSTAVA

Osnovne komponente rashladnih sustava su:

- Prigušni ventil – doziranje i prigušivanje radne tvari
- Isparivač – tu radna tvar isparava, hladeći pritom sekundarni medij
- Kompresor – uloga mu je da podigne tlak radne tvari na tlak kondenzacije
- Kondenzator – radna tvar kondenzira

Osim osnovnih komponenata tu je još i razna sigurnosna, kontrolna i regulacijska armatura: termoekspanzijski ventil, elektromagnetski ventil, odvajač kapljevine, odvajač ulja, filter-sušać, kontrolno staklo i drugi.

### 2.1 Izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline su toplinski aparati u kojima se izmjenjuje toplina između 2 medija koja struje kroz izmjenjivač. Općenita podjela je na: *rekuperatore*, *regeneratore* i *direktne* aparate. Kod rekuperatora su struje odvojene fizičkom pregradom i oni se najviše koriste u procesu rashladne tehnike. Ovisno o smjeru strujanja rekuperatori se mogu podijeliti na:

- a) – *istosmjerne* rekuperatore
- b) – *protusmjerne* rekuperatore
- c) – *križne* (unakrsne) rekuperatore

Istosmjerni rekuperatori su oni kod kojih su struje međusobno paralelne i teku u istom smjeru, dok kod protusmjernih teku u suprotnom smjeru. Smjer strujanja utječe na efikasnost izmjenjivača u smislu potrebne površine. Ako se uzme ista vrijednost toplinskog toka za sva 3 tipa, protusmjerni će imati najmanju potrebnu površinu. Mana mu je što će kod njega biti prisutno najveće toplinsko naprezanje stijenke izmjenjivača.

Ovisno o načinu hlađenja kondenzatora imamo podjelu: *zrakom hlađeni kondenzatori*, *vodom hlađeni kondenzatori*, *evaporativni kondenzatori* i *kondenzatori sa rashladnim tornjem*.

### 2.1.1 Zrakom hlađeni kondenzatori

Kondenzatori hlađeni zrakom su najjeftiniji jer koriste besplatan zrak. Po efikasnosti su najlošiji jer je rashladni medij upravo taj zrak (plin), koji u odnosu na kapljevinu ima mnogo lošija svojstva koja utječu na izmjenu topline. To je razlog zašto se često upotrebljavaju u rashladnim postrojenjima manjih i srednjih kapaciteta. Njegova mala gustoća povlači za sobom potrebu za velikim protocima što ujedno znači i veća dimenzija kondenzatora. Zrak, kao i drugi plinoviti fluidi, ima mali koeficijent prijelaza topline. Zbog toga se rashladni zrak povlači kroz izmjenjivač aksijalnim ventilatorima smještenim na izlazu iz izmjenjivača kako bi se osiguralo ravnomjerno strujanje zraka preko izmjenjivačke površine i što jača izmjena topline.



Slika 4. Zrakom hlađeni kondenzator [8]

### 2.1.2 Vodom hlađeni kondenzatori

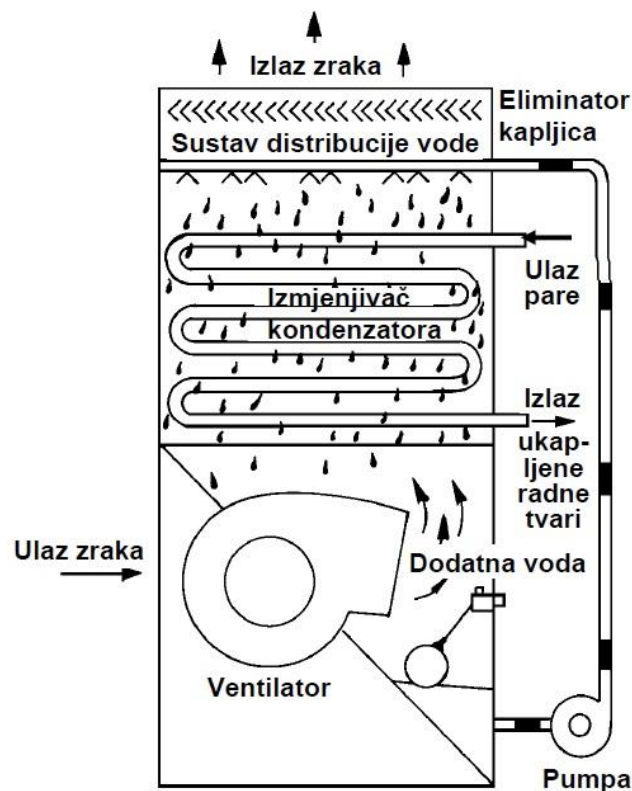
To su kondenzatori koji neposredno koriste jezersku, riječnu, podzemnu ili morsku vodu. Često je potrebno ugraditi filtracijski uređaj kako bi se spriječilo onečišćenje cijevi kondenzatora. Korištenje jezerske, riječne, morske ili podzemne vode je metoda jednog prolaska jer ta voda ne može recirkulirati i ponovno se koristiti u kondenzatoru. Postoje zakonske regulative koje ograničavaju količinu vode koja se smije koristiti iz prirodnih izvora.

### 2.1.3 Evaporativni kondenzatori

Evaporativni kondenzatori su kondenzatori koji odvođe toplinu kondenzacije iz izmjenjivača pomoću efekta evaporativnog hlađenja. Voda se raspršuje preko izmjenjivačke površine na koju

prisilno nastružava zrak uslijed pogona ventilatora. Zbog kontakta suhog zraka i ovlažene površine izmjenjivača, dolazi do pojave ishlapljivanja kojom se hladi radna tvar u sustavu.

Dok je zrakom hlađeni kondenzator ograničen temperaturom suhog termometra okolišta, u evaporativnom kondenzatoru je odvođenje topline ograničeno temperaturom vlažnog termometra okolišta, koja je oko 8 do 14K niža od temperature suhog termometra. Iz toga proizlazi veća iskoristivost evaporativnog kondenzatora u odnosu na onaj koji je zrakom hlađen. Za isti učinak, evaporativni kondenzator će imati manju površinu izmjenjivača i manji protok zraka.

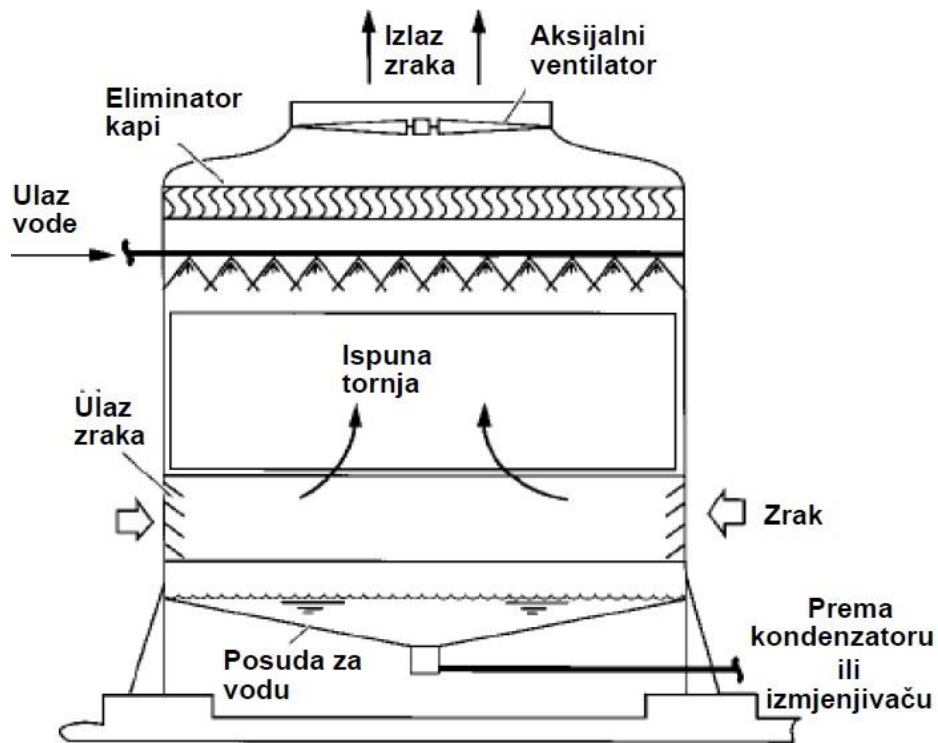


Slika 5. Evaporativni kondenzator [2]

#### 2.1.4 Kondenzatori sa rashladnim tornjem

Koriste se u velikim rashladnim postrojenjima. Voda izlazi iz kondenzatora i ulazi u rashladni toranj gdje se raspršuje preko ispune rashladnog tornja pri čemu se hladi na nižu temperaturu efektom ishlapljivanja. Ta temperatura je ograničena temperaturom vlažnog termometra zraka. Nakon kemijskog obrađivanja, voda se vraća u reciklacijski krug.

Budući da je voda u recirkulaciji, ovaj sustav je idealan za slučaj kada se koristi voda koja se plaća. Jedini gubici vode su u ishlapljivanju, u odmuljivanju i eventualno odnešenim kapljicama strujanjem zraka s time da se ovaj zadnji sprječava u dobroj mjeri ugradnjom eliminatora kapljica.



Slika 6. Rashladni toranj [2]

## 2.2 Kompresor

Kompresori su uređaji koji procesom stlačivanja dovode plin u energetski vrijednije stanje. Izbor kompresora je iznimno važan za optimalan rad sustava, odnosno sa najmanjim utroškom energije. Zato je važno znati o čemu ovisi iskoristivost kompresora i na koji način se ona može povećati.

Kod rashladnih uređaja promatramo rashladni učinak kompresora. On je definiran kao umnožak specifične topline isparivanja i masenog protoka radne tvari.

$$\Phi_0 = q_0 \cdot q_m$$

Maseni protok radne tvari se definira kao:

$$q_m = V_u \cdot \rho_1$$

gdje je  $V_u$  usisni volumen kompresora, a  $\rho_1$  gustoća radne tvari na usisu u kompresor.

Usisni volumen stapnog kompresora je jednak umnošku stapajnog volumena  $V_s$ , frekvencije vrtnje  $f$ , broju cilindara  $i$ , i volumetrijskog stupnja djelovanja:

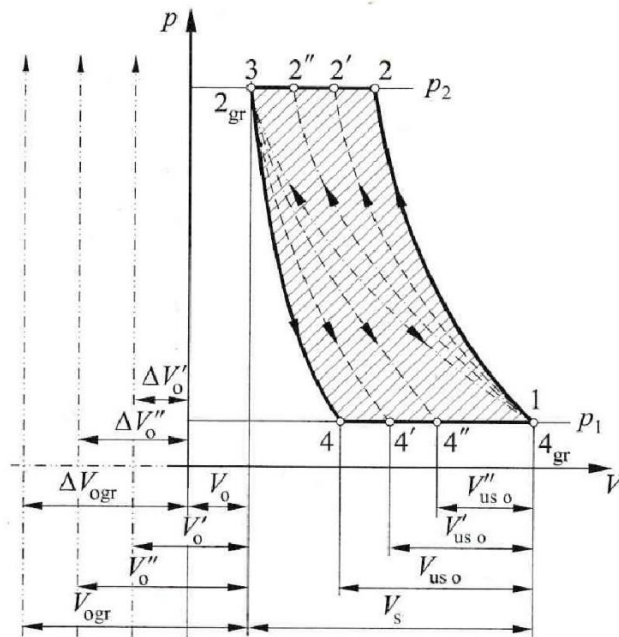
$$V_u = V_s \cdot f \cdot i \cdot \lambda$$

Volumetrijski stupanj djelovanja predstavlja sveukupne volumetrijske gubitke kompresora:

$$\lambda = \lambda_s \cdot \lambda_{pr} \cdot \lambda_q \cdot \lambda_h$$

$\lambda_s$  – volumetrijski stupanj djelovanja zbog štetnog prostora. Štetan prostor je onaj koji se nalazi iznad gornje mrtve točke kompresora i nužan je kako bi se spriječio kontakt stapa i ventilne ploče. Njega je nemoguće istisnuti i nakon kompresije on ostaje u cilindru. Pomicanjem stapa prema donjoj mrtvoj točki dolazi do usisavanja, ali ne odmah, upravo zato jer postoji stlačena radna tvar u štetnom prostoru koja prvo treba ekspanzirati do tlaka usisavanja. Ta ekspanzija umanjuje iznos dobave kompresora i zbog toga štetan prostor nazivamo upravo tako, štetan. On je razlog zašto i postoji granica koja se ne smije preći u omjeru kompresije. Što više povećavamo omjer kompresije, kompresor postaje manje učinkovit.





Slika 7. Utjecaj veličine štetnog prostora na usisani volumen [3]

$\lambda_{pr}$  – volumetrijski stupanj djelovanja zbog prigušivanja na ventilima. Pri usisu radne tvari, tlak usisavanja treba biti nešto niži u tlaka u usisnom vodu. Pri istiskivanju radne tvari, tlak istiskivanja treba biti nešto viši od tlaka u tlačnom vodu. Razlog zašto postoje ta 2 uvjeta je pojava trenja.

$\lambda_q$  – volumetrijski stupanj djelovanja zbog izmjene topline. Plin koji je komprimiran će imati višu temperaturu nego prije kompresije. Posljedica toga je da će se plin, kojeg kompresor usisava, zagrijati od tog zaostalog plina u štetnom prostoru. Usisani plin će se također zagrijavati od stijenke cilindra. Rezultat te izmjene topline je da će plin na kraju usisavanja imati veću temperaturu nego plin u usisnom vodu, a viša temperatura znači manju dobavu.

$\lambda_h$  - volumetrijski stupanj djelovanja zbog propuštanja. Dio plina se tijekom kompresije gubi propuštanjem između stapa i cilindra. Kod rashladnih sustava je ovaj faktor eliminiran budući da je nadasve nedopustivo da radna tvar curi u okolinu.

Kod većine kompresora se uvjetom ekonomičnosti smatra kada je sveukupni gubitak  $\lambda > 0,6$ .

Važno je napomenuti i stupanj djelovanja kompresora  $\eta_k$  i što on predstavlja. Postoji razlika između snage potrebne za kompresiju i efektivne snage koju treba privesti spojci kompresora, a

njih povezuje stupanj djelovanja kompresora. Ukupni stupanj djelovanja kompresora računa se kao umnožak izentropskog (indiciranog) stupnja djelovanja i mehaničkog stupnja djelovanja kompresora.

$$\eta_k = \eta_{is-i} \cdot \eta_m$$

Izentropski-indicirani stupanj djelovanja kompresora predstavlja omjer izentropskog rada kompresora i realnog indiciranog rada utrošenog za kompresiju.

$$\eta_{is-i} = \frac{w_t}{w_i}$$

$w_t$  - rad potreban za izentropsku kompresiju, J/kg

$w_i$  - indicirani rad potreban za komprimiranje radne tvari

Izentropski stupanj djelovanja pokazuje koliko je stvarni proces lošiji od teorijskog. Kreće se u rasponu 0,75 - 0,85 Uzima u obzir potreban višak rada za politropsku kompresiju, trenje između čestica radne tvari i uz stjenku cilindra, otpor u samoradnim ventilima, zagrijavanje.

Mehanički stupanj djelovanja se računa kao omjer realnog indiciranog rada i efektivnog rada kompresora.

$$\eta_m = \frac{w_i}{w_{ef}}$$

$w_{ef}$  – efektivan rad na spojci s pogonskim strojem

Mehanički stupanj djelovanja sadrži gubitke prijenosa i gubitke trenja u ležajevima. Kreće se u rasponu 0,87 - 0,93. Ako je kompresor na istoj osovinu kao i pogonski stroj onda nema gubitaka prijenosa.

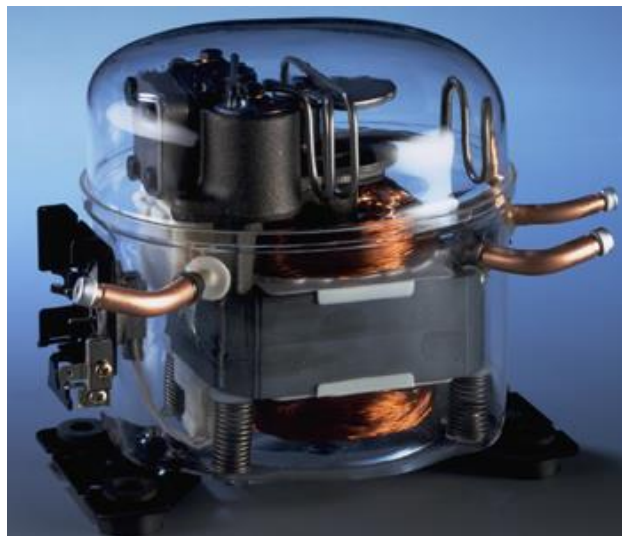
Kompresori se prema vrsti dijele na:

- Centrifugalne rashladne agregate
- Vijčane rashladne agregate
- Agregati sa stapnim kompresorima

- Rashladnici sa spiralnim kompresorima

Prema izvedbi su podijeljeni na *hermetičke*, *poluhermetičke* i *otvorene*.

Kod hermetičke izvedbe kompresor i elektromotor su zajedno zatvoreni u zavarenu limenu posudu. Ovakva izvedba se koristi kod kućanskih hladnjaka i malih rashladnih jedinica. Otvoreni sustav je nužan ako se koriste radne tvari koje su agresivne prema bakru ili aluminiju. Primjer kod rashladnih sustava je sustav s amonijakom.



Slika 8. Kompresor hermetičke izvedbe [6]

### 2.3 Radne tvari u tehnici hlađenja

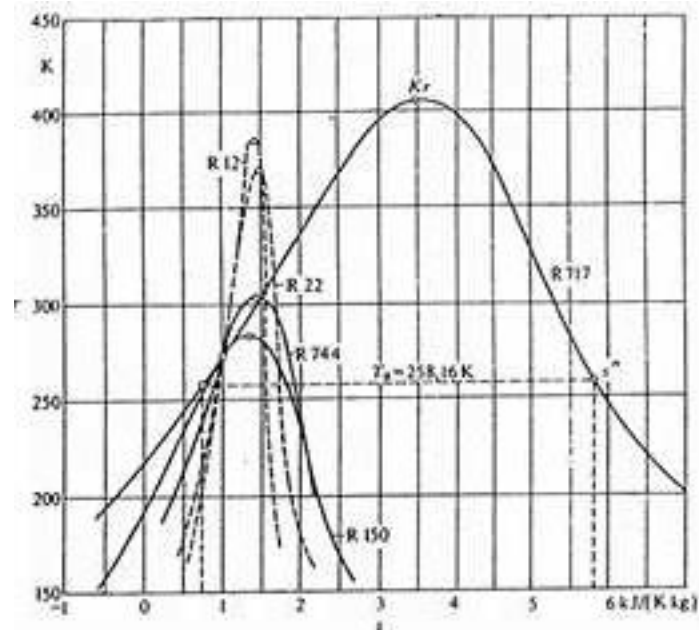
Kao što je već rečeno, radna tvar u sustavu je posredni medij za prijenos topline, no postoji mnogo uvjeta koje radne tvari trebaju ispunjavati. Svojstva radnih tvari će utjecati na pogonske troškove, protočnu količinu, punjenje sustava, dimenzije sustava.

Neki od poželjnih uvjeta su sljedeći:

- Niska temperatura isparivanja
- Velika latentna toplota isparivanja i kondenzacije
- Velika gustoća pri temperaturi isparivanja
- Mala viskoznost
- Nezapaljivost i neotrovnost

- Fizikalna i kemijska stabilnost
- Bez utjecaja na razgradnju ozona
- Mali utjecaj na zagrijavanje atmosfere

Slika 9 pokazuje zasićena područja nekih radnih tvari, dok je njihovo različito područje primjene prikazano u tablici 1.



Slika 9. Zasićena područja nekih radnih tvari

Tablica 1. Preporuka za odabir radnih tvari [1]

| Područje primjene                            | Temperatura hlađenja [°C]             |                     |                            |                   |
|--|---------------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|
|  | +20/0                                 | 0/-15               | -15/45                     | <-45              |
| Industrija                                   |                                       | R717, R227, R407C   | R717, R407B, R407C, R744   | R744              |
| Industrijska klimatizacija, dizalice topline | R404A, R407C, R410A, R717, R227, R124 |                     |                            |                   |
| Komercijalna klimatizacija, dizalice topline | R134a, R407C, R410A, R290             |                     |                            |                   |
| Ugostiteljstvo, kućanstvo, transport         | R600a, R1234yf                        | R134a, R404A, R600a | R404A, R134a, R407C, R407A |                   |
| Znanost                                      | R134a, R290, R1234yf                  | R717, R134a         | R717, R407A                | R290, R170, R1270 |

Prema porijeklu, radne tvari se dijele na: anorganske, organske, azeotropske i zeotropske. Primjer anorganskih su: amonijak, voda, zrak i ugljik dioksid. Organske tvari se dijele na ugljikovodike, halogenirane derivate metana i etana. Halokarbonati se dijele na: CFC – klorofluorouglijci od kojih su najpoznatiji R11 i R12; HCFC – klorofluorouglikovodici (R22); i HFC – fluorirani ugljikovodici (R134a, R32).

Radne tvari su se tijekom godina mijenjale na način da su neke postale zabranjene, a do tih odluka se dolazilo paralelno sa ispitivanjima kojima je utvrđena njihova štetnost na okoliš glede razgradnje ozona ili globalnog zagrijavanja. Tako je 1987. godine potpisan sporazum naziva Montraelski protokol kojim se zabranjuju CFC radne tvari zbog razgradnje ozonskog omotača. Kyoto protokol, koji je stupio na snagu 2005. godine, smanjuje broj radnih tvari u skupini HFC koje se smiju koristiti zbog njihova utjecaja na globalno zagrijavanje.

Nakon zabrana određenih radnih tvari, pojavio se problem sa rashladnim uređajima koji su koristili te rashladne tvari. Zamjena drugim tvarima nije bila moguća zbog drugačijih svojstva tvari, a time ujedno i drugačijih konstrukcijskih karakteristika rashladnih uređaja za optimalan rad sustava. Kompletna zamjena rashladnih uređaja bi bila prevelik financijski gubitak pa su napravljene smjese radnih tvari s ciljem da imaju slična termodinamička svojstva sada zabranjenih radnih tvari kako bi ih mogle zamjeniti. Dije se na azeotropske smjese koje pri konstantnom tlaku imaju konstantnu temperaturu isparivanja u zasićenom području, i na zeotropske smjese koje pri promjeni agregatnog stanja mijenjaju temperaturu pri konstantnom tlaku.

### 3 REGULACIJA RASHLADNIH SUSTAVA

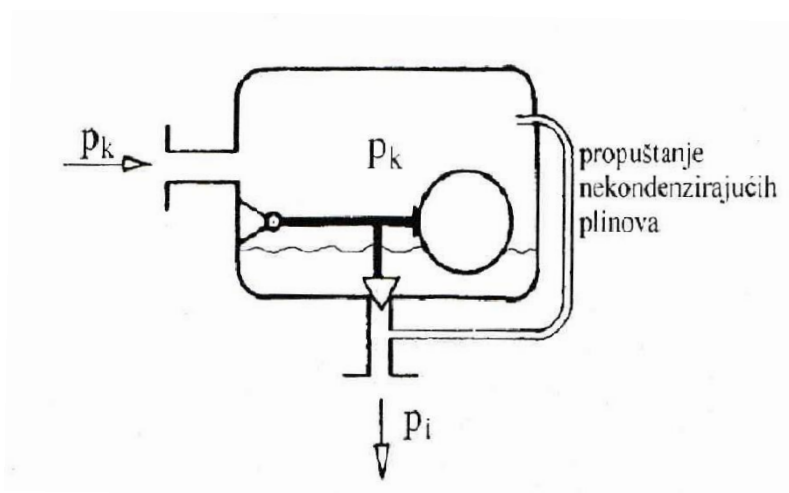
U svakom tehničkom procesu, pa tako i u rashladnom, je nužna regulacija kako bi se mogli održavati željeni parametri rada. Za sustave je često nametnut zahtjev za samoregulacijom, odnosno regulacija uz nikakav ili minimalan nadzor.

Regulacijsku armaturu možemo podijeliti prema izvedbi na:

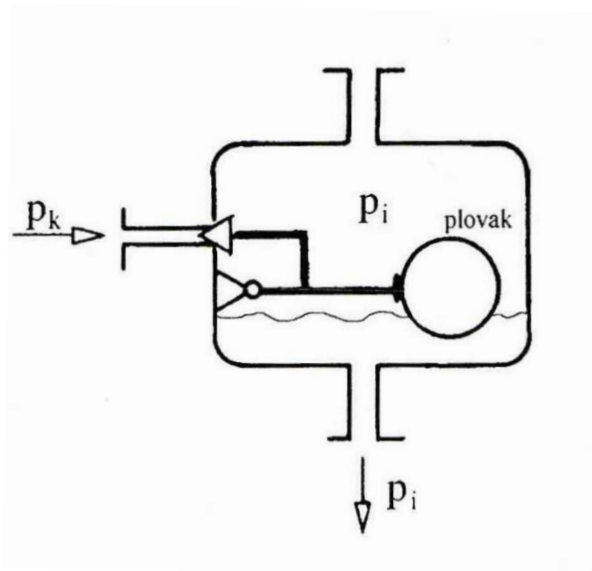
- Regulatori razine
- Regulatori tlaka
- Regulatori temperature pregrijanja

#### 3.1 Regulatori razine

U izvedbama isparivača potopljenog tipa potrebno je regulirati razinu kapljevite radne tvari. To se ostvaruje pomoću dva regulacijska elementa. Jedan je ventil s plovkom na niskotlačnoj strani (VPNT), a drugi ventil s plovkom na visokotlačnoj strani (VPVT). Kod sustava sa VPNT-om, ukapljena radna tvar će se nalaziti ili u kondenzatoru ili u sakupljaču, dok će kod VPVT-a ukapljena radna tvar u kondenzatoru iščezavati, a sakupljač ukapljenje radne tvari neće biti potreban. Ventil propušta svu ukapljenu radnu tvar u isparivač.



Slika 10. Ventil s plovkom na visokotlačnoj strani [1]

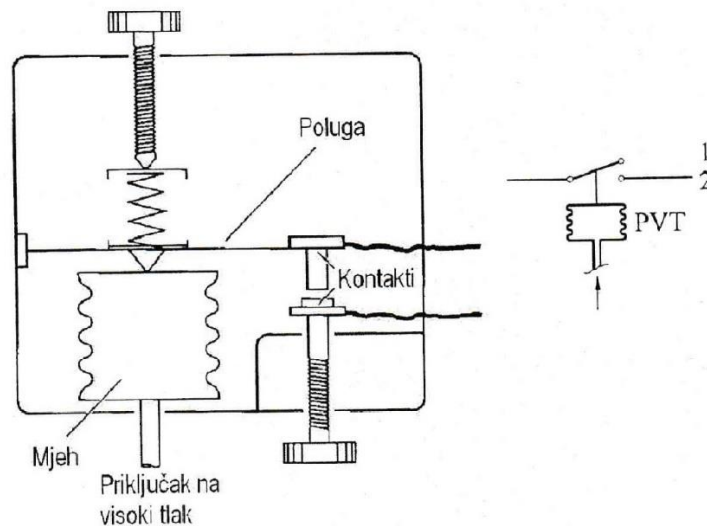


Slika 11. Ventil s plovkom na niskotlačnoj strani [1]

### 3.2 Regulatori tlaka

U sustavima često iznos hlađenja, odnosno snage isparivača bude varijabilan. U slučaju manjeg opterećenja isparivača protok radne tvari bude smanjen. Kompresor će se toj smanjenoj dobavi automatski prilagoditi povećanjem kompresijskog omjera zahvaljujući samoradim ventilima. U obrnutom slučaju, kada se poveća dobava, smanjit će se kompresijski omjer. Te varijacije treba limitirati i kontrolirati.

Za zaštitu sustava od prekoračenja maksimalnog i minimalnog dozvoljenog radnog tlaka u sustavu i njihove stabilizacije koristi se presostat visokog tlaka (PVT) i presostat niskog tlaka (PNT). Te regulacijske komponente predstavljaju osjetnik tlaka koji upravlja električnom sklopkom. Kod presostata visokog tlaka sklopka se otvara pri nekom maksimalnom tlaku i prekida regulacijski strujni krug čime se obustavlja rad kompresora.



Slika 12. Presostat visokog tlaka [1]

### 3.3 Regulator temperature pregrijanja

Vrlo je važno osiguravati neko pregrijanje radne tvari prije ulaska u kompresor. Često je taj iznos oko 5K iznad temperature isparivanja. Naime, kompresor je dimenzioniran tako da mu je štetan prostor, iznad gornje mrtve točke, po volumnom iznosu minimalan jer utječe na iskoristivost kompresora. Ukoliko u kompresor dođe kapljevita faza radne tvari, doći će do hidrauličkog udara budući da je kapljevina nekompresibilna. To podrazumijeva lom kompresora i kompletno mijenjanje istog. Zato je iznimno važno da radna tvar pri ulasku u kompresor bude u stanju blago pregijane pare.

Regulacijski element koji osigurava pregrijanje radne tvari pri izlasku iz isparivača je termoekspanzijski ventil (TEV). Nalazi se pri ulazu u isparivač dok mu se termoosjetnik nalazi na izlazu isparivača, a međusobno su povezani kapilarnom cjevčicom. U slučaju kada se smanji potreba za hlađenjem, on će smanjiti protok radne tvari u isparivaču. Njegov mehanizam rada je da će u isparivač propustiti uvijek onoliko radne tvari da ona ispari i pregrije se za zadanu vrijednost, oko 5K.



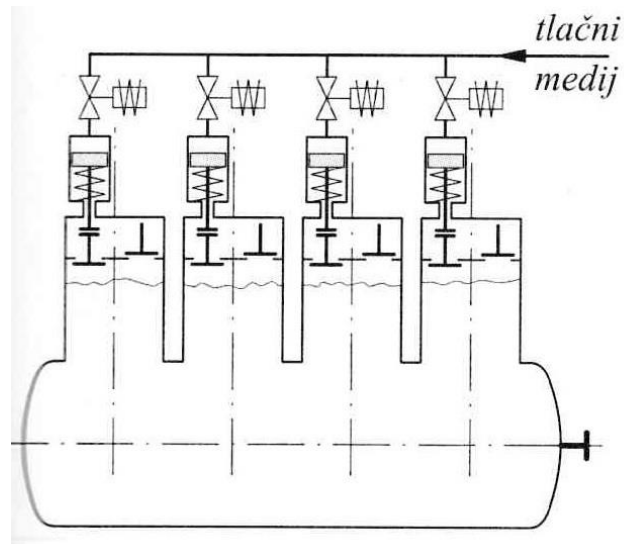


Slika 13. Termoekspanzijski ventil [7]

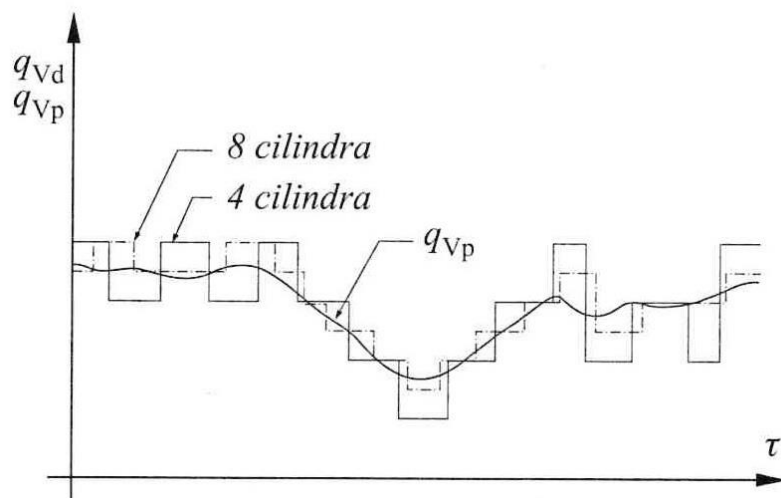
### 3.4 Regulacija kompresora

Najjednostavnija regulacija kompresora je intermitirajući pogon, ali taj način je dosta neekonomičan i grub. U ovom slučaju će devijacija tlaka kondenzacije biti najveća. Elektromotor pri pokretanju povlači 8 puta veću struju od nazivne što osim pogonskih troškova za sobom povlači i dodatno zagrijavanje namotaja, a time povećanu disipaciju energije. Pri prekomjernim učestalostima ukapčanja će se pregrijati namotaji elektromotora i bit će povećana opasnost od pregaranja. To se može izbjeći predimenzioniranjem elektromotora, s time da će to biti dopustivo samo za uređaje manjeg kapaciteta.

Za veće sustave, glađa regulacija se postiže stupnjevanim reguliranjem. U većim sustavima kompresori često imaju veći broj cilindara na raspolaganju. Pri maksimalnom opterećenju sustava svi cilindri će biti u radu. Ukoliko opterećenje opada mogu se isključiti iz pogona pojedini cilindri i time se regulira sustav. Broj cilindara direktno ovisi o stupnjevima regulacije na način da će četverocilindarski kompresor imati regulaciju u 5 stupnjeva (0, 25, 50, 75 i 100% kapaciteta).



Slika 14. Višecilindarski kompresor [3]



Slika 15. Stupnjevana regulacija dobave [3]

## 4 ANALIZA RASHLADNOG SUSTAVA

### 4.1 Općenito o analizi

Prema [9], za analizu rada uređaja se može koristiti sljedeći model. Sustav se u potpunosti opisuje sa 5 nezavisnih varijabli. Jedna od mogućih kombinacija je 1) rashladno opterećenje isparivača 2) temperatura vode na uzlazu u isparivač 3) protok vode isparivača 4) temperatura zraka na izlazu iz kondenzatora 5) protok zraka kondenzatora. Međutim, opisivajući sustav preko izlazećih temperatura vode i zraka na isparivaču i kondenzatoru, protoci postaju manje značajni pa se broj varijabli smanjuje na 3. Utvrđeno je i da je efikasnost sustava neovisna o individualnim temperaturama vode i zraka, već o njihovim međusobnim razlikama. Varijable kojima se opisuje sustav su sljedeće:

$$X = \frac{Q_{isp}}{Q_{proj}}$$

$$Y = \frac{T_{kon,i} - T_{isp,i}}{\Delta T_{proj}}$$

$$Z = \frac{P_{tot}}{P_{proj}}$$

Gdje je:  $Q_{isp}$  - rashladno opterećenje isparivača

$T_{kon,i}$  - temperatura zraka na izlazu iz kondenzatora

$T_{isp,i}$  - temperatura vode na izlazu iz isparivača

$P_{tot}$  - snaga kompresora

$Q_{proj}$  - rashladno opterećenje isparivača za projektne uvjete

$P_{proj}$  - snaga na kompresoru za projektne uvjete

$\Delta T_{proj}$  - temperaturna razlika izlaza vode i zraka za projektne uvjete

Funkcijska ovisnost snage sustava o prethodnim varijablama je sljedeća:

$$Z = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3Y + a_4Y^2 + a_5XY$$

Koeficijenti  $a_0 - a_5$  u gornjoj jednadžbi se određuju linearnom metodom najmanjih kvadrata uz mjerene podatke rada. Budući da se svaki rashladnik drugačije ponaša pri različitim uvjetima, izračunati koeficijenti će biti specifični samo za taj rashladnik i oni opisuju rad tog jednog sustava.

Rashladni sustav se regulira prema temperaturi hladene vode na izlazu iz isparivača, stoga nam je ona poznata. Pri opisivanju funkcijske ovisnosti snage se javlja problem, odnosno račun se malo komplicira jer je potrebno poznavati temperaturu zraka na izlazu iz kondenzatora. Nju je potrebno izračunati, a račun polazi od izraza za snagu isparivača:

$$Q_{isp} = m_{isp}C_{p,isp}(T_{isp,u} - T_{isp,i})$$

$m_{isp}$  - protok vode u isparivaču

$C_{p,isp}$  - specifični toplinski kapacitet vode u isparivaču

$T_{isp,u}$  - temperatura vode na ulazu u isparivač

Snaga kondenzatora se može izračunati kao:

$$Q_{kond} = Q_{isp} + \eta_k P_{tot}$$

i na kraju bezdimenzijska temperatura vode  $Y$  kombinacijom prethodnih jednadžbi iz sljedeće relacije:

$$\begin{aligned} Q_{isp} + \eta_k P_{proj}(a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3Y + a_4Y^2 + a_5XY) \\ = m_{kon}C_{p,kon}[Y\Delta T_{proj} - (T_{kon,u} - T_{isp,i})] \end{aligned}$$

$\eta_k$  - stupanj djelovanja kompresora

$m_{kon}$  - protok zraka u kondenzatoru

$C_{p,kon}$  - specifični toplinski kapacitet zraka u kondenzatoru

$T_{kon,u}$  - temperatura zraka na ulazu u kondenzator

Faktor hlađenja se računa pomoću jednadžbe:

$$COP = \frac{Q_{isp}}{P_{tot}}$$

i on je sada funkcijski opisan u ovisnosti o temperaturama vode i zraka na isparivaču i kondenzatoru.

## 4.2 Program za analizu

Analiziran je rad rashladnika koji se koristi za hlađenje upravne zgrade Hrvatske Elektroprivrede. Model rashladnika je RTAD 100 Standard sa sljedećim radnim karakteristikama:

Tablica 2. Radne karakteristike rashladnika [10]

| $T_{isp,i}$<br>[°C] | Temperatura okoliša [°C] |                |                |                |                |                |
|---------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                     | 25                       |                | 30             |                | 35             |                |
|                     | $Q_{isp}$ [kW]           | $P_{tot}$ [kW] | $Q_{isp}$ [kW] | $P_{tot}$ [kW] | $Q_{isp}$ [kW] | $P_{tot}$ [kW] |
| 5                   | 345,5                    | 92,6           | 325,2          | 98,9           | 304,2          | 106,2          |
| 7                   | 367,9                    | 96,4           | 346,4          | 102,8          | 324,3          | 110,1          |
| 9                   | 391,0                    | 100,3          | 368,3          | 106,8          | 345            | 114,3          |
| 11                  | 414,8                    | 104,4          | 390,9          | 111,1          | 366,3          | 118,6          |
| 13                  | 439,2                    | 108,7          | 414,0          | 115,5          | 388,2          | 123,1          |

| $T_{isp,i}$ [°C] | Temperatura okoliša [°C] |                |                |                |
|------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | 40                       |                | 46             |                |
|                  | $Q_{isp}$ [kW]           | $P_{tot}$ [kW] | $Q_{isp}$ [kW] | $P_{tot}$ [kW] |
| 5                | 282.7                    | 114.3          | 242.5          | 118.1          |
| 7                | 301.6                    | 118.4          | 246.2          | 114.3          |
| 9                | 321.1                    | 122.6          | 249.1          | 109.7          |
| 11               | 341.2                    | 127.1          | 254.0          | 107.1          |
| 13               | 349.7                    | 126.3          | 256.8          | 103.4          |

Kod za curve fitting:

```
Tkonu = [25 30 35 40 46 25 30 35 40 46 25 30 35 40 46 25 30 35 40 46 25 30 35
40 46];
Tispi = [5 5 5 5 5 7 7 7 7 7 9 9 9 9 9 11 11 11 11 11 13 13 13 13 13];
Ptot = [92.6 98.9 106.2 114.3 118.1 96.4 102.8 110.1 118.4 114.3 100.3 106.8
114.3 122.6 109.7 104.4 111.1 118.6 127.1 107.1 108.7 115.5 123.1 126.3
103.4];
```

```

Qisp = [345.5 325.2 304.2 282.7 242.5 367.9 346.4 324.3 301.6 246.2 391.0
368.3 345.0 321.1 249.1 414.8 390.9 366.3 341.2 254.0 439.2 414.0 388.2 349.7
256.8];
Qproj = 304.2;
Tproj = 40.74;
Pproj = 106.2;

```

```

n = 0.86;
mkon = 37;
Cpkon = 1.005;
Tkoni = (Qisp + n*Ptot)/(mkon*Cpkon) + Tkonu;

```

```

X = Qisp/Qproj;
Y = (Tkoni - Tispi)/Tproj;
Z = Ptot/Pproj;

```

```

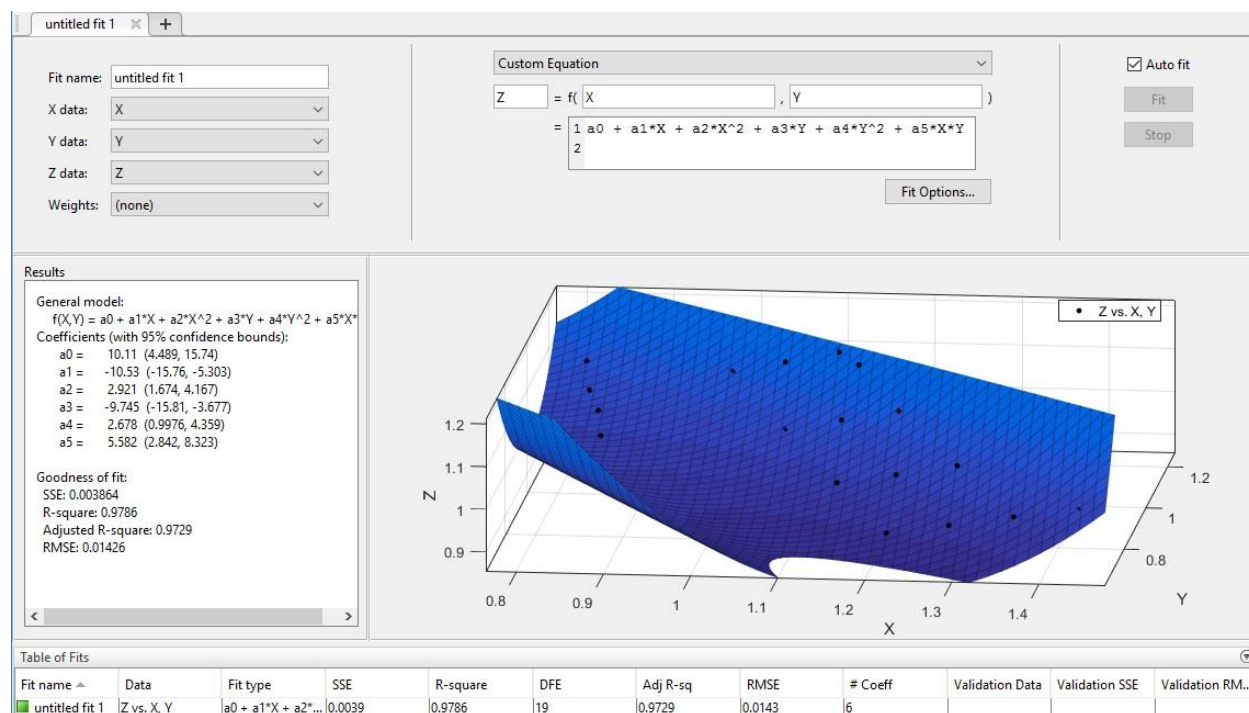
%linear least-squares curve-fitting Z=f(X,Y)
%Z = a0 + a1*X + a2*X^2 + a3*Y + a4*Y^2 + a5*X*Y

```

```

a0 = 10.11;
a1 = -10.53;
a2 = 2.921;
a3 = -9.745;
a4 = 2.678;
a5 = 5.582;

```



Slika 16. Rezultat metode najmanjih kvadrata

Nakon što su izračunati koeficijenti  $a_0 - a_5$ , može se prikazati  $COP = f(Tispi, Tkonu)$  pomoću sljedećeg koda

```

a0 = 10.11;
a1 = -10.53;
a2 = 2.921;
a3 = -9.745;
a4 = 2.678;
a5 = 5.582;
Qproj = 304.2; %kW
Pproj = 106.2; %kW
Tproj = 40.74; %°C
n      = 0.86;
mkon   = 37;    %kg/s
Cpkon  = 1.005; %kJ/kgK

%Qisp = [345.5 367.9 391 414.8 439.2];
%Tkonu = [25 25 25 25 25];
%Tispi = [5 7 9 11 13];

%Qisp = [325.2 346.4 368.3 390.9 414];
%Tkonu = [30 30 30 30 30];
%Tispi = [5 7 9 11 13];

%Qisp = [304.2 324.3 345 366.3 388.2];
%Tkonu = [35 35 35 35 35];
%Tispi = [5 7 9 11 13];

%Qisp = [282.7 301.6 321.1 341.2 349.7];
%Tkonu = [40 40 40 40 40];
%Tispi = [5 7 9 11 13];

%Qisp = [242.5 246.2 249.1 254 256.8];
%Tkonu = [46 46 46 46 46];
%Tispi = [5 7 9 11 13];

X = Qisp/Qproj;
a = n*Pproj*a4;
b = -2.4049e+03 + 509.8152*X;
for i = 1:length(X)
c(i) = Qisp(i) + 91.332*(10.11 -10.53*X(i) + 2.921*X(i)^2) + 37.185*(Tkonu(i) -
Tispi(i));
end

for i = 1:length(X)
[Y1(i),Y2(i)] = kvadr (a,b,c,X(i),Qisp(i),Tkonu(i),Tispi(i));
end
if (Y1>0 & Y1<1.5)
    Y=Y1;
else Y=Y2;
end

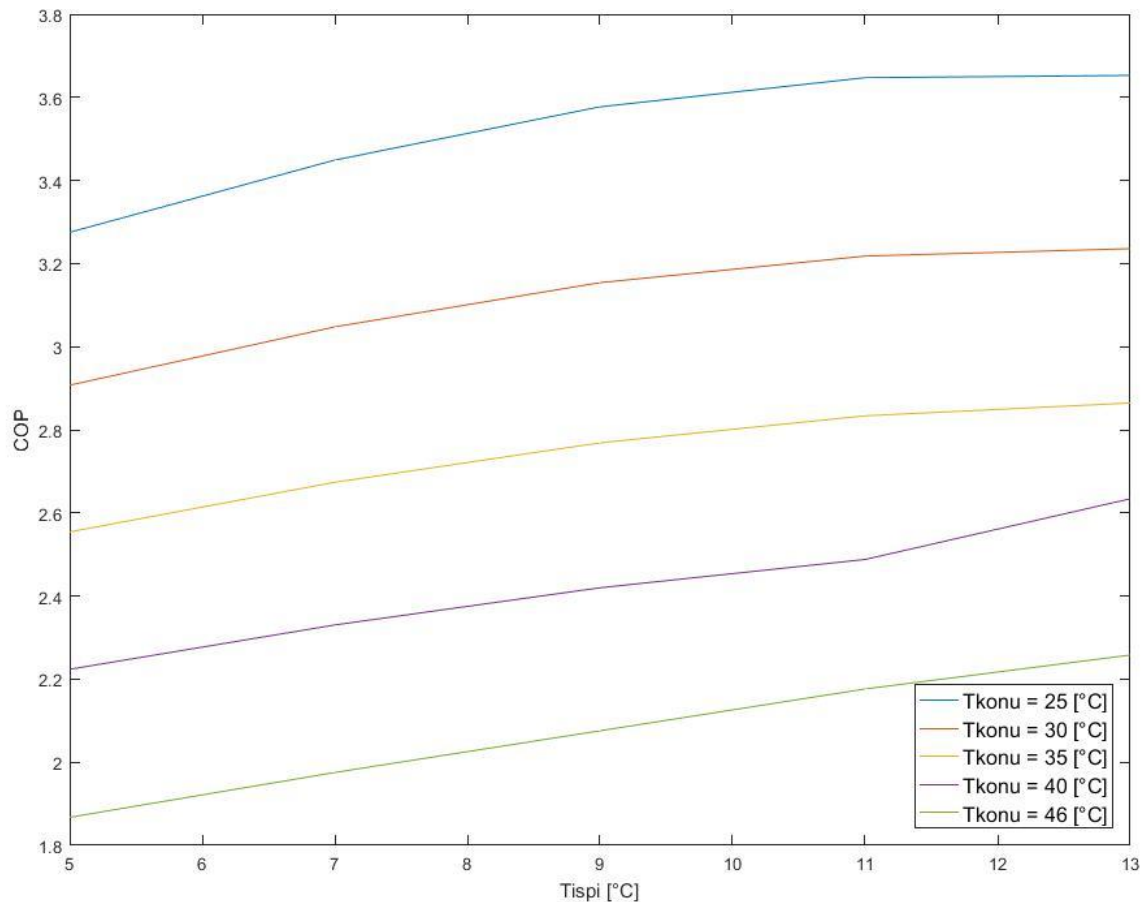
for i = 1:length(X)
    Z(i) = (a0 + a1*X(i) + a2*X(i)^2 + a3*Y(i) + a4*Y(i)^2 + a5*X(i)*Y(i));
end

Ptot = Pproj*Z;

for ii = 1:length(Qisp)
COP(ii) = Qisp(ii)/(Ptot(ii) + 1.9*6);
end

```

```
plot(Tispi,COP)
hold on
legend('Tkonu = 25 [°C]', 'Tkonu = 30 [°C]', 'Tkonu = 35 [°C]', 'Tkonu = 40 [°C]', 'Tkonu = 46 [°C]')
xlabel('Tispi [°C]')
ylabel('COP')
```



Slika 17. Ovisnost COP-a o izlaznoj temperaturi vode isparivača

Na slici 17. se vidi ono što je već prije rečeno, da ukoliko raste temperaturna razlika između isparivača i kondenzatora, faktor hlađenja opada. Uzrok je smanjivanje specifične topline isparivanja, a i manja dobava kompresora zbog većeg omjera kompresije.

Faktor hlađenja COP je u prethodnoj analizi prikazan za slučaj punog opterećenja. Međutim, kako rashladnik neće uvijek raditi pri punom opterećenju, valja analizirati i promjenu COP-a kada je opterećenje djelomično. Vrijednost faktora hlađenja za ovaj slučaj daje proizvođač u tablici 3:



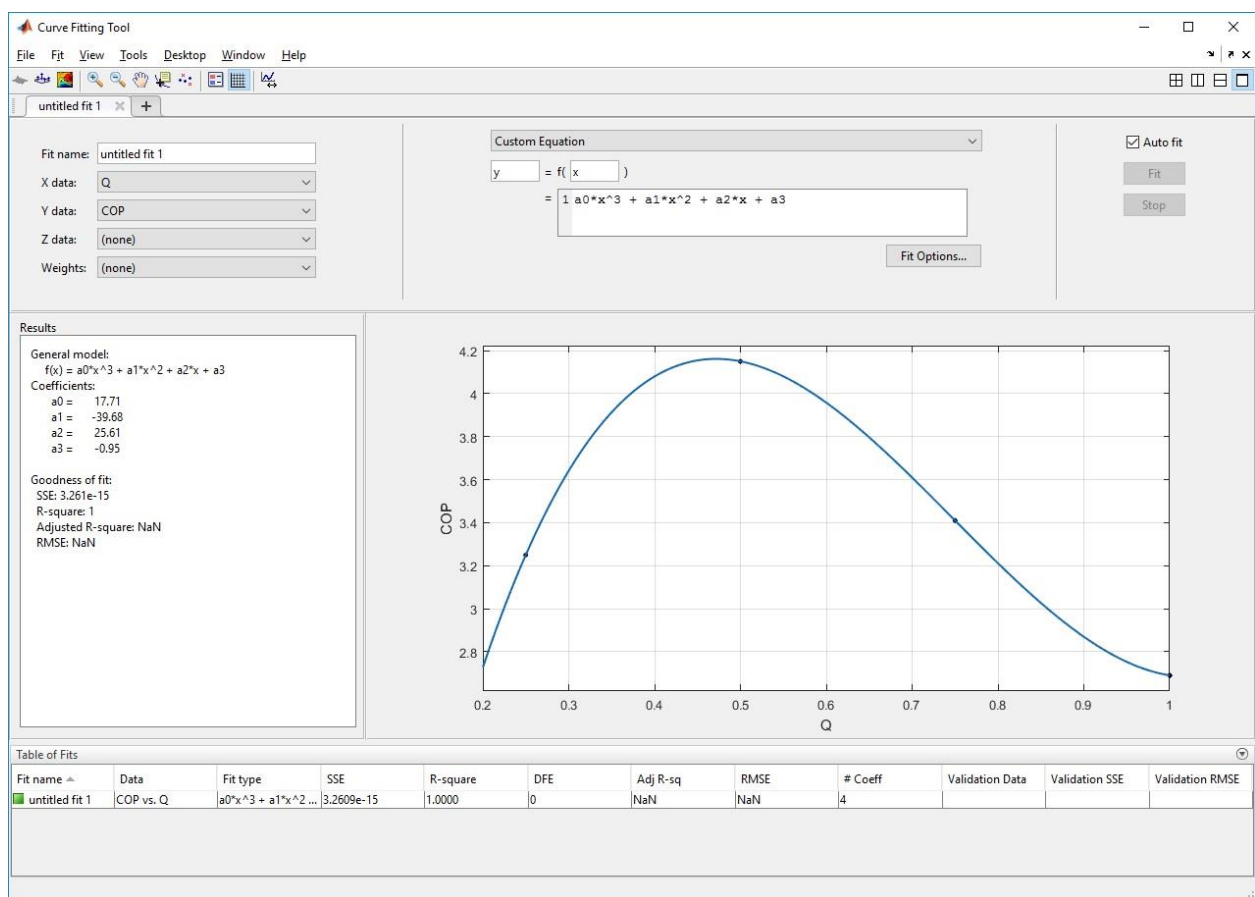
Tablica 3. Radne karakteristike rashladnika pri djelomičnom opterećenju [10]

| Opterećenje % | Qisp [kW] | Ptot [kW] | COP  |
|---------------|-----------|-----------|------|
| 100           | 324.3     | 110.1     | 2.69 |
| 75            | 240       | 59.7      | 3.41 |
| 50            | 160       | 33.1      | 4.15 |
| 25            | 61        | 13.1      | 3.25 |

Ovisnost faktora hlađenja pri djelomičnom opterećenju se može prikazati pomoću sljedećeg koda:

```
COP = [2.69 3.41 4.15 3.25];
Q = [1 0.75 0.5 0.25];
```

```
%curve-fitting COP=f(X)
%COP = a0*x^3 + a1*x^2 + a2*x + a3
```



Slika 18. Ovisnost COP-a pri djelomičnom opterećenju

Na slici 18. se može primjetiti kako faktor hlađenja postiže maksimum pri djelomičnom opterećenju od oko 47%. Većina rashladnih uređaja ima maximum unutar intervala 40-70%.

## 5 ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme, kada je poseban naglasak na uštedi energije, nužno je određivanje uvjeta pri kojima se postiže maksimalna ušteda i optimalan rad rashladnog uređaja. Uštedu i rad uređaja pokazuje faktor hlađenja COP. Sa razvojem tehnologije dolazi i razvoj rashladnih sustava u smislu konstrukcije i manje disipacije energije što podrazumijeva i da će sve veći toplinski učini postati ostvarivi.

Ovim radom pokazan je način kako se provodi analiza rada rashladnika vode. Prvo je teorijski opisan način rada sustava i izraženi su parametri o kojima ovisi efikasnost da bi na kraju analiza bila provedena na stvarnom slučaju. Njezina važnost jest u tome da se na temelju rezultata može donijeti zaključak o njegovom radu i eventualnoj usporedbi sa drugim rashladnicima.

## 6 LITERATURA

- [1] Soldo, V., Ćurko T.: Podloge za predavanja Hlađenje i dizalice topline, FSB, Zagreb, 2011.
- [2] Balen, I.: Predavanja: Klimatizacija, FSB, Zagreb - siječanj 2016.
- [3] Andrassy, M.: Stapni kompresori, FSB, Zagreb, 2004.
- [4] Ćurko, T.: Radne tvari u tehnici hlađenja, Zagreb, 2000.
- [5] <http://www.siox.com/water-chillers.html> - siječanj 2017.
- [6] <http://www.secop.com/products/compressor-basics/hermetic-compressors.html> - siječanj 2017.
- [7] <http://drives.danfoss.hr/newsstories/rc/50-million-t2s-in-50-years/?ref=17179947649#/> - siječanj 2017.
- [8] <http://berg-group.com/products/air-cooled-refrigeration-units/remote-air-cooled-chillers/> - siječanj 2017.
- [9] Braun, J.E.: Methodologies for the Design and Control of Central Cooling Plants, University of Wisconsin-Madison, 1988.
- [10] [http://www.tranevietnam.com/doc\\_viewer.aspx?fileName=/upload/document/RTAD\\_Catalog.pdf](http://www.tranevietnam.com/doc_viewer.aspx?fileName=/upload/document/RTAD_Catalog.pdf) - rujan 2017.