

# Kondenzator rashladnog agregata hlađen optočnom vodom

---

**Filipović, Eugen**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*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:235:273412>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Eugen Filipović

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr.sc. Vladimir Soldo, izv. prof.

Student:

Eugen Filipović

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem dr.sc. Vladimiru Soldi koji je prihvatio mentorstvo te mi ustupio potrebne materijale i stručno me vodio kroz završni rad.

Eugen Filipović



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	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Eugen FILIPOVIĆ** Mat. br.: 0035189033

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kondenzator rashladnog agregata hlađen optočnom vodom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Chiller with water cooled condenser**

Opis zadatka:

Za hlađenje poslovne zgrade na području grada Zagreba koristi se rashladnik vode s kondenzatorom hlađenim optočnom vodom. Nazivno rashladno opterećenje zgrade iznosi 1,2 MW. Radna tvar je R410A. U radu je potrebno analizirati potrošnju vode na rashladnom tornju za ljetni režim rada rashladnog uređaja (od svibnja do rujna). Proračun napraviti na satnoj bazi.

Ulazni podaci za proračun:

- temperaturni režim hlađenja vode 12/7 °C,
- satne vrijednosti rashladnog opterećenja prostora.

Rad treba sadržavati:

1. Načine izvedbe, te prednosti i nedostatke vodom i zrakom hlađenih kondenzatora.
2. Postavku rashladnog procesa i termodinamički proračun vodom hlađenog kondenzatora.
3. Proračun gubitaka vode na rashladnom tornju.
4. Shemu spajanja i automatske regulacije rashladnog sustava.

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

Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 26. veljače 2015.  
**2. rok:** 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
**2. rok:** 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Dr. sc. Vladimir Soldo, izv. prof

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. IZVEDBE KONDENZATORA.....	2
2.1. Kondenzatori hlađeni zrakom .....	2
2.2. Kondenzatori hlađeni vodom .....	4
2.2.1. Kondenzator cijev u cijevi.....	4
2.2.2. Kondenzator s cijevima u plaštu (shell & tube) .....	5
2.2.3. Pločasti kondenzator .....	6
2.2.4. Kondenzator s cijevnom zavojnicom u bubnju .....	6
2.3. Kondenzatori hlađeni optočnom vodom i zrakom .....	7
2.3.1. Kondenzatori u izvedbi s rashladnim tornjem.....	7
2.3.1.1. Protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem .....	9
2.3.1.2. Križni rashladni toranj s induciranim strujanjem .....	10
2.3.1.3. Protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem.....	11
2.3.2. Evaporativni kondenzator .....	11
3. PRORAČUN GUBITAKA VODE NA RASHLADNOM TORNJU .....	14
3.1. Određivanje satnih vrijednosti učina kondenzatora i snage kompresora .....	14
3.2. Određivanje gubitaka vode na rashladnom tornju.....	19
3.3. Gubici vode za svibanj, lipanj, srpanj i rujanj .....	25

---

3.3.1. Svibanj.....	26
3.3.2. Lipanj .....	28
3.3.3. Srpanj .....	30
3.3.4. Rujan .....	32
4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN VODOM HLAĐENOG KONDENZATORA .....	35
4.1. Određivanje točaka rashladnog procesa .....	35
4.2. Proračun shell & tube kondenzatora hlađenog vodom.....	39
4.3. Proračun cjevovoda .....	45
5. SPECIFIKACIJA MATERIJALA I OPREME.....	46
6. ZAKLJUČAK .....	49
LITERATURA .....	50
PRILOZI.....	51

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Temperaturni profil na kondenzatoru .....	1
Slika 2. Kondenzator kućnog hladnjaka .....	2
Slika 3. Shematski prikaz kondenzatora s horizontalnim i s vertikalnim strujanjem zraka .....	3
Slika 4. Spiralni kondenzator .....	4
Slika 5. Shematski prikaz elementnog kondenzatora cijev u cijevi .....	5
Slika 6. Kondenzator s cijevima u plaštu .....	5
Slika 7. Pločasti kondenzator .....	6
Slika 8. Kondenzator s cijevnom zavojnicom .....	6
Slika 9. Kondenzator u izvedbi s rashladnim tornjem .....	7
Slika 10. Prikaz procesa u Mollier-ovom h-x dijagramu .....	8
Slika 11. Protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem .....	10
Slika 12. Križni rashladni toranj s induciranim strujanjem.....	10
Slika 13. Protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem.....	11
Slika 14. Kondenzator s centrifugalnim ventilatorom i aksijalnim ventilatorom .....	12
Slika 16. Grafički prikaz satnih vrijednosti rashladnog opterećenja za mjesec kolovoz .....	14
Slika 17. Dijagram ovisnosti faktora hlađenja (COP) o parcijalnom opterećenju .....	17
Slika 18. Prikaz satnih vrijednosti snage kompresora i rashladnog opterećenja.....	19
Slika 19. Grafički prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. kolovoza .....	22
Slika 20. Ovisnost dodatne količine vode o rashladnom opterećenju.....	23
Slika 21. Grafički prikaz gubitaka vode za pojedini dan u mjesecu kolovoz .....	24
Slika 22. Grafički prikaz mjesečne potrošnje vode na rashladnom tornju za ljetni režim.....	34
Slika 23. Određivanje temperature granice hlađenja u h-x dijagramu .....	35
Slika 24. Shema rashladnog postrojenja .....	36
Slika 25. Prikaz rashladnog procesa u T-s dijagramu .....	37
Slika 26. Prikaz rashladnog procesa u log p-h dijagramu .....	37



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Prednosti i nedostaci zrakom hlađenih kondenzatora .....	3
Tablica 2. Prednosti i nedostaci kondenzatora u izvedbi s rashladnim tornjem .....	9
Tablica 3. Prednosti i nedostaci evaporativnog kondenzatora .....	13
Tablica 4. Satne vrijednosti rashladnog opterećenja prostora za mjesec kolovoz .....	15
Tablica 5. Satne vrijednosti temperatura [°C] za dan 24. kolovoza za grad Zagreb .....	15
Tablica 6. Satne vrijednosti relativne vlažnosti [%] za dan 24. kolovoza za grad Zagreb.....	16
Tablica 7. Prikaz dobivenih rezultata za dan 24. kolovoza koristeći model u Excel-u.....	18
Tablica 8. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. kolovoza .....	21
Tablica 9. Dnevna potrošnja vode za mjesec kolovoz .....	23
Tablica 10. Satne vrijednosti rashladnog opterećenja $\Phi_0$ , [kW] .....	25
Tablica 11. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. svibnja.....	26
Tablica 12. Dnevna potrošnja vode za mjesec svibanj.....	27
Tablica 13. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. lipnja .....	28
Tablica 14. Dnevna potrošnja vode za mjesec lipanj .....	29
Tablica 15. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. srpnja .....	30
Tablica 16. Dnevna potrošnja vode za mjesec srpanj .....	31
Tablica 17. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. rujna .....	32
Tablica 18. Dnevna potrošnja vode za mjesec rujna .....	33
Tablica 19. Veličine stanja rashladnog procesa .....	38
Tablica 20. Preporučljive brzine strujanja freona .....	45
Tablica 21. Odabir dimenzija cjevovoda.....	45

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

ZR-EF-001 Shema spajanja i automatske regulacije

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\Phi$	W	Toplinski tok
A	m <sup>2</sup>	Površina plohe
$\vartheta$	°C	Temperatura
U	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prolaza topline
I	h <sup>-1</sup>	Broj izmjena zraka
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
c	J/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet
h	kJ/kg	Entalpija
$\varphi$	%	Relativna vlažnost zraka
s	kJ/(kgK)	Entropija
q <sub>m</sub>	kg/s	Maseni protok
P	W	Snaga
w	m/s	Brzina
q	W/m <sup>2</sup>	Gustoća toplinskog toka
k	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prolaza topline
p	Pa	Tlak
$\delta$	m	Debljina stjenke cijevi
$\lambda$	W/(m K)	Koeficijent toplinske provodnosti
$\tau$	h	Vrijeme
$\mu$	Pa s	Dinamički viskoznost
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	Kinematčka viskoznost
$\xi$	[-]	Faktor trenja
$\Psi_c$	[-]	Koeficijent orebrenih cijevi

## **SAŽETAK**

U ovom radu analizirana je potrošnja vode na rashladnom tornju za ljetni režim rada rashladnog uređaja koji se koristi za hlađenje poslovne zgrade na području grada Zagreba. Nazivno rashladno opterećenje zgrade iznosi 1,6 MW, a kao radna tvar u sustavu se koristi R134a. Proračun je napravljen na satnoj bazi, a kao ulazni podaci za proračun koristile su se satne vrijednosti rashladnog opterećenja prostora i temperaturni režim hlađenja vode 12/7 °C. U uvodnom dijelu ovog rada ukratko su opisani načini izvedbe, te prednosti i nedostaci vodom i zrakom hlađenih kondenzatora. Osim analize potrošnje vode na rashladnom tornju, napravljen je i termodinamički proračun vodom hlađenog kondenzatora nazivne snage 1,8 MW. Također, napravljen je i proračun svih cjevovoda ovog sustava te su odabrane sve potrebne komponente ovog rashladnika vode. Na kraju rada prikazana je shema spajanja i automatske regulacije rashladnog sustava.

## **SUMMARY**

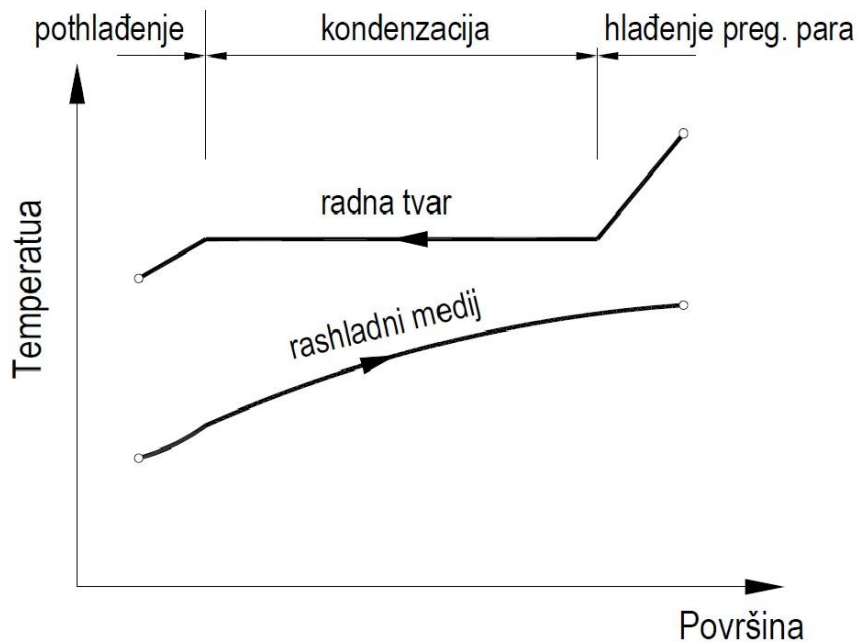
In this paper, the consumption of the cooling tower is being analyzed for the summer operation mode of the cooling system which is used to cool an office building in Zagreb. The nominal cooling capacity of the building is 1,6 MW and R134a is used as a refrigerant in the system. The calculation is based on hourly basis and hourly values of the cooling load and temperature regime of cooling water 12/7°C were used as input data for the calculation. The methods of performance and advantages and disadvantages of water and air-cooled condensers are briefly described in the introductory part of this paper. There is an analysis of water consumption in the cooling tower as well as a thermodynamic calculation of water cooled condenser with 1,8 MW rated power. Moreover, a calculation of all pipelines in this system was made and all necessary components of the chiller were chosen. The merging scheme and automatic regulation of the cooling system is shown at the end of this paper.

## 1. UVOD

Kondenzator je jedan od četiri osnovne komponente kompresijskog rashladnog uređaja na kojemu se toplina kondenzacije radne tvari predaje nekom okolišnom mediju. Toplina kondenzacije je približno jednaka toplinskoj energiji preuzetoj od hlađenog medija na isparivaču uvećanoj za energiju kompresije:

$$\Phi_{kond} \approx \Phi_{isp} + P_{komp}$$

Zadatak kondenzatora je ohladiti pregrijane pare radne tvari do temperature kondenzacije, zatim odvesti toplinu kondenzacije pri tlaku kondenzacije, te na kraju ukapljenu radnu tvar pothladiti za nekoliko stupnjeva.



Slika 1. Temperaturni profil na kondenzatoru

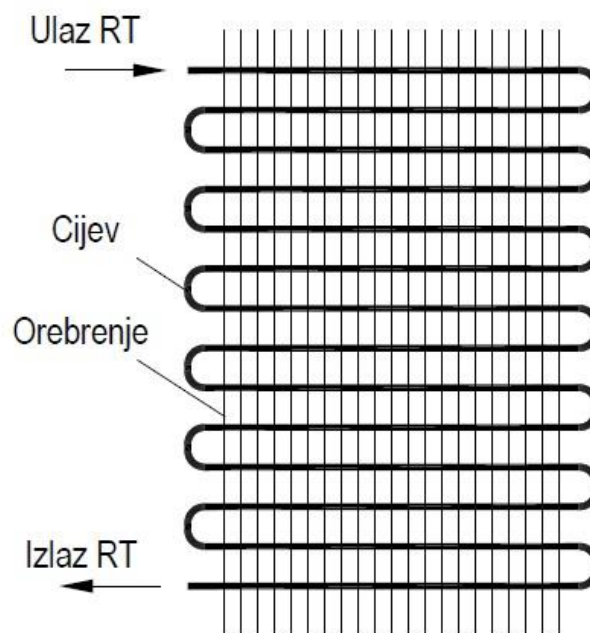
Prema načinu odvođenja topline kondenzacije u rashladnoj tehnici kondenzatori mogu biti:

- kondenzatori hlađeni zrakom
- kondenzatori hlađeni vodom
  - kondenzatori hlađeni protočnom vodom
  - kondenzatori hlađeni optočnom vodom i zrakom
    - kondenzatori u izvedbi s rashladnim tornjem
    - evaporativni kondenzatori

## 2. IZVEDBE KONDENZATORA

### 2.1. Kondenzatori hlađeni zrakom

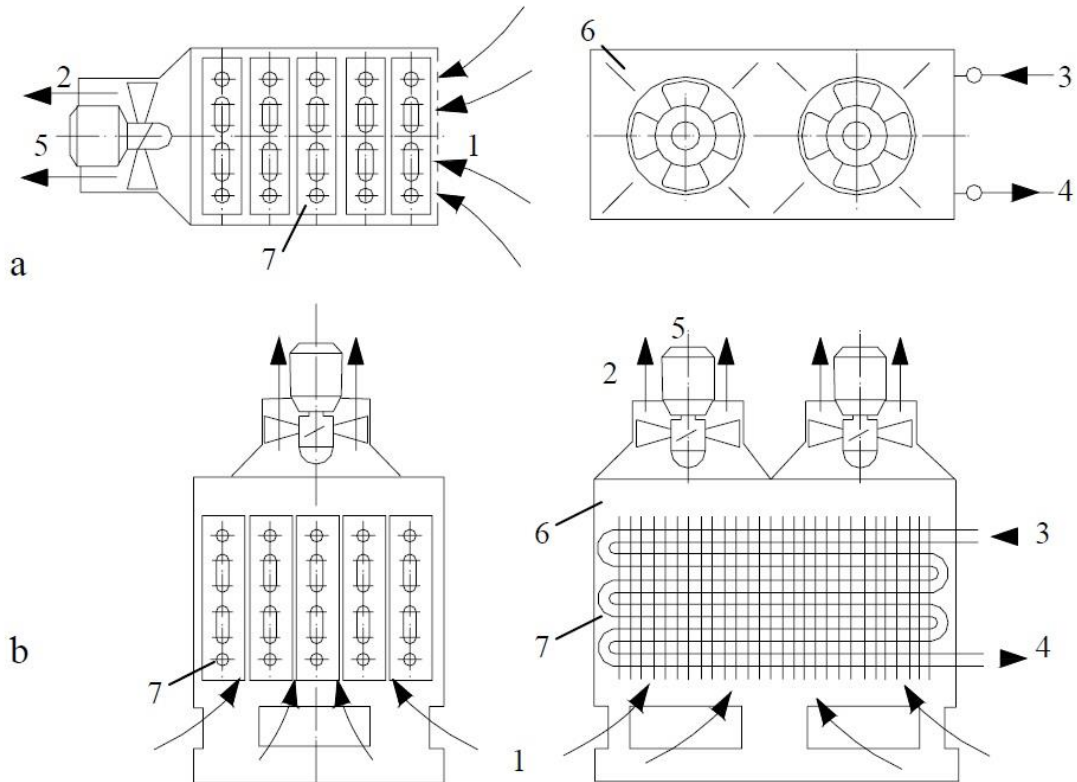
Kako je zrak izuzetno pristupačan toplinski ponor i ne zahtijeva veće ulaganje u održavanje kondenzatora, najveći broj kondenzatora u praksi su hlađeni zrakom. Primjenjuju se za sve veličine rashladnih uređaja na lokacijama gdje na raspolaganju nema dovoljno vode. Pregrijana para radne tvari iz kompresora ulazi u kondenzator pri vrhu uređaja, a rashladni zrak se ventilatorima siše preko izmjenjivačke površine kako bi se osiguralo ravnomjerno strujanje zraka. Kondenzator se obično sastoji od više redova (2 do 6) orebrenih cijevi s lamelama. Na manjim rashladnim uređajima kondenzatori su hlađeni zrakom bez prisilne cirkulacije zraka. Takav primjer imamo kod kondenzatora kućnog hladnjaka, koji se sastoji od bakrene cijevi i orebrenja izvedenog od žice ili uskih lamela.



Slika 2. Kondenzator kućnog hladnjaka

Zbog slabog koeficijenta prijelaza topline na strani zraka, na kondenzatore srednjih i većih kapaciteta ugrađuju se ventilatori kako bi se ostvarila prisilna cirkulacija zraka. S obzirom na smjer strujanja zraka dijelimo ih na kondenzatore s horizontalnim i kondenzatore s vertikalnim prostrujavanjem zraka. Temperatura kondenzacije zrakom hlađenih kondenzatora je obično za 10 do 12°C viša od temperature okoline. Djelovanje ovih kondenzatora znatno ovisi o stanju okolišnog zraka. U ljetnim uvjetima temperatura kondenzacije poraste i do 50°C, pa pri

projektiranju uređaja sa suhim zračnim kondenzatorima to treba uzeti u obzir. Nečiste površine kondenzatora također značajno utječu na povišenje temperature kondenzacije, a time i povećanu potrošnju energije za pogon rashladnog uređaja.



Slika 3. Shematski prikaz kondenzatora a) s horizontalnim b) s vertikalnim strujanjem zraka. 1-ulaz zraka kroz zaštitnu rešetku; 2-izlaz zraka; 3-ulaz pare radne tvari; 4-izlaz kondenzata radne tvari; 5-ventilator s elektromotorom; 6-oplata kondenzatora; 7-orebrena cijevna sekcija

Prednosti	Nedostaci
-jeftina ugradnja i održavanje	-više temperature kondenzacije u odnosu na vodom hlađene kondenzatore
-nije potrebna voda	-za veće kapacitete potrebno je više spojenih jedinica u nizu
-nema problema sa smrzavanjem, kamencem i korozijom	-veći zahtjevi za energijom po kW hlađenja
-nije potrebna cirkulacijska pumpa i priprema vode	-visoka buka i problem onečišćenja površine

Tablica 1. Prednosti i nedostaci zrakom hlađenih kondenzatora



## 2.2. Kondenzatori hlađeni vodom

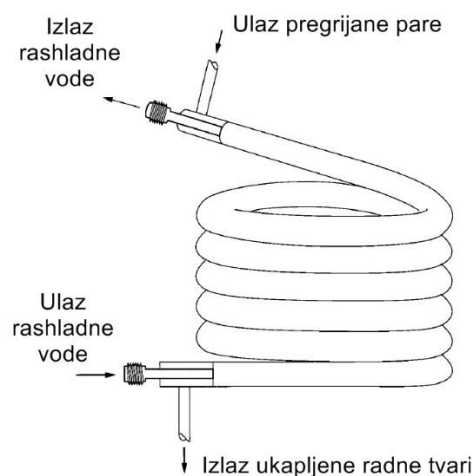
Voda ima znatno veći specifični toplinski kapacitet od zraka, a kad je raspoloživa u prosjeku je niže temperature od zraka što znači da se kod vodom hlađenih kondenzatora postižu niže temperature kondenzacije (niži tlakovi kondenzacije), a time i manja potrošnja energije za pogon kompresora. Ako je dostupna, uglavnom se koristi neposredno jezerska, riječna, podzemna ili morska voda, pa se često moraju ugraditi uređaji za filtraciju vode kako bi se spriječilo onečišćenje cijevi kondenzatora. Kada se radi o metodi jednog prolaska, tada govorimo o protočnim sustavima jer voda ne recirkulira u sustavu, dok kod optočnih sustava jedna te ista voda recirkulira sustavom.

Izvedbe vodom hlađenih kondenzatora su:

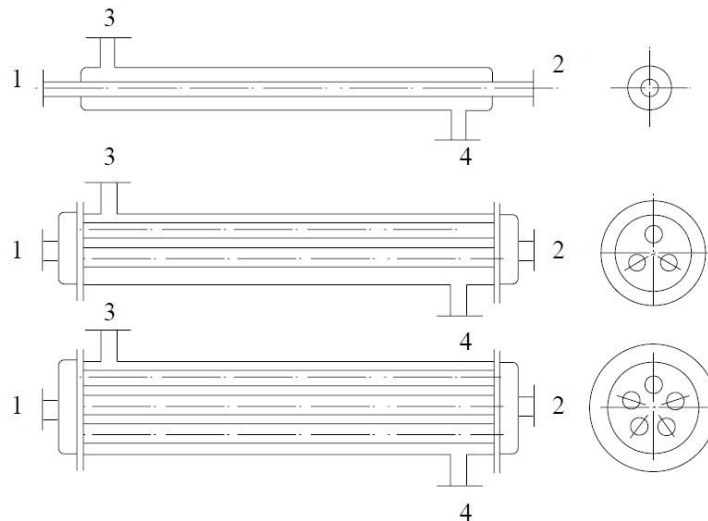
- kondenzator cijev u cijevi
- kondenzator s cijevima u plaštu (shell & tube)
- pločasti kondenzator
- kondenzator s cijevnom zavojnicom u bubnju

### 2.2.1. Kondenzator cijev u cijevi

Ova vrsta kondenzatora koristi se za sustave manjih kapaciteta, obično do 50 kW. Jedna ili više cijevi manjeg promjera nalaze se u vanjskoj cijevi većeg promjera. Kroz unutarnju cijev ili cijevi struji voda, a oko njih u unutrašnjosti vanjske cijevi kondenzira radna tvar. Oko unutarnje cijevi obično je namotana i spiralna traka radi poboljšanja prijelaza topline. Kod višecijevnih kondenzatora poklopci na strani vode trebaju biti demontažni radi čišćenja od vodenog kamenca.



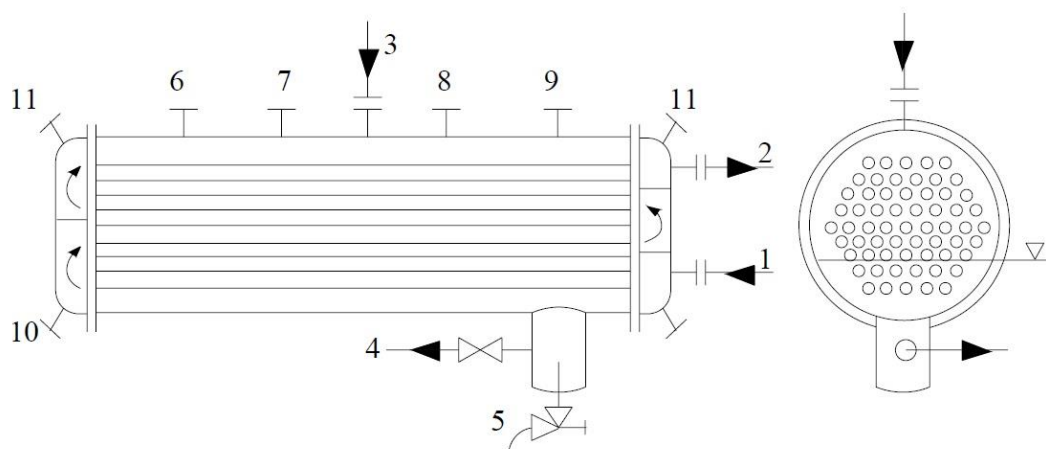
Slika 4. Spiralni kondenzator



Slika 5. Shematski prikaz elementnog kondenzatora cijev u cijevi  
1-ulaz vode; 2-izlaz vode; 3-ulaz pare radne tvari; 4-izlaz kapljevite radne tvari

### 2.2.2. Kondenzator s cijevima u plaštu (shell & tube)

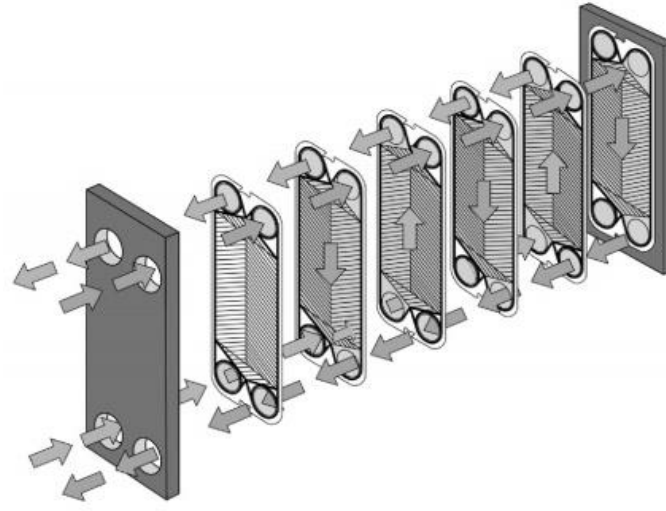
Kondenzatori s cijevima u plaštu su najraširenija vrsta kondenzatora i mogu se izrađivati u svim veličinama. Koristi se u industrijskim postrojenjima i klimatizacijskim sustavima kapaciteta do 2000 kW. Radna tvar kondenzira na snopu cijevi, a voda protječe kroz cijevi u jednom ili više prolaza. Na snopu cijevi u kondenzatorskom dijelu odvija se filmska kondenzacija, dok je na potopljenom snopu cijevi u pothlađivačkom dijelu slobodna konvekcija. Uobičajene su izvedbe s ravnim cijevima u horizontalnoj izvedbi. Tamo gdje je na raspolaganju mali tlocrtni prostor za smještaj cijevi mogu biti vertikalne, ali to smanjuje koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari.



Slika 6. Kondenzator s cijevima u plaštu: 1-ulaz vode; 2-izlaz vode; 3-ulaz pare RT; 4-izlaz kapljevite RT; 5-ispust ulja; 6-priključak za sigurnosne ventile; 7-izjednačenje tlaka; 8-priključak za manometar; 9-odvod nekondenzirajućih plinova; 10-ispust vode; 11-odračivanje

### 2.2.3. Pločasti kondenzator

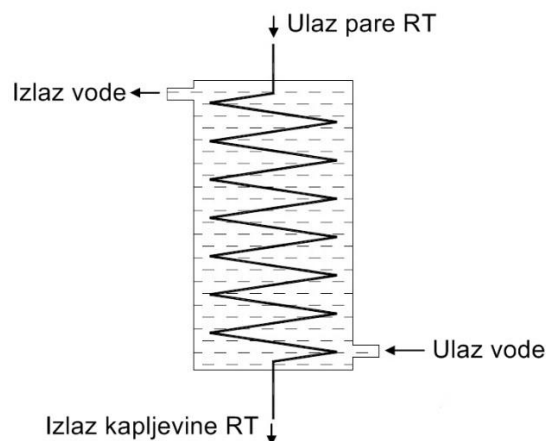
Za pločaste kondenzatore karakterističan je jako veliki prijenos topline, pa stoga oni imaju visok učinak i jako mali volumen. Radna tvar kondenzira u svakom drugom međuprostoru a voda ulazi u ostale međuprostore i preuzima toplinu kondenzacije. Velik problem ovih kondenzatora su kamenac i nečistoće te se zbog toga izrađuju u rastavljivoj izvedbi kako bi se olakšalo čišćenje.



Slika 7. Pločasti kondenzator

### 2.2.4. Kondenzator s cijevnom zavojnicom u bubnju

Rade se za male toplinske učinke (1 do 5 kW) i najjednostavnije rashladne uređaje. Moguće je korištenje topline vode ugrijane u bubnju (npr. potrošna voda). Nedostatak je relativno velik pad tlaka radne tvari koja struji kroz cijevnu zavojnicu i mali koeficijent prijelaza topline sa strane vode. Ovaj se koeficijent može povećati dodavanjem miješalice.



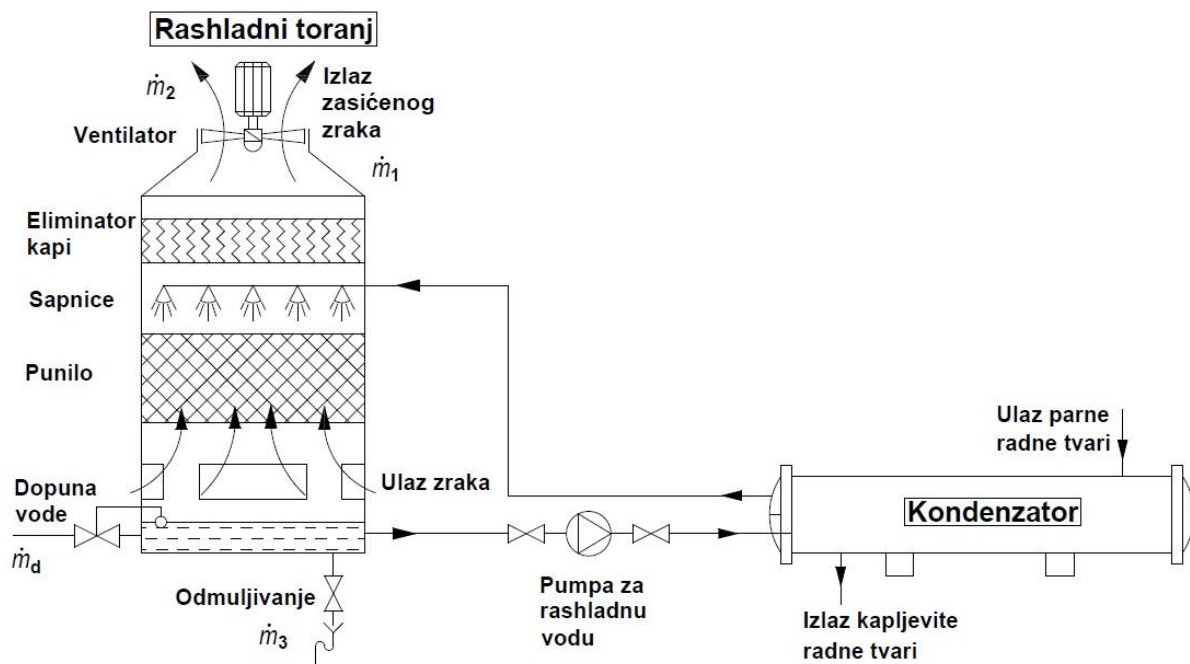
Slika 8. Kondenzator s cijevnom zavojnicom

## 2.3. Kondenzatori hlađeni optočnom vodom i zrakom

Kako nije uvijek moguće imati na raspolaganju dovoljnu količinu protočne vode i graditi rashladne sustave uz rijeke, jezera ili mora, koriste se kondenzatori hlađeni optočnom vodom, bilo u izvedbi s rashladnim tornjem ili u izvedbi evaporativnog kondenzatora. Ovi kondenzatori zahtijevaju brižnu kemijsku pripremu vode i veća sredstva za održavanje sustava.

### 2.3.1. Kondenzatori u izvedbi s rashladnim tornjem

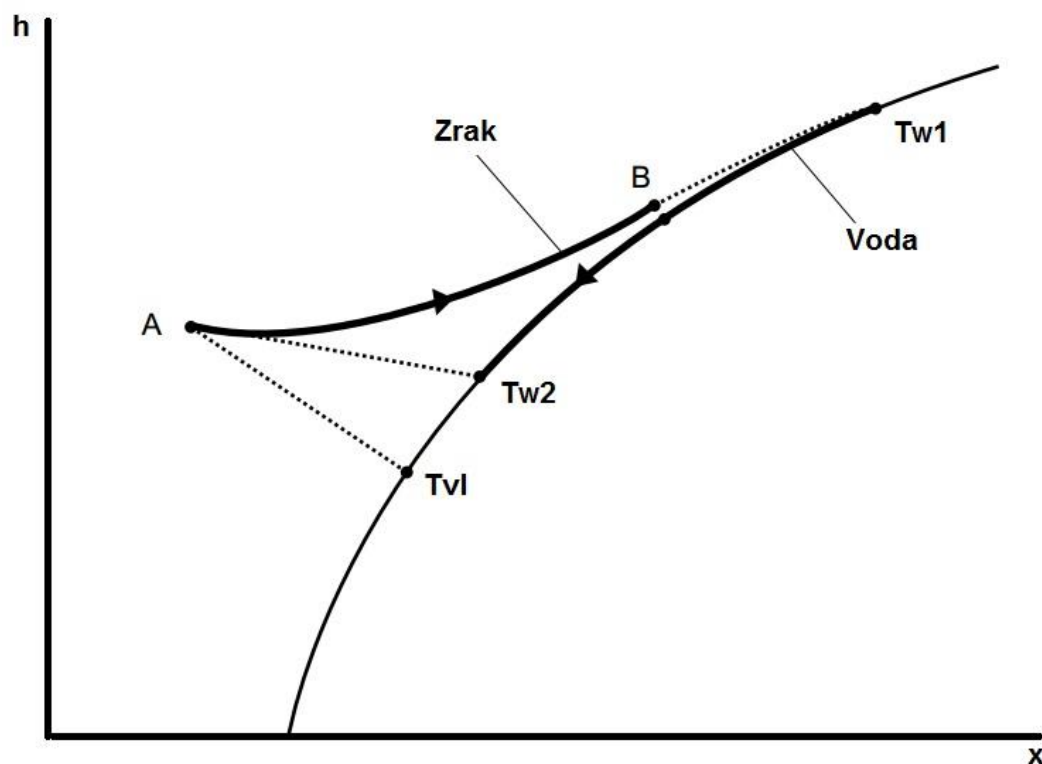
Rashladni toranj služi za odbacivanje topline kod vodom hlađenog kondenzatora većih sustava hlađenja, klimatizacije i sustava u procesnoj industriji. Potrošnja vode u rashladnom tornju je samo oko 5% potrošnje u protočnim sustavima s jednim prolazom, što ovaj sustav čini najjeftinijim za rad s vodom koja se plaća. Kondenzator je smješten u strojarnici, dok je rashladni toranj u slobodnoj okolini. Ispuna tornja služi za stvaranje velike površine za izmjenu topline i tvari, a iza ispune se obično stavlja i eliminator kapljica kako bi se smanjili gubici vode.



Slika 9. Kondenzator u izvedbi s rashladnim tornjem

Voda koja izlazi iz kondenzatora, ulazi odozgo u rashladni toranj te se raspršuje preko ispune rashladnog tornja pri čemu se hladi na nižu temperaturu efektom ishlapljivanja. Zrak se pritom zasićuje i izbacuje u okolinu, a preostala voda se ohlađena vraća natrag u sustav. Toplinski učinak rashladnog tornja prije svega ovisi o temperaturi vlažnog termometra ulaznog zraka, jer

se na rashladnom tornju voda može ohladiti na 3-4°C iznad temperature vlažnog termometra okoliša. Temperatura suhog termometra i relativna vlažnost ulaznog zraka uzeti neovisno, imaju neznatan utjecaj na toplinski učinak rashladnih tornjeva s prisilnim strujanjem, ali utječu na količinu ishlapljene vode unutar rashladnog tornja. Voda se u rashladnom tornju ne može ohladiti niže od temperature vlažnog termometra okolišnog zraka. Dakle, što je zrak manje relativne vlažnosti, moći će se dostići niža temperatura vode na izlazu iz rashladnog tornja. Uobičajena temperatura rashladne vode na ulazu u toranj kreće se u rasponu od 27 do 33°C, a promjena temperature vode je od 4 do 7°C. Za uobičajene klimatske uvjete u Hrvatskoj od 32 do 35°C temperature vanjskog zraka i relativne vlažnosti 45%, temperaturni režim vode na kondenzatoru iznosi približno 29/33°C. Pri tome temperatura kondenzacije iznosi između 36 i 39°C. U usporedbi sa zrakom hlađenim kondenzatorima kod kojih temperatura kondenzacije za navedene uvjete iznosi približno 45°C, kod rashladnih sustava s vodom hlađenim kondenzatorima postiže se znatno bolja učinkovitost.



Slika 10. Prikaz procesa u Mollier-ovom h-x dijagramu

U radu rashladnih tornjeva za odvođenje topline javljaju se gubici vode koje je potrebno nadoknaditi dodavanjem svježe vode u recirkulirajući sustav. Ta voda se kemijski priprema

dodavanjem kemikalija poput klora ili sulfatne kiseline kako bi se stalno osigurale čiste površine sustava (bez taloženja mulja i kamenca) te spriječilo nastajanje biološkog taloga. Gubitak vode na rashladnom tornju iznosi od 2 do 5% od optočne vode na rashladnom tornju. Potrebna masa dodatne vode ( $\dot{m}_d$ ) jednaka je zbroju mase vode koja je ishlapila ( $\dot{m}_1$ ), mase vode koja je odnešena strujom zraka ( $\dot{m}_2$ ) i mase vode koja je potrebna za odmuljivanje ( $\dot{m}_3$ ).

$$\dot{m}_d = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Prednosti	Nedostaci
-niža temperatura kondenzacije od zrakom hlađenih kondenzatora	-kemijska priprema vode
-manja potrošnja energije	-visoki investicijski troškovi i troškovi održavanja
-manja duljina cjevovoda s radnom tvari	-zauzimanje prostora
-koristi se za veće sustave	-ovisnost o stanju okoliša i opasnost od smrzavanja

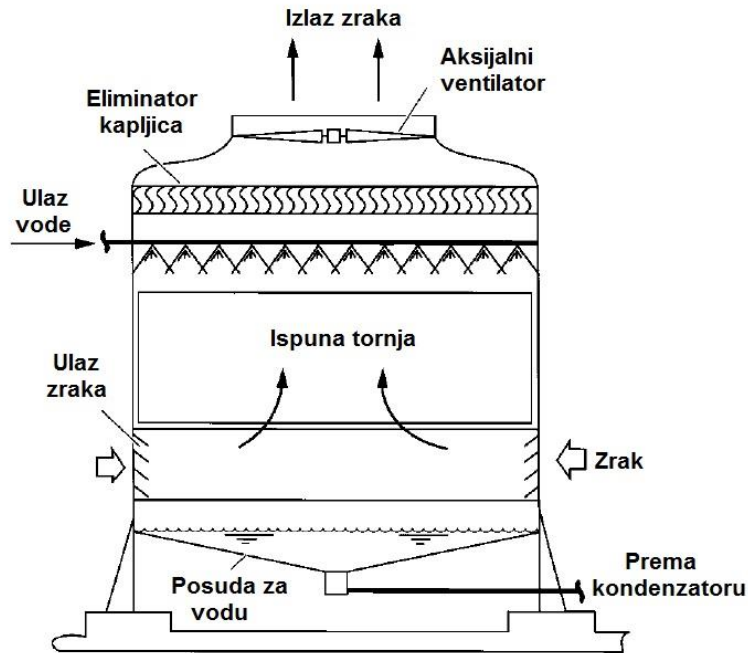
Tablica 2. Prednosti i nedostaci kondenzatora u izvedbi s rashladnim tornjem

Rashladni tornjevi s prisilnim strujanjem mogu se prema izvedbi svrstati u sljedeće kategorije:

- protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem
- križni rashladni toranj s induciranim strujanjem
- protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem

### 2.3.1.1. Protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem

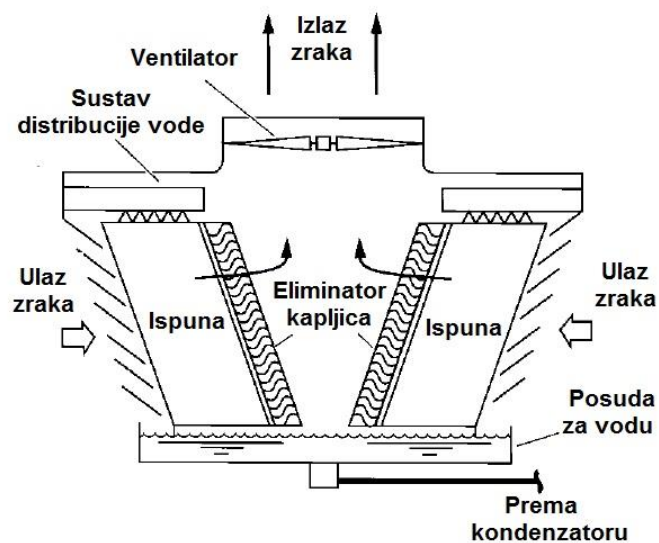
Kod ove izvedbe rashladnog tornja aksijalni ventilator je smješten niz struju zraka i nalazi se na izlazu, pri vrhu uređaja. Zrak ulazi pri dnu tornja i vertikalno struji kroz ispune tornja prema vrhu. Voda se preko sapnica raspršuje i vertikalno slijeva niz ispunu tornja te se na taj način ostvaruje protusmjerno strujanje.



Slika 11. Protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem

### 2.3.1.2. Križni rashladni toranj s induciranim strujanjem

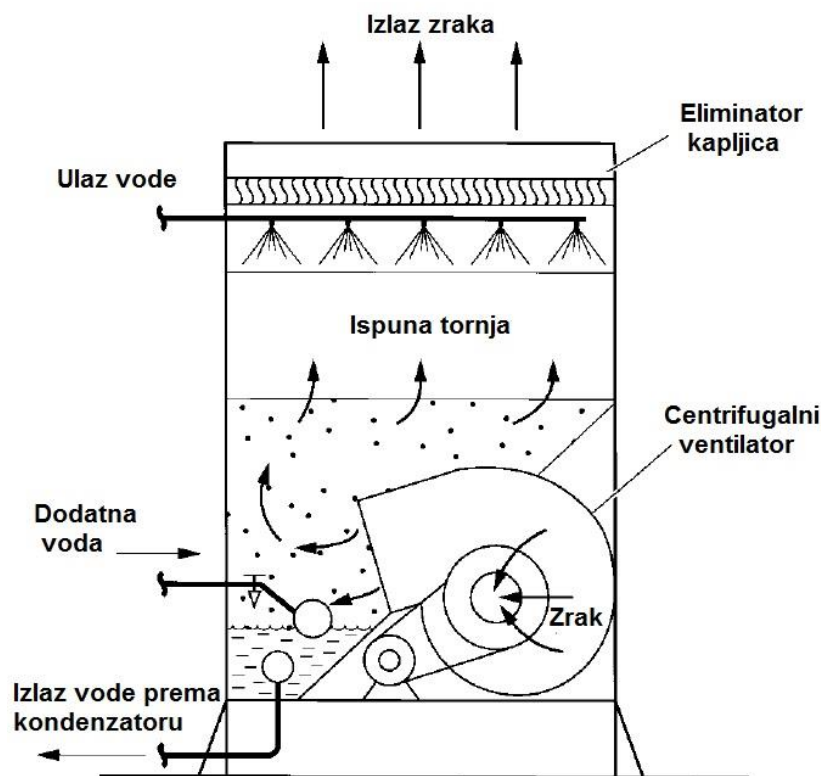
Kod ove izvedbe rashladnog tornja aksijalni ventilator je smješten na vrhu (izlazu) uređaja. Zrak ulazi s bočne strane te vodoravno struji kroz ispunu i eliminator kapljica. Zrak se zatim usmjerava prema gore i izlazi pri vrhu uređaja. Raspršena voda se vertikalno slijeva niz ispunu i ostvaruje križno strujanje sa zrakom. Križni tornjevi s induciranim strujanjem imaju veću površinu za ulaz zraka i niže su izvedbe za razliku od protustrujnih tornjeva. Negativna strana ove izvedbe je povećan rizik od recirkulacije istrošenog zraka iz tornja.



Slika 12. Križni rashladni toranj s induciranim strujanjem

### 2.3.1.3. Protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem

Glavna razlika ovog rashladnog tornja u odnosu na protusmjerni s induciranim strujanjem je u smještaju ventilatora. U ovom slučaju ventilator (centrifugalni) nalazi se na dnu tornja gdje usisava, usmjerava i ispuhuje zrak kroz ispunu tornja. Ovi rashladni tornjevi koriste se uglavnom kod malih i srednje velikih postrojenja. Posljedica ovakvog smještaja ventilatora je smanjenje vibracija (zbog nižeg težišta), bolji efekt ishlapljivanja iz sabirne posude i nejednolika raspodjela strujanja zraka kroz ispunu.



Slika 13. Protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem

### 2.3.2. Evaporativni kondenzator

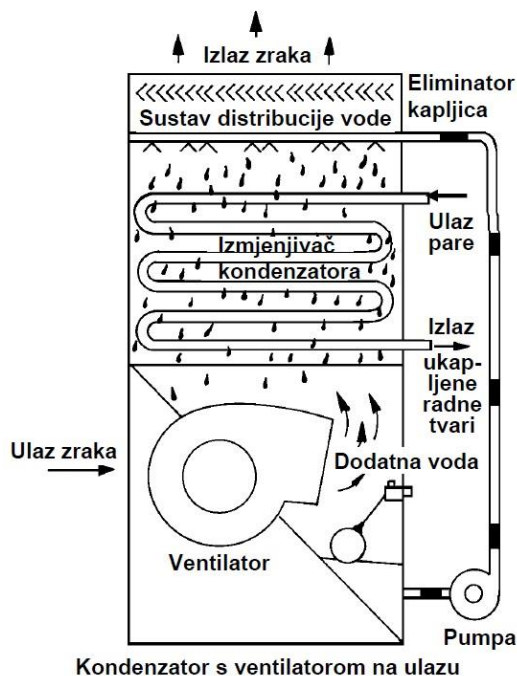
Evaporativni kondenzatori spadaju u skupinu zatvorenih recirkulirajućih sustava za odvođenje topline i najčešći u primjeni su:

- kondenzator s aksijalnim ventilatorom na izlazu
- kondenzator s centrifugalnim ventilatorom na ulazu

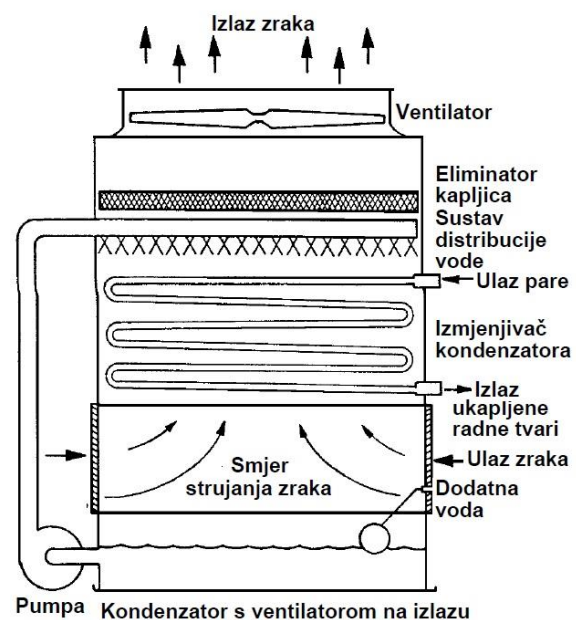
Kod evaporativnog kondenzatora izmjenjivačku površinu čine orebrene cijevi koje su s vanjske strane oplakivane optočnom vodom i nasmrujane zrakom, dok se unutar cijevi odvija



kondenzacija radne tvari. Rad i djelovanje evaporativnog kondenzatora je gotovo identično radu rashladnog tornja. Glavna razlika je to što voda kod evaporativnog kondenzatora oplakuje visokotlačni cjevovod radne tvari tako da radna tvar kondenzira direktno u tornju. Stoga kod evaporativnih kondenzatora imamo jedan izmjenjivač manje pa ujedno i bolji učinak uz manje dimenzije. U usporedbi sa zrakom hlađenim kondenzatorom, evaporativnom kondenzatoru je potrebna manja površina izmjenjivača i manji protok zraka za odvođenje iste količine topline, ili se alternativno može postići veća učinkovitost radom pri nižim temperaturama kondenzacije. Ovi kondenzatori postižu čak za 3 do 5°C manju temperaturu kondenzacije od kondenzatora u izvedbi s rashladnim tornjem. Svi evaporativni kondenzatori, kao i rashladni tornjevi, moraju se kemijski tretirati kako bi se ograničilo razvijanje mikroorganizama, a uz to smanjilo taloženje kamenca i spriječila korozija uređaja. Količina ishlapljene vode se kreće u rasponu od 0,5 do 0,6 ml/s po kW hlađenja, a uz to se gubi i manja količina vode odnošenjem kapljica kroz eliminator. Uz kvalitetno pripremljenu vodu, gubici vode uslijed odmuljivanja su do polovice količine vode koja ishlapi, a ukupna potrošnja vode kreće se od 0,7 do 0,9 ml/s po kW hlađenja. U našem slučaju, što će biti pokazano kasnijim proračunom, ukupna potrošnja vode iznosi u prosjeku 0,75 ml/s po kW hlađenja što je u granicama iskustvenih vrijednosti. Regulacija učinka evaporativnih kondenzatora može se postići diskontinuiranim pogonom ventilatora ili modulirajućom zaklopkom u struji zraka za smanjenje protoka.



Slika 14. Kondenzator s centrifugalnim ventilatorom



Slika 15. Kondenzator s aksijalnim ventilatorom

<b>Prednosti</b>	<b>Nedostaci</b>
-niža temperatura kondenzacije od izvedbe s rashladnim tornjem	-otežano održavanje cijevnih sekcija kondenzatora
-manja količina vode u odnosu na izvedbu s rashladnim tornjem	-vođenje visokotlačnog cjevovoda do tornja (veće punjenje radne tvari)
-manja snaga pumpe	-kemijska priprema vode
-manje dimenzije tornja i cijevi za vodu u odnosu na rashladni toranj	-veći investicijski troškovi
-visoka učinkovitost	-ovisnost o stanju okoliša
-manja površina izmjenjivača i manji protok zraka	-problemi sa smrzavanjem

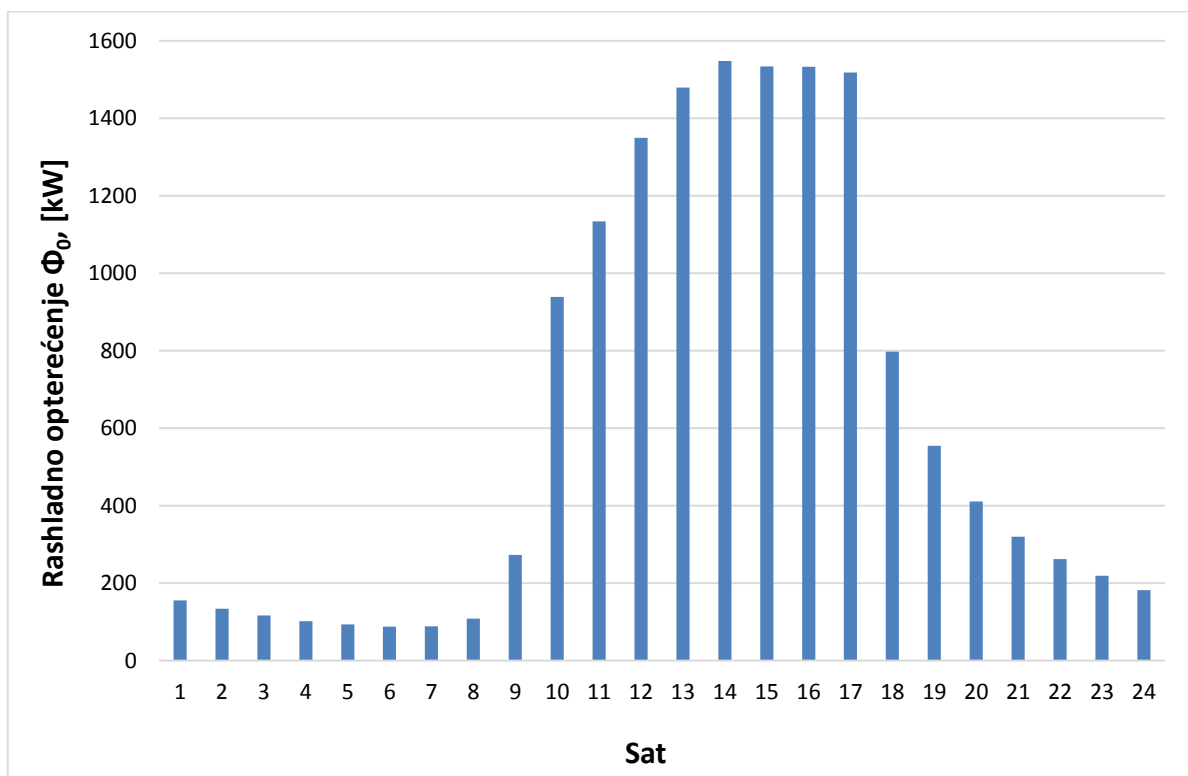
Tablica 3. Prednosti i nedostaci evaporativnog kondenzatora

### 3. PRORAČUN GUBITAKA VODE NA RASHLADNOM TORNJU

U ovom radu, zadatak je bio analizirati potrošnju vode na rashladnom tornju za ljetni režim rada rashladnog uređaja na satnoj bazi. Rashladnik vode s kondenzatorom hlađenim optočnom vodom koristi se za hlađenje poslovne zgrade na području grada Zagreba, čije opterećenje iznosi 1,6 MW. Proračun gubitaka vode na rashladnom tornju rađen je na satnoj bazi za mjesec kolovoz a kao karakterističan dan odabran je 24. kolovoza na čijem primjeru ćemo objasniti postupak proračuna. Model proračuna gubitaka vode napravljen je u programu Microsoft Excel, a kao ulazni podaci za proračun koristili su se temperaturni režim hlađenja vode 12/7 °C, te satne vrijednosti rashladnog opterećenja.

#### 3.1. Određivanje satnih vrijednosti učina kondenzatora i snage kompresora

Satne vrijednosti rashladnog opterećenja prostora za mjesec kolovoz prikazane su grafički (slika 16.) i tablično (tablica 4.).



Slika 16. Grafički prikaz satnih vrijednosti rashladnog opterećenja za mjesec kolovoz

Sat	Rashladno opterećenje $\Phi_0$ , [kW]
1	155,9
2	133,9
3	116,5
4	102,1
5	93,3
6	87,8
7	89,1
8	108,5
9	273,2
10	938,4
11	1133,5
12	1349,1
13	1478,8
14	1547,8
15	1533,5
16	1533,2
17	1518,3
18	797,6
19	554,8
20	411,0
21	320,2
22	262,2
23	218,9
24	182,4

Tablica 4. Satne vrijednosti rashladnog opterećenja prostora za mjesec kolovoz

Kako bi mogli odrediti snagu kompresora i učin kondenzatora, koristeći *Prilog E, Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* [6], očitali smo satne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti za grad Zagreb za mjesec kolovoz, a njihove vrijednosti za dan 24. kolovoza dane su u tablici 5 i 6.

	$\vartheta_0$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_4$	$\vartheta_5$	$\vartheta_6$	$\vartheta_7$	$\vartheta_8$	$\vartheta_9$	$\vartheta_{10}$
24. kolovoza	23,6	22,8	21,9	21	20,2	20,4	23,7	26,3	28	30,7	33

$\vartheta_{11}$	$\vartheta_{12}$	$\vartheta_{13}$	$\vartheta_{14}$	$\vartheta_{15}$	$\vartheta_{16}$	$\vartheta_{17}$	$\vartheta_{18}$	$\vartheta_{19}$	$\vartheta_{20}$	$\vartheta_{21}$	$\vartheta_{22}$	$\vartheta_{23}$
34,3	35,3	36,2	36,5	36,1	36	34,8	30,9	27,1	25,1	23,6	22,3	21,4

Tablica 5. Satne vrijednosti temperatura [°C] za dan 24. kolovoza za grad Zagreb

	$\varphi_0$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	$\varphi_7$	$\varphi_8$	$\varphi_9$	$\varphi_{10}$
24. kolovoza	68	79	76	79	80	79	67	56	53	45	37

$\varphi_{11}$	$\varphi_{12}$	$\varphi_{13}$	$\varphi_{14}$	$\varphi_{15}$	$\varphi_{16}$	$\varphi_{17}$	$\varphi_{18}$	$\varphi_{19}$	$\varphi_{20}$	$\varphi_{21}$	$\varphi_{22}$	$\varphi_{23}$
32	27	25	20	20	21	22	36	51	58	67	72	76

Tablica 6. Satne vrijednosti relativne vlažnosti [%] za dan 24. kolovoza za grad Zagreb

U ovom modelu, za regulaciju protoka vode kroz kondenzator, korištena je fiksna temperaturna razlika između temperature vode na ulazu u kondenzator, odnosno temperature na izlazu iz rashladnog tornja i temperature vlažnog termometra od 3 °C ( $\vartheta_{wk1} - \vartheta_{GH} = 3^\circ\text{C}$ ). Stoga smo iz očitanih satnih vrijednosti temperature okoliša i relativne vlažnosti, koristeći empirijsku formulu koju je Roland Stull dao u svom znanstvenom radu *Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature* [7], računali satne vrijednosti temperature vlažnog termometra:

$$\vartheta_{GH} = \vartheta \cdot \arctan \left[ 0,151977(\varphi + 8,313659)^2 \right] + \arctan(\vartheta + \varphi) - \arctan(\varphi - 1,676331) \\ + 0,00391838 \cdot (\varphi)^{\frac{3}{2}} \cdot \arctan(0,023101 \cdot \varphi) - 4,686035$$

Pošto znamo da se voda u tornju može ohladiti na temperaturu 3 do 4 °C višu od temperature vlažnog termometra okoliša, lako smo izračunali temperaturu vode na izlazu iz tornja, odnosno na ulazu u kondenzator:

$$\vartheta_{wk1} = \vartheta_{GH} + 3^\circ\text{C}$$

Iz podatka da se voda u kondenzatoru zagrije za 5 °C, dobivamo temperaturu vode na izlazu iz kondenzatora, odnosno na ulazu u toranj koristeći sljedeći izraz:

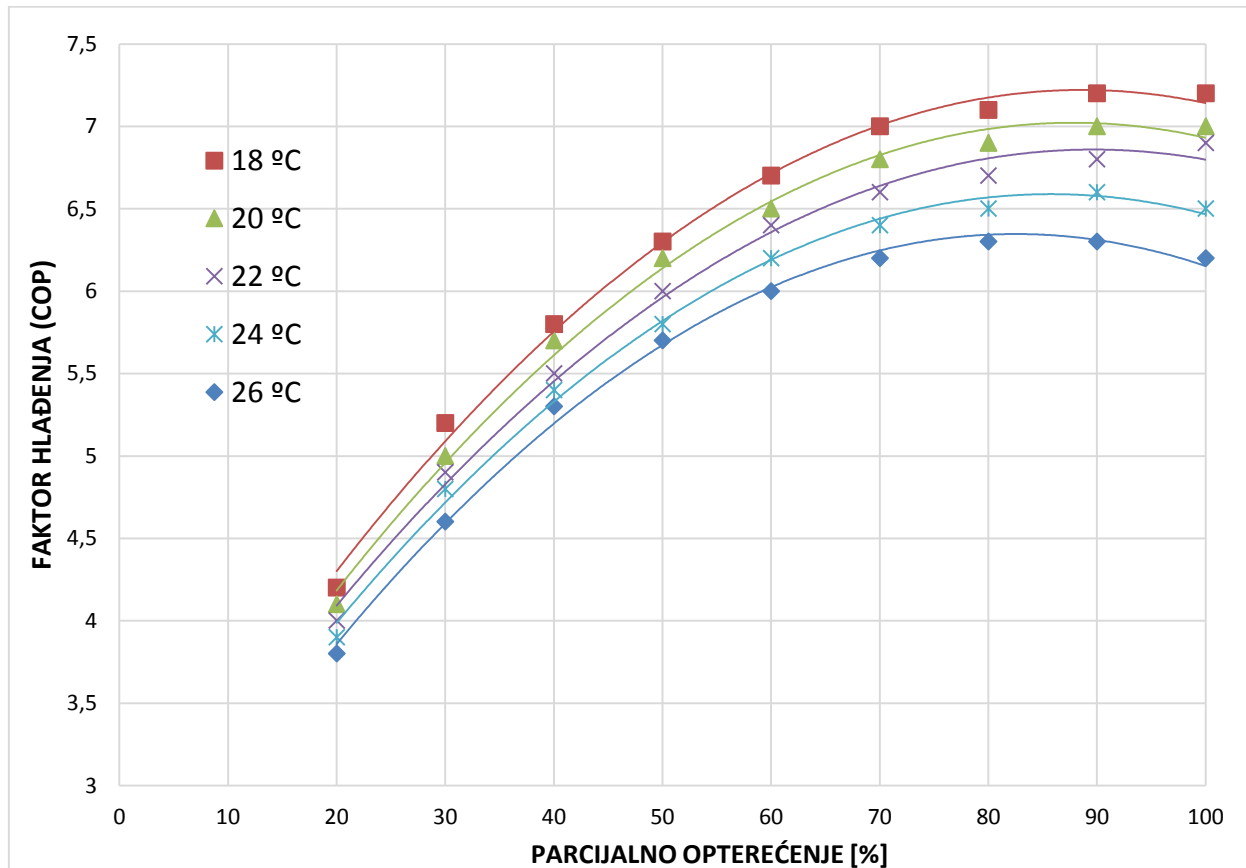
$$\vartheta_{wk2} = \vartheta_{wk1} + 5^\circ\text{C}$$

Da bi došli do učina kondenzatora pri različitim parcijalnim opterećenjima, korišteni su podaci o rashladnom agregatu kojeg su F. W. Yu i K. T. Chan koristili u svojim istraživanjima i koji je opisan u njihovom znanstvenom radu *Optimization of water-cooled chiller system with load-based speed control* [8]. Karakteristike korištenog rashladnog agregata su sljedeće:

- Nominalni rashladni kapacitet: 1600 kW
- Nominalna snaga kompresora: 280,7 kW
- COP pri nazivnom opterećenju: 5,7
- Temperaturni režim hlađenja vode: 12/7 °C

- Nominalni protok hladene vode: 72 l/s
- Temperaturni režim vode kroz kondenzator: 33/38 °C
- Nominalni protok vode kroz kondenzator: 87 l/s

Za određivanje učina kondenzatora pri parcijalnom opterećenju prethodno opisanog rashladnog agregata korišten je dijagram ovisnosti faktora hlađenja (COP) o parcijalnom opterećenju za različite temperature vode na ulazu u kondenzator (slika 17.).



Slika 17. Dijagram ovisnosti faktora hlađenja (COP) o parcijalnom opterećenju za različite temperature vode na ulazu u kondenzator

Pomoću ovog dijagrama jednostavno smo interpolacijom u Excel-u dobili sve satne vrijednosti faktora hlađenja za različita parcijalna opterećenja, a korištenjem tog faktora izračunali smo snagu kompresora te na kraju i učinak kondenzatora za svaki sat. Snaga kompresora se računa prema sljedećoj formuli:

$$P = \frac{\Phi_0}{COP}$$

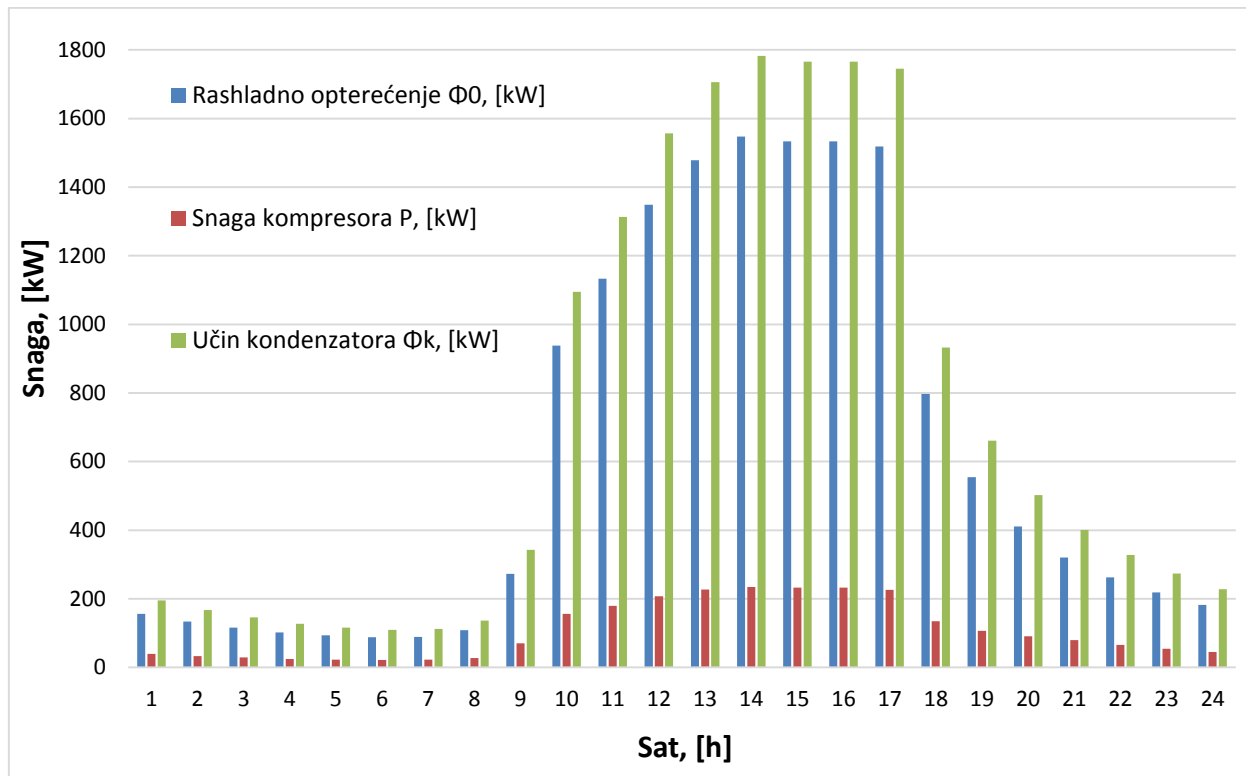
Učinak kondenzatora računamo kao zbroj rashladnog opterećenja i snage kompresora:

$$\Phi_k = \Phi_0 + P$$

Sat	Rashladno opterećenje $\Phi_o$ , [kW]	Temp. vlažnog termometra $\vartheta_{GH}$ , [°C]	Temp. vode na ulazu u kond. $\vartheta_{wk1}$ , [°C]	Temp. vode na izlazu iz kond. $\vartheta_{wk2}$ , [°C]	Parcijalno opterećenje [%]	COP	Snaga kompresora P, [kW]	Učinak kondenzatora $\Phi_k$ , [kW]
1	155,9	20,1	23,1	28,1	10	3,9	40,0	195,9
2	133,9	18,8	21,8	26,8	8	4,0	33,5	167,4
3	116,5	18,4	21,4	26,4	7	4,0	29,1	145,6
4	102,1	17,7	20,7	25,7	6	4,1	24,9	127,0
5	93,3	17,8	20,8	25,8	6	4,1	22,8	116,1
6	87,8	19,3	22,3	27,3	5	4,0	22,0	109,8
7	89,1	20,1	23,1	28,1	6	3,9	22,8	111,9
8	108,5	21,1	24,1	29,1	7	3,9	27,8	136,3
9	273,2	22,0	25,0	30,0	17	3,9	70,1	343,3
10	938,4	22,2	25,2	30,2	59	6,0	156,4	1094,8
11	1133,5	22,1	25,1	30,1	71	6,3	179,9	1313,4
12	1349,1	21,6	24,6	29,6	84	6,5	207,6	1556,7
13	1478,8	21,7	24,7	29,7	92	6,5	227,5	1706,3
14	1547,8	20,3	23,3	28,3	97	6,6	234,5	1782,3
15	1533,5	20,1	23,1	28,1	96	6,6	232,3	1765,8
16	1533,2	20,3	23,3	28,3	96	6,6	232,3	1765,5
17	1518,3	19,8	22,8	27,8	95	6,7	226,6	1744,9
18	797,6	20,4	23,4	28,4	50	5,9	135,2	932,8
19	554,8	20,0	23,0	28,0	35	5,2	106,7	661,5
20	411,0	19,3	22,3	27,3	26	4,5	91,3	502,3
21	320,2	19,2	22,2	27,2	20	4,0	80,1	400,3
22	262,2	18,7	21,7	26,7	16	4,0	65,6	327,8
23	218,9	18,4	21,4	26,4	14	4,0	54,7	273,6
24	182,4	19,4	22,4	27,4	11	4,0	45,6	228,0

Tablica 7. Prikaz dobivenih rezultata za dan 24. kolovoza koristeći model u Excel-u

U tablici 7. prikazani su rezultati dobiveni korištenjem modela u Excel-u, a na slici 18. možemo vidjeti grafički prikaz satnih vrijednosti rashladnog opterećenja, snage kompresora i učinka kondenzatora.



Slika 18. Prikaz satnih vrijednosti snage kompresora, učina kondenzatora i rashl. opterećenja

### 3.2. Određivanje gubitaka vode na rashladnom tornju

Za daljnji nastavak proračuna koristit ćemo satne vrijednosti učina kondenzatora iz kojih ćemo računat protok kroz kondenzator, odnosno kroz rashladni toranj pomoću sljedeće formule:

$$\dot{m}_{wk} = \frac{\Phi_k}{c_w \cdot (\vartheta_{wk2} - \vartheta_{wk1})} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$c_w = 4,18 \frac{kJ}{kg K}$$

Nakon što smo izračunali satne vrijednosti protoka, preostaje nam još samo izračunati gubitke vode na rashladnom tornju te potrebnu masu dodatne vode. Potrebna masa dodatne vode ( $\dot{m}_d$ ) jednaka je zbroju mase vode koja je ishlapila ( $\dot{m}_1$ ), mase vode koja je odnesena strujom zraka ( $\dot{m}_2$ ) i mase vode koja je potrebna za odmuljivanje ( $\dot{m}_3$ ).

$$\dot{m}_d = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$



Maseni tok vode koja je ishlapila  $\dot{m}_1$  iznosi približno 1 do 2 % masenog toka vode u sustavu i može se izračunati sljedećim izrazom:

$$\dot{m}_1 \approx \frac{\Phi}{r} \approx \frac{\dot{m}_w \cdot c_w \cdot \Delta\vartheta_w}{r} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$r = 2450 \frac{kJ}{kg}$$

U našem slučaju, toplinski tok  $\Phi$  koji se izmjenjuje na rashladnom tornju približno je jednak učinu kondenzatora  $\Phi_k$  pa je gubitak vode ishlapljivanjem u našem tornju jednak:

$$\dot{m}_1 \approx \frac{\Phi_k}{r} \approx \frac{\dot{m}_{wk} \cdot c_w \cdot \Delta\vartheta_w}{r} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Maseni tok vode koja je odnesena strujom zraka u obliku kapljica  $\dot{m}_2$  približno iznosi 0,3% masenog toka vode u sustavu i može se izračunati sljedećim izrazom:

$$\dot{m}_2 \leq 0,003 \cdot \dot{m}_w \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Za naš rashladni toranj, gubitak vode koji je odnesen strujom zraka u obliku kapljica iznosi približno 0,2% :

$$\dot{m}_2 = 0,002 \cdot \dot{m}_{wk} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Maseni tok vode potreban za odmuljivanje  $\dot{m}_3$  ovisi o stupnju uparenja i može se izračunati sljedećim izrazom:

$$\dot{m}_3 = \frac{1}{u-1} \cdot \dot{m}_1 = \frac{1}{u-1} \cdot \frac{\Phi}{r} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Veličina  $u$  predstavlja stupanj uparenja koji je jednak omjeru karbonatne tvrdoće recirkulirajuće vode  $K_r^\circ$  i karbonatne tvrdoće dodatne vode  $K_d^\circ$ , odnosno omjer otopljenih tvari u recirkulirajućoj vodi i koncentracije otopljenih tvari u dodanoj vodi. Optimalni stupanj uparenja nalazi se u rasponu između 4 i 6, a u našem slučaju on iznosi:

$$u = 4$$

Stoga se za naš slučaj, maseni tok vode potreban za odmuljivanje računava prema sljedećem izrazu:

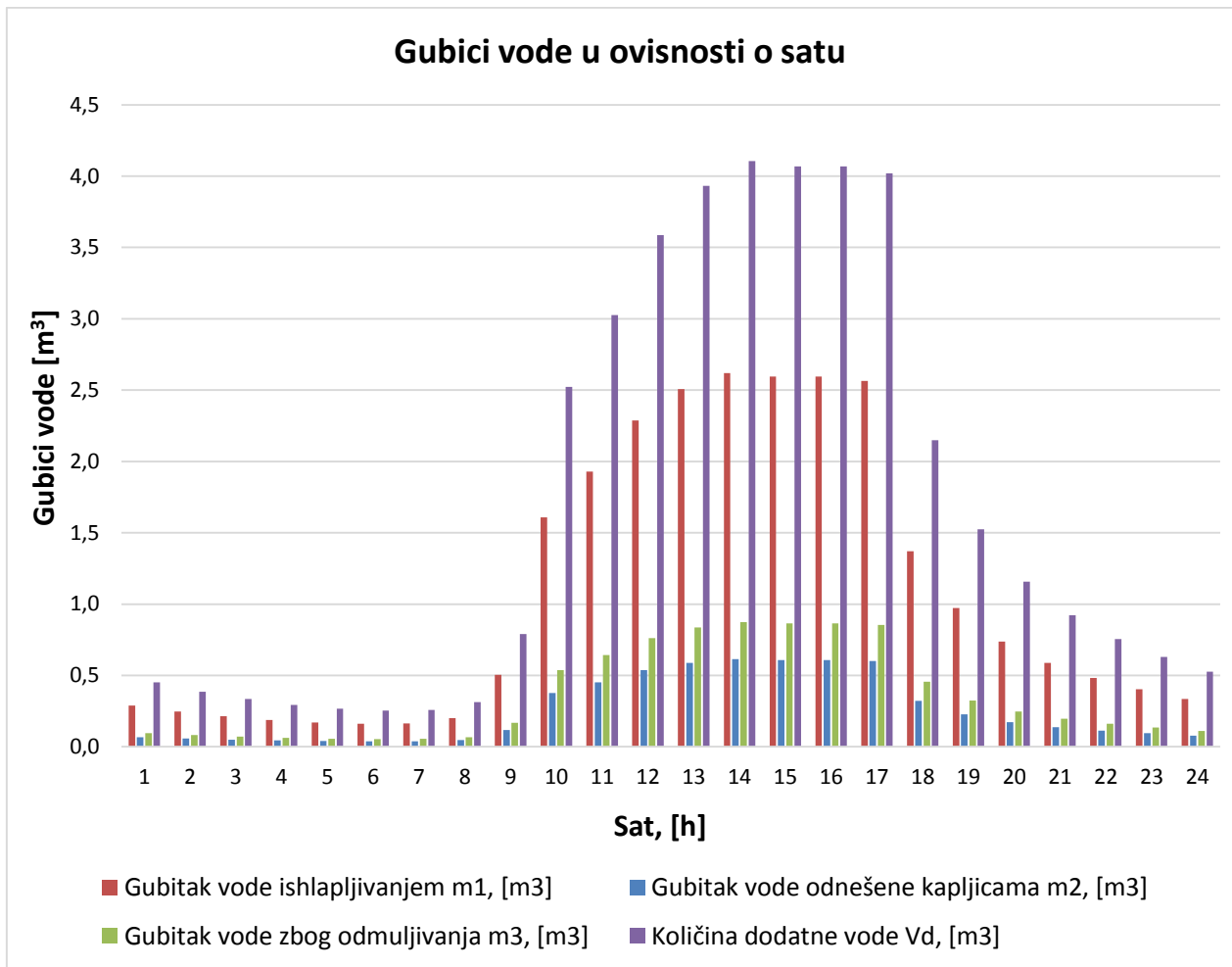
$$\dot{m}_3 = \frac{1}{4-1} \cdot \dot{m}_1 = \frac{1}{4-1} \cdot \frac{\Phi_k}{r} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Na kraju, zbrajanjem svih gubitaka dobiva se potrebna količina dodatne vode za svaki sat, i u konačnici za svaki dan u mjesecu. U tablici 8. prikazane su dobivene vrijednosti protoka vode kroz kondenzator, odnosno kroz toranj, te vrijednosti svih gubitaka vode za dan 24. kolovoza, a ukupna dodatna količina vode iznosi:

$$V_{d\_kolovoz} = 40,34 \text{ m}^3$$

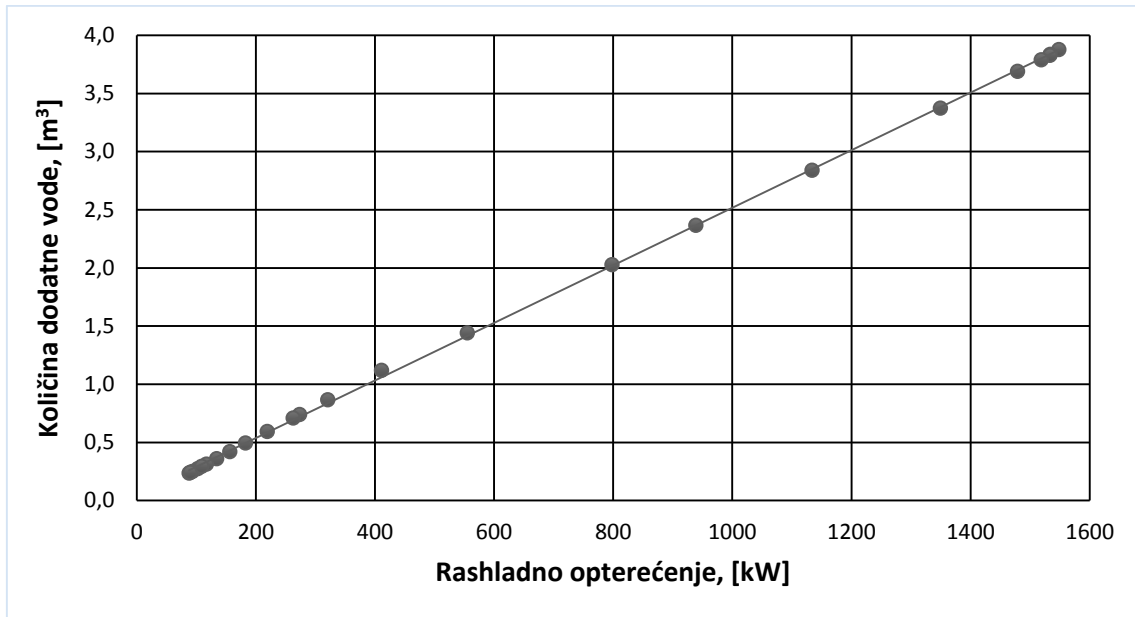
Sat	Protok vode kroz kondenzator $m_{wk}$ , [kg/s]	Gubitak vode ishlapljivanjem $m_1$ , [kg/s]	Gubitak vode odnesene kapljicama $m_2$ , [kg/s]	Gubitak vode zbog odmuljivanja $m_3$ , [kg/s]	Maseni tok dodatne vode $m_d$ , [kg/s]	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1	9,37	0,080	0,019	0,027	0,125	0,451
2	8,01	0,068	0,016	0,023	0,107	0,386
3	6,97	0,059	0,014	0,020	0,093	0,335
4	6,08	0,052	0,012	0,017	0,081	0,293
5	5,55	0,047	0,011	0,016	0,074	0,267
6	5,25	0,045	0,011	0,015	0,070	0,253
7	5,36	0,046	0,011	0,015	0,072	0,258
8	6,52	0,056	0,013	0,019	0,087	0,314
9	16,42	0,140	0,033	0,047	0,220	0,791
10	52,38	0,447	0,105	0,149	0,701	2,522
11	62,84	0,536	0,126	0,179	0,840	3,026
12	74,48	0,635	0,149	0,212	0,996	3,586
13	81,64	0,696	0,163	0,232	1,092	3,931
14	85,28	0,727	0,171	0,242	1,141	4,106
15	84,49	0,721	0,169	0,240	1,130	4,068
16	84,47	0,721	0,169	0,240	1,130	4,067
17	83,49	0,712	0,167	0,237	1,117	4,020
18	44,63	0,381	0,089	0,127	0,597	2,149
19	31,65	0,270	0,063	0,090	0,423	1,524
20	24,04	0,205	0,048	0,068	0,321	1,157
21	19,15	0,163	0,038	0,054	0,256	0,922
22	15,68	0,134	0,031	0,045	0,210	0,755
23	13,09	0,112	0,026	0,037	0,175	0,630
24	10,91	0,093	0,022	0,031	0,146	0,525
	<b>Ukupno:</b>	<b>7,147</b>	<b>1,676</b>	<b>2,382</b>	<b>11,204</b>	<b>40,336</b>

Tablica 8. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. kolovoza



Slika 19. Grafički prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. kolovoza

Iz dijagrama na slici 19. vidimo da se najviše vode gubi ishlapljivanjem, a najmanje odnošenjem kapljica u okoliš kroz eliminator. Gubici zbog odmuljivanja su skoro za pola manji od gubitaka ishlapljivanjem. Također, na dijagramu je vidljivo da se najveći gubici vode pojavljuju u poslijepodnevnom satima od 12 do 17 sati kada je i rashladno opterećenje najveće.



Slika 20. Ovisnost dodatne količine vode o rashladnom opterećenju

Na slici 20. prikazan je graf ovisnosti gubitaka vode o rashladnom opterećenju koji je pravac, što znači da gubici vode rastu linearno s povećanjem rashladnog opterećenja sustava.

Kako smo ovaj model radili u Excel-u, lako smo na isti način izračunali gubitke vode za svaki pojedini dan u mjesecu kolovoz, te njihovim zbrajanjem dobili ukupnu mjesečnu potrošnju vode ovog postrojenja.

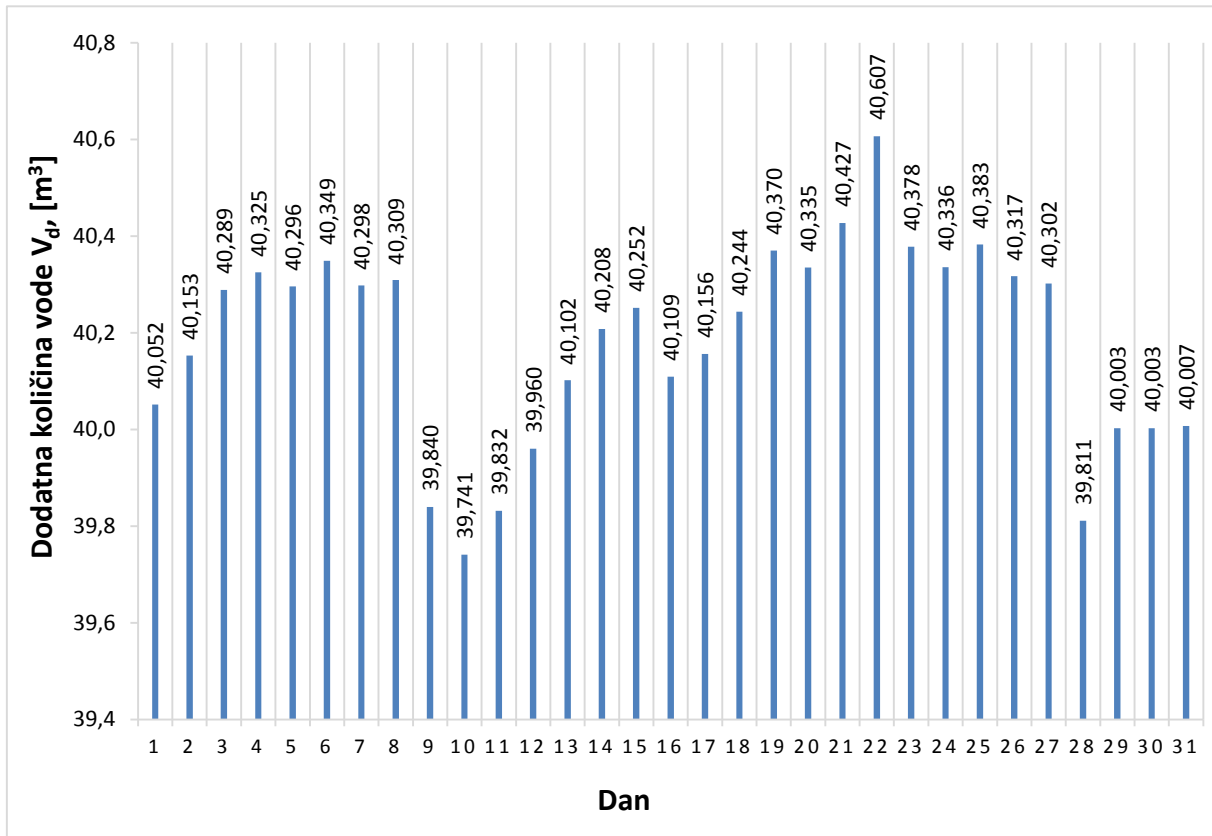
Dan	Količina dodatne vode $V_d$ , [m³]
1.	40,052
2.	40,153
3.	40,289
4.	40,325
5.	40,296
6.	40,349
7.	40,298
8.	40,309
9.	39,840
10.	39,741
11.	39,832
12.	39,960
13.	40,102
14.	40,208
15.	40,252

16.	40,109
17.	40,156
18.	40,244
19.	40,370
20.	40,335
21.	40,427
22.	40,607
23.	40,378
24.	40,336
25.	40,383
26.	40,317
27.	40,302
28.	39,811
29.	40,003
30.	40,003
31.	40,007
<b>Ukupno:</b>	<b>1245,794</b>

Tablica 9. Dnevna potrošnja vode za mjesec kolovoz

U tablici 9. prikazane su dobivene vrijednosti gubitaka vode na rashladnom tornju za pojedini dan u mjesecu kolovoz, a njihovim zbrajanjem dobili smo ukupnu mjesečnu potrošnju vode koja iznosi:

$$V_{duk\_kolovoz} = 1245,79 \text{ m}^3$$



Slika 21. Grafički prikaz gubitaka vode za pojedini dan u mjesecu kolovoz

Iz dobivenih dnevnih vrijednosti potrošnje vode (slika 21.) vidi se da se gubici vode jako malo mijenjaju za pojedini dan u mjesecu, jer je satno rashladno opterećenje konstantno za svaki dan u mjesecu. Najveća potrošnja bila je dana 22. kolovoza koji uz visoke temperature ima ujedno i dosta visoke vrijednosti relativne vlažnosti iz čega vidimo da gubici vode na tornju ne ovisi samo o rashladnom opterećenju već i o stanju okoliša, odnosno o temperaturi vlažnog termometra okoliša.

### 3.3. Gubici vode za svibanj, lipanj, srpanj i rujan

Prethodni model za proračun gubitaka vode opisan za mjesec kolovoz također smo iskoristili za računanje gubitaka vode i za preostale mjesece u ljetnom režimu, odnosno za svibanj, lipanj, srpanj i rujan. Kao što smo već opisali u prethodnim točkama, za proračun gubitaka vode potrebno nam je satno rashladno opterećenje svakog pojedinog mjeseca prikazano u tablici 10.

Sat	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan
1	43,6	115,4	171,1	155,9	87,2
2	39,5	95,2	142,1	133,9	74,8
3	35,6	77,6	121,7	116,5	65,1
4	31,7	64,3	109,8	102,1	58,5
5	28,2	55,2	102,7	93,3	53,8
6	25,9	53,3	98,0	87,8	50,2
7	28,4	65,1	118,4	89,1	48,3
8	34,8	88,3	154,3	108,5	58,8
9	106,3	226,3	300,8	273,2	212,5
10	390,5	703,8	963,2	938,4	602,8
11	398,3	950,8	1184,9	1133,5	695,2
12	578,2	1224,1	1401,5	1349,1	870,0
13	691,7	1378,6	1551,7	1478,8	968,5
14	733,9	1439,3	1573,1	1547,8	999,1
15	770,3	1388,3	1592,0	1533,5	955,2
16	782,7	1364,8	1598,7	1533,2	914,7
17	765,3	1301,3	1562,8	1518,3	882,9
18	278,8	757,6	887,3	797,6	383,6
19	189,9	554,8	673,2	554,8	201,2
20	133,6	412,6	522,5	411,0	156,5
21	88,0	281,5	396,9	320,2	134,4
22	68,7	202,6	322,9	262,2	118,1
23	58,2	168,1	265,2	218,9	104,6
24	51,1	139,4	216,9	182,4	92,5

Tablica 10. Satne vrijednosti rashladnog opterećenja  $\Phi_0$ , [kW] za svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz i rujan

Kao karakterističan dan za svaki mjesec odabran je 24. dan u mjesecu, pa su stoga i rezultati proračuna za navedene mjesece prikazani u tablicama upravo za taj dan.

## 3.3.1. Svibanj

Sat	Protok vode kroz kondenzator $m_{wk}$ , [kg/s]	Gubitak vode ishlapljivanjem $m_1$ , [kg/s]	Gubitak vode odnesene kapljicama $m_2$ , [kg/s]	Gubitak vode zbog odmuljivanja $m_3$ , [kg/s]	Maseni tok dodatne vode $m_d$ , [kg/s]	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1	2,58	0,022	0,005	0,007	0,035	0,124
2	2,34	0,020	0,005	0,007	0,031	0,113
3	2,11	0,018	0,004	0,006	0,028	0,102
4	1,88	0,016	0,004	0,005	0,025	0,090
5	1,67	0,014	0,003	0,005	0,022	0,080
6	1,53	0,013	0,003	0,004	0,021	0,074
7	1,69	0,014	0,003	0,005	0,023	0,081
8	2,07	0,018	0,004	0,006	0,028	0,100
9	6,33	0,054	0,013	0,018	0,085	0,305
10	22,93	0,196	0,046	0,065	0,307	1,104
11	23,29	0,199	0,047	0,066	0,312	1,121
12	32,88	0,281	0,066	0,094	0,440	1,583
13	38,90	0,332	0,078	0,111	0,520	1,873
14	41,17	0,351	0,082	0,117	0,551	1,982
15	43,00	0,367	0,086	0,122	0,575	2,070
16	43,39	0,370	0,087	0,123	0,580	2,089
17	42,62	0,364	0,085	0,121	0,570	2,052
18	16,59	0,142	0,033	0,047	0,222	0,799
19	11,30	0,096	0,023	0,032	0,151	0,544
20	7,91	0,068	0,016	0,023	0,106	0,381
21	5,21	0,044	0,010	0,015	0,070	0,251
22	4,07	0,035	0,008	0,012	0,054	0,196
23	3,43	0,029	0,007	0,010	0,046	0,165
24	3,03	0,026	0,006	0,009	0,040	0,146
	<b>Ukupno:</b>	<b>3,088</b>	<b>0,724</b>	<b>1,029</b>	<b>4,841</b>	<b>17,43</b>

Tablica 11. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. svibnja

Ukupna potrošnja vode za dan 24. svibnja iznosi:

$$V_{d\_svibanj} = 17,43 \text{ m}^3$$

Dan	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1.	17,357
2.	17,388
3.	17,337
4.	17,326
5.	17,323
6.	17,323
7.	17,323
8.	17,323
9.	17,34
10.	17,323
11.	17,363
12.	17,46
13.	17,323
14.	17,323
15.	17,323
16.	17,323
17.	17,323
18.	17,323
19.	17,323
20.	17,354
21.	17,377
22.	17,323
23.	17,439
24.	17,43
25.	17,323
26.	17,323
27.	17,323
28.	17,323
29.	17,323
30.	17,346
31.	17,392
<b>Ukupno:</b>	<b>537,723</b>

Tablica 12. Dnevna potrošnja vode za mjesec svibanj

Ukupna potrošnja vode za mjesec svibanj iznosi:

$$V_{duk\_svibanj} = 537,72 \text{ m}^3$$



## 3.3.2. Lipanj

Sat	Protok vode kroz kondenzator $m_{wk}$ , [kg/s]	Gubitak vode ishlapljivanjem $m_1$ , [kg/s]	Gubitak vode odnesene kapljicama $m_2$ , [kg/s]	Gubitak vode zbog odmuljivanja $m_3$ , [kg/s]	Maseni tok dodatne vode $m_d$ , [kg/s]	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1	6,84	0,058	0,014	0,019	0,091	0,329
2	5,64	0,048	0,011	0,016	0,075	0,272
3	4,60	0,039	0,009	0,013	0,061	0,221
4	3,81	0,032	0,008	0,011	0,051	0,183
5	3,27	0,028	0,007	0,009	0,044	0,157
6	3,16	0,027	0,006	0,009	0,042	0,152
7	3,86	0,033	0,008	0,011	0,052	0,186
8	5,23	0,045	0,010	0,015	0,070	0,252
9	13,41	0,114	0,027	0,038	0,179	0,645
10	39,20	0,334	0,078	0,111	0,524	1,887
11	52,39	0,447	0,105	0,149	0,701	2,522
12	66,94	0,571	0,134	0,190	0,895	3,223
13	75,25	0,642	0,151	0,214	1,006	3,623
14	78,43	0,669	0,157	0,223	1,049	3,776
15	75,65	0,645	0,151	0,215	1,012	3,642
16	74,50	0,636	0,149	0,212	0,996	3,587
17	70,79	0,604	0,142	0,201	0,947	3,408
18	42,00	0,358	0,084	0,119	0,562	2,022
19	31,29	0,267	0,063	0,089	0,418	1,506
20	23,77	0,203	0,048	0,068	0,318	1,144
21	16,68	0,142	0,033	0,047	0,223	0,803
22	12,00	0,102	0,024	0,034	0,161	0,578
23	9,96	0,085	0,020	0,028	0,133	0,479
24	8,34	0,071	0,017	0,024	0,112	0,401
	<b>Ukupno:</b>	<b>6,202</b>	<b>1,454</b>	<b>2,067</b>	<b>9,723</b>	<b>34,928</b>

Tablica 13. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. lipnja

Ukupna dodatna količina vode za dan 24. lipnja iznosi:

$$V_{d\_lipanj} = 34,93 \text{ m}^3$$

Dan	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1.	35,142
2.	35,148
3.	35,318
4.	35,281
5.	35,296
6.	35,315
7.	35,338
8.	35,298
9.	35,017
10.	34,935
11.	34,932
12.	35,012
13.	35,052
14.	35,14
15.	35,176
16.	35,25
17.	35,317
18.	35,319
19.	34,922
20.	34,918
21.	35,146
22.	35,339
23.	35,351
24.	34,928
25.	34,918
26.	34,921
27.	35,151
28.	34,938
29.	35,281
30.	35,268
Ukupno:	1054,367

Tablica 14. Dnevna potrošnja vode za mjesec lipanj

Ukupna potrošnja vode za mjesec lipanj iznosi:

$$V_{duk\_lipanj} = 1054,37 \text{ m}^3$$

## 3.3.3. Srpanj

Sat	Protok vode kroz kondenzator $m_{wk}$ , [kg/s]	Gubitak vode ishlapljivanjem $m_1$ , [kg/s]	Gubitak vode odnesene kapljicama $m_2$ , [kg/s]	Gubitak vode zbog odmuljivanja $m_3$ , [kg/s]	Maseni tok dodatne vode $m_d$ , [kg/s]	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1	10,09	0,086	0,020	0,029	0,135	0,486
2	8,38	0,071	0,017	0,024	0,112	0,403
3	7,18	0,061	0,014	0,020	0,096	0,346
4	6,48	0,055	0,013	0,018	0,087	0,312
5	6,06	0,052	0,012	0,017	0,081	0,292
6	5,81	0,050	0,012	0,017	0,078	0,280
7	7,05	0,060	0,014	0,020	0,094	0,339
8	9,18	0,078	0,018	0,026	0,123	0,442
9	17,90	0,153	0,036	0,051	0,239	0,862
10	53,18	0,454	0,106	0,151	0,711	2,560
11	65,03	0,555	0,130	0,185	0,870	3,131
12	76,78	0,655	0,154	0,218	1,027	3,697
13	85,16	0,726	0,170	0,242	1,139	4,100
14	86,18	0,735	0,172	0,245	1,153	4,149
15	87,21	0,744	0,174	0,248	1,166	4,199
16	87,58	0,747	0,175	0,249	1,171	4,217
17	85,61	0,730	0,171	0,243	1,145	4,122
18	49,09	0,419	0,098	0,140	0,657	2,363
19	37,76	0,322	0,076	0,107	0,505	1,818
20	29,72	0,254	0,059	0,085	0,397	1,431
21	23,03	0,196	0,046	0,065	0,308	1,109
22	19,22	0,164	0,038	0,055	0,257	0,925
23	15,78	0,135	0,032	0,045	0,211	0,760
24	12,79	0,109	0,026	0,036	0,171	0,616
	<b>Ukupno:</b>	<b>7,611</b>	<b>1,784</b>	<b>2,537</b>	<b>11,933</b>	<b>42,684</b>

Tablica 15. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. srpnja

Ukupna dodatna količina vode za dan 24. srpnja iznosi:

$$V_{d,srpanj} = 42,68 \text{ m}^3$$

Dan	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1.	42,675
2.	42,672
3.	42,672
4.	43,086
5.	43,183
6.	43,187
7.	43,225
8.	43,223
9.	43,249
10.	43,256
11.	43,233
12.	43,24
13.	43,276
14.	43,28
15.	42,792
16.	42,815
17.	43,187
18.	43,191
19.	43,204
20.	42,732
21.	42,895
22.	42,891
23.	42,872
24.	42,684
25.	42,672
26.	42,672
27.	42,857
28.	42,875
29.	42,837
30.	42,97
31.	42,931
Ukupno:	1332,534

Tablica 16. Dnevna potrošnja vode za mjesec srpanj

Ukupna potrošnja vode za mjesec srpanj iznosi:

$$V_{duk\_srpanj} = 1332,53 \text{ m}^3$$

## 3.3.4. Rujan

Sat	Protok vode kroz kondenzator $m_{wk}$ , [kg/s]	Gubitak vode ishlapljivanjem $m_1$ , [kg/s]	Gubitak vode odnesene kapljicama $m_2$ , [kg/s]	Gubitak vode zbog odmuljivanja $m_3$ , [kg/s]	Maseni tok dodatne vode $m_d$ , [kg/s]	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1	5,14	0,044	0,010	0,015	0,069	0,248
2	4,41	0,038	0,009	0,013	0,059	0,212
3	3,84	0,033	0,008	0,011	0,051	0,185
4	3,44	0,029	0,007	0,010	0,046	0,165
5	3,16	0,027	0,006	0,009	0,042	0,152
6	2,96	0,025	0,006	0,008	0,040	0,143
7	2,85	0,024	0,006	0,008	0,038	0,137
8	3,47	0,030	0,007	0,010	0,046	0,167
9	12,59	0,107	0,025	0,036	0,168	0,606
10	33,15	0,283	0,066	0,094	0,443	1,596
11	38,08	0,325	0,076	0,108	0,509	1,834
12	47,57	0,406	0,095	0,135	0,636	2,291
13	53,06	0,453	0,106	0,151	0,710	2,554
14	54,73	0,467	0,109	0,156	0,732	2,635
15	52,33	0,446	0,105	0,149	0,700	2,519
16	50,11	0,427	0,100	0,142	0,670	2,413
17	48,37	0,413	0,097	0,138	0,647	2,329
18	21,36	0,182	0,043	0,061	0,286	1,029
19	11,41	0,097	0,023	0,032	0,153	0,549
20	9,08	0,077	0,018	0,026	0,121	0,437
21	8,00	0,068	0,016	0,023	0,107	0,385
22	7,00	0,060	0,014	0,020	0,094	0,337
23	6,20	0,053	0,012	0,018	0,083	0,298
24	5,46	0,047	0,011	0,016	0,073	0,263
	<b>Ukupno:</b>	<b>4,161</b>	<b>0,975</b>	<b>1,387</b>	<b>6,523</b>	<b>23,848</b>

Tablica 17. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za dan 24. rujna

Ukupna dodatna količina vode za dan 24. rujna iznosi:

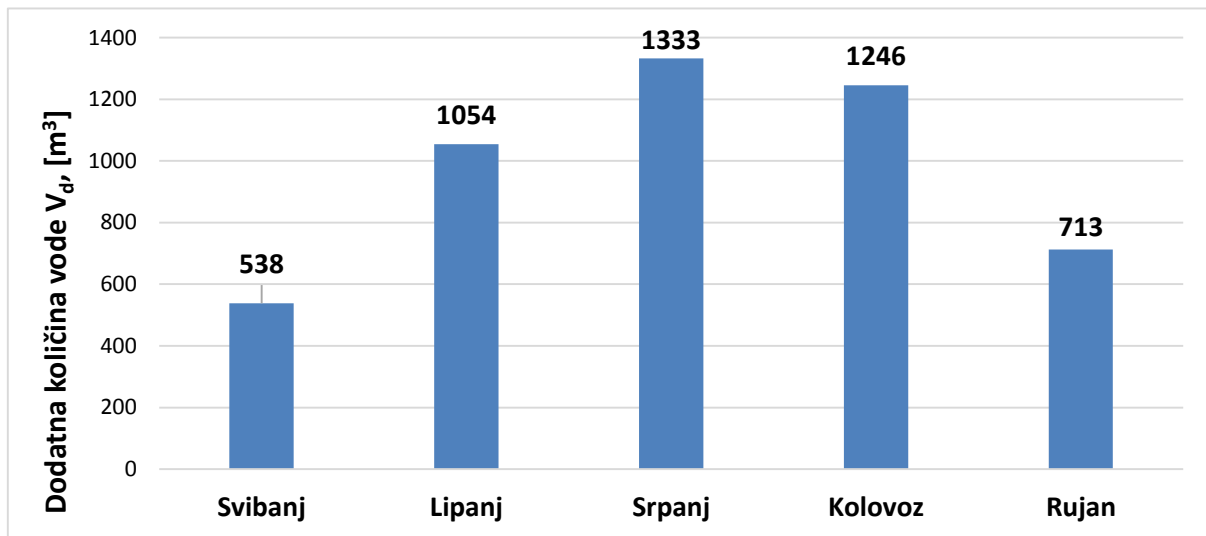
$$V_{d\_rujan} = 23,85 \text{ m}^3$$

Dan	Količina dodatne vode $V_d$ , [m <sup>3</sup> ]
1.	23,704
2.	23,92
3.	23,936
4.	23,926
5.	23,92
6.	23,778
7.	23,678
8.	23,712
9.	23,785
10.	23,797
11.	23,885
12.	23,848
13.	23,678
14.	23,678
15.	23,678
16.	23,678
17.	23,72
18.	23,77
19.	23,708
20.	23,678
21.	23,678
22.	23,678
23.	23,678
24.	23,848
25.	23,755
26.	23,866
27.	23,85
28.	23,682
29.	23,803
30.	23,678
Ukupno:	712,993

Tablica 18. Dnevna potrošnja vode za mjesec rujan

Ukupna potrošnja vode za mjesec rujan iznosi:

$$V_{duk\_rujan} = 712,99 \text{ m}^3$$



Slika 22. Grafički prikaz mjesečne potrošnje vode na rashladnom tornju za ljetni režim

Na slici 22. vidi se da je za mjesec srpanj potrošnja vode na rashladnom tornju najveća, dok je za svibanj najmanja. Već smo ranije spomenuli da potrošnja vode proporcionalno ovisi o rashladnom opterećenju sustava, pa to možemo vidjeti i na ovom primjeru gdje su gubici vode najveći u srpnju upravo zbog najvećeg rashladnog opterećenja, a najmanji u svibnju kada je rashladno opterećenje najmanje. Osim rashladnog opterećenja, na ovakav rezultat veliki utjecaj ima i stanje okoliša, odnosno temperatura vlažnog termometra koja je u srpnju najveća, a u svibnju najmanja. Uspoređujući dobivene rezultate s podacima o gubicima vode u Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, utvrdili smo da se radi o približno sličnim brojevima što upućuje na ispravnost ovog modela za računanje gubitaka vode na rashladnom tornju. Treba još napomenuti kako nismo dobili točne podatke o rashladnom opterećenju knjižnice, tako da unatoč sličnim rezultatima koje smo dobili, trebalo bi još usporediti stvarno opterećenje knjižnice sa zadanim opterećenjem u ovom radu da bi sa sigurnošću mogli reći da je ovaj proračun u potpunosti ispravan.

Količina dodatne vode u Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu za mjesec srpanj:

$$V_{duk\_srpanj} = 1345 \text{ m}^3$$

Količina dodatne vode za mjesec srpanj prema prethodno opisanom modelu:

$$V_{duk\_srpanj} = 1332,5 \text{ m}^3$$

Rezultati se razlikuju za  $12,5 \text{ m}^3$ .

## 4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN VODOM HLAĐENOG KONDENZATORA

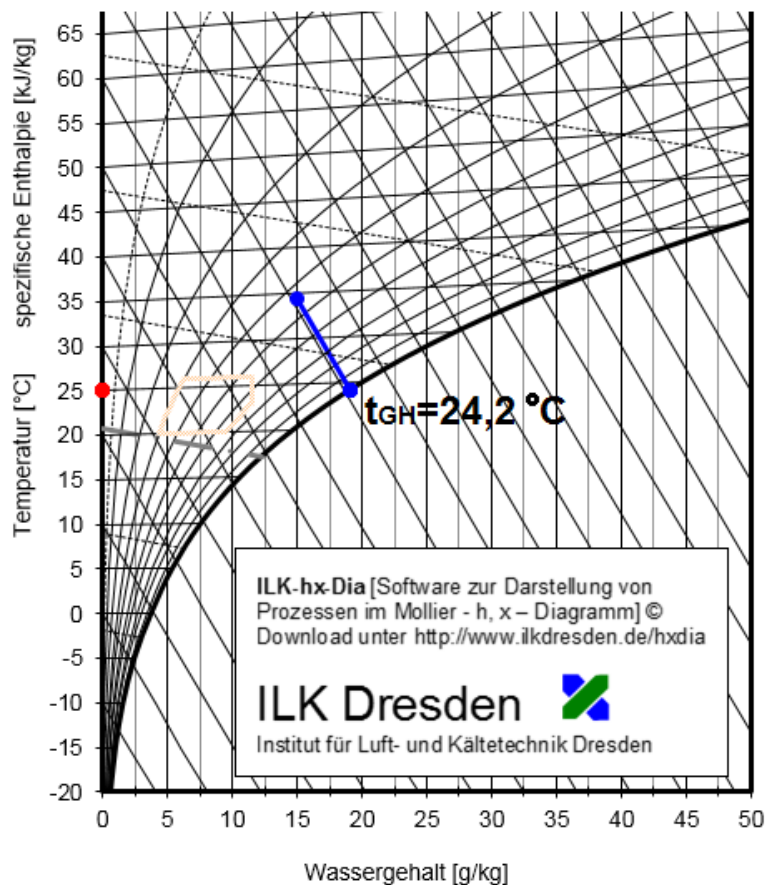
### 4.1. Određivanje točaka rashladnog procesa

Toplinski proračun vodom hlađenog kondenzatora rađen je za najkritičniji dan u mjesecu kolovoz, a to je 22. kolovoza kada je učinak kondenzatora dosegao vrijednost od 1800 kW, a temperaturni režim vode na kondenzatoru je iznosio 28/33 °C. Ovaj učinak, kondenzator je postigao u 14 sati kada su temperatura zraka i relativna vlažnost iznosili:

Temperatura zraka:  $t_{ok} = 34,4 \text{ °C}$

Relativna vlažnost:  $\varphi = 41\%$

Za ovo stanje zraka očitani smo temperaturu vlažnog termometra iz h-x dijagrama:



Slika 23. Određivanje temperature granice hlađenja u h-x dijagramu

Temperatura vlažnog termometra očitana iz dijagrama iznosi:

$$t_{GH} = 24,2 \text{ °C}$$



Pošto znamo da se voda u tornju može ohladiti na temperaturu 3 do 4 °C višu od temperature vlažnog termometra okoliša, izračunali smo temperaturu vode na izlazu iz tornja, odnosno na ulazu u kondenzator:

$$t_{w1} = t_{GH} + 3^{\circ}\text{C} = 24,2 + (3 \dots 4) \approx 28^{\circ}\text{C}$$

Kako se voda u kondenzatoru zagrije za 5 °C, odredili smo da temperaturni režim vode kroz kondenzator iznosi 28/33 °C, a za temperaturu kondenzacije odabrana je  $t_c = 38^{\circ}\text{C}$ .

Toplinski učin isparivača:  $\Phi_0 = 1547,8 \text{ kW}$

Temperaturni režim hlađenja vode: 12/7 °C

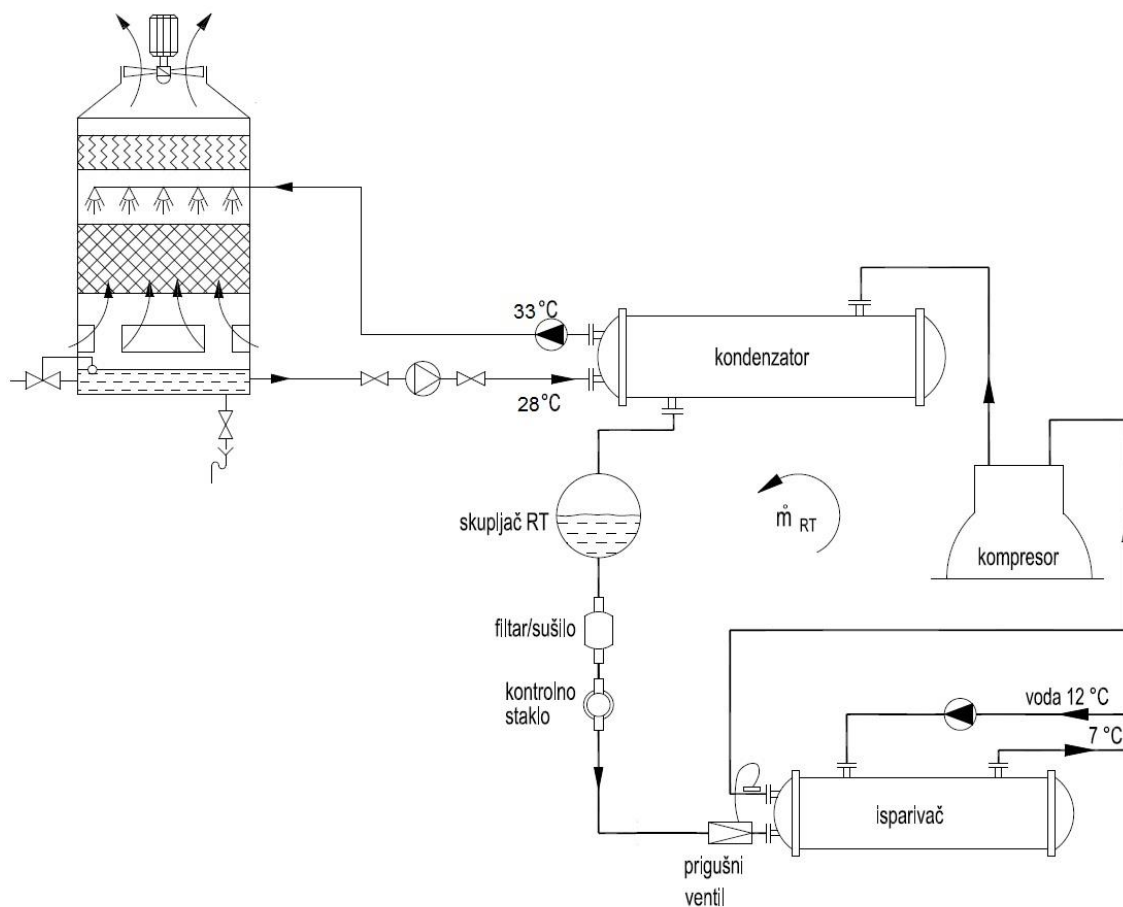
Odabrana temperatura isparavanja:  $t_e = 2^{\circ}\text{C}$

Temperaturni režim vode kroz kondenzator: 28/33 °C

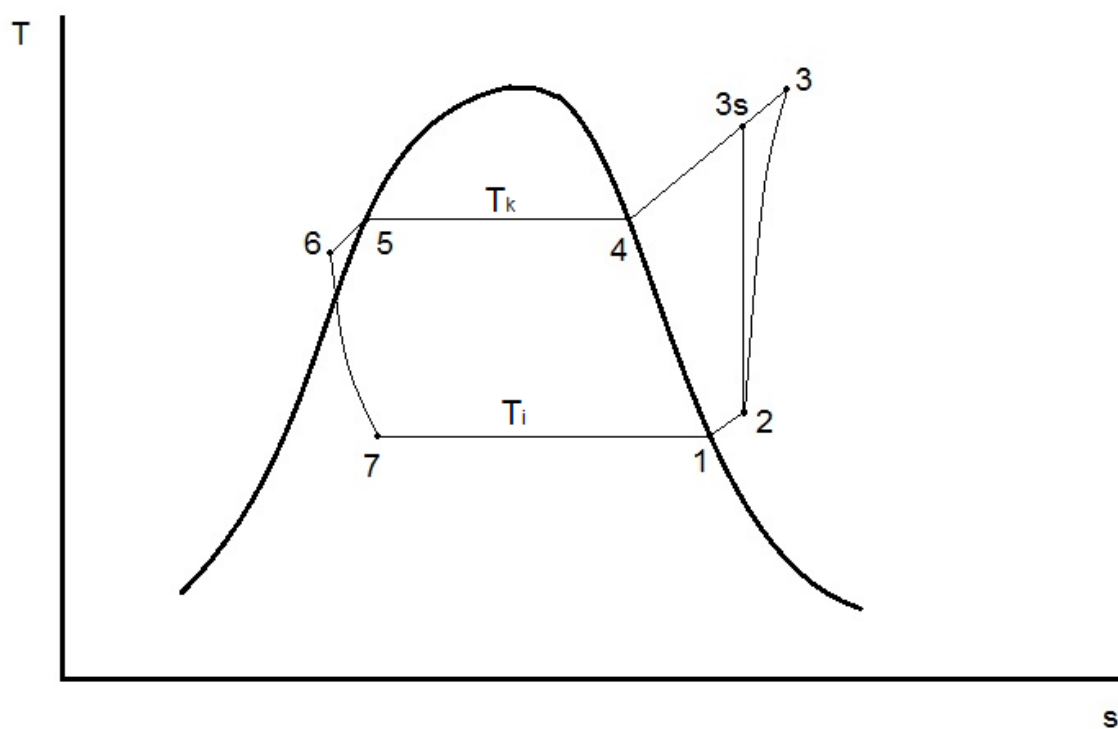
Odabrana temperatura kondenzacije:  $t_c = 38^{\circ}\text{C}$

Izentropski stupanj djelovanja kompresora:  $\eta_s = 0,85$

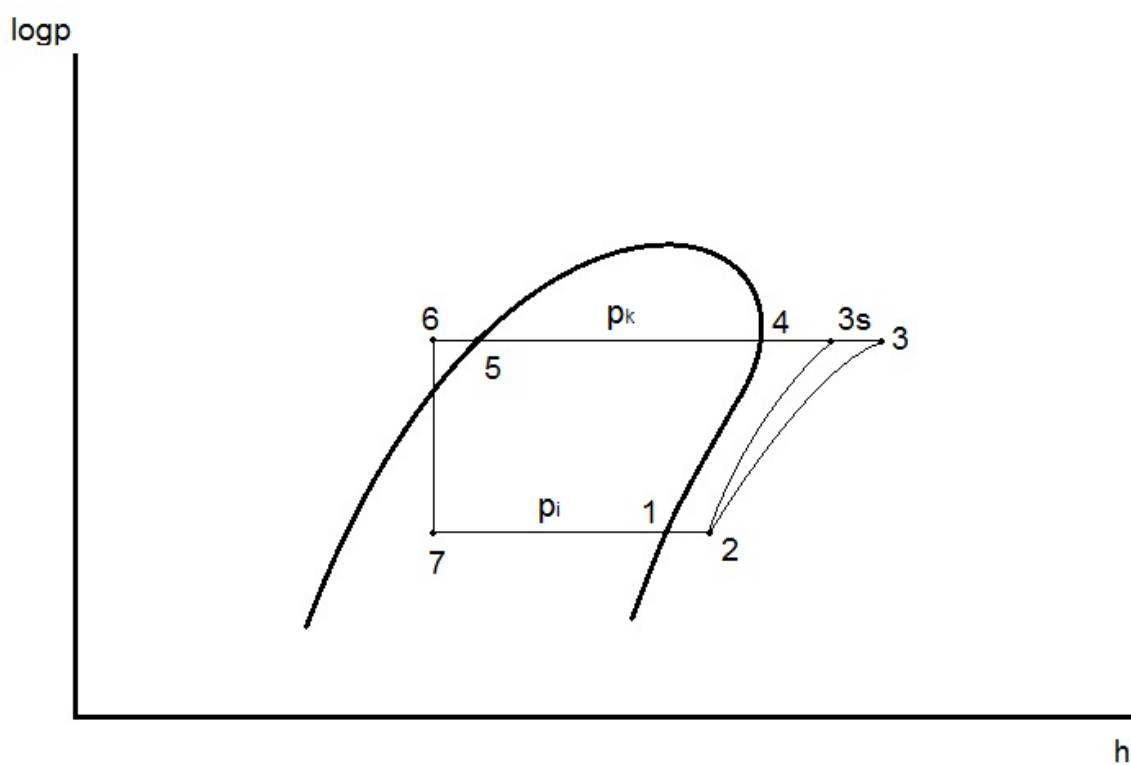
Radna tvar: R134a



Slika 24. Shema rashladnog postrojenja



Slika 25. Prikaz rashladnog procesa u T-s dijagramu



Slika 26. Prikaz rashladnog procesa u log p-h dijagramu

Za određivanje veličina stanja svih točaka procesa korištene su *Radne tvari u tehnici hlađenja* čiji je autor profesor Tonko Ćurko [12]. Sve vrijednosti su očitane iz tablica ili iz dijagrama za radnu tvar R134a, a jedino je entalpija točke 3 zbog izentropskog djelovanja kompresora izračunata preko sljedeće formule:

$$\eta_s = \frac{h_{3s} - h_2}{h_3 - h_2}$$

Iz čega slijedi:

$$h_3 = \frac{h_{3s} - h_2 + h_2 \cdot \eta_s}{\eta_s} = \frac{428 - 405 + 405 \cdot 0,85}{0,85} = 432,06 \text{ kJ/kg}$$

	t [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]
1	2	3,1462	399,77	1,726
2	7	3,1462	405	1,744
3s	46	9,6315	428	1,744
3	53	9,6315	432,06	1,765
4	38	9,6315	418,55	1,712
5	38	9,6315	253,43	1,181
6	33	9,6315	246,5	1,16
7	2	3,1462	246,5	1,16

Tablica 19. Veličine stanja rashladnog procesa

Maseni tok radne tvari:

$$\dot{m}_{RT} = \frac{\Phi_0}{h_2 - h_7} = \frac{1547,8}{406 - 246,5} = 9,765 \text{ kg/s}$$

Snaga kompresora:

$$P_{komp} = \dot{m}_{RT} \cdot (h_3 - h_2) = 9,765 \cdot (432,06 - 405) = 264,24 \text{ kW}$$

Učin kondenzatora:

$$\Phi_k = \dot{m}_{RT} \cdot (h_3 - h_6) = 9,765 \cdot (432,06 - 246,5) = 1812,04 \text{ kW}$$

## 4.2. Proračun shell & tube kondenzatora hlađenog vodom

Toplinski učin kondenzatora:  $\Phi_k = 1812,04 \text{ kW}$

Temperatura vode na ulazu u kondenzator:  $t_{w1} = 28 \text{ °C}$

Temperatura vode na izlazu iz kondenzatora:  $t_{w2} = 33 \text{ °C}$

Temperatura kondenzacije:  $t_c = 38 \text{ °C}$

Radna tvar: R134a

Za izmjenjivač su odabrane glatke bakrene cijevi sljedećih dimenzija:

$$d_e = 16 \text{ mm}$$

$$d_i = 14 \text{ mm}$$

Promjer plašta izmjenjivača:  $D = 800 \text{ mm}$

Razmak između cijevi:  $s = 21 \text{ mm}$

Omjer vanjske i unutarnje površine:

$$\frac{A_e}{A_i} = \frac{d_e}{d_i} = \frac{16}{14} = 1,143$$

Približan broj cijevi koji se može smjestiti u poprečni presjek plašta izmjenjivača:

$$n_t = 0,75 \cdot \left[ \left( \frac{D}{s} \right)^2 - 1 \right] + 1 = 0,75 \cdot \left[ \left( \frac{0,8}{0,021} \right)^2 - 1 \right] + 1 = 1088,69$$

Odabrani broj cijevi:

$$n_t = 1000$$

Maseni protok vode:

$$\dot{m}_w = \frac{\Phi_k}{c_w \cdot (t_{w2} - t_{w1})} = \frac{1812,04}{4,175 \cdot (33 - 28)} = 86,8 \text{ kg/s}$$

Odabrani broj prolaza vode:

$$n_p = 4$$

Broj cijevi u jednom prolazu:

$$n_{t1} = \frac{n_t}{n_p} = \frac{1000}{4} = 250$$

Brzina vode u cijevima:

$$w = \frac{\dot{m}_w}{\frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot n_{t1} \cdot \rho_w} = \frac{86,8}{\frac{\pi \cdot 0,014^2}{4} \cdot 250 \cdot 995,1} = 2,27 \text{ m/s}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta t_m = \frac{(t_c - t_{w1}) - (t_c - t_{w2})}{\ln \frac{t_c - t_{w1}}{t_c - t_{w2}}} = \frac{(38 - 28) - (38 - 33)}{\ln \frac{38 - 28}{38 - 33}} = 7,21 \text{ }^\circ\text{C}$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode računa se pomoću sljedeće formule:

$$\alpha_w = f_w \cdot B_w \cdot \frac{w^{0,8}}{d_i^{0,2}}$$

Korekcijski faktor  $f_w$  ovisi o Reynoldsovom broju:

$$Re \geq 10000 \rightarrow f_w = 1$$

$$Re < 10000 \rightarrow f_w = -0,0101183 \cdot \left(\frac{Re}{1000}\right)^2 + 0,18978 \cdot \left(\frac{Re}{1000}\right) + 0,106247$$

Svojstva vode za srednju temperaturu vode  $t_{wm} = 30,8 \text{ }^\circ\text{C}$  :

$\rho =$	995,1	kg/m <sup>3</sup>
$c =$	4175	J/(kgK)
$\lambda =$	0,6146	W/(mK)
$\eta =$	0,00077335	Pas
$\nu =$	0,000000777	m <sup>2</sup> /s

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{w \cdot d_i}{\nu} = \frac{2,27 \cdot 0,014}{0,777 \cdot 10^{-6}} = 40853,3$$

Kako je  $Re = 40853,3 > 10000$  slijedi da je  $f_w = 1$

Koeficijent  $B_w$ :

$$B_w = 0,023 \cdot \rho^{0,8} \cdot c^{0,4} \cdot \lambda^{0,6} \cdot \eta^{-0,4}$$

$$B_w = 0,023 \cdot 995,1^{0,8} \cdot 4,175^{0,4} \cdot 0,6146^{0,6} \cdot (0,77335 \cdot 10^{-3})^{-0,4} = 2118,8$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode:

$$\alpha_w = f_w \cdot B_w \cdot \frac{w^{0,8}}{d_i^{0,2}} = 1 \cdot 2118,8 \cdot \frac{2,27^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 9579,66 \frac{W}{m^2K}$$

Otpor prolazu topline zbog cijevi  $R_1$ :

$$\delta_1 = 1 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = 370 \frac{W}{mK} \text{ - bakar}$$

$$d_m = 15 \text{ mm}$$

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} \cdot \frac{d_i}{d_m} = \frac{0,001}{370} \cdot \frac{0,014}{0,015} = 2,52252 \cdot 10^{-6} \frac{m^2K}{W}$$

Otpor prolazu topline zbog kamenca  $R_2$ :

$$\delta_2 = 0,4 \text{ mm}$$

$$\lambda_2 = 2 \frac{W}{mK} \text{ - kamenac}$$

$$R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0,0004}{2} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{m^2K}{W}$$

Suma otpora na strani vode:

$$\sum R_i = R_1 + R_2 = 2,52252 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-4} = 0,0002025 \frac{m^2K}{W}$$

Specifični toplinski tok na strani vode:

$$q_i = \frac{t_z - t_{wm}}{\frac{1}{\alpha_w} + \sum R_i} = \frac{t_z - 30,79}{\frac{1}{9579,66} + 0,0002025} = 3258,307 \cdot (t_z - 30,79)$$

gdje je  $t_z$  temperatura vanjske stijenke cijevi.

Specifični toplinski tok na strani radne tvari:

$$q_e = \frac{A_i}{A_e} \cdot q_i = \frac{1}{1,143} \cdot 3258,307 \cdot (t_z - 30,79) = 2851,019 \cdot (t_z - 30,79)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari:

$$\alpha_R = 0,725 \cdot B \cdot d_e^{-0,25} \cdot f^{-1/6} \cdot \psi_c \cdot (t_c - t_z)^{-0,25}$$

Svojstva radne tvari pri temperaturi kondenzacije  $t_c = 38 \text{ }^\circ\text{C}$  :

$\rho =$	1155,1	kg/m <sup>3</sup>
$c =$	1487	J/(kgK)
$\lambda =$	0,0756	W/(mK)
$\eta =$	0,000168	Pas
$h_c =$	165,12	kJ/kg

Koeficijent B:

$$B = \left( \frac{g \cdot h_c \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta} \right)^{0,25} = \left( \frac{9,81 \cdot 165,12 \cdot 10^3 \cdot 1155,1^2 \cdot 0,0756^3}{0,000168} \right)^{0,25} = 1536,09$$

Približan broj cijevi u jednom vertikalnom redu:

$$f = 0,9 \cdot \frac{D}{1,732 \cdot s} = 0,9 \cdot \frac{0,8}{1,732 \cdot 0,021} \approx 19$$

Za glatke cijevi koeficijent  $\psi_c$  iznosi:

$$\psi_c = 1$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari:

$$\alpha_R = 0,725 \cdot B \cdot d_e^{-0,25} \cdot f^{-1/6} \cdot \psi_c \cdot (t_c - t_z)^{-0,25}$$

$$\alpha_R = 0,725 \cdot 1536,09 \cdot 0,016^{-0,25} \cdot 19^{-1/6} \cdot 1 \cdot (38 - t_z)^{-0,25}$$

$$\alpha_R = 1916,898 \cdot (38 - t_z)^{-0,25}$$

Specifični toplinski tok na strani radne tvari:

$$q_e = \alpha_R \cdot (38 - t_z)$$

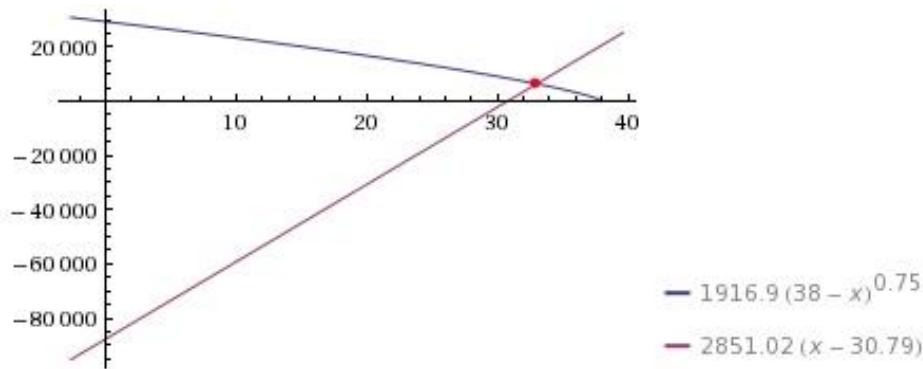
Kada u ovu jednadžbu umetnemo  $\alpha_R$  dobivamo:

$$q_e = 1916,898 \cdot (38 - t_z)^{0,75}$$

Nakon što smo dobili dvije jednadžbe za specifični toplinski tok na vanjskoj strani cijevi, koristeći program WolframAlpha izjednačili smo te dvije funkcije te grafički odredili temperaturu vanjske stijenke cijevi  $t_z$ .

$$q_e = 1916,898 \cdot (38 - t_z)^{0,75}$$

$$q_e = 2851,019 \cdot (t_z - 30,79)$$



Slika 23. Određivanje temperature vanjske stijenke grafičkom metodom

Očitana temperatura vanjske stijenke cijevi iznosi:

$$t_z = 33,026 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sada, kada imamo temperaturu stijenke cijevi, lako možemo izračunati i specifični toplinski tok na strani radne tvari:

$$q_e = 2850,019 \cdot (33,026 - 30,79) = 6384,56 \text{ W/m}^2$$

Također možemo izračunati i koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari:

$$\alpha_R = 1916,898 \cdot (38 - 33,026)^{-0,25} = 1283,57 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Ukupni koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi:

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_R} + R_e + \left(\Sigma R_i + \frac{1}{\alpha_w}\right) \cdot \frac{A_e}{A_i}}$$

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{1283,57} + 0 + \left(0,0002025 + \frac{1}{9579,66}\right) \cdot 1,14} = 885,09 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Vanjska površina cijevi potrebna za izmjenu topline:

$$A_e = \frac{\Phi_c}{q_e} = \frac{1812,04 \cdot 10^3}{6384,56} = 283,82 \text{ m}^2$$

Unutarnja površina cijevi potrebna za izmjenu topline:

$$A_i = A_e/1,14 = 283,82/1,14 = 248,34 \text{ m}^2$$



Ukupna potrebna duljina cijevi:

$$L_{uk} = \frac{A_i}{\pi \cdot d_i} = \frac{248,34}{\pi \cdot 0,02} = 5649,19 \text{ m}$$

Duljina jedne cijevi:

$$L = \frac{L_{uk}}{n_t} = \frac{5649,19}{1000} = 5,65 \text{ m}$$

Pad tlak vode u cijevima:

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = 0,02226$$

$$\Delta p = \left( \xi \cdot \frac{L}{d_i} + \frac{1,5}{n_p} + 1,5 \right) \cdot n_p \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}$$

$$\Delta p = \left( 0,02226 \cdot \frac{5,65}{0,014} + \frac{1,5}{4} + 1,5 \right) \cdot 4 \cdot \frac{995,1 \cdot 2,27^2}{2} = 111109,9 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = 1,111 \text{ bar}$$

Konačne dimenzije kondenzatora s cijevima u plaštu:

- promjer plašta:  $D = 800 \text{ mm}$
- aktivna duljina:  $L = 5650 \text{ mm}$

### 4.3. Proračun cjevovoda

Brzine strujanja radne tvari R134a u cijevima odabiremo iz skripte *Hlađenje i dizalice topline* str. 120, Tablica 6.1. [3]

Radna tvar	Uisni vod	Tlačni vod	Kapljevinski vod
Freoni	8-12	10-15	0,4-1,2

Tablica 20. Preporučljive brzine strujanja freona

Nakon odabira brzina strujanja za pojedine vodove računamo:

- volumenski protok radne tvari:

$$q_{V,RT} = \frac{\dot{m}_{RT}}{\rho_{RT}}$$

- poprečni presjek cijevi:

$$A = \frac{q_{V,RT}}{w}$$

- promjer cjevovoda:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

Vod	Uisni	Tlačni	Kapljevinski
Odabrana brzina strujanja, w [m/s]	12	15	1
Temperatura, t [°C]	7	53	33
Gustoća RT, $\rho_{RT}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	15,08	43,3	1176
Volumni protok RT, $q_{V,RT}$ [m <sup>3</sup> /s]	0,6475	0,2255	0,0083
Poprečni presjek, A [m <sup>2</sup> ]	0,053958	0,0150357	0,008304
Promjer cjevovoda, d [mm]	262,11	138,36	102,82
Odabrane dimenzije cjevovoda	DN 250	DN 150	DN 100

Tablica 21. Odabir dimenzija cjevovoda

## 5. SPECIFIKACIJA MATERIJALA I OPREME

### 1. *Kompresor*: otvoreni vijčani kompresor

- rashladnog učina:  $\Phi_0 = 422 \text{ kW}$
- $\vartheta_e/\vartheta_c = 2 \text{ °C}/38 \text{ °C}$
- snaga:  $P = 95,5 \text{ kW}$
- kao proizvod: Bitzer; tip: OSK 8571-K
- radna tvar: R134a

kom: 4

### 2. *Isparivač*: s cijevima u plaštu

- rashladni učin:  $\Phi_0 = 1600 \text{ kW}$
- $\vartheta_e/\vartheta_c = 2 \text{ °C}/38 \text{ °C}$
- radna tvar: R134a

kom: 1

### 3. *Kondenzator*: s cijevima u plaštu

- učin:  $\Phi_k = 1850 \text{ kW}$
- $\vartheta_e/\vartheta_c = 2 \text{ °C}/38 \text{ °C}$
- radna tvar: R134a

kom: 1

### 4. *Sakupljač radne tvari*

- volumen: 500 l
- kao proizvod: Bitzer; tip: F3102N

kom: 1

### 5. *Filter nečistoća*

- kao proizvod Danfoss; tip: FIA 100-500

kom: 2

- kao proizvod Danfoss; tip: FIA 80-500

kom: 1

- kao proizvod Danfoss; tip: FIA 125-500

kom: 4

**6. Elektronski ekspanzijski ventil**

- kao proizvod: Danfoss; tip: ICM 65-A

kom: 1

**7. Rashladni toranj**

- rashladnog učina:  $\Phi_k = 1850 \text{ kW}$
- $\vartheta_{w1}/\vartheta_{w2} = 33 \text{ °C}/38 \text{ °C}$

kom: 1

**8. Odvajač ulja**

- volumen: 868 l
- kao proizvod Bitzer; tip: OAC 25012A

kom: 1

**9. Zaporni ventili**

- kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 80
- kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 100
- kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 125
- kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 150

kom: 2

kom: 5

kom: 4

kom: 3

**10. Elektromagnetni ventil**

- kao proizvod: Danfoss; tip: ICS 80

kom: 1

**11. Nepovratni ventili**

- kao proizvod: Danfoss; tip: SCA 125

kom: 4

**12. Presostat niskog tlaka**

- kao proizvod: Danfoss; tip: RT1A

kom: 1

**12. Presostat visokog tlaka**

- kao proizvod: Danfoss; tip: RT117

kom: 1

**13. Pretvarač tlaka**

- kao proizvod: Danfoss; tip: MBS 1200

kom: 2

**14. Upravljački sklop**

- kao proizvod: Danfoss; tip: AKC 25H7

kom: 1

**15. Sigurnosni ventil**

- kao proizvod: Danfoss; tip: BSV 8T 322

kom: 1

**16. Cijevi: čelične**

- DN 80            5 m
- DN 100          10 m
- DN 125          5 m
- DN 150          10 m
- DN 250          7 m
- DN 300          20 m

**17. Izolacija**

- kao proizvod Armaflex; tip: AF-1-250      7 m
- kao proizvod Armaflex; tip: AF-1-140      5 m
- kao proizvod Armaflex; tip: AF-1-300      20 m

## **6. ZAKLJUČAK**

Proračunom je dokazano da gubici vode na rashladnom tornju ponajviše ovise o rashladnom opterećenju sustava te o stanju okoliša, odnosno o temperaturi vlažnog termometra okolišnog zraka. Tako smo za mjesec srpanj, za koji je rashladno opterećenje najveće kao i temperature vlažnog termometra, dobili najveće gubitke vode na rashladnom tornju, dok su za mjesec svibanj rezultati obrnuti iz razloga što je za taj mjesec rashladno opterećenje najmanje. U ovom radu, još je pokazano da se najviše vode na rashladnom tornju gubi ishlapljivanjem, nešto manje odmuljivanjem, a najmanje se odnosi kapljicama u okoliš. Na kraju rada, obavljen je posjet u Nacionalnu i sveučilišnu knjižnicu u Zagrebu, gdje su rezultati dobiveni u ovom proračunu uspoređeni sa stvarnim podacima o potrošnji vode na rashladnom tornju, te se pokazalo da proračunom dobivene brojke približno odgovaraju stvarnim podacima u praksi čime smo potvrdili točnost ovog modela za proračun gubitaka vode.

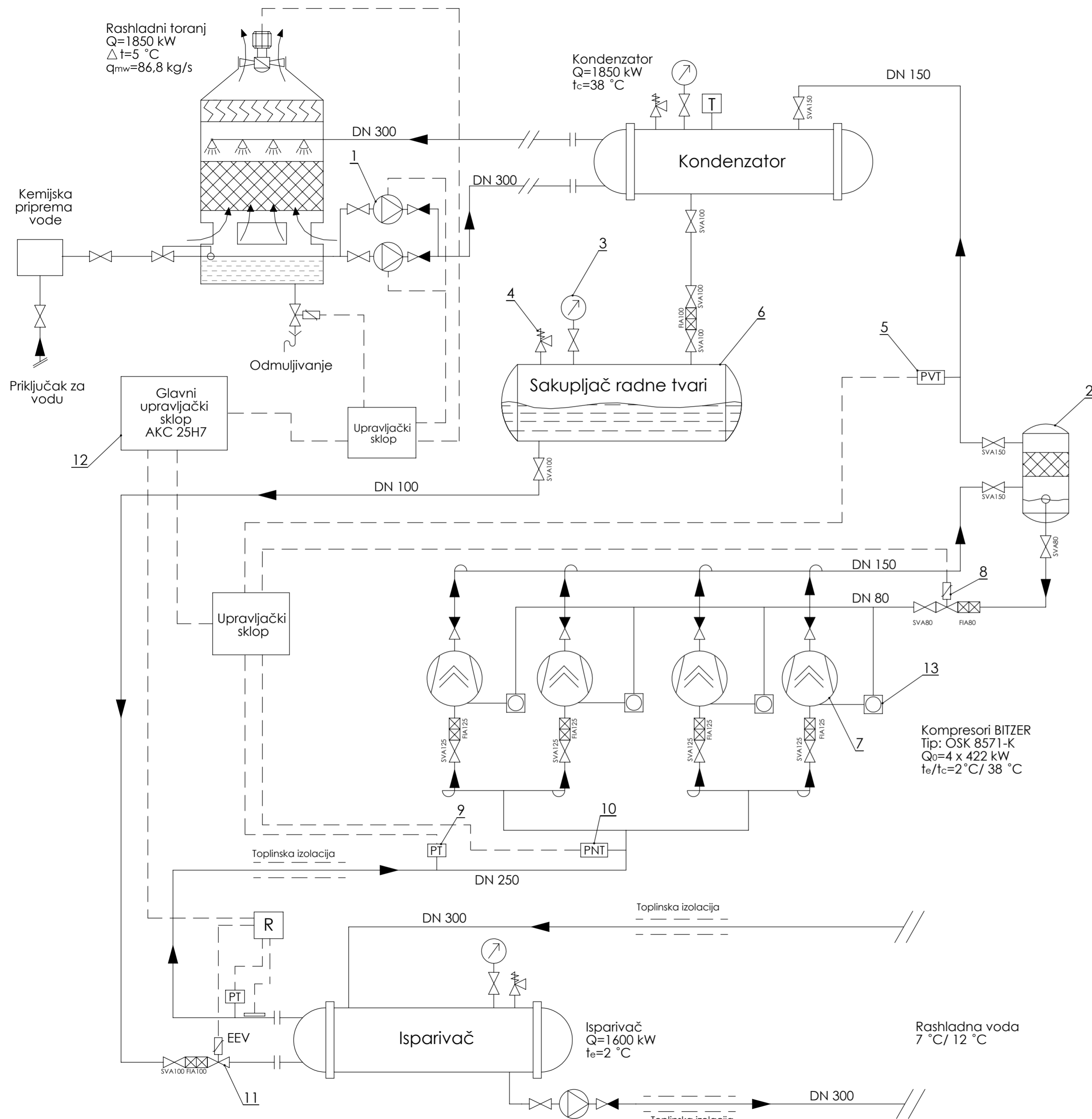
## LITERATURA

- [1] Soldo V, Ćurko T.: *Podloge za predavanje Hlađenje i dizalice topline*, Zagreb, 2011.
- [2] ASHRAE, *Systems and Equipment*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2000.
- [3] Brlek V.: *Rashladna tehnika*, Tehnička enciklopedija
- [4] Balen I.: *Podloge za predavanja iz kolegija Klimatizacija*, FSB, Zagreb
- [5] *Priručnik za energetska certificiranje zgrada*, Program Ujedinjenih naroda za razvoj-UNDP, Tiskara Zelina, 2010.
- [6] *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Prilog E*, Narodne novine, broj 97/14
- [7] Roland Stull: *Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature*, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2011.
- [8] F.W. Yu, K.T. Chan: *Optimization of water-cooled chiller system with load-based speed control*, Department of Building Services Engineering, Hong Kong, 2008.
- [9] D. Ljubas, *Predavanja iz kolegija Voda, gorivo i mazivo*, FSB, Zagreb, 2008.
- [10] Đurak T., Kos F., Mekanović J., Soldo V.: *Kondenzatori hlađeni optočnom vodom*, FSB, Zagreb
- [11] Ciconkov R.: *Refrigeration solved examples*, Skopje, 2001.
- [12] Ćurko T.: *Radne tvori u tehnici hlađenja*, Zagreb, 2000.
- [13] Halasz B, Galović A, Boras I.: *Toplinske tablice*, Zagreb, 2007.
- [14] Kraut, B.: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [15] <https://www.bitzer.de>
- [16] <http://products.danfoss.com/all-products/>

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Shema spajanja i automatske regulacije rashladnog sustava





NAPOMENA:  
 Kompletan cjevovod usisnog voda, te cjevovod rashladne vode je izoliran Armaflex izolacijom.

Radna tvar: R134a

13	Ventil s plovkom	4	Danfoss			
12	Glavni upravljački sklop	1	Danfoss	AKC 25H7		
11	Elektronski ekspanzijski ventil	1	Danfoss	ICM-65-A		
10	Presostat niskog tlaka	1	Danfoss	RT1A		
9	Pretvarač tlak	2	Danfoss	MBS 1200		
8	Elektromagnetni ventil	1	Danfoss	ICS 80		
7	Kompresor	4	Bitzer	OSK 8571-K		
6	Sakupljač radne tvari	1	Bitzer	F3102N		
5	Presostat visokog tlaka	1	Danfoss	RT117		
4	Sigurnosni ventil	3	Danfoss	BSV 8T 322		
3	Manometar	3				
2	Odvajač ulja	1	Bitzer	OAC 25012A		
1	Pumpa	3				
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Proizvođač	Model	Sirove dimenzije	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime		Potpis	
Projektirao		05.09.2015.	Eugen Filipović		[Signature]	
Razradio		05.09.2015.	Eugen Filipović		[Signature]	
Crtao		05.09.2015.	Eugen Filipović		[Signature]	
Pregledao			Dr. sc. Vladimir Soldo		[Signature]	
Mentor			Dr. sc. Vladimir Soldo		[Signature]	
ISO - tolerancije			Objekt: Rashladnik vode s kondenzatorom hlađenim optočnom vodom		Objekt broj:	
					R. N. broj:	
			Napomena: Radna tvar - R134a		Kopija	
			Materijal:		Masa:	
			Naziv: Shema spajanja i automatske regulacije rashladnog sustava		Pozicija:	
			Mjerilo originala		Format: A2	
			Crtež broj: ZR-EF-001		Listova: 1	
					List: 1	

**SolidWorks Student Edition.**  
**For Academic Use Only.**