Rashladni tornjevi u industriji

Ćurčin, Franko

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:426053

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Franko Ćurčin

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo, dipl. ing. Franko Ćurčin

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Vladimiru Soldi koji je prihvatio mentorstvo i stručno me vodio kroz završni rad, te doc. dr. sc. Zoranu Domitranu na savjetima i pomoći tijekom izrade rada.

Franko Ćurčin

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Franko ĆURČIN** Mat. br.: 0035207123

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rashladni tornjevi u industriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Industry cooling towers**

Opis zadatka:

U radu je potrebno dati osnovne karakteristike rashladnih tornjeva. Opisati izvedbe sustava s opisom strukturnih elemenata pojedinih jedinica, kao i tehnologije koje se koriste u proizvodnji. Navesti razlike u izvedbi s aksijalnim ventilatorom u odnosu na izvedbe s radijalnim ventilatorom te IP značajke elektromotora. Pokazati i pojasniti koje su razlike u odabranim ispunama tornjeva.

Za industrijsko posredno rashladno postrojenje rashladnog učinka 550 kW potrebno je projektirati rashladni toranj. Temperaturni režim glikolne smjese na isparivaču rashladnika kapljevine iznosi 0/-5°C. Stanje vanjskog zraka je 33 °C i 55 % relativne vlažnosti. Radna tvar je R290.

Rad treba sadržavati:

1. Pregled izvedbi i karakteristika rashladnih tornjeva i evaporativnih kondenzatora.
2. Dimenzioniranje rashladnog tornja, izbor ventilatora i motora, te ostalih elemenata rashladne jedinice.
3. Model tijeka proračuna s prikazom u blok dijagramu.
4. Dispozicijski crtež rashladnog tornja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:
V Soldo
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....I
POPIS SLIKA.....III
POPIS TABLICA.....IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE.....V
POPIS OZNAKA.....VI
SAŽETAK.....VIII
SUMMARY.....IX
1. UVOD.....1
2. RASHLADNI TORNJEVI.....3
2.1. Protusmjerni rashladni tornjevi s induciranim strujanjem.....6
2.2. Križni rashladni tornjevi s induciranim strujanjem.....7
2.3. Protusmjerni rashladni tornjevi s tlačnim strujanjem.....8
3. EVAPORATIVNI KONDENZATORI.....9
4. LEGIONARSKA BOLEST.....12
5. ISPUNA RASHLADNOG TORNJA.....13
6. MATERIJALI ZA IZRADU RASHLADNIH TORNJEVA.....15
7. IP ZNAČAJKE ELEKTROMOTORA.....19
8. PRORAČUN RASHLADNOG TORNJA.....21
8.1. Projektni zadatak.....21
8.2. Određivanje temperatura kondenzacije i isparivanja.....23
8.3. Rashladni krug.....24
9. DIMENZIONIRANJE RASHLADNOG TORNJA.....28
9.1. Optimalni omjer masenih protoka vode i zraka.....28
9.2. Promjena entalpije zraka prolaskom kroz rashladni toranj.....29
9.3. Izračun karakteristike tornja.....30
9.4. Izračun dimenzija ispune rashladnog tornja.....32
9.5. Određivanje ukupnog pada tlaka Δp_{uk}.....36
9.6. Odabir ventilatora i elektromotora.....39
10. DIMENZIONIRANJE CJEVOVODA.....42
10.1. Usisni vod.....42
10.2. Tlačni vod.....43
10.3. Kapljevinski vod.....43
10.4. Cjevovod rashladne vode.....44
10.5. Cjevovod glikolne smjese.....45

11. POTROŠNJA RASHLADNE VODE.....46
12. SPECIFIKACIJA MATERIJALA.....58
13. ZAKLJUČAK.....61
LITERATURA.....62
PRILOZI.....63

POPIS SLIKA

Slika 1. Prve izvedbe rashladnih tornjeva [1].....1
Slika 2. Shematski prikaz rashladnog tornja [2].....3
Slika 3. Prikaz procesa u Molliereovom h – x dijagramu [2].....4
Slika 4. Eliminatori kapljica.....5
Slika 5. Protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem [2].....6
Slika 6. Križni rashladni toranj s induciranim strujanjem [2].....7
Slika 7. Protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem [2].....8
Slika 8. Poprečni presjek evaporativnog kondenzatora [2].....9
Slika 9. Primjer taloga kod loše održavanog rashladnog tornja.....11
Slika 10. Ispuna u obliku šipki za raspršivanje [3].....14
Slika 11. Ispuna u obliku folije [4].....14
Slika 12. Rashladni toranj izrađen od drveta.....15
Slika 13. Rashladni toranj izrađen od galvaniziranog čelika.....16
Slika 14. Rashladni toranj izrađen od staklenih vlakana.....17
Slika 15. Betonski rashladni toranj.....18
Slika 16. Kategorizacija IP značajki.....19
Slika 17. Shema rashladnog postrojenja.....22
Slika 18. Prikaz rashladnog procesa u T – s i log p – h dijagramu.....25
Slika 19. Poprečni presjek rebraste ispune.....32
Slika 20. Vizualni prikaz dimenzioniranog rashladnog tornja.....35
Slika 21. *Drift 130* eliminator kapljica.....37
Slika 22. Pad tlaka u eliminatoru kapljica *Drift* 130.....38
Slika 23. Dijagram radne točke ventilatora.....40
Slika 24. Prikaz rashladnog opterećenja industrijskog postrojenja kroz sate.....46
Slika 25. Dijagram ovisnosti faktora hlađenja o parcijalnim opterećenjima za različite temperature ulazne vode u kondenzator.....50
Slika 26. Grafički prikaz satnih vrijednosti rashladnog opterećenja, snage kompresora i učina kondenzatora.....52
Slika 27. Grafički prikaz pojedinih i ukupnih gubitaka rashladne vode.....55
Slika 28. Postotni udjeli pojedinačnih gubitaka rashladne vode.....56
Slika 29. Grafički prikaz dnevne potrošnje vode kroz mjesec srpanj.....57
Slika 30. Izometrijski prikaz modela rashladnog tornja.....64
Slika 31. Nacrt modela rashladnog tornja.....65
Slika 32. Bokocrt modela rashladnog tornja.....66
Slika 33. Tlocrt modela rashladnog tornja.....67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Točke procesa.....26
Tablica 2. Numeriča integracija za izračun karakteristike tornja.....31
Tablica 3. Oblik rebrastih ispuna korištenih u eksperimentima [9].....32
Tablica 4. Satne vrijednosti rashladnog opterećenja za 8. srpnja.....47
Tablica 5. Satne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka za 8. srpnja.....48
Tablica 6. Prikaz dobivenih rezultata za dan 8. srpnja.....51
Tablica 7. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za 8. srpnja.....54
Tablica 8. Prikaz dnevne potrošnje vode kroz mjesec srpanj.....56

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

RT - 2020 Dispozicijski crtež rashladnog tornja

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ	°C	temperatura
p	bar	tlak
Φ_0	kW	rashladni učinak
η	-	izentropski stupanj djelovanja kompresora
φ	%	relativna vlažnost zraka
h	kJ/kg	specifična entalpija
s	kJ/(kgK)	specifična entropija
q	kg/s	maseni protok
P	kW	snaga
Φ_{kond}	kW	učinak kondenzatora
COP	-	faktor hlađenja procesa
c_w	kJ/(kgK)	specifični toplinski kapacitet vode
c_{glikol}	kJ/(kgK)	specifični toplinski kapacitet glikolne smjese
r_w	kJ/kg	specifična toplina isparavanja vode
K	kg/(m^2s)	koeficijent prijenosa mase
a	m^{-1}	površina za prijenos mase izražena po volumenu ispune tornja
V	m^3/m^2	volumen ispune tornja po izražen po poprečnom presjeku tornja
L	kg/(m^2s)	gustoća masenog protoka vode
G	kg/(m^2s)	gustoća masenog protoka zraka
T	°C	temperatura vode kroz rashladni toranj
c_1	-	eksperimentalna konstanta
c_2	-	eksperimentalna konstanta
A	m^2	površina presjeka

W	m	duljina stranice
Δp	Pa	pad tlaka
w	m/s	brzina strujanja
$\dot{V}$	m^3/s	volumni protok
ρ	kg/m^3	gustoća
C_d	-	koeficijent gubitaka
n	-	broj
d	mm	promjer
LwtA	db(A)	razina buke

SAŽETAK

U ovom radu proveden je proračun rashladnog tornja za industrijsko posredno rashladno postrojenje rashladnog učinka 550 kW. Radna tvar u sustavu je R290 i koristi se za hlađenje glikolne smjese temperaturnog režima 0/-5 °C. Proračunom su odabrane dimenzije ispune rashladnog tornja, eliminatora kapljica, rešetki za usis zraka, ventilator i elektromotor, te dimenzije cjevovoda.

U uvodnom dijelu ukratko su opisani načini izvedbe rashladnih tornjeva i evaporativnih kondenzatora s opisom strukturnih elemenata pojedinih jedinica. Navedene su razlike u izvedbi s aksijalnim u odnosu na radijalne ventilatore, te su opisane pojedinosti odabranih ispuna rashladnih tornjeva.

Uz proračun rashladnog tornja proveden je i proračun potrošnje vode na rashladnom tornju za ljetni režim rada u mjesecu srpnju. Na kraju rada prikazan je dispozicijski crtež rashladnog tornja i model tijeka proračuna prikazan u blok dijagramu.

Ključne riječi:

rashladni toranj; karakteristike rashladnog tornja; potrošnja vode

SUMMARY

In this paper, a thermodynamic analysis of a cooling tower of an industrial plant with cooling capacity of 550 kW is shown. The refrigerant used in system is R290 and it is used for cooling a glycol mixture with temperature regime of 0/-5 °C. Analysing the system dimensions of a cooling tower fill, drift eliminators, air louvers, cooling fan, electric motor and piping are chosen.

The introductory part of this paper briefly explains methods of implementation of cooling towers and evaporative condensers with a description of structural elements of the individual units.

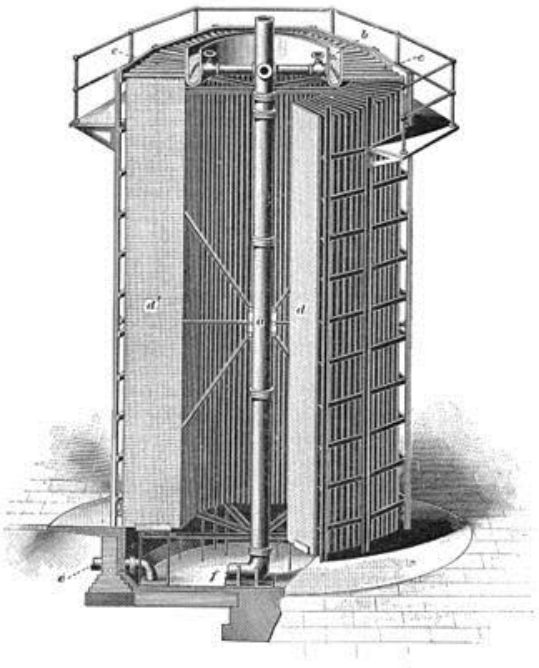
The differences in performance of axial and centrifugal fans are listed and specifications of various cooling tower fills are shown. The water consumption analysis is included for summer cooling regime in July. At the end of this paper a drawing of a cooling tower and block diagram are given.

Key words:

cooling tower; cooling tower characteristics; water consumption

1. UVOD

Rashladni tornjevi su uređaji koji se koriste za hlađenje rashladne vode iz vodom hlađenih kondenzatora. Koriste se u slučajevima gdje je nedostatak izvora vode, primjerice iz rijeka i jezera ili mora, te kada nije moguće zadovoljiti granicu dopuštenog zagrijavanja vode od 3 do 5 °C. Rashladno djelovanje bazira se na principu ishlapljivanja vode u struju vanjskog zraka. U današnje vrijeme rashladna voda ima vrlo visoku ulogu u industrijskim postrojenjima. Rafinerije, čeličane, tvornice hrane i lijekova itd. koriste se strojevima koji otpuštaju toplinsku energiju, te ih je potrebno hladiti. Rashladni tornjevi su stoga vrlo važan dio postrojenja, te njihov nesmetan rad omogućuje rad ostalih sustava. Prvi rashladni tornjevi javljaju se u 19. stoljeću razvojem kondenzatora za parne strojeve. Prve verzije tornjeva su se oslanjale na prirodnu cirkulaciju zraka, pa su iz tog razloga bili dizajnirani po principu dimnjaka da se osigura protok zraka. Rashladna voda se pumpama dovodila do vrha tornja gdje se onda ispuštala sapnicama preko drvenih dasaka.



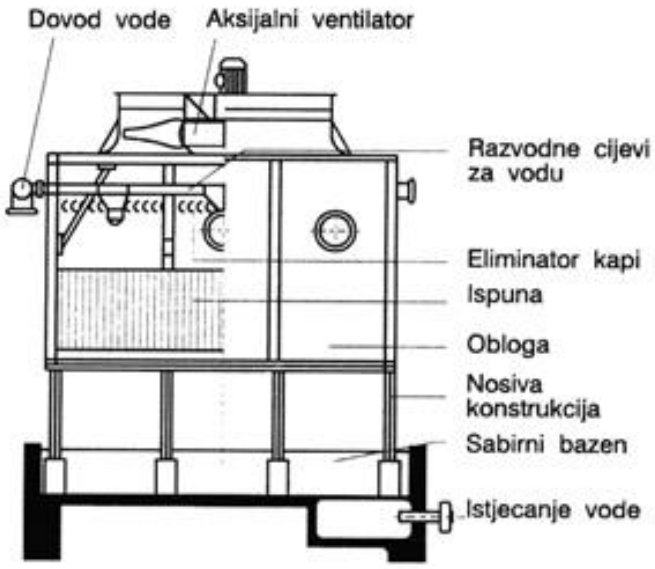
Slika 1. Prve izvedbe rashladnih tornjeva

Postoje dva načina hlađenja kondenzatora hlađenih optočnom vodom:

- Rashladnim tornjevima
- Evaporativnim kondenzatorima

2. RASHLADNI TORNJEVI

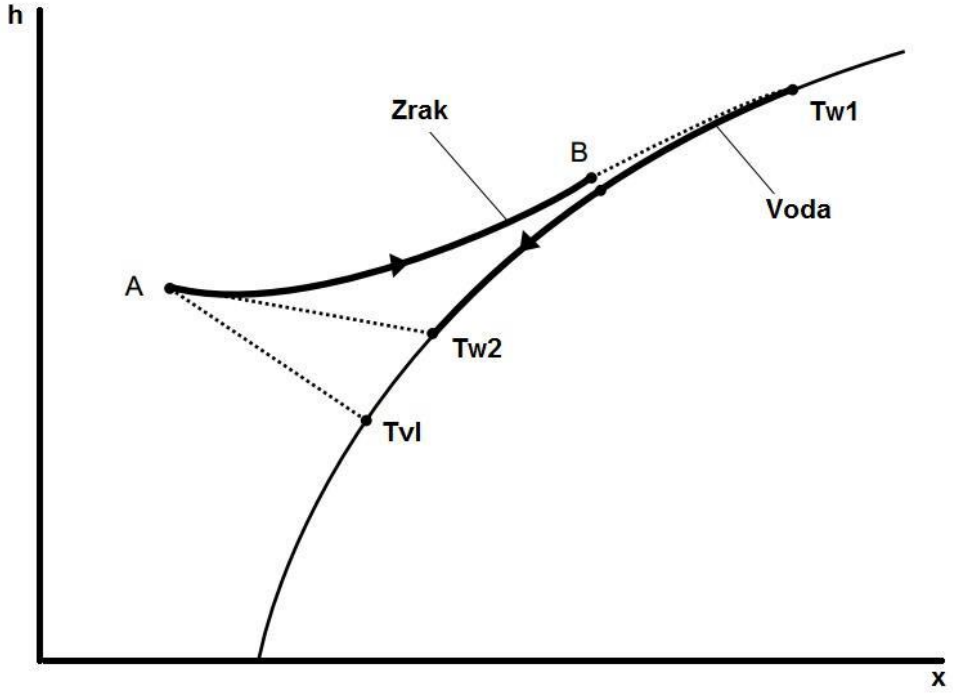
Rashladni toranj se sastoji od ventilatora, ispune, eliminatora kapljica, sapnica za rasprskavanje vode i sabirne posude. Na vrhu tornja se obično stavlja eliminator kapljica da bismo smanjili gubitke vode. Rashladna voda dobavlja se cijevima uz pomoć pumpe koja pumpa vodu iz kondenzatora, koji se uglavnom nalazi u strojarnici. Voda se iz sapnica raspršuje u kapljicama koje zatim klize po ispuni, gdje nam je cilj osigurati sto duži prolaz radi većeg izmjenjenog toplinskog toka. Glavni zadatak ispune je povećati površinu dodira između vode i zraka.



Slika 2. Shematski prikaz rashladnog tornja

Gubici rashladne vode su manji od 5% po jednom prolazu [2], što je vrlo povoljno s obzirom da se rashladna voda plaća. U gubitke svrstavamo gubitke radi ishlapljivanja vode, gubitke radi kapljica odnešenih strujom zraka, te gubitke radi odmuljivanja. Gubici radi ishlapljivanja se javljaju jer se na tome zasniva efekt hlađenja rashladne vode.

Voda ulaskom odozgo hlađena je strujom zraka koji se pritom zasićuje i izlazi u okoliš. Toplinski učinak prvenstveno ovisi o temperaturi vlažnog termometra ulaznog zraka jer se rashladna voda može najviše ohladiti 3 do 4 °C iznad temperature vlažnog termometra okoliša. Voda se u rashladnom tornju ne može ohladiti ispod temperature vlažnog termometra okoliša. To nam stoga govori da što je zrak manje relativne vlažnosti, to će se rashladna voda više moći ohladiti. Uobičajena ulazna temperatura rashladne vode u toranj kreće se u rasponu od 27 °C do 33 °C, a promjena temperature vode je od 4 °C do 7 °C.



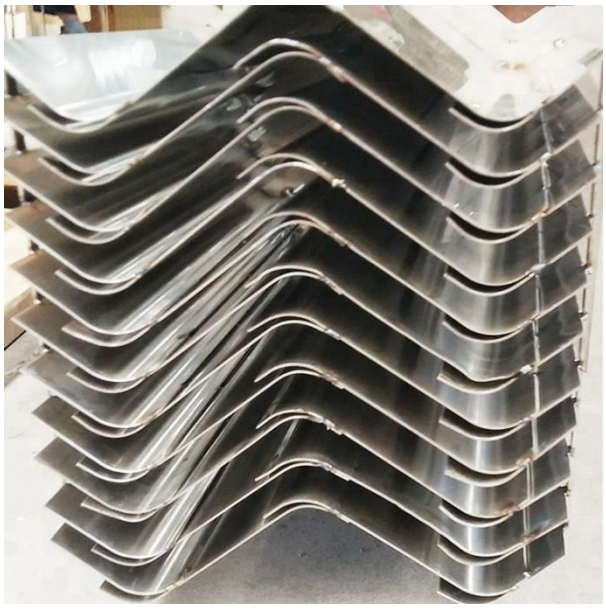
Slika 3. Prikaz procesa u Molliereovom h – x dijagramu

U vodi se prolaskom kroz cijeli sustav može svoriti kamenac i mulj. Unutar tornja također vladaju dobri uvjeti za razvoj legionele i algi. Idealna temperatura za razvoj legionele je od 22 °C do 45 °C [3], što spada u područje rada rashladnog tornja. Temperature iznad 70 °C ubijaju legionelu. Zato se svježa voda koju dodajemo u recirkulirajući sustav mora posebno tretirati kemikalijama poput klora ili sulfatne kiseline. Stoga redovitim održavanjem rashladnog tornja i rashladnog medija produljuje se vijek trajanja.

Pod pojmom održavanje misli se na:

- Kontrolu korozije
- Kontrolu čistoće dijelova
- Mikrobiološku kontrolu
- Kemijsko tretiranje vode

Eliminatori kapljica služe da smanje gubitke vode kroz struju zraka. Konstruirani su tako da imaju puno naglih skretanja kanala. Radi toga kapljice vode se često sudaraju o stijenke i mijenjaju smjer čime im opada kinetička energija, pa samim time padaju nazad u toranj do sabirne posude.



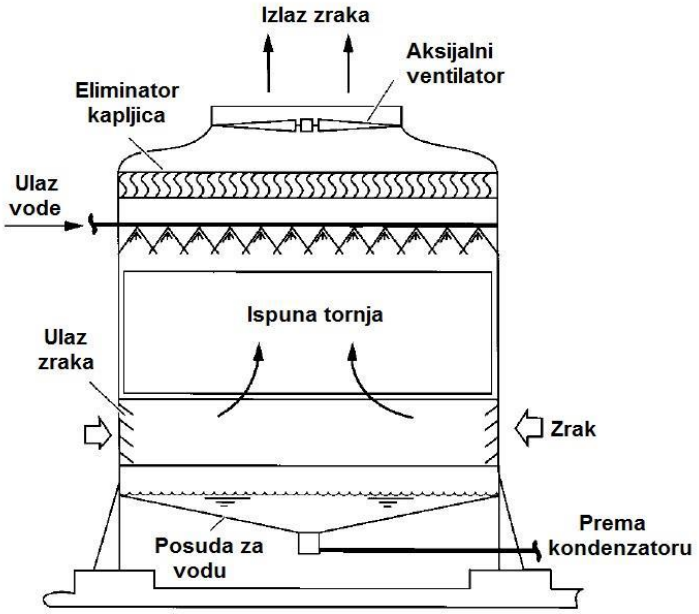
Slika 4. Eliminatori kapljica

Rashladne tornjeve s prislinim strujanjem možemo svrstati u tri kategorije:

1. Protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem
2. Križni rashladni toranj s induciranim tornjem
3. Protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem

2.1. Protusmjerni rashladni tornjevi s induciranim strujanjem

Kod ovakve izvedbe rashladnog tornja ventilator je smješten na vrhu tornja, niz struju zraka. Atmosferski zrak se uvlači kroz otvor za usis ili mrežicu sa dna tornja koji zatim struji vertikalno prema vrhu. Voda se raspršuje iz sapnica na vrhu, te se salijeva prema dolje, ususret nadolazećoj struji zraka. To ovakav tip tornja čini protusmjernim.

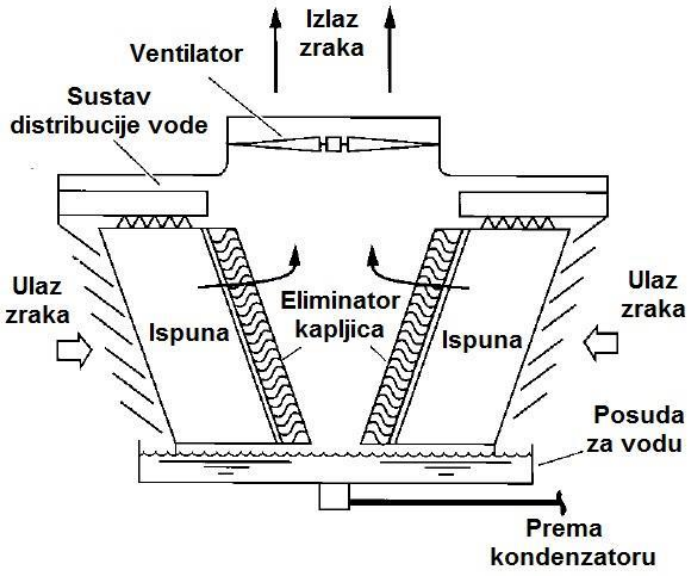


Slika 5. Protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem

U protusmjernim rashladnim tornjevima najsuhlji zrak je u kontaktu sa najhladnijom vodom. To bi značilo da se zrak strujanjem prema vrhu zagrijava pritom hladeći rashladnu vodu. Ovakva vrsta rashladnog tornja pokazuje bolje performanse od križnih rashladnih tornjeva. Zrak jednoličnije prolazi kroz ispunu i izlazi van iz tornja sa višom brzinom. Viša brzina pri izlazu sprječava pojavu recirkulacije zraka.

2.2. Križni rashladni tornjevi s induciranim strujanjem

Kod križnih rashladnih tornjeva s induciranim strujanjem ventilator se također nalazi na vrhu tornja. Ispuna je stavljena na isto mjesto gdje su i otvori, odnosno mrežice za usis zraka. Struja zraka stoga struji horizontalno kroz ispunu i eliminator kapljica. Strujanje zatim mijenja smjer u vertikalno te izlazi van na vrhu tornja. Voda koja se rasprskuje iz sapnica pada vertikalno u ispunu, te se križa sa strujom zraka. Takav način izmjene topline čini ovaj tip tornja križnim.

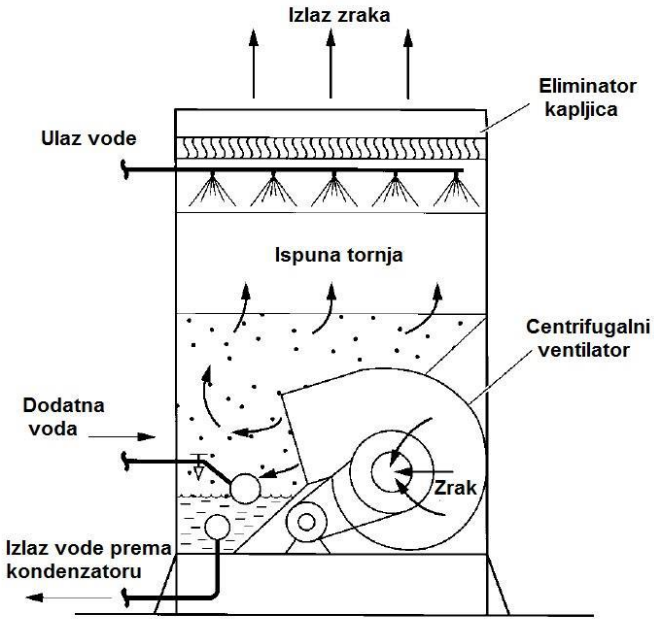


Slika 6. Križni rashladni toranj s induciranim strujanjem

Ovakva izvedba tornja ima puno veću površinu usisa atmosferskog zraka. Također jedna od prednosti ovakvog tornja je ta da je manjih dimenzija, pa nam je potrebna i manja pumpa za dovod rashladne vode jer su sapnice na manjoj visini. Mana ovakvog tornja je ta da može doći do recirkulacije zraka čime se smanjuje učin hlađenja.

2.3. Protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem

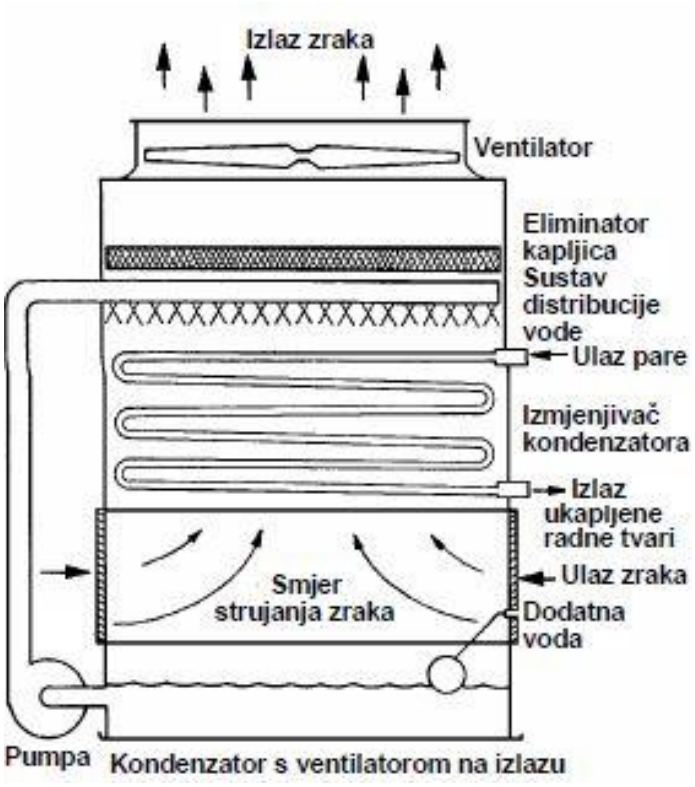
U protusmjernom rashladnom tornju s tlačnim strujanjem centrifugalni ventilator se nalazi na dnu tornja, kod otvora za zrak, te tjera stlačeni zrak vertikalno kroz ispunu. Voda iz sapnica pada vertikalno prema dolje ususret struji zraka. Zbog toga što se ventilator nalazi na dnu tornja, vibracije su puno manje za razliku od ostalih izvedbi. Centrifugalni ventilator osigurava veći protok zraka, pa je i sam učin hlađenja veći. Mana je to što distribucija struje zraka nije jednolika kao i kod aksijalnih ventilatora, pa se voda nejednoliko hladi. Zbog snažnog usisa zraka može doći do recirkulacije zraka, što je nepovoljno. Protusmjerni rashladni tornjevi s tlačnim strujanjem se uglavnom koriste u malim i srednje velikim instalacijama.



Slika 7. Protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem

3. EVAPORATIVNI KONDENZATORI

Kod vodom hlađenih kondenzatora evaporativni kondenzatori predaju toplinu u okoliš ishlapljivanjem rashladne vode. Kroz cijevi kondenzatora struji para radne tvari visoke temperature i visokog tlaka, te se one u isto vrijeme kontinuirano škrope rashladnom vodom s vanjske strane uz pomoć recirkulirajućeg sustava rashladne vode.



Slika 8. Poprečni presjek evaporativnog kondenzatora

Kako je vidljivo sa slike 8 zrak istovremeno struji preko kondenzatorskih cijevi, što rezultira ishlapljivanjem jednog dijela recirkulirajuće rashladne vode. Taj proces ishlapljivanja odvodi toplinu od cijevi, čime se hladi i kondenzira para radne tvari.

Evaporativni kondenzatori smanjuju potrebu kemijskog tretiranja vode koje vežemo uz rashladne tornjeve. U odnosu na zrakom hlađene kondenzatore, evaporativni kondenzatori zahtjevaju puno manju površinu cijevi i protoka zraka da bi se postigao isti rashladni učin, što ih čini energetski učinkovitijim.

Evaporativni kondenzatori mogu raditi na nižim temperaturama kondenzacije u odnosu na zrakom hlađene kondenzatore iz razloga što je temperatura kondenzacije radne tvari kod zrakom hlađenih kondenzatora određena temperaturom suhog termometra okoliša. Temperaturu kondenzacije radne tvari kod evaporativnih kondenzatora određuje temperatura vlažnog termometra okoliša, koja je uobičajeno oko 7 °C niža od temperature suhog termometra. Evaporativni kondenzatori su stoga manjih dimenzija za isti zadani rashladni učin.

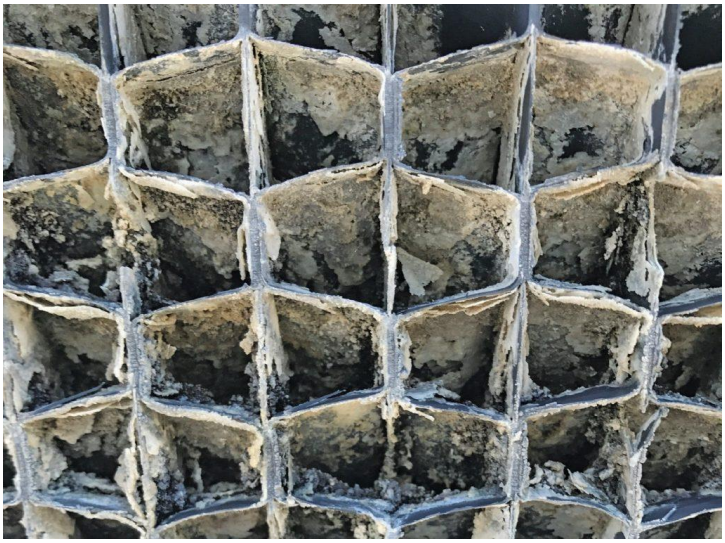
Tok topline kod evaporativnih kondenzatora ide s radne tvari koja kondenzira unutar cijevi, prolazi kroz stijenku cijevi, zatim prolazi kroz tanki sloj vode, te u konačnici dolazi do struje zraka. Prijenos topline u prvom koraku pokreće temperaturna razlika između kondenzirajuće radne tvari i taknog sloja rashladne vode na površini cijevi.

U drugom koraku prijenos topline pokreće razlika temperatura i entalpija između površine vodenog sloja i zraka. Izmjena osjetne topline na mjestu dodira vodenog sloja i zraka odvija se radi temperaturnog gradijenta i ishlapljivanja vodene pare u struju zraka radi entalpijskog gradijenta.

Glavni dijelovi evaporativnih kondenzatora su:

- kondenzatorske cijevi
- ventilatori
- vodene sapnice
- sustav raspodjele vode
- spremnik hladne vode
- eliminatori kapljica
- sustav nadoknade svježe vode

Gotovo svi evaporativni kondenzatori u komercijalnoj uporabi rade s prisilnim strujanjem zraka, to jest, koriste ventilatore za stvaranje protoka struje zraka. Također ih dijelimo na aksijalne i centrifuaglne, isto kao i kod rashladnih tornjeva.



Slika 9. Primjer taloga kod loše održavanog rashladnog tornja

Kako se i evaporativni kondenzatori služe recirkulirajućom vodom nakon određenog vremena nastaje sve više i više taloga ishlapljivanjem vode. Intenzivno taloženje može dovesti do stvaranja ljuštenja dijelova i korozije. Uz navedene probleme tu se još i javljaju biološki zagađivači i nečistoće, kao što je npr Legionela. Tretiranje ovih problema rješava se isto kao i kod rashladnih tornjeva, to jest tretiranjem kemikalijama poput klora ili sulfatne kiseline.

4. LEGIONARSKA BOLEST

Legionela je živi organizam koji spada u patogenu skupinu bakterija. Vrlo često se veže uz sustave klimatizacije, grijanja i hlađenja pošto oni nerijetko rade na idealnim temperaturama za njen rast i razvoj (22 °C do 45 °C) [3]. Često se može naći u komponentama sa spremnicima vode kao što su rashladni tornjevi, evaporativni kondenzatori, ovlaživači zraka itd. Uz navedene sustave se uvijek javlja vodena para koja na izlazu kondenzira u vodenu maglicu. U slučaju da voda sadrži legionelu, osoba koja udahne tu maglicu može vrlo lako razviti legionarsku bolest. Osoba koja se zarazila tom bolešću razvija upalu pluća, s povišenom temperaturom i raspadom dišnog sustava koja može voditi do smrti. Najveći broj oboljelih razvije bolest u zatvorenim prostorima. Stoga, radi prevencije, sustave treba projektirati tako da zrak koji izlazi iz rashladnih tornjeva, evaporativnih kondenzatora itd. ne bude u blizini usisnih kanala za ventilaciju zraka.

5. ISPUNA RASHLADNOG TORNJA

Ispuna rashladnog tornja ima važnu, ako ne i najvažniju, funkciju rashladnog tornja. Ona treba moći osigurati što bolju izmjenu topline rashladne vode s ulaznom strujom zraka kako bi se ta rashladna voda mogla što bolje ohladiti, a da dimenzije ispune budu što manje.

Kroz povijest su se koristili različiti materijali za izradu ispune, kao što su: drvo, glina, azbest i čelik. Danas se gotovo uvijek koriste PVC ispune, radi niske cijene i odličnih karakteristika. Lako se proizvode što im snižava cijenu, a imaju mogućnost dobrog oblikovanja u razne oblike što im daje bolje karakteristike.

Prema obliku, ispunu dijelimo na 2 tipa:

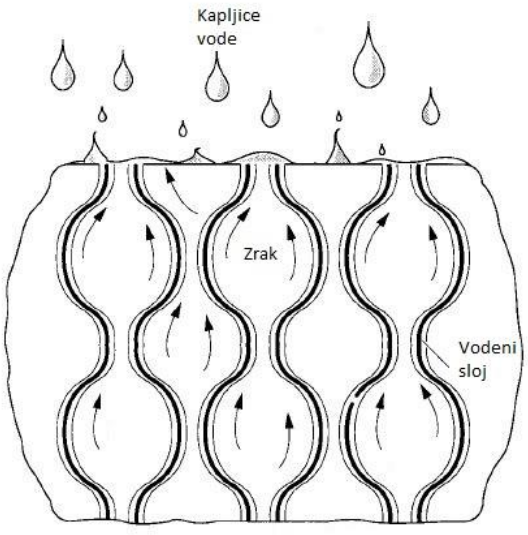
- Ispuna u obliku cijevi/rešetki za raspršivanje
- Ispuna u obliku folije

Ispuna u obliku cijevi ili rešetki za raspršivanje radi na principu da rashlanda voda pada u kaskadama po cijevima ispune sve do donjeg dijela ispune, čime se ujedno i raspršuje u sitne kapljice (odakle i naziv za ispunu). Ovakav tip ispune pruža najmanji otpor pri horizontalnom strujanju zraka, stoga je poželjno da se koristi kod križnih rashladnih tornjeva s induciranim strujanjem. Velika prednost ovog tipa ispune je ta da nije potrebna visoka kvaliteta distribucije vode po sapnicama iz razloga što se voda u konačnici dobro raspodijeli padanjem kroz ispunu. Održavanje je vrlo jednostavno radi otvorenosti i preglednosti ispune, što olakšava vizualnu kontrolu.



Slika 10. Ispuna u obliku šipki za raspršivanje

Drugi tip ispune, ispuna u obliku folije, se uglavnom izrađuje iz PVC materijala. Oblikuje se u rebraste uzorke, preko kojih voda zatim struji u vrlo tankom filmu. Iako ima manu da rashladna voda nije u potpunosti ravnomjerno rasprostranjena kroz ispunu i dalje se više koristi iz razloga što ima višu učinkovitost zbog toga što je površina za prijenos mase po volumenu ispune tornja viša. To zapravo znači da ova vrsta ispune ima veću dodirnu površinu, dulje trajanja kontakta rashladne vode sa strujom zraka i prisan kontakt između rashladne vode i zraka. U praksi se pokazalo da korištenjem ovog tipa ispune rashladna voda na izlazu iz tornja bude za 1.1 °C hladnija naspram ostalih izvedbi [4].



Slika 11. Ispuna u obliku folije

6. MATERIJALI ZA IZRADU RASHLADNIH TORNJEVA

Odabir materijala za izradu rashladnih tornjeva provodi se s obzirom na kvalitetu raspoložive rashladne vode i amosferskih uvjeta.

Drvo se često koristilo u prošlosti za izradu kućišta. Sekvoja i jela su bile vrste drveta koja su se preferirala za izradu, ali ih je bilo potrebno posebno kemijski tretirati radi štetočina. Takve kemikalije su danas zabranjene za uporabu iz razloga što su jako štetne za okoliš, stoga se drvo, kao materijal, praktički u potpunosti izbacilo iz uporabe.



Slika 12. Rashladni toranj izrađen od drveta

Metali su jako rasprostranjeni kao materijali za izgradnju rashladnih tornjeva. Čelik galvaniziran cinkom se koristi za rashladnje tornjeve malih i srednjih dimenzija. Bronca i mjed se koriste za izradu cijevi. Vanjska konstrukcija je od nehrđajućeg čelika radi korozivne atmosfere, dok se nehrđajući čelik također koristi za spremnike vode. Ovakve vrste rashladnih tornjeva uglavnom imaju višu cijenu.



Slika 13. Rashladni toranj izrađen od galvaniziranog čelika

Rashladni tornjevi od staklenih vlakana su relativno nova tehnologija u industriji, koja je u današnje vrijeme u vrlo brzom razvoju. Puno industrijskih postrojenja mijenja stara kućišta za nova izrađena od staklenih vlakana. Razlog je taj da ona imaju manju masu uz zadovoljavajuću čvrstoću, te su dugotrajnija. Ističe ih iznimna otpornost na koroziju, a montaža i izrada su vrlo brza što je jako poželjno. Cijenom su konkurentna kućištima od nehrđajučeg čelika.



Slika 14. Rashladni toranj izrađen od staklenih vlakana

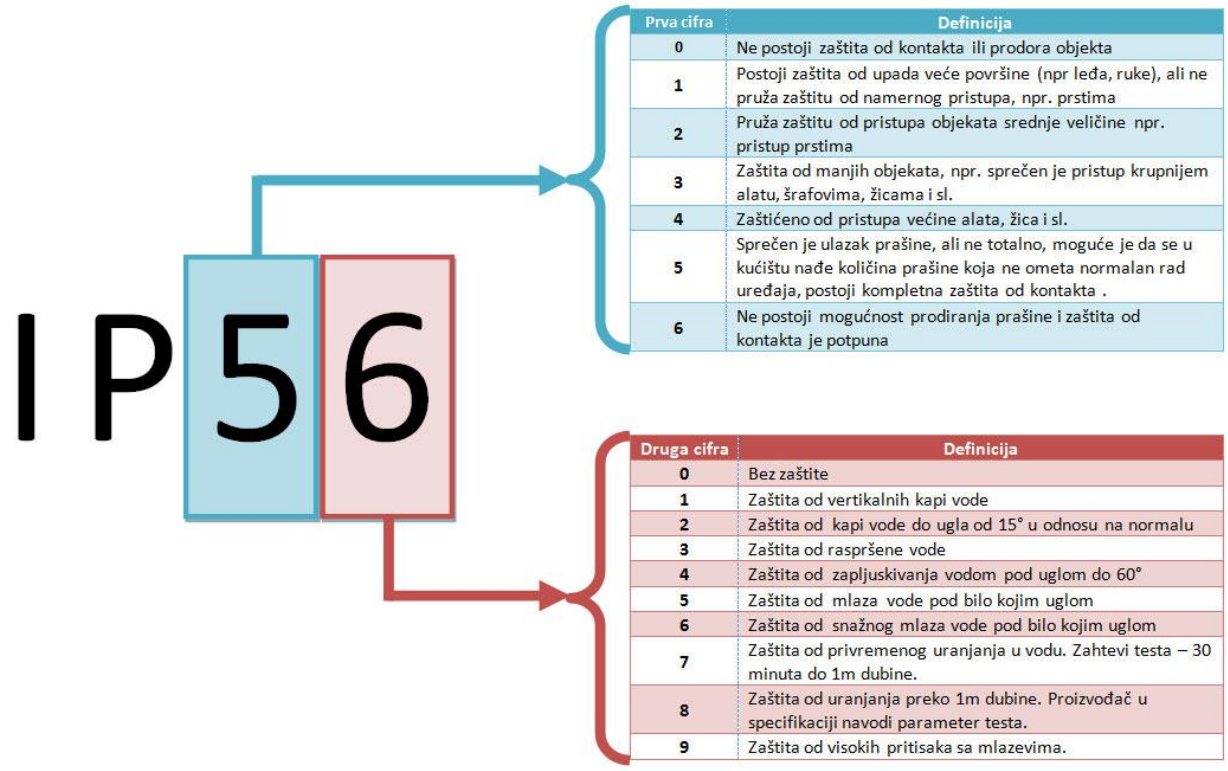
Beton se uglavnom koristi za rashladne tornjeve velikih dimenzija i kapaciteta. Imaju jako dugačak životni vijek, u prosjeku od 38 do 40 godina. Izgradnja je vrlo spora, te se moraju raditi na licu mjesta. Uz to im je cijena jako visoka.



Slika 15. Betonski rashladni toranj

7. IP ZNAČAJKE ELEKTROMOTORA

IP značajka, punog naziva „Ingress Protection code“ (u prijevodu: značajka zaštite od ulaska), odnosi se na različite razine zaštite kućišta i označava stupanj zaštićenosti od prašine, vode i udaraca. IP značajka ima široku primjenu u Europi i dobiva se temeljitim testiranjem proizvoda. Norma za IP značajke glasi EN 60529. Isprva joj je namjena bila za elektroničke proizvode i kućišta, no danas se koristi i za definiranje brtvljenosti rotacijskih strojeva [12]. Značajka se dijeli na 2 karakteristična broja. Prvi broj označava zaštitu opreme od prodora stranih krutih rijela, dok drugi broj označava zaštitu opreme protiv štetnog ulaska tekućine.



Prva cifra	Definicija
0	Ne postoji zaštita od kontakta ili prodora objekta
1	Postoji zaštita od upada veće površine (npr leđa, ruke), ali ne pruža zaštitu od namernog pristupa, npr. prstima
2	Pruža zaštitu od pristupa objekata srednje veličine npr. pristup prstima
3	Zaštita od manjih objekata, npr. sprečen je pristup krupnijem alatu, šrafovima, žicama i sl.
4	Zaštićeno od pristupa većine alata, žica i sl.
5	Sprečen je ulazak prašine, ali ne totalno, moguće je da se u kućištu nađe količina prašine koja ne ometa normalan rad uređaja, postoji kompletna zaštita od kontakta .
6	Ne postoji mogućnost prodiranja prašine i zaštita od kontakta je potpuna

Druga cifra	Definicija
0	Bez zaštite
1	Zaštita od vertikalnih kapi vode
2	Zaštita od kapi vode do ugla od 15° u odnosu na normalu
3	Zaštita od raspršene vode
4	Zaštita od zapljuskivanja vodom pod uglom do 60°
5	Zaštita od mlaza vode pod bilo kojim uglom
6	Zaštita od snažnog mlaza vode pod bilo kojim uglom
7	Zaštita od privremenog uranjanja u vodu. Zahtevi testa – 30 minuta do 1m dubine.
8	Zaštita od uranjanja preko 1m dubine. Proizvođač u specifikaciji navodi parameter testa.
9	Zaštita od visokih pritisaka sa mlazevima.

Slika 16. Kategorizacija IP značajki

Rashladni tornjevi i evaporativni kondenzatori su sutavi koji su konstantno izloženi vlažnim uvjetima. S obzirom da su ventilatori pogonjeni elektromotorom treba biti oprezan prilikom odabira. Nerijetko se, kod npr. aksijalnih ventilatora, elektromotor nalazi na samom vratilu ventilatora koji je direktno izložen kondenzatu vode u struji zraka i kapljicama. U takvim uvjetima može doći do kvara, ukoliko je odabrana nedovoljna zaštita. S obzirom na radne uvjete, preporuča se odabir elektromotora s IP 68 značajkom. To bi, prema slici 16., značilo da je elektromotor osiguran od prodiranja prašine i potpuno je zaštićen od vanjskog kontakta, te je zaštiten od visokih uvjeta vlage. Prilikom kupovine potrebnog elektromotora za zadani sustav, potrebno je naglasiti proizvođaču željenu razinu značajke. To u konačnici znači da proizvođač treba staviti dodatne brtve na već gotov proizvod da bi se posigla željena zaštita.

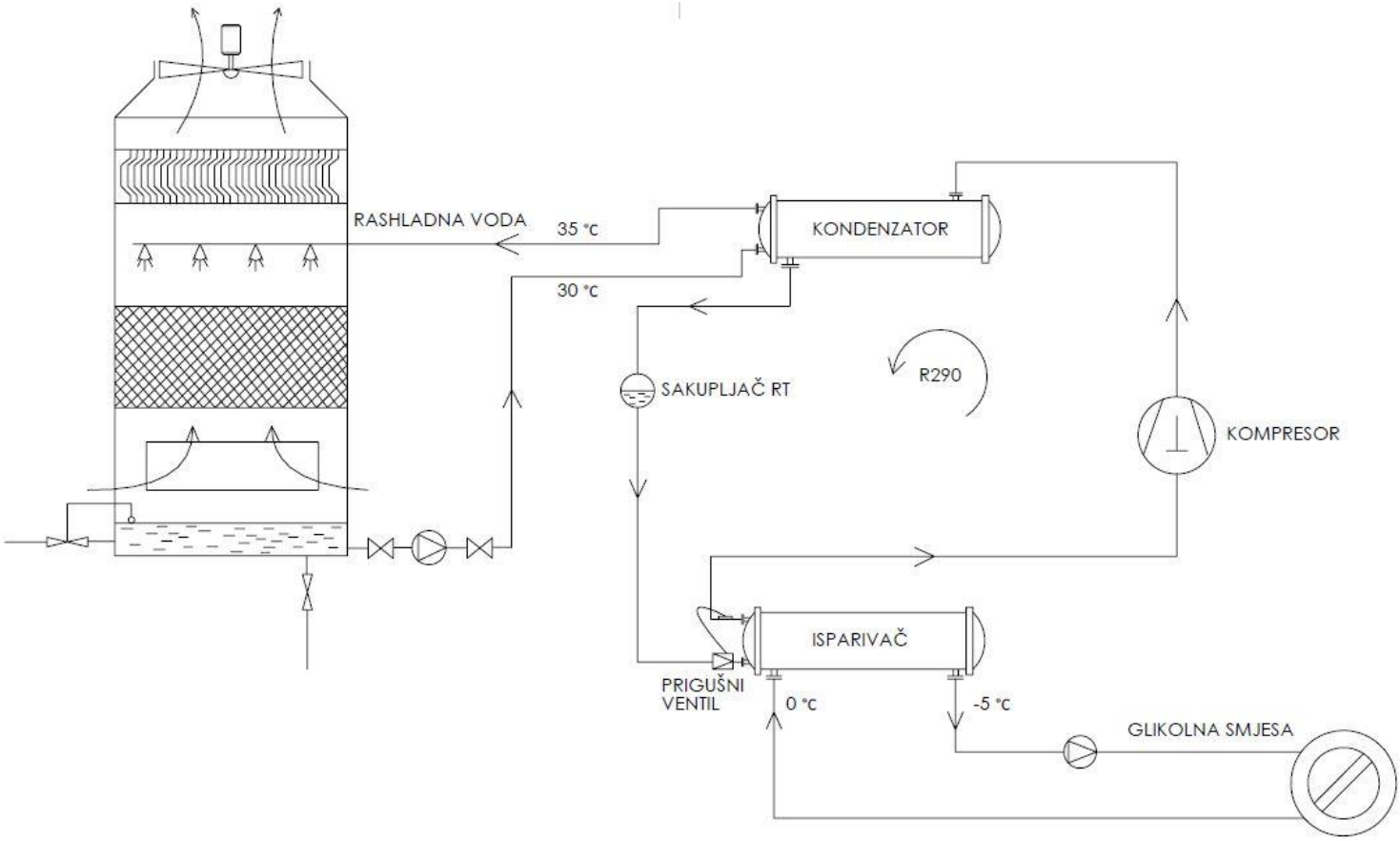
8. PRORAČUN RASHLADNOG TORNJA

8.1. Projektni zadatak

Optočna voda koristi se za hlađenje kondenzatora s cijevima u plaštu. Voda se zatim hladi na rashladnom tornju kao što prikazuje slika 17.
Za potrebe rashladnog agregata učinka hlađenja 550 kW potrebno je projektirati rashladni toranj na kojem se optočna voda hladi s 35 °C na 30 °C. Radna tvar rashladnog agregata za hlađenje glikolne smjese u temperaturnom režimu 0/-5 °C je propan R290.

Ulazni podaci:

- Radna tvar R290
- Temperatura isparavanja ϑ_i= -8 °C
- Temperatura kondenzacije ϑ_k= 38 °C
- Tlak isparavanja p_i= 3,69 bar
- Tlak kondenzacije p_k= 13,1 bar
- Rashladni učinak Φ_0= 550 kW
- Temperatura glikolne smjese na ulazu u isparivač $\vartheta_{GL,u}$= 0 °C
- Temperatura glikolne smjese na izlazu iz isparivača $\vartheta_{GL,i}$= -5 °C
- Izentropski stupanj djelovanja kompresora η= 0,65
- Pregrijanje $\Delta\vartheta_{preg}$ = 5 °C
- Pothlađenje $\Delta\vartheta_{pot}$ = 3 °C
- Temperatura okolišnog zraka ϑ_{ok} = 33 °C
- Relativna vlažnost okolišnog zraka φ_{ok} = 55 %



Slika 17. Shema rashladnog postrojenja

8.2. Određivanje temperatura kondenzacije i isparavanja

Za stanje vanjskog zraka temperature 33 °C i relativne vlažnosti 55% korištenjem programa COOLPROP određena je temperatura vlažnog termometra vanjskog zraka u iznosu od 25, 8 °C.

$$\vartheta_{z,\,vl1} = 25,\,8\ °C \approx 26\ °C$$

Pri čemu je:

$\vartheta_{z,\,vl1}$ temperatura vlažnog termometra ulaznog zraka [°C]

Temperatura vlažnog termometra postavlja teoretski najnižu temperaturu na koju se hlađena rashladna voda može ohladiti, odnosno predstavlja granicu hlađenja vode. Kako je to teoretski proces pretpostavljena je izlazna temperatura vode 4 °C viša od granice hlađenja.

$$\vartheta_{w2} = \vartheta_{z,\,vl1} + 4\ °C = 26 + 4 = 30\ °C$$

Pri čemu je:

ϑ_{w2} temperatura vode na izlazu iz rashladnog tornja [°C]

Prema [3] uobičajeni temperaturni raspon u rashladnom tornju iznosi od 4 °C do 7 °C. U ovom proračunu je pretpostavljena temperaturna razlika vode na kondenzatoru u iznosu od 5 °C. Prema tome, temperatura vode na ulazu u rashladni toranj iznosi:

$$\vartheta_{w1} = \vartheta_{w2} + 5\ °C = 30 + 5 = 35\ °C$$

Pri čemu je:

ϑ_{w1} temperatura vode na ulazu u rashladni toranj [°C]

Kako bi se odredila temperatura kondenzacije pretpostavljena je razlika od 3 °C između temperature vode na izlasku iz kondenzatora i temperature kondenzacije.

$$\vartheta_{kond} = \vartheta_{w1} + 3\ °C = 35 + 3 = 38\ °C$$

Pri čemu je:

ϑ_{kond} temperatura kondenzacije [°C]

Temperatura isparavanja određena je preko izlazne temperature glikolne smjese u iznosu od -5 °C i temperaturne razlike od 3 °C

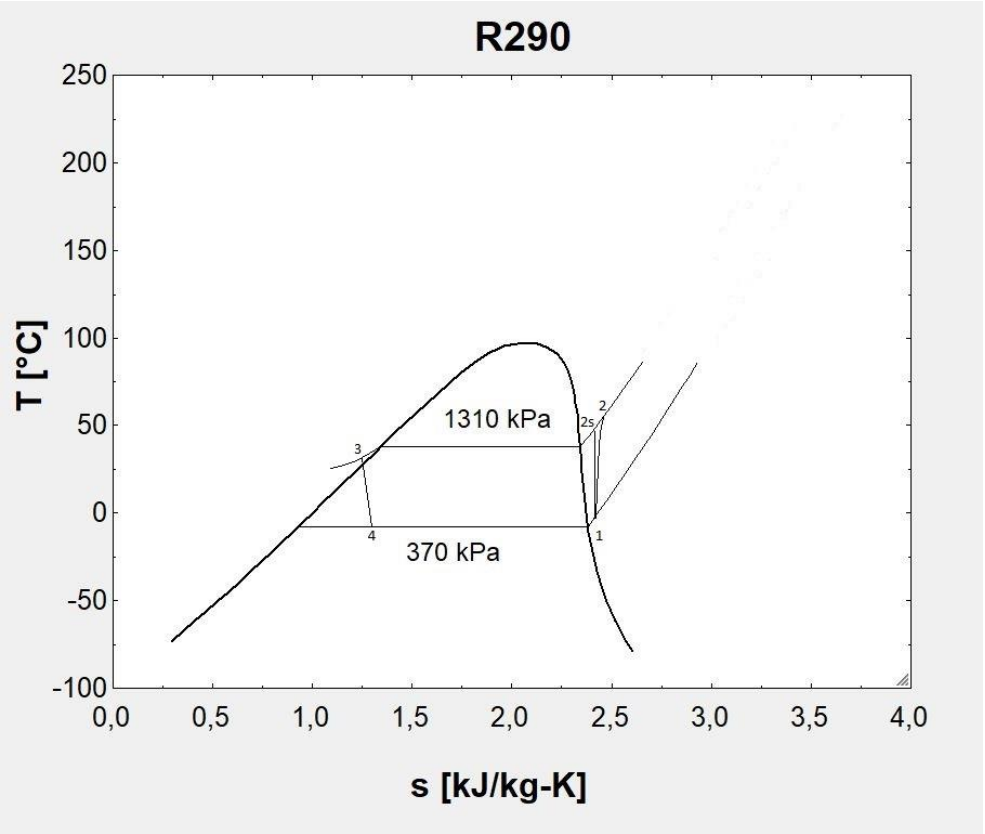
$$\vartheta_{isp} = \vartheta_{GL,i} - 3\ °C = -5 - 3 = -8\ °C$$

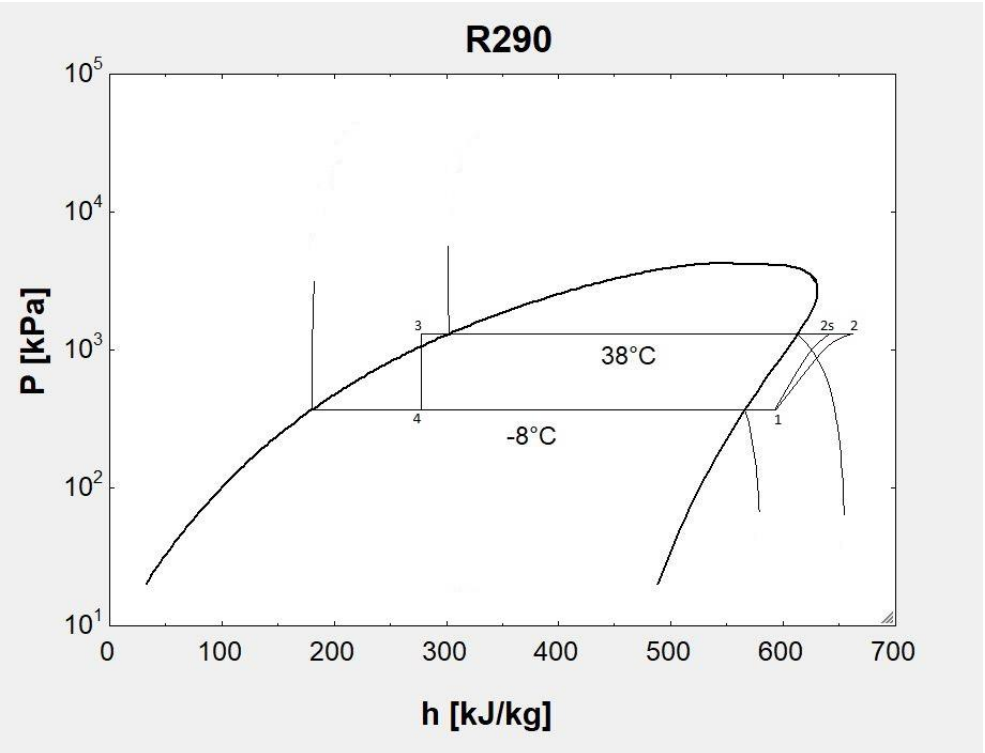
Pri čemu je:

ϑ_{isp} temperatura isparavanja [°C]

8.3. Rashladni krug

Na slici 18 prikazani su *T – s* dijagram i *log(p)-h* dijagram rashladnog procesa. Temperatura na izlazu iz kompresora iznosi 63 °C uz izentropski stupanj kompresije, predložen od strane mentora, $\eta = 0{,}65$.





Slika 18. Prikaz rashladnog procesa u T – s i log p – h dijagramu

Tablica 1. prikazuje vrijednosti temperature, tlaka, specifične entalpije i specifične entropije u svakoj točci procesa izračunate programom COOLPROP. Pretpostavljena razlika između temperature kondenzacije i temperature pothlađenja iznosi 3 °C. U kompresor ulazi pregrijana radna tvar R290 da bismo izbjegli pojavu hidrauličkog udara. Razlika između temperature isparavanja i temperature pregrijanja iznosi 5 °C. Točka 2s predstavlja stanje nakon izentropske kompresije radne tvari dok je stanje točke 2 izračunato korištenjem izentropskog stupnja kompresije $\eta = 0{,}65$.

Točke procesa	**Temperatura [°C]**	**Tlak [bar]**	**Specifična entalpija [kJ/kg]**	**Specifična entropija [kJ/kgK]**
1	-3	3,7	574,2423	2,4124
2	48,12	13,1	635,1105	2,4124
2s	63,32	13,1	667,8836	2,5095
3	38	13,1	292,8073	1,3136
4	-8	3,7	292,8073	

Tablica 1. Točke procesa

Pomoću definiranih točaka procesa i poznatog rashladnog učinka izračunat je protok radne tvari kroz sustav:

$$q_{m,RT} = \frac{\Phi_o}{h_1 - h_4} = \frac{550}{574{,}2423 - 292{,}8073} = 1{,}9543\ kg/s$$

Snaga kompresora:

$$P_{komp} = q_{m,RT} \cdot (h_2 - h_1) = 1{,}9543 \cdot (667{,}8856 - 574{,}2423) = 183\ kW$$

Učinak kondenzatora:

$$\Phi_{kond} = \Phi_o + P_{komp} = 550 + 183 = 733\ kW$$

Faktor hlađenja procesa COP:

$$COP = \frac{\Phi_o}{P_{komp}} = \frac{550}{183} = 3{,}0055$$

Protok rashladne vode:

$$C_1 \cdot (T_{w2} - T_{w1}) = c_w \cdot q_{m,w} \cdot (T_{w2} - T_{w1}) = \Phi_o + P_{komp} = \Phi_k$$

$$q_{m,w} = \frac{\Phi_k}{c_w \cdot (T_{w2} - T_{w1})} = \frac{733}{4{,}179 \cdot (35 - 30)} = 35{,}08\ kg/s$$

Pri čemu je:

c_w specifični toplinski kapacitet rashladne vode za srednju temperaturu od 32,5 °C [4,179 kJ/kgK]

Protok glikolne smjese:

$$q_{m,glikol} = \frac{\Phi_o}{c_{glikol} \cdot (T_{povrat} - T_{polaz})} = \frac{550}{3{,}715 \cdot (0 - (-5))} = 29{,}61\ kg/s$$

Pri čemu je:

c_{glikol} specifični toplinski kapacitet 40%-tne glikolne smjese [3,715 kJ/kgK]

9. DIMENZIONIRANJE RASHLADNOG TORNJA

9.1. Optimalni omjer masenih protoka vode i zraka

Protok vode rashladne vode $q_{m,w}$ izračunat je pomoću učinka kondenzatora i pretpostavljene temperaturne razlike od 5 °C:

$$C_1 \cdot (\vartheta_{w2} - \vartheta_{w1}) = c_w \cdot q_{m,w} \cdot (\vartheta_{w2} - \vartheta_{w1}) = \Phi_k$$

$$q_{m,w} = \frac{\Phi_k}{c_w \cdot (\vartheta_{w2} - \vartheta_{w1})} = \frac{733}{4{,}179 \cdot (35 - 30)} = 35{,}08\ kg/s$$

Pri čemu je:

c_w specifični toplinski kapacitet rashladne vode za srednju temperaturu od 32,5 °C [4,179 kJ/kgK]

Prema [7] izračunat je optimalni omjer masenih protoka vode i zraka:

$$\left(\frac{q_{m,w}}{q_{m,z}}\right)_{opt} = \frac{c_z}{c_w} + \frac{r_w \cdot 0{,}622 \cdot e^{18{,}6 - \frac{5206{,}9}{T_{w,sr}}} \cdot 5206{,}9 \cdot p_{ok}}{c_w \cdot T_{w,sr}^2 \cdot \left(p_{ok} - e^{18{,}6 - \frac{5206{,}9}{T_{w,sr}}}\right)^2}$$

Pri čemu su:

$q_{m,z}$ protok zraka kroz rashladni toranj [kg/s]

r_w toplina isparavanja vode [2500 kJ/kg]

$T_{w,sr}$ srednja temperatura vode kroz rashladni toranj [305,65 K]

p_{ok} tlak okoliša [101,325 kPa]

Uvrštavanjem brojeva u prethodnu jednadžu dobiva se:

$$\left(\frac{q_{m,w}}{q_{m,z}}\right)_{opt} = \frac{1{,}036}{4{,}179} + \frac{2500 \cdot 0{,}622 \cdot e^{18{,}6-\frac{5206{,}9}{305{,}65}} \cdot 5206{,}9 \cdot 101{,}325}{4{,}179 \cdot 305{,}65^2 \cdot \left(101{,}325 - e^{18{,}6-\frac{5206{,}9}{305{,}65}}\right)^2} = 1{,}3231$$

Maseni protok zraka kroz rashladni toranj iznosi:

$$q_{m,z} = \frac{q_{m,w}}{1{,}3231} = \frac{35{,}08}{1{,}3231} = 26{,}51\ kg/s$$

9.2. Promjena entalpije zraka prolaskom kroz rashladni toranj

Poznavanjem masenog protoka vode i zraka te pada temperature vode na rashladnom tornju moguće je izračunati promjenu specifične entalpije zraka na rashladnom tornju:

$$\Delta h_z = \frac{q_{m,w}}{q_{m,z}} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w2}) = 1{,}3231 \cdot 4{,}179 \cdot (35 - 30) = 27{,}6462\ kJ/kg$$

Pri čemu je:

Δh_z promjena entalpije zraka prolaskom kroz rashladni toranj [kJ/kg]

9.3. Izračun karakteristike tornja

Za izračun karakteristike rashladnog tornja prema Merkelovoj metodi korišten je sljedeći izraz [7]:

$$\frac{KaV}{L} = c_w \cdot \int_{T_{w2}}^{T_{w1}} \frac{dT}{h_s - h_z}$$

Pri čemu su:

K	koeficijent prijenosa mase [kg/m^{2}s]
a	površina za prijenos mase izražena po volumenu ispune tornja [m^{-1}]
V	volumen ispune tornja po poprečnom presjeku tornja [m^3/m^2]
L	gustoća masenog protoka vode [kg/m^{2}s]
T	temperatura vode kroz rashladni toranj [°C]
h_s	entalpija zasićenog zraka na temperaturi vode u promatranom lokalnom segmentu [kJ/kg]
h_z	entalpija struje zraka u promatranom lokalnom segmentu ispune [kJ/kg]

U Tablici 2. prikazana je provedba numeričke integracije s temperaturnim korakom u iznosu od 0,5 °C. Pretpostavljeno je da se entalpija zraka h_z mijenja linearno s porastom temperature vode, od ulazne specifične entalpije u iznosu od 81,848 kJ/kg do 109,5471 kJ/kg. Vrijednosti entalpije zasićenog zraka uzete su iz Toplinskih tablica. [13]

Temperatura vode T_w [°C]	**h_s (T_w) [kJ/kg]**	**h_z [kJ/kg]**	**(h_s- h_z) [kJ/kg]**	**1/(h_s- h_z) [kg/kJ]**	**Prosječna vrijednost 1/(h_s- h_z) [kg/kJ]**
30	100,0105	81,848	18,1625	0,05505	
30,5	102,6618	84,6179	18,0438	0,05542	0,05523
31	105,3737	87,3878	17,9858	0,05559	0,05551
31,5	108,148	90,15773	17,9903	0,05558	0,05559
32	110,9863	92,9276	18,0587	0,05537	0,05548
32,5	113,8902	95,6975	18,1926	0,05496	0,05517
33	116,8617	98,4875	18,3942	0,05436	0,05466
33,5	119,9206	101,2374	18,6652	0,05357	0,05397
34	123,0146	104,0073	19,0073	0,05261	0,05309
34,5	126,1999	106,7772	19,4227	0,05148	0,05205
35	129,4604	109,5471	19,9133	0,05021	0,05085
				SUMA	0,54162

Tablica 2. Numerička integracija za izračun karakteristike tornja

Karakteristika tornja iznosi:

$$\frac{KaV}{L} = c_w \cdot \Delta T_{w,i} \cdot \sum_i \frac{1}{h_{s,i} - h_{z,i}} = 4{,}179 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}54162 = 1{,}1317$$

Pri čemu je:

$\Delta T_{w,i}$ korak numeričke integracije [0,5 °C]

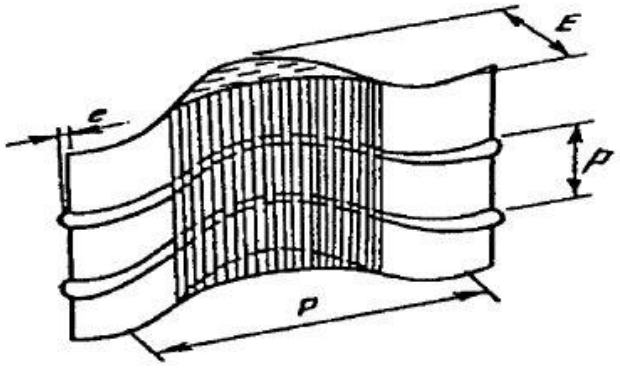
9.4. Izračun dimenzija ispune rashladnog tornja

Ispune rashladnog tornja tipično imaju dosta kompleksne geometrije površine, za koju se koeficijent prijenosa mase K ne može analitički odrediti. Stoga se eksperimentima za različite tipove geometrija dolazi do koeficijenta Ka (kg s^{-1} m^{-3}), iz razloga što koeficijent površine za prijenos mase izražen po volumenu ispune tornja „a“ je vrlo teško zasebno odrediti [8]. Za ispunu rashladnog tornja odabrana je ispuna grupe C6 iz Tablice 3. za koju su Goshayshi i Missenden [9] eksperimentalno odredili koeficijente.

Test group	Type of corrugation	Surface area per unit volume (m^{-1})	Pitch (mm)	Spacing (mm)	P/D	Type of surface	p/e	θ(°)
C1	Sinusoidal	200	70	50	1.40	Rough	1	45
C2	Sinusoidal	250	65	40	1.65	Rough	3	0
C3	Triangular	300	45	40	1.13	Smooth	–	–
C4	Triangular	350	50	35	1.43	Rough	4	0
C5	Hexagonal	470	40	25	1.32	Rough	5	0
C6	Sinusoidal	500	30	20	1.50	Rough	4	45
C7	Triangular	500	30	20	1.50	Rough	5	0

Tablica 3. Oblik rebrastih ispuna korištenih u eksperimentima [9]

Ispuna C6 je sinusoidalnog oblika, sa omjerom visine i širine ispune P/D = 1.5 za koju se postižu najveće vrijednosti koeficijenta Ka. Kut nagiba poprečnog rebra sa horizontalnim θ iznosi 45°.



Slika 19. Poprečni presjek rebraste ispune

Goshayshi i Missenden predlažu jednadžbu pomoću koje se faktor Ka može odrediti za svaku skupinu ispune uz grešku od ±4%:

$$Ka = c_1 \cdot (L)^{0,45} \cdot (G)^{0,6}$$

Pri čemu koeficijent Ka ovisi o:

c_1	eksperimentalna konstanta
L	gustoća masenog protoka vode [kg/m^{2}s]
G	gustoća masenog protoka zraka [kg/m^{2}s]

Prema [4] ukoliko gustoća masenog protoka vode padne na 2440 kg/hm^2, voda se ne može dovoljno ravnomjerno distribuirati po površini ispune i samim time pada učinak. S druge pak strane, ako gustoća masenog protoka vode prijeđe iznos od 14640 kg/hm^2 ispuna se preplavi, te strujanje nije više u tankom filmu već curi u debelim slojevima te se tako smanjuje efektivna površina između zraka i vode. Brzine strujanja zraka po presjeku ispune okomitom u odnosu na strujanje, su ograničene na 1.5 do 2 m/s sa maksimalnim padom totalnog tlaka u iznosu od 250 Pa. To nam daje ograničenje gustoće masenog protoka zraka na 8296 kg/hm^2. Koristeći ove zadane zahtjeve odabrana je površina poprečnog prijeseka, na način da se vrijednosti gustoća masenih protoka nalaze u zahtjevanim rasponima:

$$A_{pop} = 12\ m^2$$

Prema tome iznosi gustoća masenih protoka vode i zraka iznose:

$$L = \frac{\dot{m}_w}{A_{pop}} = \frac{35{,}08}{12} \cdot 3600 = 10524 \frac{kg}{hm^2} = 2{,}9233\ \frac{kg}{sm^2}$$

$$G = \frac{\dot{m}_z}{A_{pop}} = \frac{26{,}51}{12} \cdot 3600 = 7953 \frac{kg}{hm^2} = 2{,}2092\ \frac{kg}{sm^2}$$

Za skupinu ispune C6 konstanta c_1 iznosi 2.20. Uvrštavajući iznos konstante c_1 zajedno sa vrijednostima L i G u prethodnu jednadžbu dobiva se:

$$Ka = 2{,}20 \cdot (2{,}9233)^{0{,}6} \cdot (2{,}2092)^{0{,}45} = 5{,}98 \ \frac{kg}{m^3 s}$$

Iz prethodno izračunatu karakteristiku rashladnog tornja KaV/L izlučivanjem se dobiva izraz za visinu ispune tornja, odnosno volumen ispune tornja izražen po poprečnom presjeku strujanja:

$$V = \frac{1{,}1317 \ \cdot L}{Ka} = \frac{1{,}1317 \cdot 2{,}9233}{5{,}98} = 0{,}5532 \ \frac{m^3}{m^2}$$

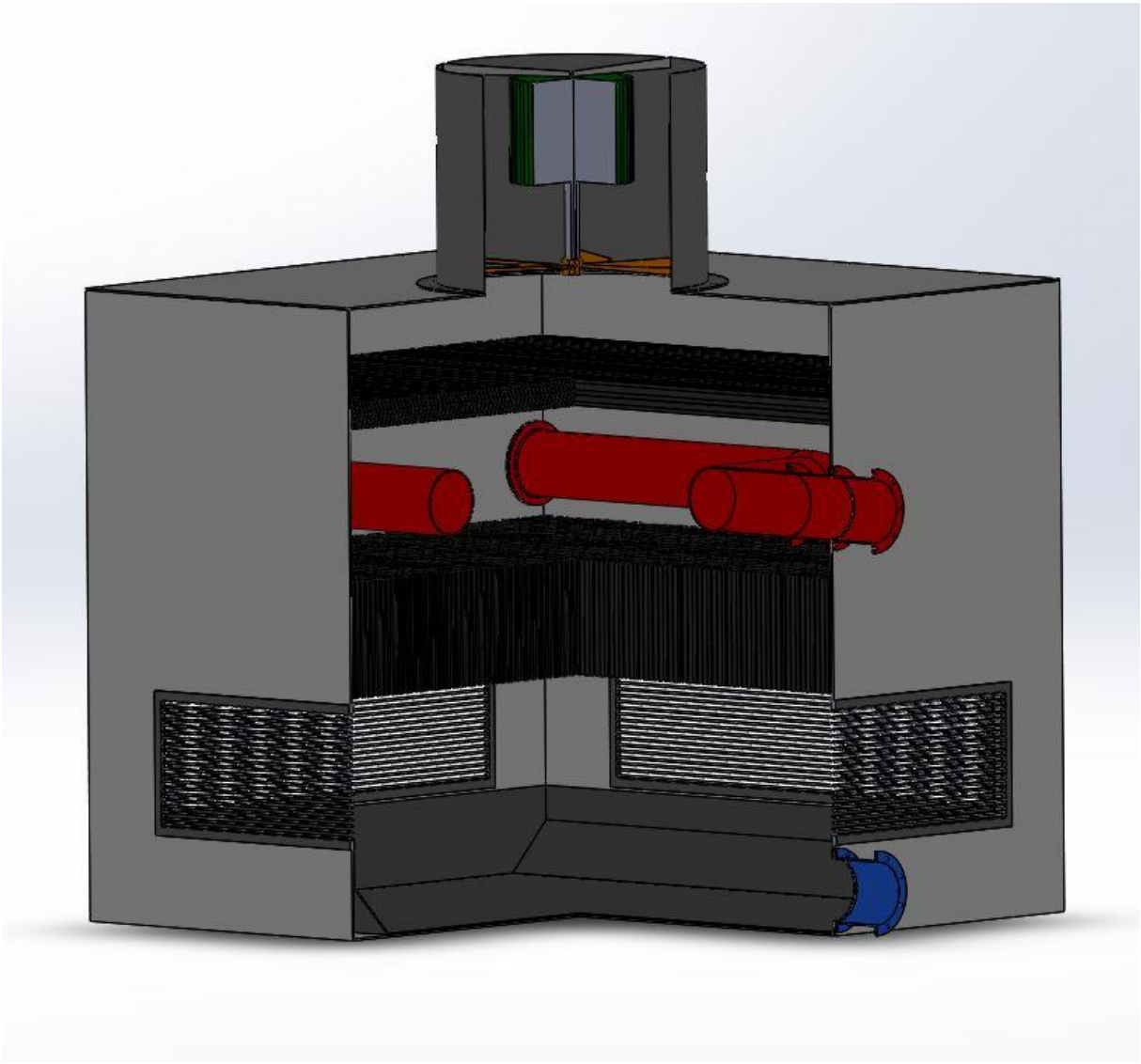
Volumen ispune će stoga iznositi:

$$V_{ispune} = V \cdot A_{pop} = 0{,}5532 \cdot 12 = 6{,}6384 \ m^3$$

Ako pretpostavimo kvadratni presjek ispune, dužina i širina će iznositi:

$$W = \sqrt{A_{pop}} = \sqrt{12} = 3{,}46 \ m$$

Konačne dimenzije rashladnog tornja stoga iznose 3460 x 3460 x 4111 mm, te su vizualno prikazane na slici 20, modelom koji je izrađen u računalnom programu SolidWorks.



Slika 20. Vizualni prikaz dimenzioniranog rashladnog tornja

9.5. Određivanje ukupnog pada tlaka Δp_{uk}

Ukupni pad tlaka u rashladnom tornju biti će jednak zbroju pada tlakova na ispuni, eliminatoru kapljica i otvoru za zrak:

$$\Delta p_{uk} = \Delta p_i + \Delta p_e + \Delta p_o$$

Za pad tlaka kroz ispunu rashladnog tornja Goshayshi i Missenden [9] također predlažu eksperimentalno dobiven izraz uz grešku od ±3%, koji glasi:

$$\Delta p_i = c_2 \cdot (L)^{0,35} \cdot (G)^{0,55}$$

Gdje je:

c2 eksperimentalna konstanta

Za odabranu grupu ispune C6, konstanta c_2 iznosi 32,5.

Uvrštavajući sve poznate faktore u prethodnu jednadžbu dobivamo pad tlaka Δp u iznosu od:

$$\Delta p_i = 32{,}5 \cdot (2{,}9233)^{0,35} \cdot (2{,}2092)^{0,55} = 73{,}16\ Pa$$

Pad tlaka na eliminatoru čestica ovisi o brzini stujanja zraka, te se očitava iz dijagrama (slika 21) koji su dani od strane proizvođača.
Brzina strujanja zraka u rashladnom tornju se računa kao:

$$w_z = \frac{\dot{V}_z}{\rho_z \cdot A_{pop}}$$

Gdje su:

V_z	volumni protok zraka [m^3/s]
ρ_z	gustoća zraka [1,117 kg/m^3]
A_{pop}	poprečni presjek rashladnog tornja [m^2]

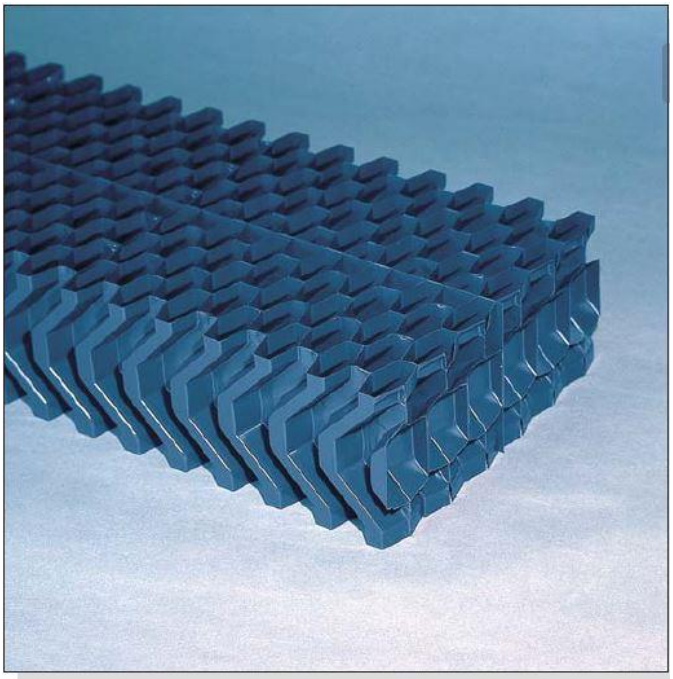
Volumni protok zraka iznosi:

$$\dot{V}_z = \frac{\dot{m}_z}{\rho_z} = \frac{26{,}51}{1{,}117} = 23{,}73\,\frac{m^3}{s}$$

Stoga brzina strujanja zraka u rashladnom tornju iznosi:

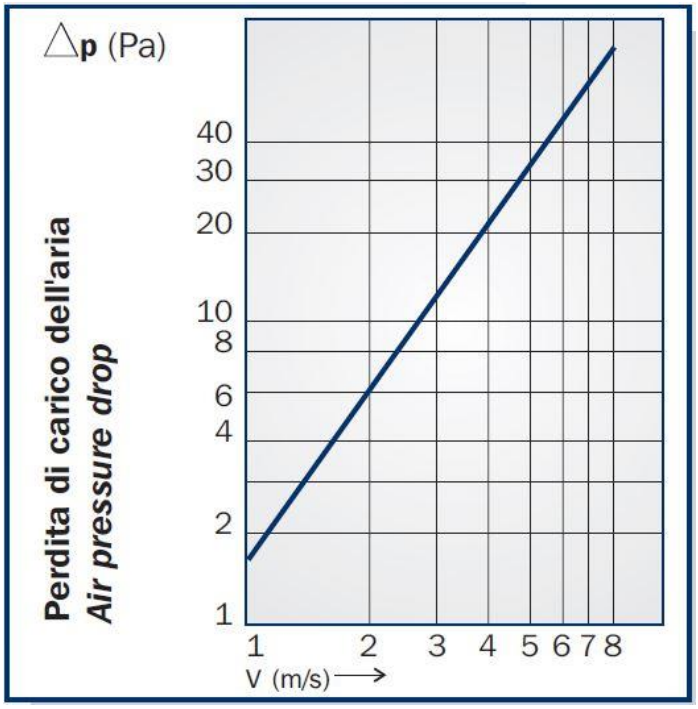
$$w_z = \frac{23{,}73}{1{,}117 \cdot 12} = 1{,}77\ \frac{m}{s}$$

Za eliminator kapljica odabire se *Drift 130* eliminator kapljica. Geometrija eliminatora kapljica bazira se na četiri promjene smjera kretanja struje zraka, te se koristi kod protusmjernih rashladnih tornjeva sa vertikalnim strujanjem zraka. Materijal korišten prilikom izrade dijela su PVC ploče istisnute u oblik kanala, te zatim spojene u cjelinu.



Slika 21. *Drift 130* eliminator kapljica

Pad tlaka u eliminatoru kapljica očitava se iz sljedećeg dijagrama:



Slika 22. Pad tlaka u eliminatoru kapljica *Drift 130*

Za izračunatu brzinu strujanja zraka u rashladnom tornju od 1,66 m/s očitan pad tlaka iznositi će:

$$\Delta p_e = 4 \text{ Pa}$$

Pad tlaka strujanja zraka kod usisnih rešetki također je zadan od strane proizvođača. Za usisne rešetke odabrane su rešetke proizvođača Construction Specialties, naziva *CS RSH – 5700* [10].

Dimenzije usisne rešetke su 2,5 m x 0,8 m, gdje efektivna površina usisa prema katalogu iznosi 1,796 m^2.

Odabran broj usisnih rešetki za rashladni toranj je 4.

Pad tlaka kroz usisnu rešetku računa se prema sljedećem izrazu [10]:

$$\Delta p_o = \frac{\rho}{2} \cdot [\frac{\dot{V}_z}{C_d \cdot A_{efekt.} \cdot n}]^2$$

Gdje su:

ρ_z gustoća zraka [1,117 kg/m^3]

V_z volumni protok zraka [m^3/s]

C_d koeficijent gubitaka zadan od strane proizvođača [0,32]

n broj rešetki

Stoga pad tlaka na usisnoj rešetci iznosi:

$$\Delta p_o = \frac{1{,}117}{2} \cdot \left[\frac{23{,}73}{0{,}32 \cdot 1{,}796 \cdot 4}\right]^2 = 59{,}509\ Pa$$

Nakon što su određeni svi padovi tlakova po komponentama može se izračunati ukupni pad tlaka u rashladnom tornju:

$$\Delta p_{uk} = 73{,}16 + 4 + 59{,}509 = 136{,}67\ Pa$$

9.6. Odabir ventilatora i elektromotora

Za stabilan i pouzdan rad rashladnog tornja potrebno je dobro izabrati ventilator s odgovarajućim elektromotorom. Oni moraju osiguravati potreban protok zraka za zadano opterećenje. Snaga ventilatora ovisi o ukupnom padu tlaka sustava i količini volumnog protoka zraka koja se mora unijeti u sustav.

Odabir ventilatora izvršen je uz pomoć alata *QualityFan selection software* [11] danog od strane tvrtke *HW Ventilation.*

Ulazne vrijednosti za alat *QualityFan selection software*:

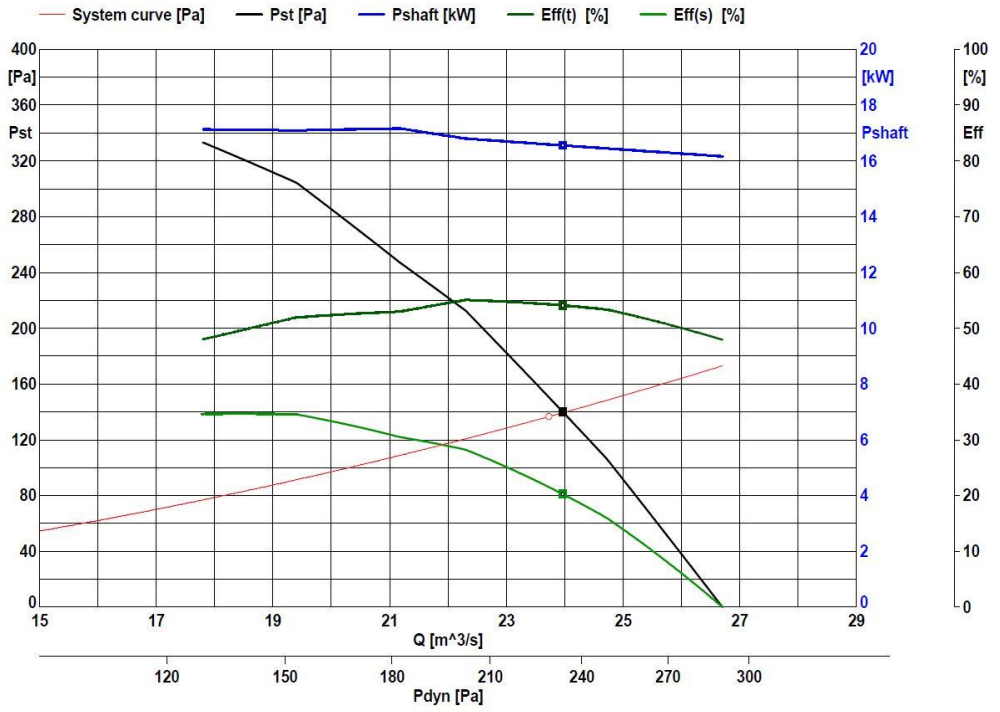
- V_z = 23,73 m^3/s
- Δp_{uk} = 136,67 Pa

Unosom ovih vrijednosti dobivamo listu raspoloživih ventilatora s obzirom na stupanj djelovanja poredanu od ventilatora s najvišim stupnjem djelovanja prema najmanjem.

Odabran je ventilator sa najvišim stupnjem djelovanja koji ima sljedeće karakteristike:

- Promjer lopatica d = 1250 mm
- Maksimalna temperatura zraka na usisu ϑ = 50 °C
- Materijal lopatica PPG (polipropilen ojačan staklenim vlaknima)
- Broj okretaja lopatica n = 920 min^{-1}

Alat za odabrani ventilator daje idući dijagram sa prikazanim radnim točama:



Slika 23. Dijagram radne točke ventilatora

Za zadane parametre očitane su iduće vrijednosti:

- P_{vent} = 16,56 kW
- η_{vent} = 20,26 %
- Razina buke LwtA = 101,8 db(A)
- Brzina vrha lopatice v = 60,21 m/s

Prema dobivenim karakterisikama ventilatora se zatim treba izabrati odgovarajući elektromotor. S obzirom da je elektromotor izložen području visoke vlage radi kondenzacije rashladne vode koja je ishlapila u struji zraka, potrebno je naručiti elektromotor sa odgovarajućom IP karakteristikom. Za zadanu snagu i brzinu vrtnje ventilatora, odabire se elektromotor prema katalogu [15].

10. DIMENZIONIRANJE CJEVOVODA

Pretpostavljaju se brzine strujanja u sljedećim proračunima.

Gustoće radne tvari dobivene su uz pomoć COOLPROP programa.

Za cijevi su odabrane čelične bešavne cijevi, prema normi EN10027 – 2 [14].

10.1. Usisni vod

Pretpostavljena brzina strujanja u usisnom vodu:

$$W_{usis} = 8 \text{ m/s}$$

Gustoća radne tvari na usisu u kompresor:

$$\rho_1 = 9{,}47 \text{ kg/m}^3$$

Promjer usisnog voda:

$$D_{usis} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_1 \cdot w_{usis} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}9543}{9{,}47 \cdot 8 \cdot \pi}} = 0{,}1812\ m = 181{,}2\ mm$$

Odabrana je čelična cijev DN200 (φ216 x 6 mm).

Provjera brzine strujanja:

$$w_{usis} = \frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_1 \cdot D_{usis}^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 1{,}9543}{9{,}47 \cdot 0{,}204^2 \cdot \pi} = 6{,}31\ m/s$$

Brzina strujanja u usisnom vodu zadovoljava.

10.2. Tlačni vod

Pretpostavljena brzina strujanja u tlačnom vodu:

$$W_{tlačni} = 12,5 \text{ m/s}$$

Gustoća radne tvari na ulazu u kondenzator:

$$\rho_1 = 53,8 \text{ kg/m}^3$$

Promjer tlačnog voda:

$$D_{tlačni} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_2 \cdot w_{tlačni} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,9543}{53,8 \cdot 12,5 \cdot \pi}} = 0,0608\ m = 60,8\ mm$$

Odabrana je čelična cijev nazivnog promjera DN65 (φ76,1 x 2,9 mm).

Provjera brzine strujanja:

$$w_{tlačni} = \frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_2 \cdot D_{tlačni}^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 1,9543}{53,8 \cdot 0,0703^2 \cdot \pi} = 9,36\ m/s$$

Brzina u tlačnom vodu zadovoljava.

10.3. Kapljevinski vod

Pretpostavljena brzina strujanja u kapljevinskom vodu:

$$W_{kaplj} = 0,7 \text{ m/s}$$

Gustoća radne tvari na ulazu u kondenzator:

$$\rho_1 = 476,1 \text{ kg/m}^3$$

Promjer kapljevinskog voda:

$$D_{kaplj} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_3 \cdot w_{kaplj} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}9543}{476{,}1 \cdot 0{,}7 \cdot \pi}} = 0{,}08641\ m = 86{,}41\ mm$$

Odabrana je čelična cijev nazivnog promjera DN100 (φ108 x 3,6 mm).

Provjera brzine strujanja:

$$w_{kaplj} = \frac{4 \cdot q_{m,RT}}{\rho_3 \cdot D_{kaplj}^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 1{,}9543}{476{,}1 \cdot 0{,}1008^2 \cdot \pi} = 0{,}51\ m/s$$

Brzina strujanja u kapljevinskom vodu zadovoljava.

10.4. Cjevovod rashladne vode

Pretpostavljena brzina strujanja vode:

$$W_w = 1\ \text{m/s}$$

Gustoća vode za srednju temperaturu ($\vartheta_{w,sr}$ = 32,5 °C):

$$\rho_w = 994{,}8\ \text{kg/m}^3$$

Promjer cjevovoda za rashladnu vodu:

$$D_w = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,w}}{\rho_w \cdot w_w \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 35{,}08}{994{,}8 \cdot 1 \cdot \pi}} = 0{,}2119\ m = 211{,}9\ mm$$

Odabrana je čelična cijev nazivnog promjera DN250 (φ267 x 6,3 mm).

Provjera brzine strujanja:

$$w_w = \frac{4 \cdot q_{m,w}}{\rho_w \cdot D_w^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 35{,}08}{994{,}8 \cdot 0{,}2544^2 \cdot \pi} = 0{,}69\ m/s$$

Brzina strujanja rashladne vode zadovoljava.

10.5. Cjevovod glikolne smjese

Pretpostavljena brzina strujanja glikolne smjese:

$$W_{glikol} = 0{,}7\ \text{m/s}$$

Gustoća glikolne smjese:

$$\rho_{glikol} = 1036\ \text{kg/m}^3$$

Promjer cjevovoda glikolne smjese:

$$D_{glikol} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,glikol}}{\rho_{glikol} \cdot w_{glikol} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 29{,}61}{1036 \cdot 0{,}7 \cdot \pi}} = 0{,}228\ m = 228\ mm$$

Odabrana je čelična cijev nazivnog promjera DN250 (φ267 x 6,3 mm).

Provjera brzine strujanja:

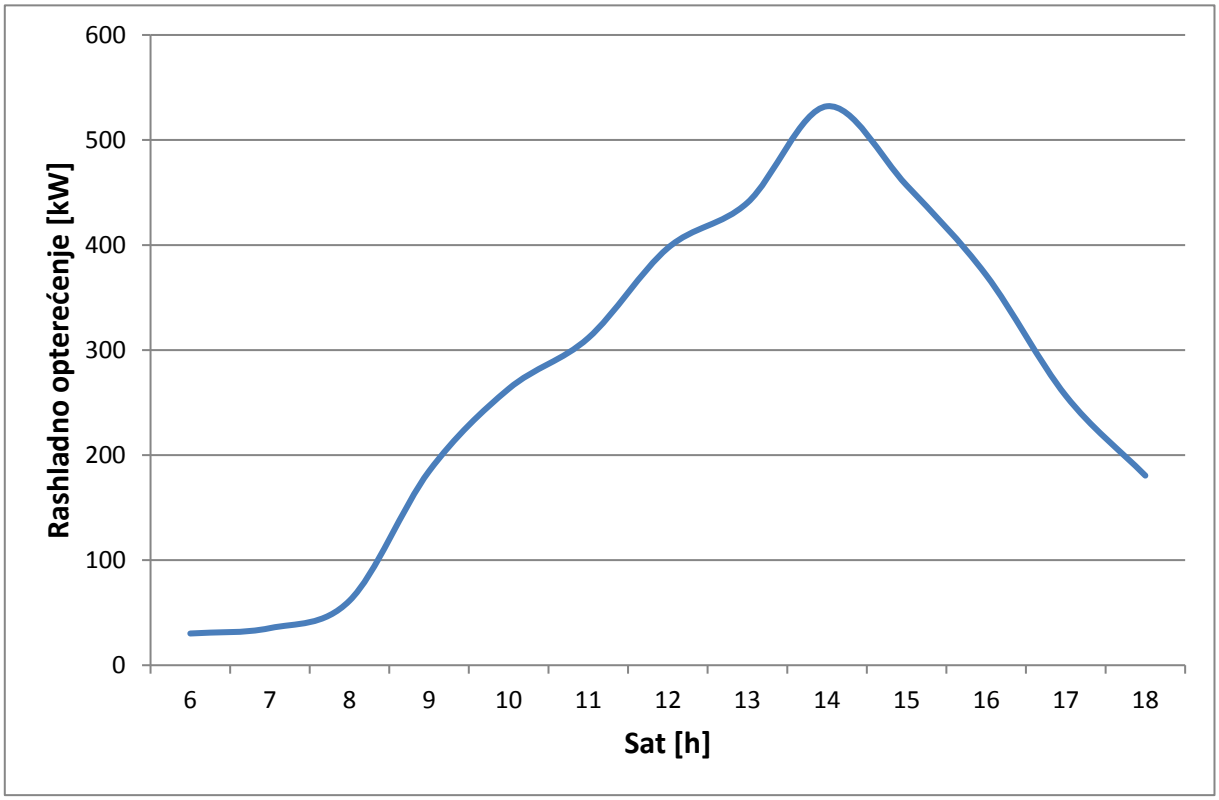
$$w_{glikol} = \frac{4 \cdot q_{m,glikol}}{\rho_{glikol} \cdot D_{glikol}^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 29{,}61}{1036 \cdot 0{,}2544^2 \cdot \pi} = 0{,}56\ m/s$$

Brzina strujanja u cjevovodu glikolne smjese zadovoljava.

11. POTROŠNJA RASHLADNE VODE

Nakon što smo dimenzionirali rashladni toranj za nazivni rashladni učinak, potrebno je izračunati dnevnu potrošnju vode za industrijsko postrojenje promjenjivog rashladnog opterećenja.

Proračun dnevne potrošnje vode rađen je na satnoj bazi za 8. srpnja, u programu Microsoft Excel. Ulazni podaci za proračun su bili temperaturni režim glikolne smjese na ulazu u isparivač 0/-5 °C, rashladno opterećenje i satne vrijednosti rashladnog opterećenja.



Slika 24. Prikaz rashladnog opterećenja industrijskog postrojenja kroz sate

Sat	Rashladno opterećenje kW
6	30,2
7	35,3
8	61,4
9	184,7
10	263,1
11	311,5
12	397,2
13	440,3
14	532,1
15	456,9
16	371,4
17	256,6
18	180,5

Tablica 4. Satne vrijednosti rashladnog opterećenja za 8. srpnja

Koristeći *Prilog E, Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* [5], očitali smo satne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka u Zagrebu za 8. srpnja.

Sat [h]	Temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
0	20	86
1	22,4	61
2	22,7	61
3	20,7	74
4	18,8	82
5	20,7	77
6	23,7	61
7	26,4	44
8	28	42
9	29,8	37
10	31,1	36
11	31	37
12	31,7	39
13	30,9	39
14	30,8	36
15	33	25
16	32,7	25
17	32,5	26
18	31,3	30

Tablica 5. Satne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka za 8. srpnja

Prilikom regulacije protoka vode kroz kondenzator, odnosno rashladni toranj, koristiti će se fiksna temperaturna razlika na ulazu i izlazu od $\Delta\vartheta_w = 5$ °C. Bitan uvjet je taj da voda na izlazu rashladnog tornja može postići maksimalnu vrijednost temperature 4 °C višu od temperature vlažnog termometra. Stoga za izračun temperature vlaćnog termometra koristimo empirijsku formulu koju je postavio Roland Stull [6], a ona glasi:

$$\vartheta_{z,vl} = \vartheta \cdot \arctan[0{,}151977(\varphi + 8{,}313659)^{0{,}5}] + \arctan(\vartheta + \varphi) - \arctan(\varphi - 1{,}676331) + 0{,}00391838 \cdot (\varphi)^{1{,}5} \cdot arctan(0{,}023101 \cdot \varphi) - 4{,}686035$$

Gdje su:

ϑ	temperatura vanjskog zraka [°C]
φ	relativna vlažnost zraka [%]

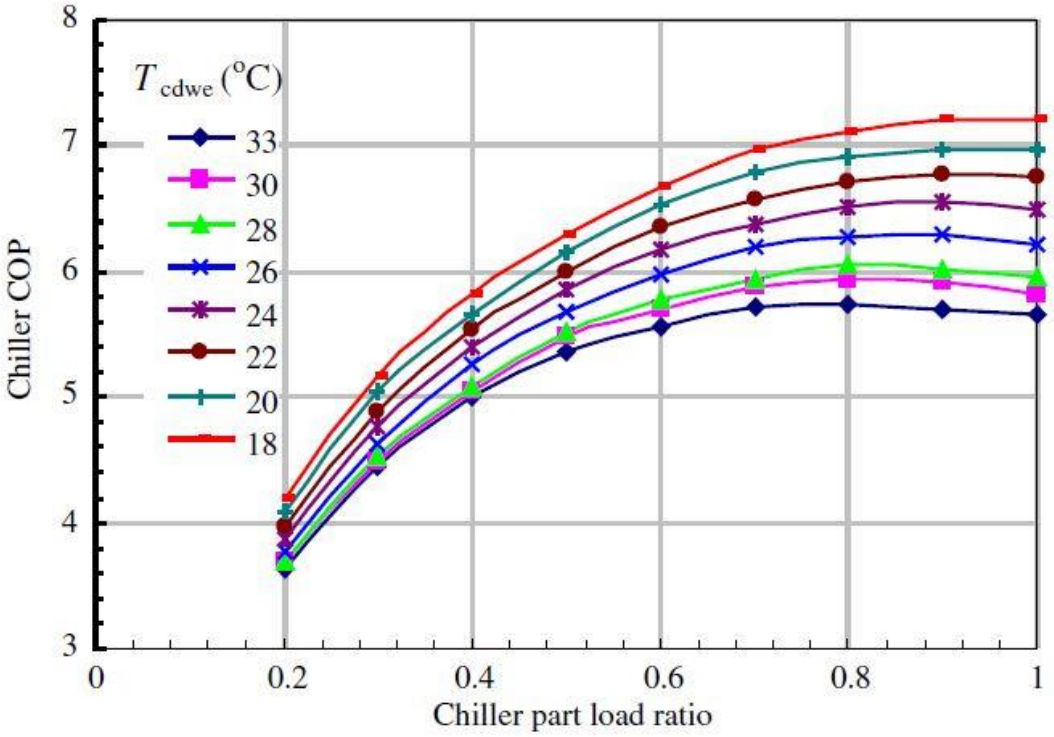
Poznavajući temperaturu vlažnog termometra $\vartheta_{z,vl}$ uz zadani uvjet možemo izračunati temperaturu vode na izlazu iz rashladnog tornja, odnosno na ulazu u kondenzator.

$$\vartheta_{w2} = \vartheta_{z,vl} + 4\ °\mathrm{C}$$

Prema proračunu rashladnog tornja rashladna voda će se ohladiti za 5 °C, stoga temperatura rashladne vode na ulazu u toranj, odnosno na izlazu iz kondenzatora glasi:

$$\vartheta_{w1} = \vartheta_{w2} + 5\ °\mathrm{C}$$

S obzirom da industrijsko postrojenje radi sa promjenjivim rashladnim opterećenjem, mijenjati će se i učin kondenzatora. Da bismo došli do učina kondenzatora pri različitim opterećenjima, korisit će se podaci koje su F. W. Yu i K. T. Chan koristili u svojim istraživanjima, te su opisani u znanstvenom radu radu *Optimization of water-cooled chiller system with loadbased speed control* [17].
Rezultati mjerenja faktora hlađenja COP pri različitim parcijalnim opterećenjima za različite temperature vode na ulazu u kondenzator su prikazani na slici 25.



Slika 25. Dijagram ovisnosti faktora hlađenja o parcijalnim opterećenjima za različite temperature ulazne vode u kondenzator

Pomoću ovog dijagrama linearnom interpolacijom dobivaju se vrijednosti faktora hlađenja za sve temperature za naš slučaj. Pronalaskom faktora hlađenja lako se izračunavaju potrebna snaga kompresora i učinak kondenzatora za svaki sat.

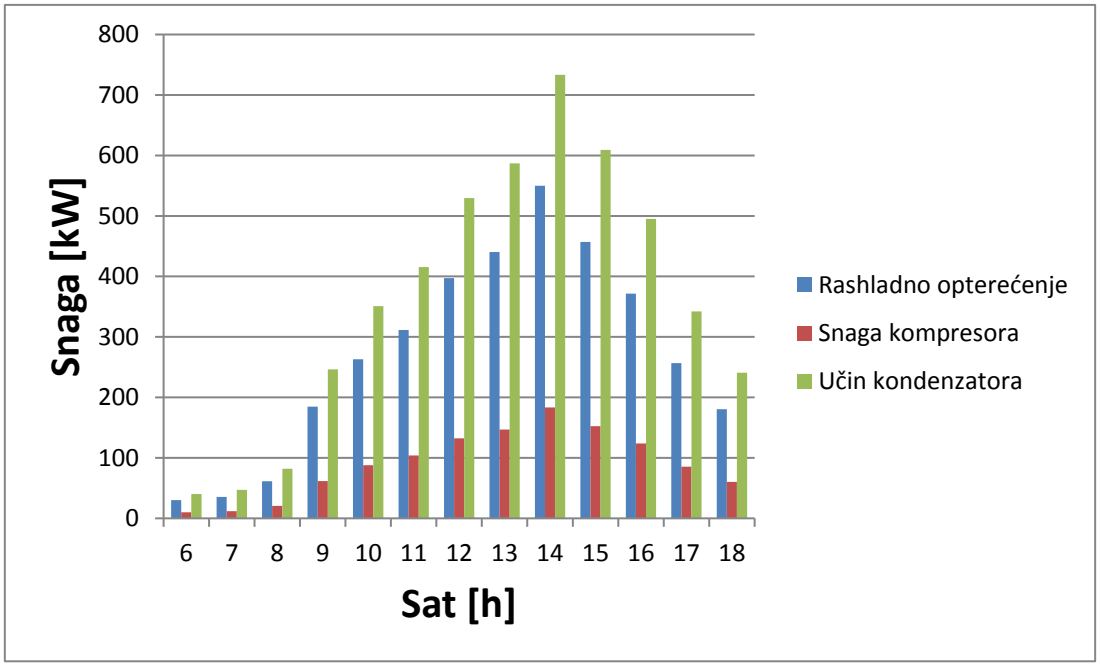
$$P = \frac{\Phi_o}{COP}$$

$$\Phi_k = \Phi_o + P$$

Sat [h]	**Rashladno opterećenje [kW]**	**$\vartheta_{z,vl}$ [°C]**	**ϑ_{w1} [°C]**	**ϑ_{w2} [°C]**	**Parcijalno opterećenje [%]**	**COP**	**Snaga kompresora [kW]**	**Učinak kondenzatora [kW]**
6	30,2	18,48	27,48	22,48	5	2,5	11,85	42,05
7	35,3	18,21	27,21	22,21	6	2,6	13,36	48,66
8	61,4	19,19	28,19	23,19	11	3,1	20,06	81,46
9	184,7	19,70	28,70	23,70	34	5,1	36,36	221,06
10	263,1	20,52	29,52	24,52	48	5,7	46,05	309,15
11	311,5	20,65	29,65	24,65	57	6,1	51,36	362,86
12	397,2	21,63	30,63	25,63	72	6,2	63,61	460,81
13	440,3	20,98	29,98	24,98	80	6,6	66,70	507,00
14	532,1	20,28	29,28	24,28	97	6,0	81,04	613,14
15	456,9	19,36	28,36	23,36	83	6,6	69,23	526,13
16	371,4	19,14	28,14	23,14	68	6,4	58,48	429,88
17	256,6	19,26	28,26	23,26	47	5,3	45,29	301,89
18	180,5	19,35	28,35	23,35	33	5,0	35,81	216,31

Tablica 6. Prikaz dobivenih rezultata za dan 8. srpnja

Rezultati u tablici 6. dobiveni su korištenjem prethodnih izraza u programu Microsoft Excel. Grafički prikaz satnih vrijednosti rashladnog opterećenja, snage kompresora i učina kondenzatora prikazani su na slici 26.



Slika 26. Grafički prikaz satnih vrijednosti rashladnog opterećenja, snage kompresora i učina kondenzatora

Po svakom prolasku rashladne vode kroz rashladni toranj javljaju se određeni gubici. Te gubitke dijelimo na gubitke radi ishlapljivanja vode, gubitke radi kapljica odnešenih strujom zraka, te gubitke radi odmuljivanja.

Stoga za proračun potrošnje rashladne vode prvo je potrebno znati potreban protok koji recirkulira sustavom za zadano opterećenje, a on se računa kao:

$$q_{m,w} = \frac{\Phi_k}{c_w \cdot (T_{w2} - T_{w1})}$$

Nakon što se odredi potreban protok preostaje nam još samo izračunati gubitke vode na rashladnom tornju, te potreban maseni protok dodatne vode. Potreban maseni protok dodatne vode ($\dot{m}_d$) jednak je zbroju protoka mase vode koja ishlapljuje ($\dot{m}_1$), protoka mase vode koja je odnesena strujom zraka ($\dot{m}_2$) i protoka mase vode koji je potreban za odmuljivanje ($\dot{m}_3$).

$$\dot{m_d} = \dot{m_1} + \dot{m_2} + \dot{m_3}$$

Maseni protok vode koja je ishlapila $\dot{m}_1$ iznosi približno 1 do 2 % masenog protoka vode u recirkulirajućem sustavu, te se računa prema sljedećem izrazu:

$$\dot{m}_1 \approx \frac{\Phi}{r} \approx \frac{q_{m,w} \cdot c_w \cdot \Delta\vartheta_w}{r}$$

Gdje su:

$q_{m,w}$ maseni protok rashladne vode [kg/s]

c_w specifični toplinski kapacitet rashladne vode za srednju temperaturu od 32,5 °C [4,179 kJ/kgK]

r specifična toplina isparavanja [2500 kJ/kg]

Maseni protok vode koja je odnesena strujom zraka $\dot{m}_2$ iznosi manje od 0,3 % masenog protoka vode u recirkulirajućem sustavu, te se računa sljedećim izrazom:

$$\dot{m}_2 \leq 0{,}003 \cdot q_{m,w}$$

Maseni protok vode potreban za odmuljivanje ovisi o stupnju uparenja, te se računa sljedećim izrazom:

$$\dot{m}_3 = \frac{1}{u-1} \cdot \dot{m}_1 = \frac{1}{u-1} \cdot \frac{\Phi}{r}$$

Veličina u predstavlja stupanj uparenja koji je jednak omjeru karbonatne tvrdoće recirkulirajuće vode K_r° i karbonatne tvrdoće dodatne vode K_d°, odnosno omjer otopljenih tvari u recirkulirajućoj vodi i koncentracije otopljenih tvari u dodatnoj vodi [16]. Optimalni stupanj upraenja nalazi se u rasponu između 4 i 6, a u našem slučaju iznosi:

$$u = 4$$

Zadane izraze ubacujemo u program Microsoft Excel, računamo zasebne gubitke, te ih na kraju zbrajamo čime određujemo kolika je potrebna količina dodatne vode za svaki sat. U tablici 7. prikazane su vrijednosti pojedinih gubitaka vode, te njihov konačan zbroj za dan 8. srpnja.

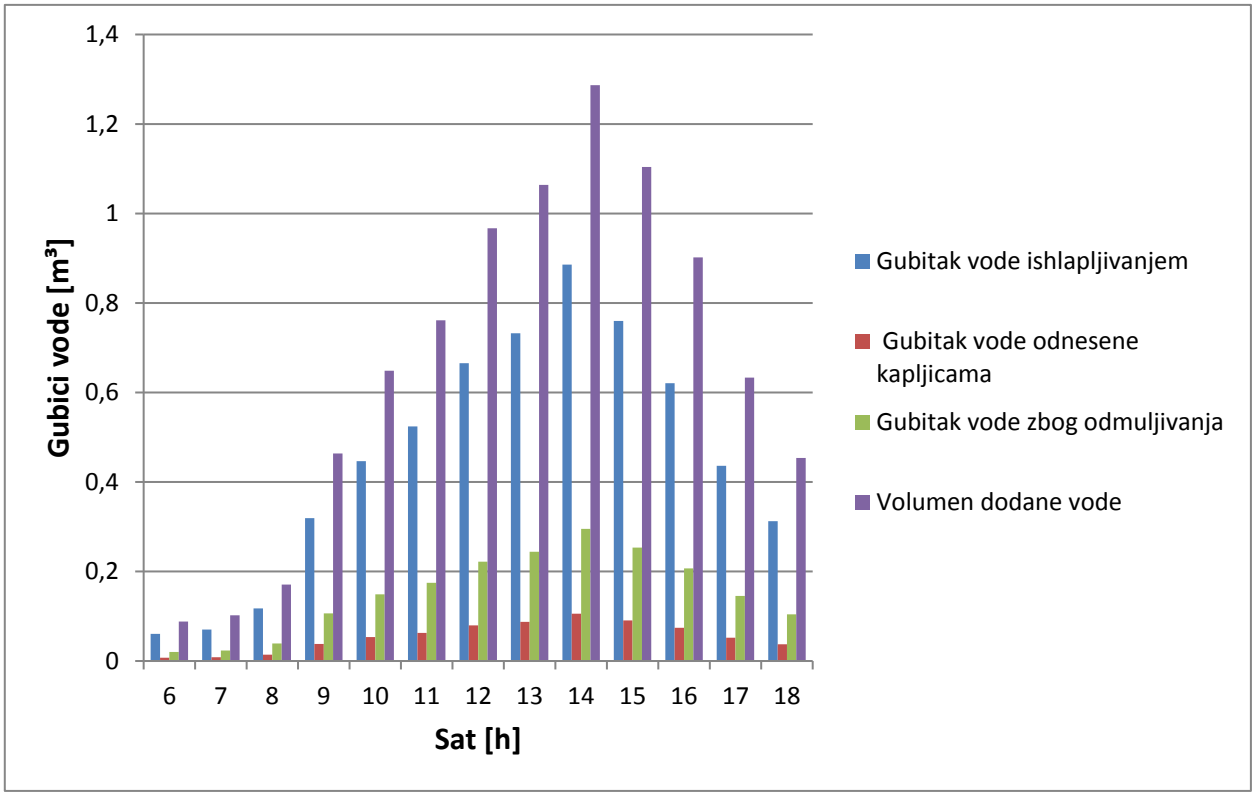
Sat [h]	**Protok rashladne vode [kg/s]**	**Gubitak vode ishlapljivanjem [kg/s]**	**Gubitak vode odnesene kapljicama [kg/s]**	**Gubitak vode zbog odmuljivanja [kg/s]**	**Protok dodatne vode [kg/s]**	**Volumen dodane vode [m^3]**
6	2,01	0,017	0,002	0,006	0,024	0,088
7	2,32	0,019	0,002	0,006	0,028	0,102
8	3,89	0,033	0,004	0,011	0,047	0,171
9	10,56	0,088	0,011	0,029	0,128	0,464
10	14,77	0,124	0,015	0,041	0,180	0,649
11	17,33	0,145	0,017	0,048	0,211	0,761
12	22,01	0,184	0,022	0,061	0,268	0,967
13	24,22	0,203	0,024	0,068	0,295	1,064
14	29,29	0,245	0,029	0,082	0,356	1,287
15	25,13	0,210	0,025	0,070	0,306	1,104
16	20,53	0,172	0,021	0,057	0,250	0,902
17	14,42	0,121	0,014	0,040	0,175	0,633
18	10,33	0,087	0,010	0,029	0,126	0,454
	UKUPNO	1,65	0,20	0,55	2,39	8,65

Tablica 7. Prikaz satnih vrijednosti gubitaka vode za 8. srpnja

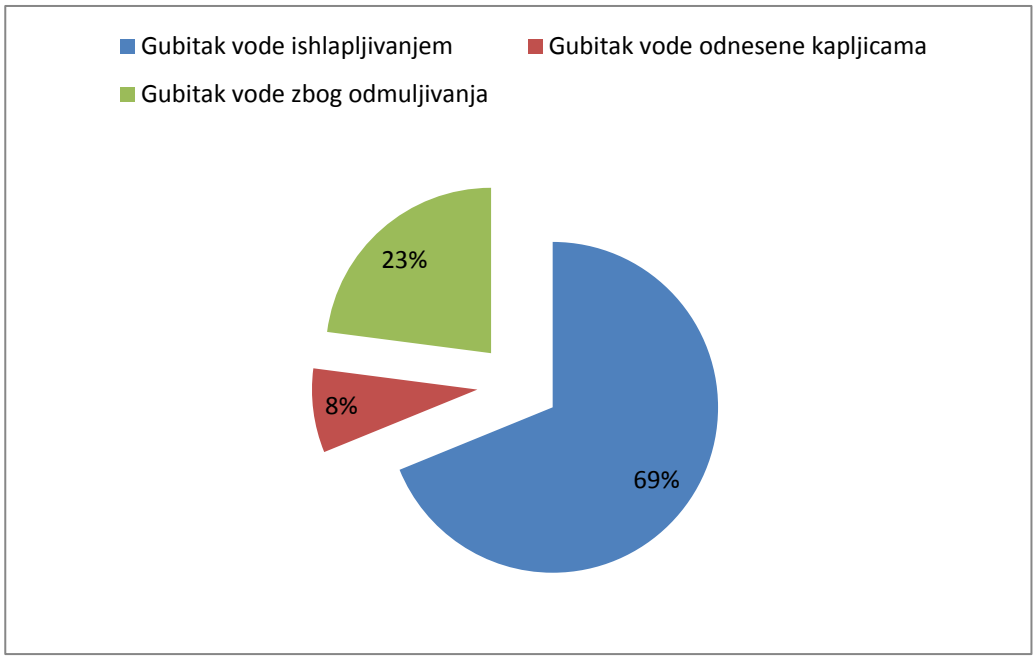
Ukupni volumen vode koji treba nadoknaditi u rashladnom tornju iznosi:

$$V_{d_8srpnja} = 8{,}65\ m^3$$

Na slikama 27 i 28 grafički su prikazani odnosi pojedinih gubitaka po svakom satu, te se iz njih zaključuje da su gubici ishlapljivanjem dominantni. Čak 69 posto ukupnih dnevnih gubitaka proizlazi iz ishlapljivanja rashladne vode, dok su gubici vode odnesene kapljicama i radi odmuljivanja puno manje izraženi, te iznose 8 i 23 posto. Također možemo uočiti da su gubici najizraženiji od 12 do 16 sati, kada je i rashladno opterećenje najveće.



Slika 27. Grafički prikaz pojedinih i ukupnih gubitaka rashladne vode



Slika 28. Postotni udjeli pojedinačnih gubitaka rashladne vode

Korištenjem proračuna potrošnje vode sada možemo izračunati cjeloukupnu potrošnju kroz mjesec srpanj za zadano industrijsko postrojenje.

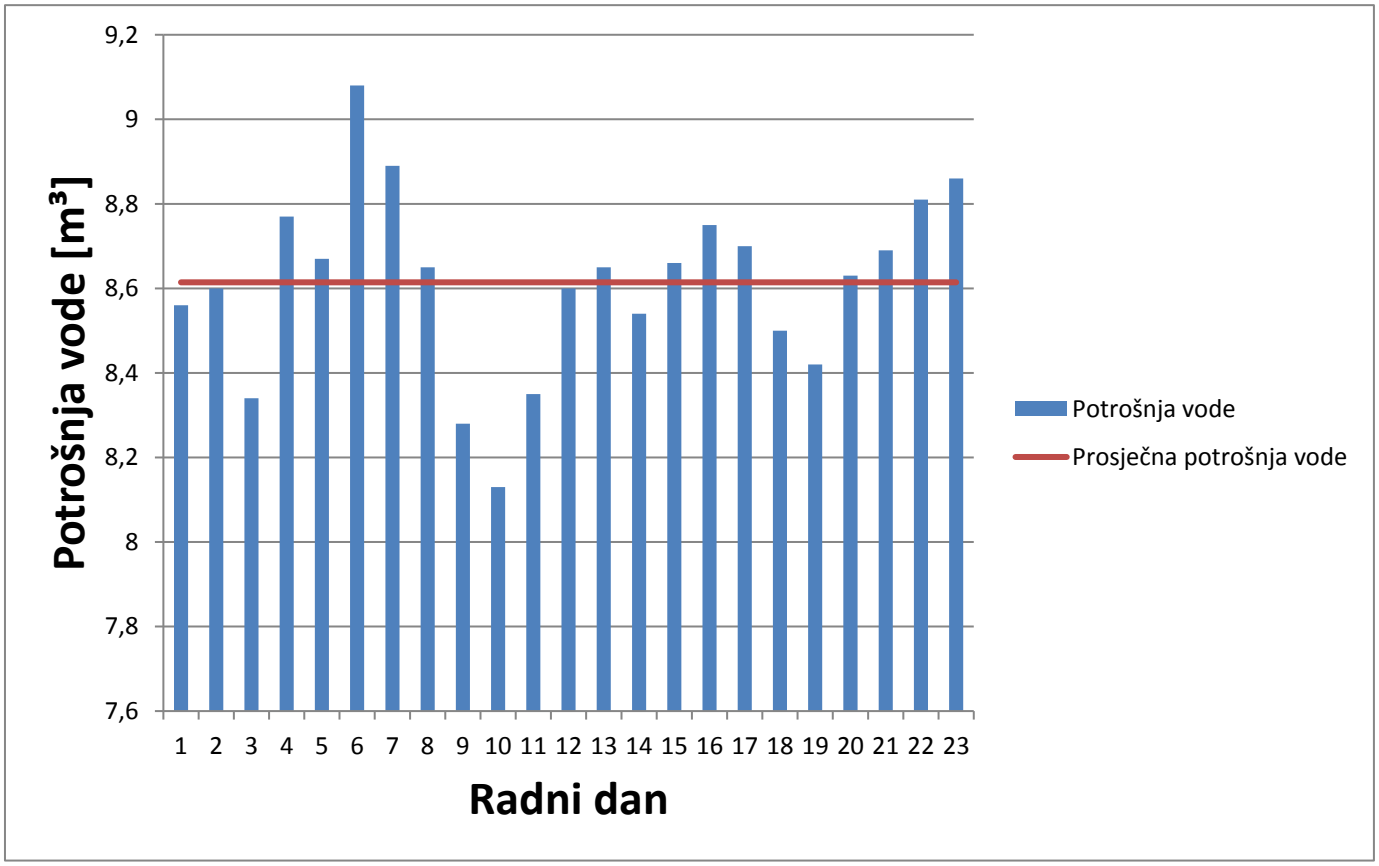
Dan	Volumen dodane vode [m^3]
1	8,56
2	8,6
3	8,34
4	8,77
5	8,67
6	9,08
7	8,89
8	8,65
9	8,28
10	8,13
11	8,35
12	8,6
13	8,65
14	8,54
15	8,66
16	8,75
17	8,7
18	8,5
19	8,42
20	8,63
21	8,69
22	8,81
23	8,86

Tablica 8. Prikaz dnevne potrošnje vode kroz mjesec srpanj

Zbrojem svih volumena dodane vode za mjesec srpanj dobivamo ukupnu potrošnju rashladne vode koja iznosi:

$$V_{d_uk_srpanj} = 198{,}13\ m^3$$

Sa slike 29 možemo primjetiti da je 6. srpnja potrošnja vode bila najviša iz razloga što su tog dana temperatura vanjskog zraka i relativna vlažnost bili najviši. Također možemo primjetiti da dnevna potrošnja vode kroz mjesec nema prevelikih odskakanja iz čega možemo zaključiti da ona većim dijelom ovisi o rashladnom opterećenju.



Slika 29. Grafički prikaz dnevne potrošnje vode kroz mjesec srpanj

12. SPECIFIKACIJA MATERIJALA

1. Isparivač: Shell & tube

- Rashladni učin: Φ_o = 550 kW
- Temperatura isparavanja: ϑ_i = -8 °C
- Radna tvar: R290
- Temperaturni režim glikolne smjese: 0/ -5 °C

2. Kondenzator: Shell & tube

- Učin kondenzatora: Φ_k = 733 kW
- Temperatura kondenzacije: ϑ_k = 38 °C
- Radna tvar: R290
- Temperaturni režim rashladne vode: 35/30 °C

3. Kompresor: vijčani kompresor

- Rashladni učinak: Φ_o = 550 kW
- Električna snaga: P = 183 kW
- Temperatura isparavanja: ϑ_{isp} = -8 °C
- Temperatura kondenzacije: ϑ_{kond} = 38 °C
- Radna tvar: R290

4. Sakupljač radne tvari

- Kapacitet: 300 l

5. Prigušni ventil

- EEV
- Rashladni učinak: Φ_o = 550 kW
- Tlak isparavanja: p_i = 3,69 bar
- Tlak kondenzacije: p_k = 13,1 bar
- Radna tvar: R290

6. Pumpa za rashladnu vodu: centrifugalna pumpa za vodu

- Protok: 127 m^3/h
- Visina dobave: h= 10m
- Snaga: P_p = 5,74 kW
- Radni medij: rashladna voda

7. Ventilator

- Tip: aksijalni
- Ukupni pad tlaka: Δp_{uk} = 136,67 Pa
- Promjer lopatica: d = 1250 mm
- Maksimalna temperatura zraka na usisu: ϑ = 50 °C
- Materijal lopatica: PPG (polipropilen ojačan staklenim vlaknima)
- Broj okretaja lopatica: n = 920 min^{-1}

8. Elektromotor

- Tip: trofazni kavezni asinkroni
- Snaga: P = 18,5 kW
- Broj okretaja: n = 970 min^{-1}

9. Eliminator kapljica

- Dimenzije: 3460 x 3460 x 130 mm
- Materijal: PVC

10. Ispuna rashladnog tornja

- Dimenzije: 3460 x 3460 x 560 mm
- Materijal: PVC

11. Rešetke za usis zraka

- Dimenzije: 2500 x 800 mm
- Materijal: Aluminij

12. Cijevi: čelične bešavne

- DN 65
- DN 100
- DN 200
- DN 250

13. ZAKLJUČAK

Proračunom rashladnog tornja određeni su omjeri masenih protoka rashladne vode i vanjskog zraka, te promjena entalpije vanjskog zraka na osnovu kojeg se dobiva karatkeristika rashladnog tornja prema Merkelovoj metodi. Korištenjem eksperimentalno dobivenih podataka određene su dimenzije ispune tornja i eliminatora kapljica. U idućem koraku određen je ukupan pad tlaka kroz rashladni toranj čime se odredila potrebna snaga ventilatora i elektromotora. Na kraju proračuna dimenzioniran je cjevovod, te je izračunata mjesečna potrošnja vode industrijskog postrojenja za mjesec srpanj. Pokazano je da su gubici rashladne vode najveći radi ishlapljivanja, dok su gubici radi odmuljivanja i odnošenja kapljica u manjem udjelu. Također je pokazano da potrošnja vode ponajviše ovisi o rashladnom opterećenju industrijskog postrojenja, dok promjena temperature vlažnog termometra pridonosi relativno malim odstupanjima potrošnje vode od prosjeka za taj mjesec.

LITERATURA

[1] *A Review Study On Cooling Towers; Types, Performance and Application*. XI. International Conference on Nuclear Structure Properties (NSP2018), Trabzon-TURKEY, 12-14 September 2018

[2] Balen I.: *Podloge za predavanja iz kolegija Klimatizacija*, FSB, Zagreb

[3] ASHRAE 2016 *HVAC Systems and Equipment*, 2016.

[4] Wang Shan K.: *Handbook of air conditioning and refrigeration*, 2nd edition, 2001.

[5] *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Prilog E,* Narodne novine, broj 97/14

[6] Stull R.: *Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature*, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2011.

[7] Shah P., Tailor N.: *Merkel's method for Designing Induced Draft Cooling Tower*. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology, 6(2), str. 63-70. 2015.

[8] Costelloe B., Finn D.P.: *Heat Transfer Correlations for Low Approach Evaporative Cooling Systems in Buildings*. Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2008

[9] Goshayshi H.R., Missenden J.F.: The investigation of cooling tower packing in various *Arrangements*, Applied Thermal Engineering 20, 69-80 str. 2000.

[10] https://www.c-sgroup.co.uk/blog/calculate-louvre-pressure-drop/

[11] https://www.hwventilation.it/en

[12] Bloch P. H.: *Ingress protection code explained*, World pumps, 26 str, November 2009.

[13] Halasz B, Galović A, Boras I.: *Toplinske tablice*, Zagreb, 2007.

[14] Kraut B.: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.

[15] http://www.koncar-mes.hr/proizvodi/elektromotori/elektromotor-1/

[16] Ljubas D.: *Predavanja iz kolegija Voda, gorivo i mazivo*, FSB, Zagreb, 2008.

[17] Yu F.W., Chan K.T..: *Optimization of water-cooled chiller system with load-based speed control*, Department of Building Services Engineering, Hong Kong, 2008.

PRILOZI

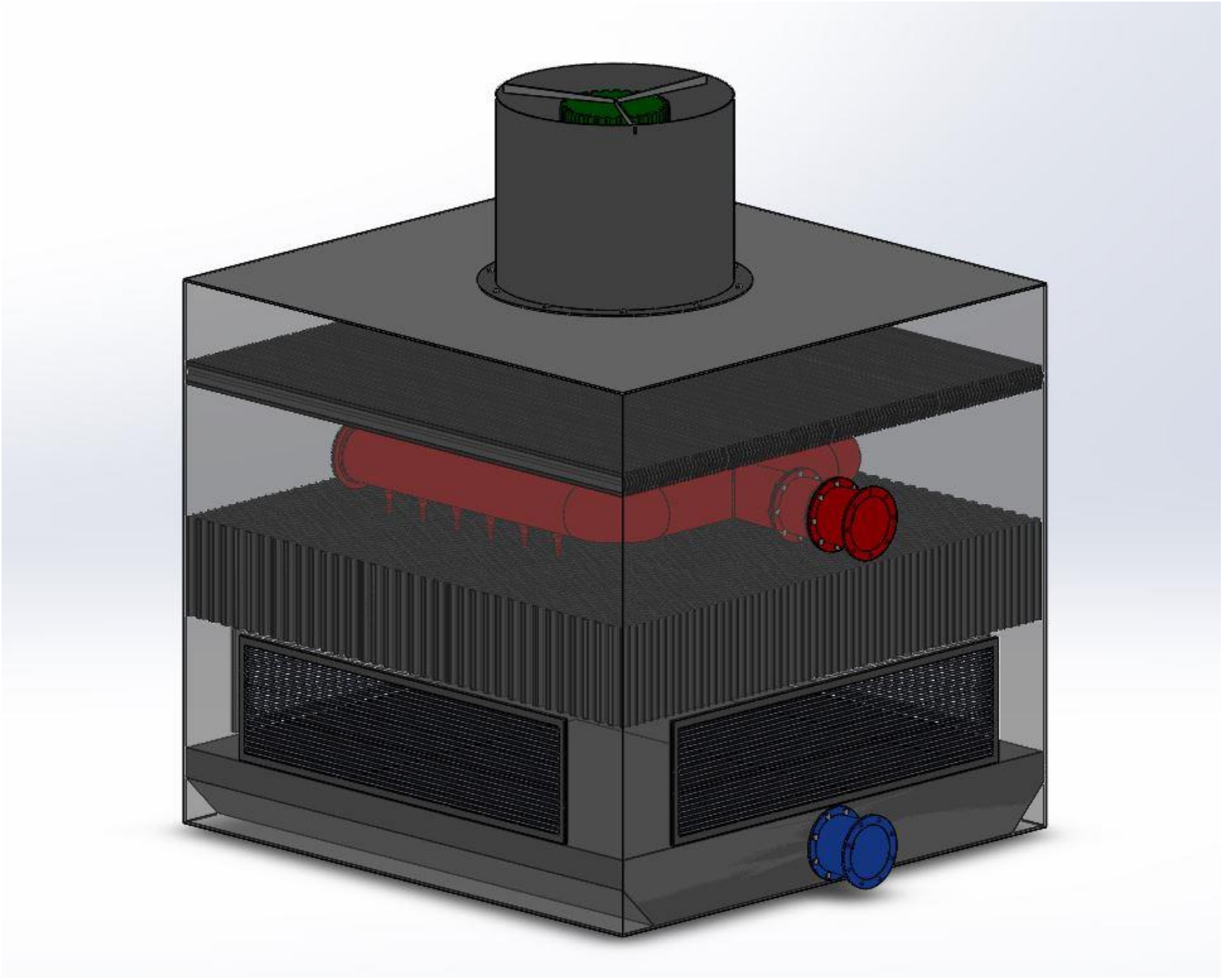
I. CD-R disc

II. Vizualni prikaz modela rashladnog tornja

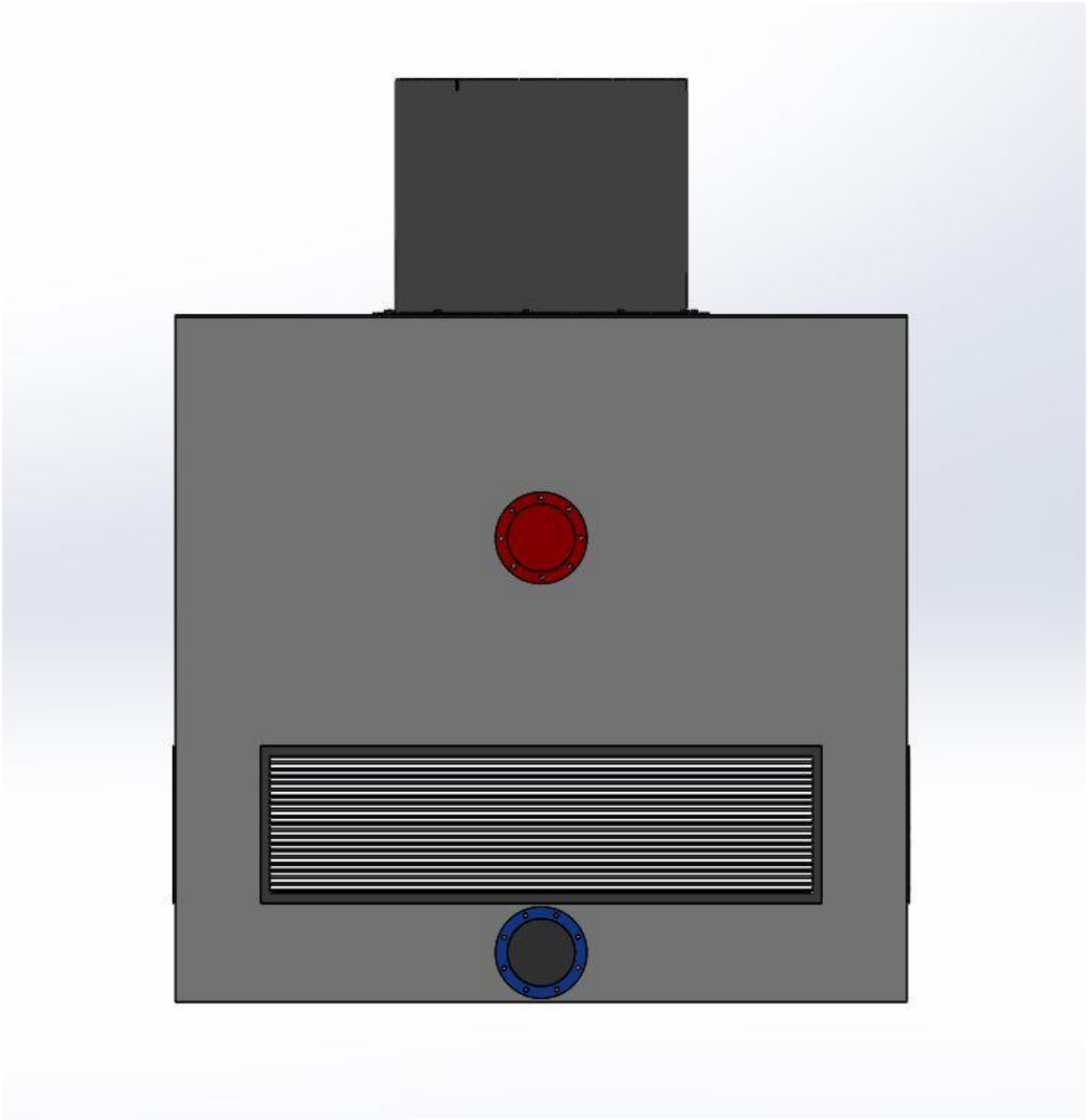
III. Blok dijagram tijeka proračuna

IV. Tehnička dokumentacija

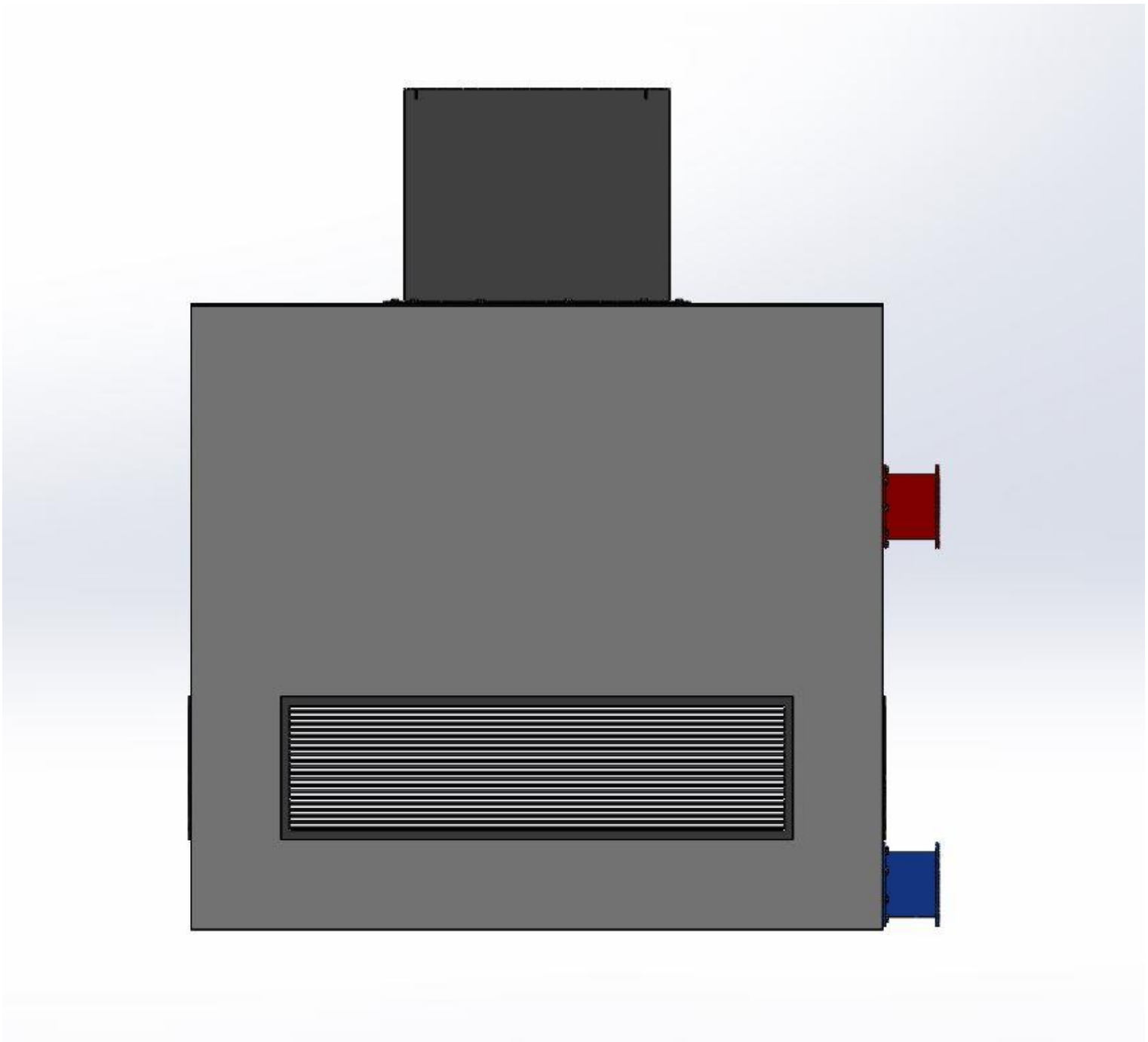
    a. Dispozicijski crtež rashladnog tornja



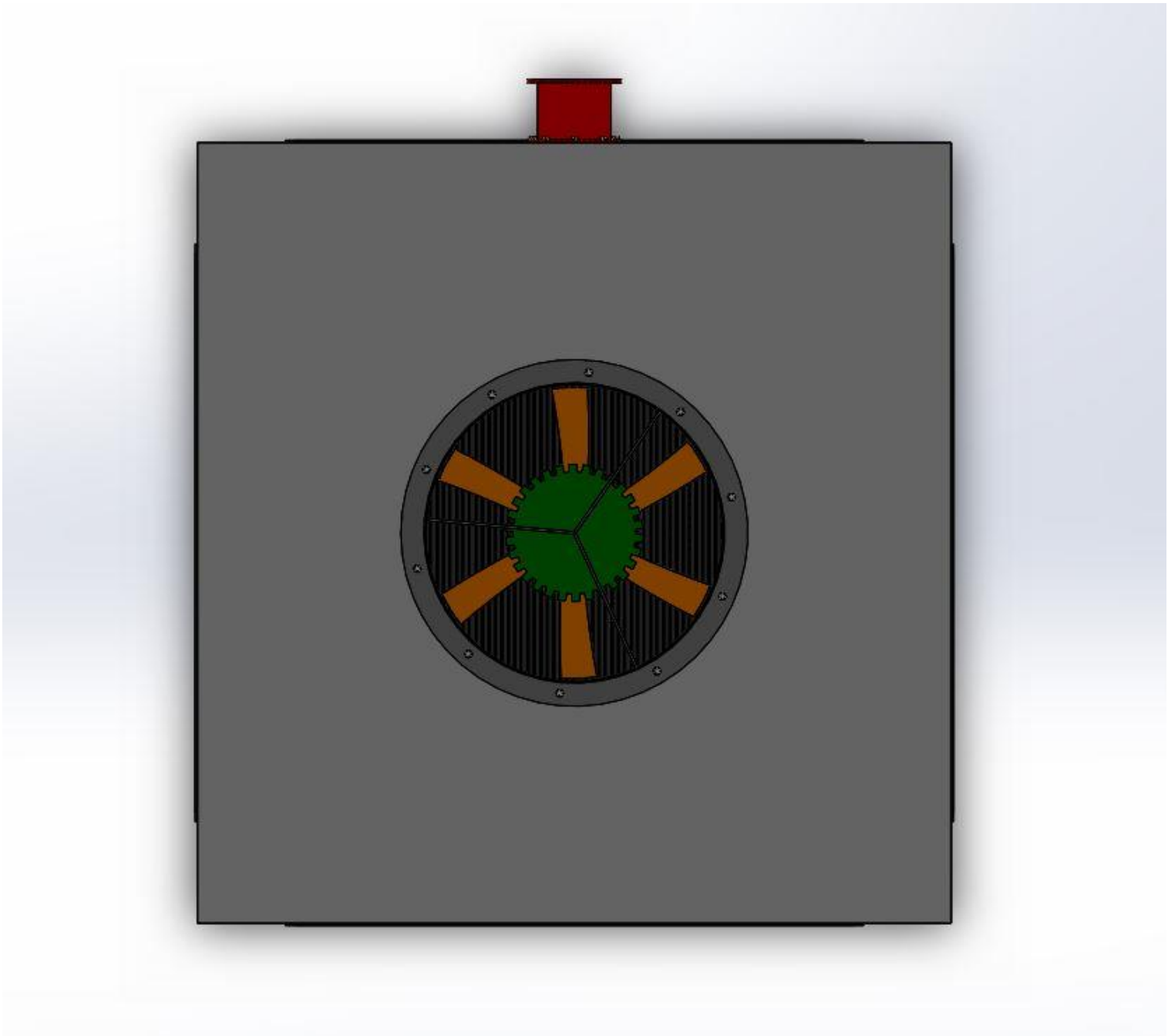
Slika 30. Izometrijski prikaz modela rashladnog tornja



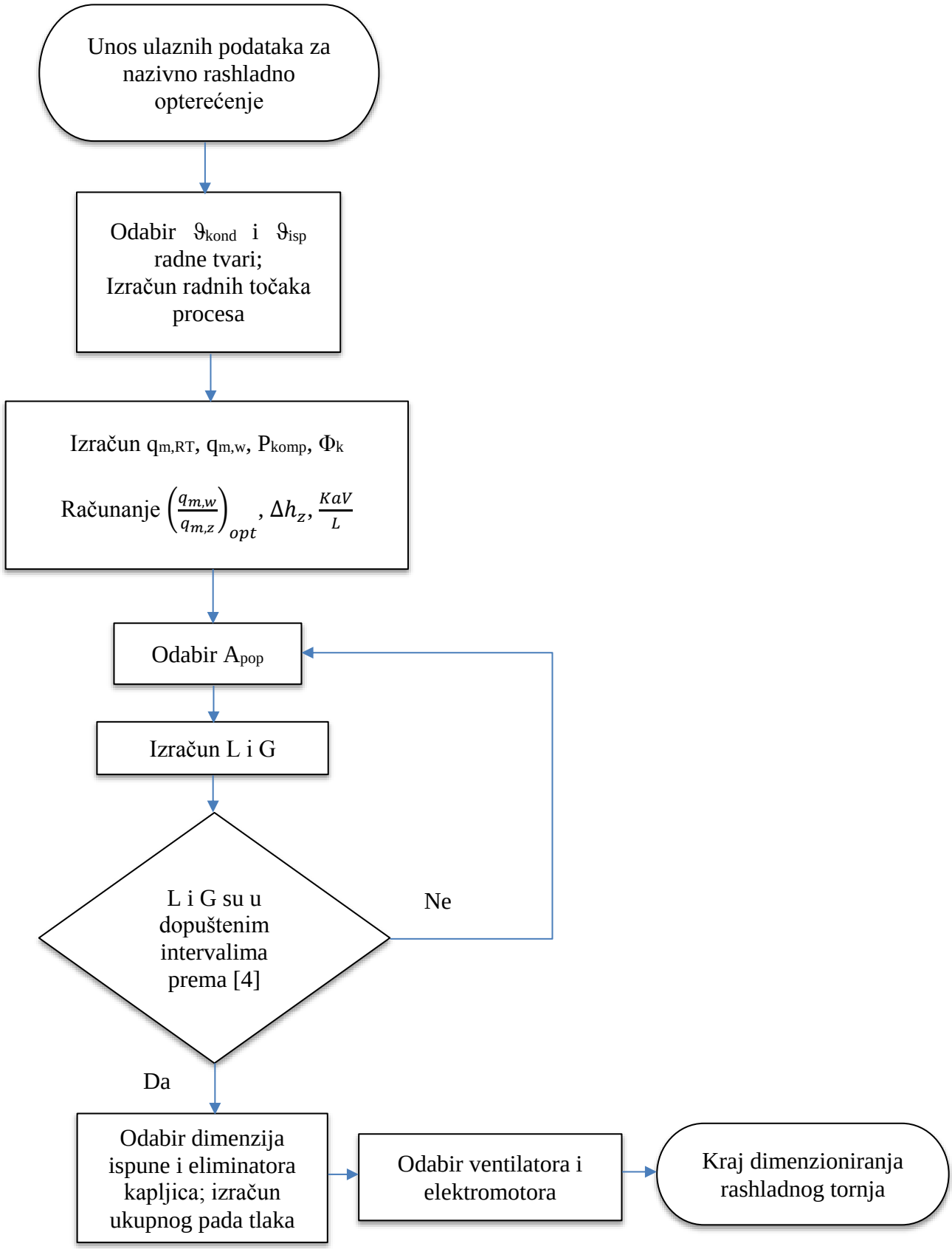
Slika 31. Nacrt modela rashladnog tornja



Slika 32. Bokocrt modela rashladnog tornja



Slika 33. Tlocrt modela rashladnog tornja


Unos ulaznih podataka za nazivno rashladno opterećenje
Odabir ϑ_{kond} i ϑ_{isp} radne tvari; Izračun radnih točaka procesa
Izračun $q_{m,RT}$, $q_{m,w}$, P_{komp}, Φ_k
Računanje $\left(\frac{q_{m,w}}{q_{m,z}}\right)_{opt}$, Δh_z, $\frac{KaV}{L}$
Odabir A_{pop}
Izračun L i G
L i G su u dopuštenim intervalima prema [4]
Ne
Da
Odabir dimenzija ispune i eliminatora kapljica; izračun ukupnog pada tlaka
Odabir ventilatora i elektromotora
Kraj dimenzioniranja rashladnog tornja