

# Rekonstrukcija amonijačnog postrojenja za hlađenje vode

---

**Krpan, Stjepan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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:235:016676>

*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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Stjepan Krpan**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Stjepan Krpan

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Vladimiru Soldi na prihvaćanju mentorstva i stručnoj pomoći tijekom izrade ovog rada. Također, zahvaljujem se i voditelju ovog projekta, dipl.ing.stroj. Željku Celiću iz mljekarske industrije Dukat d. d. na suradnji tijekom izrade ovog diplomskog rada i omogućenom obilasku postojećeg postrojenja.

Zahvaljujem se svojim prijateljima, koji su bili tu od početka pa do kraja našeg zajedničkog studiranja. Hvala vam na pomoći i lijepim uspomnama koje će nas životno povezati.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji, sestrama i mojim roditeljima na velikoj potpori tijekom svih ovih godina studiranja. Hvala vam na vašem odricanju kako bi mi pružili i omogućili uspješan završetak studija te na vašoj ljubavi koja me naučila pravim životnim vrijednostima.

Na kraju, zahvaljujem se svojoj zaručnici Martini na pruženoj ljubavi, razumijevanju i vjeri u mene, tijekom izrade ovog rada i tijekom svih godina našeg partnerstva.

Stjepan Krpan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske 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:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Stjepan KRPAN** Mat. br.: 0035186416

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rekonstrukcija amonijačnog rashladnog postrojenja za hlađenje vode**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Reconstruction of ammonia water cooling refrigeration system**

Opis zadatka:

Postojeće amonijačno rashladno postrojenje učinka hlađenja približno 3000 kW koristi se za tehnološke potrebe hlađenja u industriji mlijeka. Sustav je izveden kao banka leda s potopljenim Lindeovim isparivačem. Nedostatak postrojenja je iznimno veliko punjenje amonijaka s direktnim isparavanjem radne tvari u potopljenom isparivaču. Planira se rekonstrukcija sustava na način da se voda predhlađuje na pločastim isparivačima, a zatim dodatno hladi na silosu ledene vode s akumulacijom leda. Akumulacijski sustav izveo bi se kao posredni sustav hlađenja sa smjesom propilen glikola i vode.

U radu je potrebno projektirati rashladno postrojenje za prethlađivanje vode s 8 na 3 °C s direktnom ekspanzijom amonijaka u isparivaču (učinak hlađenja 2600 kW), te hlađenje vode u akumulacijskom silosu s bankom leda (učinak hlađenja 700 kW).

Postrojenje je smješteno na području grada Zagreba. Evaporativni kondenzatori koriste se za odvođenje topline kondenzacije.


Rad treba sadržavati:

1. Analizu potrošnje rashladne energije postojećeg i novog postrojenja za posredno hlađenje u mljekarskoj industriji.
2. Proračun punjenja amonijaka novog rashladnog postrojenja.
3. Termodinamički proračun suhog tipa isparivača za predhlađivanje vode.
4. Shemu spajanja i automatske regulacije.
5. Dispozicijski crtež rashladnog sustava.

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

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datum obrane:  
3. svibnja 2018. 5. srpnja 2018. 11., 12. i 13. srpnja 2018.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK .....	XI
SUMMARY .....	XII
1. UVOD .....	1
2. TEHNIČKI OPIS POSTROJENJA .....	2
2.1. Postojeće postrojenje .....	2
2.2. Novo postrojenje .....	8
3. ANALIZA POTROŠNJE RASHLADNE ENERGIJE .....	12
3.1. Analiza potrošnje rashladne energije postojećeg postrojenja .....	12
3.2. Analiza potrošnje rashladne energije novog postrojenja .....	17
3.2.1. Analiza potrošnje prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja .....	18
3.2.2. Analiza potrošnje drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja .....	21
3.3. Usporedba potrošnje rashladne energije postojećeg i novog postrojenja .....	25
4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN SUHOG TIPA ISPARIVAČA ZA PRETHLAĐIVANJE VODE .....	28
4.1. Termodinamičke karakteristike radnog i sekundarnog medija .....	28
4.2. Konstrukcijske dimenzije isparivača .....	30
4.3. Prijelaz topline na strani vode .....	31
4.4. Prijelaz topline na strani radne tvari amonijaka R717 .....	32
4.5. Proračun pada tlaka u isparivaču .....	36
4.6. Proračun dimenzija cjevovoda .....	39
4.6.1. Proračun dimenzija cjevovoda usisnog voda radne tvari R717 .....	40
4.6.2. Proračun dimenzija cjevovoda tlačnog voda radne tvari R717 .....	41
4.6.3. Proračun dimenzija cjevovoda kapljevinskog voda radne tvari R717 .....	42
4.6.4. Proračun dimenzija cjevovoda sekundarnog medija vode .....	43
5. PRORAČUN PUNJENJA AMONIJAKA .....	44
5.1. Proračun ukupne mase radne tvari amonijaka R717 postojećeg postrojenja .....	44
5.2. Proračun ukupne mase radne tvari amonijaka R717 novog postrojenja .....	46
5.3. Usporedba specifične potrošnje radne tvari postojećeg i novog postrojenja .....	47
6. ZAKLJUČAK .....	48
LITERATURA .....	49
PRILOZI .....	50

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Akumulacijski bazen ledene vode .....	2
Slika 2. Kontrolna prostorija .....	3
Slika 3. Separatori amonijaka .....	4
Slika 4. Evaporativni kondenzatori .....	5
Slika 5. Spremnik amonijaka .....	6
Slika 6. Pločasti izmjenjivači topline .....	7
Slika 7. Pločasti isparivači suhog tipa .....	8
Slika 8. Shematski prikaz akumulacijskog silosa .....	10
Slika 9. Određivanje temperature vlažnog termometra u h-x dijagramu .....	13
Slika 10. T-s dijagram kružnog procesa postojećeg postrojenja .....	14
Slika 11. Shema rashladnog procesa postojećeg postrojenja .....	15
Slika 12. Shema rashladnog procesa novog postrojenja .....	17
Slika 13. T-s dijagram kružnog procesa prvog stupnja novog postrojenja .....	19
Slika 14. T-s dijagram kružnog procesa drugog stupnja novog postrojenja .....	22

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti veličina stanja karakterističnih točaka rashladnog procesa postojećeg postrojenja .....	16
Tablica 2. Vrijednosti veličina stanja karakterističnih točaka prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja .....	20
Tablica 3. Vrijednosti veličina stanja karakterističnih točaka drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja .....	23
Tablica 4. Vrijednosti koeficijenata prijelaza topline na strani radne tvari u ovisnosti o sadržaju pare .....	34
Tablica 5. Vrijednosti gustoće dvofaznog strujanja u ovisnosti o sadržaju pare .....	36
Tablica 6. Vrijednosti pada tlaka zbog ubrzanja radne tvari u ovisnosti o sadržaju pare .....	37



## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- 2018/01 Shema spajanja i automatske regulacije
- 2018/02-1 Dispozicijski crtež rashladnog sustava
- 2018/02-2 Dispozicijski crtež rashladnog sustava

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\Phi_{lv,1}$	kW	Ukupno rashladno opterećenje pripreme ledene vode postojećeg postrojenja
$q_{v,lv}$	m <sup>3</sup> /h	Volumenski protok ledene vode
$\rho_{lv}$	kg/m <sup>3</sup>	Prosječna gustoća vode
$c_{lv}$	kJ/kgK	Prosječni specifični toplinski kapacitet vode
$\vartheta_{ul,lv}$	°C	Ulazna temperatura vode
$\vartheta_{izl,lv}$	°C	Izlazna temperatura vode
$\vartheta_{zr}$	°C	Temperatura vanjskog zraka
$\varphi_{zr}$	-	Relativna vlažnost vanjskog zraka
$\vartheta_{vt}$	°C	Temperatura vlažnog termometra za vanjski zrak
$\vartheta_{kond,1}$	°C	Temperatura kondenzacije u evaporativnom kondenzatoru postojećeg postrojenja
$\Phi_{0,1}$	kW	Rashladno opterećenje isparivača postojećeg postrojenja
$\vartheta_{isp,1}$	°C	Temperatura isparivanja amonijaka postojećeg postrojenja
$\eta_s$	-	Izentropski stupanj djelovanja kompresora
$h$	kJ/kg	Entalpija radne tvari
$p$	bar	Tlak radne tvari
$s$	kJ/kgK	Entropija radne tvari
$q_{m,1}$	kg/s, kg/h	Maseni protok radne tvari amonijaka postojećeg postrojenja
$P_{komp,1}$	kW	Snaga kompresije postojećeg postrojenja
$\Phi_{kond,1}$	kW	Učink kondenzatora postojećeg postrojenja
$\Phi_{lv,2a}$	kW	Rashladno opterećenje prethlađivanja vode novog postrojenja
$\vartheta_{kond,2}$	°C	Temperatura kondenzacije u evaporativnom kondenzatoru novog postrojenja
$\Phi_{0,2a}$	kW	Rashladno opterećenje isparivača prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$\vartheta_{isp,2a}$	°C	Temperatura isparivanja amonijaka prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja

$q_{m,2a}$	kg/s, kg/h	Maseni protok radne tvari amonijaka prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$P_{komp,2a}$	kW	Snaga kompresije prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$\Phi_{kond,2a}$	kW	Učink kondenzatora prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$\Phi_{lv,2b}$	kW	Rashladno opterećenje hlađenja vode u akumulacijskom silosu novog postrojenja
$\Phi_{0,2b}$	kW	Rashladno opterećenje isparivača drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$\vartheta_{isp,2b}$	°C	Temperatura isparivanja amonijaka drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$q_{m,2b}$	kg/s, kg/h	Maseni protok radne tvari amonijaka drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$P_{komp,2b}$	kW	Snaga kompresije drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$\Phi_{kond,2b}$	kW	Učink kondenzatora drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja
$\Phi_{lv,2}$	kW	Ukupno rashladno opterećenje pripreme ledene vode novog postrojenja
$P_{komp,2}$	kW	Snaga kompresije novog postrojenja
$\Phi_{kond,2}$	kW	Učink kondenzatora novog postrojenja
$\varepsilon_{hl,1}$	-	Faktor hlađenja postojećeg postrojenja
$Q_{lv,2}$	kWh	Ukupno potrebna rashladna energija 24-satnog rada novog postrojenja
$Q_l$	kWh	Ukupno potrebna akumulirana energija silosa leda
$q_{m,l}$	kg/s, kg/h	Maseni protok ulazne vode za akumulaciju leda
$q_l$	kJ/kg	Specifična toplina kopnjenja leda
$t_{a,l}$	h	Period akumulacije leda
$\Phi_{lv,2}$	kW	Rashladno opterećenje isparivača za stvaranje leda
$q_{m,2c}$	kg/s, kg/h	Maseni protok radne tvari amonijaka za stvaranje leda
$P_{komp,2c}$	kW	Snaga kompresije radne tvari za stvaranje leda
$E_{komp,2}$	kWh	Ukupna električna energija za pogon kompresora silosa leda
$\varepsilon_{hl,2}$	-	Faktor hlađenja novog postrojenja
$C_{post}$	kn	Cijena električne energije za 24-satni rad postojećeg postrojenja
$t_{VT}$	h	Vrijeme trajanja visoke tarife električne energije

---

$C_{VT}$	kn/kWh	Cijena visoke tarife električne energije
$t_{NT}$	h	Vrijeme trajanja niske tarife električne energije
$C_{NT}$	kn/kWh	Cijena niske tarife električne energije
$C_{novo}$	kn	Cijena električne energije za 24-satni rad novog postrojenja
$\Delta C_{uk}$	kn	Aproksimirana mjesečna ušteda na električnoj energiji
$\Delta \vartheta_{lv}$	°C	Razlika ulazne i izlazne temperature vode
$\vartheta_{sr,lv}$	°C	Srednja temperatura vode
$\Delta \vartheta_{preg}$	°C	Pregrijanje radne tvari
$q_0$	kJ/kg	Specifični učinak isparivača
$\lambda_{lv}$	W/mK	Prosječna toplinska provodnost vode
$\eta_{lv}$	Pas	Prosječna dinamička viskoznost vode
$\nu_{lv}$	m <sup>2</sup> /s	Prosječna kinematička viskoznost vode
$Pr_{lv}$	-	Prandtllov broj vode
$\rho_{vk}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća vrele kapljevine amonijaka
$c_{vk}$	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet vrele kapljevine amonijaka
$\lambda_{vk}$	W/mK	Toplinska provodnost vrele kapljevine amonijaka
$\eta_{vk}$	Pas	Dinamička viskoznost vrele kapljevine amonijaka
$\nu_{vk}$	m <sup>2</sup> /s	Kinematička viskoznost vrele kapljevine amonijaka
$\rho_{szp}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća suhozasićene pare amonijaka
$c_{szp}$	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet suhozasićene pare amonijaka
$\lambda_{szp}$	W/mK	Toplinska provodnost suhozasićene pare amonijaka
$\eta_{szp}$	Pas	Dinamička viskoznost suhozasićene pare amonijaka
$\nu_{szp}$	m <sup>2</sup> /s	Kinematička viskoznost suhozasićene pare amonijaka
$H_{isp}$	m	Visina isparivača
$L_{isp}$	m	Duljina isparivača
$\beta$	°	Kut orebrenja isparivača
$\Phi$	-	Faktor površine isparivača
$b_{isp}$	m	Dubina orebrenja (širina kanala) isparivača

$d_{h,isp}$	m	Ekvivalentni promjer kanala isparivača
$N_{isp}$	-	Broj ploča isparivača
$A_{c,isp}$	m <sup>2</sup>	Površina jednog kanala isparivača
$q_{m,lv}$	kg/s	Maseni protok ledene vode
$N_{lv}$	-	Broj kanala za strujanje vode
$w_{lv}$	m/s	Brzina strujanja vode kroz kanal
$Re_{lv}$	-	Reynoldsova značajka strujanja vode
$Nu_{lv}$	-	Nusseltova značajka prijelaza topline na strani vode
$\alpha_{lv}$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prijelaza topline na strani vode
$q_{pret}$	W/m <sup>2</sup>	Pretpostavljeni specifični toplinski tok u isparivaču
$\Delta\vartheta_m$	°C	Srednja logaritamska razlika temperature
$N_{NH3}$	-	Broj kanala za strujanje radne tvari amonijaka
$G_{NH3}$	kg/m <sup>2</sup> s	Gustoća masenog protoka radne tvari amonijaka
$Bo_{NH3}$	-	Boilingova značajka za proračun koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari amonijaka
$\eta_{NH3}$	Pas	Dinamička viskoznost amonijaka u ovisnosti o sadržaju pare
$\lambda_{NH3}$	W/mK	Toplinska provodnost amonijaka u ovisnosti o sadržaju pare
$Re_{NH3}$	-	Reynoldsova značajka strujanja amonijaka
$Nu_{NH3}$	-	Nusseltova značajka prijelaza topline na strani amonijaka
$\alpha_{NH3}$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prijelaza topline na strani amonijaka
$\alpha_{NH3,sr}$	W/m <sup>2</sup> K	Srednji koeficijent prijelaza topline na strani amonijaka
$k$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prolaza topline
$\lambda_{\xi}$	W/mK	Toplinska provodnost čelika
$\delta$	m	Debljina čelične ploče
$q_{stv}$	W/m <sup>2</sup>	Stvarni specifični toplinski tok u isparivaču
$A_{potr}$	m <sup>2</sup>	Potrebna površina izmjene topline
$A_{stv}$	m <sup>2</sup>	Stvarna površina izmjene topline
$\Delta A$	-	Predimenzioniranost izmjenjivača topline
$\rho_{ds}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća dvofaznog strujanja amonijaka

$x$	-	Sadržaj pare radne tvari
$\rho_{ds,sr}$	$\text{kg/m}^3$	Srednja vrijednost gustoće dvofaznog strujanja amonijaka
$\Delta p_{stat}$	Pa	Statički pad tlaka
$\Delta p_{ubrz}$	Pa	Pad tlaka zbog ubrzanja strujanja radne tvari
$\Delta p_{ubrz,sr}$	Pa	Srednja vrijednost pada tlaka zbog ubrzanja strujanja radne tvari
$Re_{szp}$	-	Reynoldsova značajka strujanja parne faze amonijaka
$f$	-	Fanningov faktor trenja
$\Delta p_{tr}$	Pa	Pad tlaka uslijed trenja
$\Delta p_{uk}$	Pa	Ukupan pad tlaka dvofaznog strujanja u pločastom isparivaču
$w_{u,NH_3}$	m/s	Brzina strujanja amonijaka u usisnom vodu
$w_{t,NH_3}$	m/s	Brzina strujanja amonijaka u tlačnom vodu
$w_{k,NH_3}$	m/s	Brzina strujanja amonijaka u kapljevinskom vodu
$w_{lv}$	m/s	Brzina strujanja ulazne vode
$\rho_{u,NH_3}$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća amonijaka na usisu u kompresor
$\rho_{t,NH_3}$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća amonijaka na izlazu iz kompresora
$\rho_{k,NH_3}$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća amonijaka na izlazu iz kondenzatora
$q_{vu,NH_3}$	$\text{m}^3/\text{s}$	Volumenski protok amonijaka u usisnom vodu
$A_u$	$\text{m}^2$	Poprečni presjek cijevi usisnog voda
$d_u$	m	Promjer cijevi usisnog voda
$q_{vt,NH_3}$	$\text{m}^3/\text{s}$	Volumenski protok amonijaka u tlačnom vodu
$A_t$	$\text{m}^2$	Poprečni presjek cijevi tlačnog voda
$d_t$	m	Promjer cijevi tlačnog voda
$q_{vk,NH_3}$	$\text{m}^3/\text{s}$	Volumenski protok amonijaka u kapljevinskom vodu
$A_k$	$\text{m}^2$	Poprečni presjek cijevi kapljevinskog voda
$d_k$	m	Promjer cijevi kapljevinskog voda
$A_{lv}$	$\text{m}^2$	Poprečni presjek cjevovoda ulazne vode
$d_{lv}$	m	Promjer cjevovoda ulazne vode
$\rho_{s,1}$	$\text{kg/m}^3$	Srednja gustoća amonijaka u isparivaču postojećeg postrojenja

---

$\rho_{mp}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća mokre pare amonijaka
$V_{c,1}$	m <sup>3</sup>	Volumen cijevi isparivača postojećeg postrojenja
$D_c$	m	Unutarnji promjer cijevi isparivača postojećeg postrojenja
$L_c$	m	Ukupna duljina cijevi isparivača postojećeg postrojenja
$m_{c,1}$	kg	Masa radne tvari u cijevima isparivača postojećeg postrojenja
$m_s$	kg	Masa radne tvari u spremniku
$\rho_{s,k}$	kg/m <sup>3</sup>	Srednja gustoća amonijaka u evaporativnom kondenzatoru
$V_k$	m <sup>3</sup>	Volumen cijevi evaporativnog kondenzatora
$D_k$	m	Unutarnji promjer cijevi evaporativnog kondenzatora
$L_k$	m	Ukupna duljina cijevi evaporativnog kondenzatora
$m_k$	kg	Masa radne tvari u cijevima evaporativnog kondenzatora
$m_{uk,1}$	kg	Ukupna masa radne tvari postojećeg postrojenja
$\rho_{s,2}$	kg/m <sup>3</sup>	Srednja gustoća amonijaka u isparivaču novog postrojenja
$N_{prep}$	-	Preporučena količina radne tvari u pločastim izmjenjivačima
$V_{c,2}$	m <sup>3</sup>	Volumen radne tvari u isparivaču novog postrojenja
$m_{c,1}$	kg	Masa radne tvari pločastog isparivača novog postrojenja
$m_{uk,2}$	kg	Ukupna masa radne tvari novog postrojenja
$g_1$	kg/kW	Specifična potrošnja radne tvari postojećeg postrojenja
$g_2$	kg/kW	Specifična potrošnja radne tvari novog postrojenja
$\Delta g$	-	Smanjenje specifične potrošnje radne tvari

## **SAŽETAK**

Tema ovog diplomskog rada je rekonstrukcija postojećeg amonijačnog rashladnog postrojenja za hlađenje vode koja se koristi za potrebe hlađenja u industriji mlijeka. Zbog postojećih nedostataka postrojenja, planira se zamjena bazena ledene vode, odnosno banke leda s potopljenim Linde-ovim tipom isparivača i radnom tvari amonijakom R717. Novo postrojenje bilo bi izvedeno na način da se ulazna voda na pločastim izmjenjivačima topline prethlađuje te se potom odvodi dalje u akumulacijski silos s bankom leda na dodatno hlađenje do zahtijevane temperature.

U ovom radu analizirana je potrošnja rashladne energije postojećeg i novog postrojenja te su prikazani proračun punjenja amonijaka i termodinamički proračun novih pločastih isparivača za prethlađivanje vode.

Na kraju rada, prikazani su izvedena shema spajanja i automatske regulacije te dispozicijski crtež rashladnog sustava.

Ključne riječi: amonijačno rashladno postrojenje, R717, silos ledene vode, akumulacija rashladne energije



## **SUMMARY**

Theme of this master thesis is reconstruction of existing ammonia cooling power plant which is used for cooling purposes in milk industry. Because of the existing power plant deficiencies, old ice water tank with Linde type evaporator and refrigerant R717 will be replaced with heat pre-exchangers and new ice water silo tank. Inlet water will be pre-cooled on heat exchangers and subsequently guided to ice water silo tank where it will be additionally cooled to required temperatures.

In this thesis consumption of cooling energy of existing and new power plant is analysed. Thermodynamic calculations of necessary quantity of ammonia and new heat evaporators for water pre-cooling are calculated.

In the end of this thesis, scheme of the connection diagrams and the automatic regulation, as well as the disposition drawing of the cooling system are attached.

Key words: ammonia refrigeration system, R717, ice water silo tank, cooling energy accumulation

## **1. UVOD**

Rad rashladnih sustava, odnosno procesi hlađenja su možda i najbitnija stavka u procesu proizvodnje kupovnog svježeg i trajnog mlijeka. Sirovo izmuženo kravlje mlijeko ima temperaturu od otprilike 35°C te ga je iz tog razloga nakon muženja potrebno što brže ohladiti na temperaturu od otprilike 4°C. Tim postupkom nastoji se spriječiti, odnosno što više minimalizirati rast mikroorganizama. Za osiguranje kvalitete sirovog kravljeg mlijeka najbitnija su dva čimbenika: postizanje zahtijevane temperature ohlađivanja i vrijeme u kojem je potrebno ohladiti sirovo mlijeko.

Za potrebe hlađenja sirovog mlijeka koriste se rashladni spremnici (kontejneri). Sirovo mlijeko se treba što brže transportirati u spremnike koji su konstruirani tako da osiguraju brzo hlađenje sirovog mlijeka na temperaturu 4°C. Ovisno o veličini farme, odnosno brzini punjenja spremnika, spremnici se periodično utovaruju na cisterne kojima se mlijeko transportira do industrijskih objekata. Dostavljeno mlijeko u rashladnom spremniku se prazni pomoću pumpi direktno s cisterni te odlazi u velike spremnike (silose mlijeka) na daljnju tehnološku obradu (pasterizacija, sterilizacija, homogenizacija) koja ovisi o vrsti proizvoda za koji će se sirovo mlijeko koristiti. Za navedene tehnološke potrebe troše se velike količine rashladne energije.

Tema ovog rada je rekonstrukcija procesnog amonijačnog rashladnog postrojenja koje se koristi za pripremu ledene vode koja je potrebna za održavanje temperature obrađenog mlijeka i mliječnih proizvoda, odnosno za hlađenje proizvoda i centralnog skladišta robe.

## **2. TEHNIČKI OPIS POSTROJENJA**

U ovom poglavlju dati su tehnički opisi postojećeg i planiranog novog rekonstruiranog postrojenja.

### **2.1. Postojeće postrojenje**

Postojeće amonijačno rashladno postrojenje ima učinak hlađenja od približno 3000 kW. Za proizvodnju ledene vode služi akumulacijski bazen ledene vode u kojem su smještene isparivačke cijevi u kojima isparuje amonijak R717 koji se koristi kao primarni radni medij. Akumulacijski bazen ledene vode postojećeg postrojenja prikazan je na slici 1.



**Slika 1. Akumulacijski bazen ledene vode**

Ulazni volumenski protok vode koji je potrebno ohladiti iznosi  $400 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ulazna voda dolazi u bazen pri temperaturi  $8^\circ\text{C}$ , dok je izlazna zahtijevana temperatura  $0,5^\circ\text{C}$ . Led se u bazenu akumulira tijekom noćnih sati kada je električna energija jeftinija, a akumulirana rashladna energija se potom troši danju što dovodi do ušteda u vidu smanjenja ulaganja u potrebnu električnu snagu kompresora. Proizvedena ledena voda koristi se u sekundarnom krugu za hlađenje mlijeka i mliječnih proizvoda.

Amonijak uobičajeno isparava pri temperaturama u granici od  $-7^\circ\text{C}$  do  $-10^\circ\text{C}$ , ovisno o potrebnom rashladnom učinku. Temperatura isparivanja je automatski regulirana računalom i može se nadzirati i regulirati u kontrolnoj prostoriji. Kontrolna prostorija postojećeg postrojenja prikazana je na slici 2.



**Slika 2. Kontrolna prostorija**

Isparivački tlakovi kreću se u intervalu vrijednosti od otprilike 2,9 do 3,5 bara. Ukupna duljina isparivačkih čeličnih bešavnih cijevi unutar bazena ledene vode je približno 17 km, dok su cijevi promjera  $\Phi 39,3 \times 2,6$  mm. Cijevi su ulaznim i izlaznim krajevima spojene na 4 separatora amonijaka u kojima se odvajaju kapljevita i parna faza amonijaka. Separatori amonijaka postojećeg postrojenja prikazani su na slici 3.



**Slika 3. Separatori amonijaka**

Amonijak se nakon isparavanja odvodi iz separatora pomoću 5 vijčanih kompresora pojedine električne snage 330 kW. Tlak na izlazu iz kompresora je vrijednosti od otprilike 12 bara.

Nakon kompresije dio para amonijaka odvodi se za potrebe dizalice topline koja služi za zagrijavanje potrošne tople vode režima 70°C/80°C. Preostali protok para amonijaka odvodi se na 12 evaporativnih kondenzatora u kojima amonijak u potpunosti kondenzira. Evaporativni kondenzatori postojećeg postrojenja prikazani su na slici 4.



**Slika 4. Evaporativni kondenzatori**

Kondenzirana kapljevina amonijaka iz evaporativnih kondenzatora i s povrata dizalice topline odvodi se u spremnik amonijaka. Iz spremnika, amonijak se usmjerava u sustav prema potrebi. Spremnik amonijaka postojećeg postrojenja prikazan je na slici 5.



**Slika 5. Spremnik amonijaka**

Iz spremnika amonijaka napajaju se 4 separatora amonijaka kojima se opskrbljuju isparivačke cijevi bazena ledene vode i dodatni separator amonijaka koji opskrbljuje isparivačke cijevi dva pločasta izmjenjivača topline na kojima se hladi smjesa etilen-glikola i vode.

U izmjenjivačima topline smjesa etilen-glikola i vode se hladi u režimu od vrijednosti  $-2^{\circ}\text{C}$  do  $-6^{\circ}\text{C}$  i na taj način predaje toplinu potrebnu za isparavanje amonijaka. Ohlađena smjesa etilen-glikola i vode koristi se u sekundarnom krugu za hlađenje centralnog skladišta, odnosno tunela proizvoda. Pločasti izmjenjivači topline u kojima se hladi smjesa etilen-glikola i vode prikazani su na slici 6.



**Slika 6. Pločasti izmjenjivači topline**

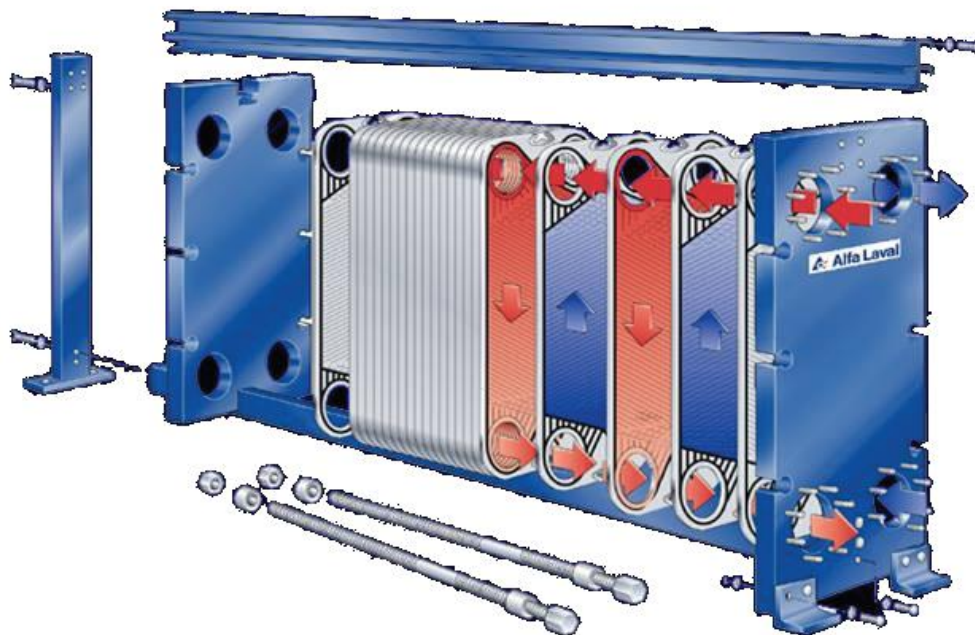


## 2.2. Novo postrojenje

Cilj rekonstrukcije postojećeg amonijačnog postrojenja je smanjenje punjenja radne tvari amonijaka R717. Iz tog razloga voda se neće hladiti samo u bazenu ledene vode pomoću isparivača s radnom tvari amonijakom R717, već će se hlađenje podijeliti na dva dijela, pri čemu ulazni parametri vode ostaju jednaki onima definiranim u tehničkom opisu postojećeg postrojenja budući da su to parametri koji su zahtijevani za uspješan rad industrijskog objekta.

Prethlađivanje ulazne vode temperature  $8^{\circ}\text{C}$  jednakog ulaznog volumenskog protoka  $400\text{ m}^3/\text{h}$  odvijat će se na pločastim isparivačima suhog tipa s direktnom ekspanzijom amonijaka u isparivaču. Izlazna zahtijevana temperatura iz isparivača je  $3^{\circ}\text{C}$ , a amonijak bi, ovisno o potrebnom rashladnom učinku, isparavao pri temperaturama u granici od  $-3^{\circ}\text{C}$  do  $1^{\circ}\text{C}$ , odnosno pri isparivačkim tlakovima u intervalu vrijednosti od otprilike 3,8 bara do 4,5 bara.

Pločasti izmjenjivači topline predaju toplinu između dva medija bez njihovog miješanja. Općenito, mediji mogu biti u kapljevitom ili plinovitom stanju. Kod rashladnih sustava u kojima je jedan medij amonijak, pločasti izmjenjivači topline najčešće se koriste kao isparivači i kondenzatori. Skica izgleda pločastog izmjenjivača topline prikazana je na slici 7.



Slika 7. Pločasti isparivači suhog tipa

Prethlađena voda temperature 3°C odvodi se u akumulacijski silos s bankom leda na dodatno hlađenje do zahtijevane temperature ledene vode 0,5°C. Akumulacijski silos s bankom leda, kao i postojeći bazen s ledenom vodom, primjer je latentnog spremnika topline.

Latentni spremnici topline rade na principu izmjene topline koja se izmjenjuje pri prijelazu radne tvari iz jednog u drugo agregatno stanje. Promjena agregatnog stanja je povrativ ravnotežan proces koji se može odvijati u oba smjera, ovisno o tome dovodi li se ili odvodi toplina. Za promjenu agregatnog stanja potrebna je velika količina topline. Iz tog razloga latentni spremnici topline imaju znatno veću gustoću pohrane topline u odnosu na osjetne spremnike topline. Još jedna prednost latentnih spremnika topline je da se kod njih izmjena topline odvija pri stalnoj temperaturi budući da je promjena faze izoterma proces.

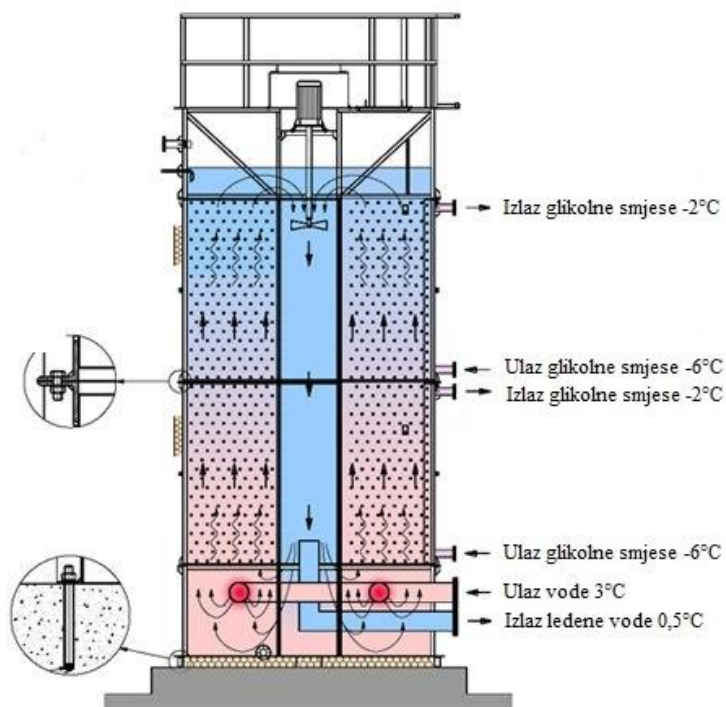
U sustavima kod kojih se koriste latentni spremnici topline najčešće se koristi pretvorba iz krutog u tekuće agregatno stanje, a vrlo rijetko iz tekućeg u plinovito agregatno stanje zbog problema koji nastaju velikim povećanjem volumena pri pretvorbi iz tekuće u plinovitu fazu. Banke leda su primjeri latentnog spremnika topline koji su u primjeni u klimatizacijskim sustavima i procesnoj industriji. Najčešći medij koji se koristi u ovim sustavima je smjesa propilen glikola i vode.

Ovakvi rashladni sustavi su efikasni zbog smanjenja dnevne potražnje za električnom energijom i zbog povećanja kapaciteta hlađanja, jer u slučaju povećanja rashladnih potreba istovremeno mogu raditi ostali rashladni uređaji i akumulacijski spremnici. Na taj način pokrivaju se vršna opterećenja i povećava efikasnost cijelog energetskeg sustava.

U noćnom radu predloženog novog sustava, smjesa etilen-glikola i vode svojim zagrijavanjem od temperature -6°C do -2°C preuzimala bi na sebe toplinu od vode, koja bi se hladila i mijenjala agregatno stanje u led. Toplina otapanja leda koristila bi se u dnevnom radu sustava tijekom trajanja skuplje tarife električne energije. Led bi se akumulirao na površini cijevi koje su potopljene u silosu vode, dok bi smjesa etilen-glikola i vode strujala kroz cijevi.

Shematski prikaz akumulacijskog silosa ledene vode s 2 akumulacijska modula tvrtke „Frigoterm“ iz Sesevetskog Kraljevca prikazan je na slici 8.

AKUMULACIJSKI  
SILOS LEDENE VODE  
tvrtke "Frigoterm"



**Slika 8. Shematski prikaz akumulacijskog silosa**

Debljina leda koja se stvara na cijevima uobičajeno se kreće u rasponu vrijednosti od 30 do 50 mm, ovisno o željenoj primjeni. Što je niža vrijednost temperature vode koju želimo postići, debljina leda mora biti veća. Postignuta debljina leda na cijevima mora biti kontrolirana kako ne bi postala prevelika jer bi se na taj način mogao zatvoriti prolaz za cirkulaciju vode između cijevi. Također, ne smije se dozvoliti da na pojedinim mjestima cijevi ostanu bez leda.

Maksimalna i minimalna debljina leda kontroliraju se pomoću senzora maksimalne i minimalne debljine leda koji reguliraju otvaranje i zatvaranje elektromagnetskog ventila. Senzori mjere debljinu leda na temelju mjerenja razlike električnih provodljivosti vode i leda, a uobičajeno su postavljeni na svakih 9 do 10 metara cijevi.

Pomoću elektromagnetskog ventila regulira se cirkulacija smjese etilen-glikola i vode. Kad debljina leda postigne maksimalnu vrijednost, senzor maksimalne debljine leda regulira zatvaranje elektromagnetskog ventila. Time se sprječava cirkulacija smjese etilen-glikola i vode kako bi se spriječilo daljnje hlađenje, odnosno stvaranje leda. Isto tako, kad debljina leda postigne minimalnu vrijednost, senzor minimalne debljine leda regulira otvaranje elektromagnetskog ventila, odnosno pokreće cirkulaciju smjese etilen-glikola i vode kako bi se pokrenulo hlađenje, odnosno stvaranje leda.

Ulazna voda temperature 3°C ulazi u bazni modul akumulacijskog silosa gdje joj se odmah smanjuje temperatura pomoću izlazne ledene vode. Smanjenje temperature regulira se ovisno o omjeru protoka ledene vode i ulazne vode povrata. Tako ohlađena ulazna voda prolazi između cijevi u kojima struji sekundarni radni fluid smjesa etilen-glikola i vode. Međusobnom izmjenom topline, ulazna voda se hladi i zamrzava na stjenkama cijevi. Voda se usmjerava prema dnu silosa pomoću postavljenog agitatora na vrhu. On usmjerava vodu u centralni kanal i šalje je prema dnu, odnosno dalje prema postrojenju.

Temperatura ulazne vode na prvim cijevima mjeri se temperaturnom sondom. Ukoliko je ta temperatura previsoka, povećava se broj okretaja agitatora kako bi na prvo miješanje dolazila veća količina ledene vode. Broj okretaja agitatora regulira se frekventnim regulatorom.

### 3. ANALIZA POTROŠNJE RASHLADNE ENERGIJE

U ovom poglavlju prikazana je provedena analiza potrošnje rashladne energije postojećeg i novog postrojenja za posredno hlađenje.

#### 3.1. Analiza potrošnje rashladne energije postojećeg postrojenja

Postojeće postrojenje za pripremu ledene vode sastoji se od bazena ledene vode s potopljenim Linde isparivačem i radnom tvari amonijakom R717, vijčanih kompresora, evaporativnih kondenzatora, spremnika za amonijak i separatora amonijaka.

Potrebno je pripremiti 400 m<sup>3</sup>/h vode ulazne temperature 8°C, dok je izlazna zahtijevana temperatura vode 0,5°C. Iz toga slijedi:

$$\Phi_{lv,1} = q_{v,lv} * \rho_{lv} * c_{lv} * (\vartheta_{ul,lv} - \vartheta_{izl,lv}) = 3500 \text{ kW} \quad (1)$$

pri čemu je:

$\Phi_{lv,1}$  - ukupno rashladno opterećenje pripreme ledene vode postojećeg postrojenja

$q_{v,lv}$  - volumenski protok ledene vode = 400 m<sup>3</sup>/h

$\rho_{lv}$  - prosječna gustoća vode = 999,9 kg/m<sup>3</sup>

$c_{lv}$  - prosječni specifični toplinski kapacitet vode = 4,20 kJ/kgK

$\vartheta_{ul,lv}$  - ulazna temperatura vode = 8°C

$\vartheta_{izl,lv}$  - izlazna temperatura vode = 0,5°C

Kako bi se odredila temperatura kondenzacije potrebno je definirati sljedeće parametre zraka:

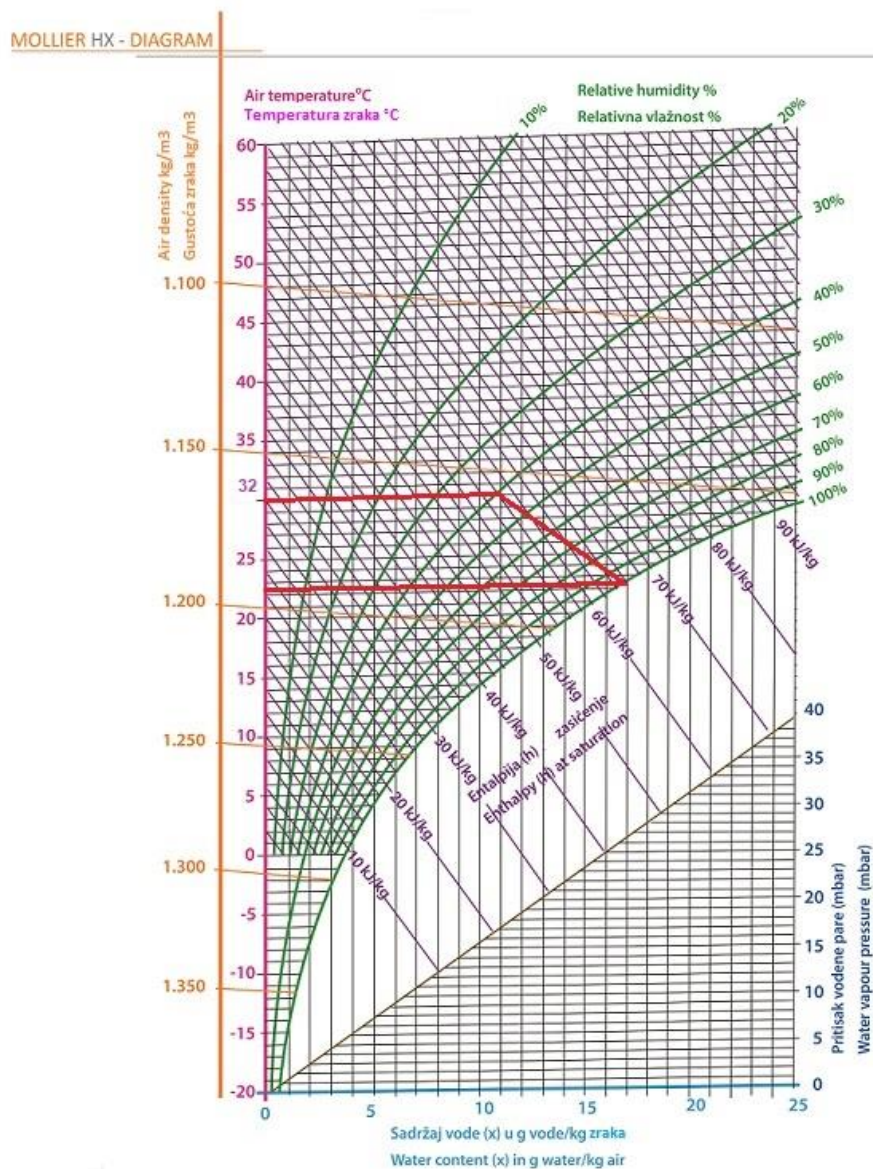
$$\vartheta_{zr} = 32^\circ\text{C}$$

$$\varphi_{zr} = 0,40$$

Pomoću navedenih vrijednosti parametara temperature i vlažnosti vanjskog zraka određena je temperatura vlažnog termometra za navedene parametre očitavanjem iz h-x dijagrama za okolišni atmosferski tlak:

$$\vartheta_{vt} = 22,5^\circ\text{C}$$

Na slici 9. prikazan je postupak određivanja temperature vlažnog termometra u h-x dijagramu.



Slika 9. Određivanje temperature vlažnog termometra u h-x dijagramu

Iz iskustva prakse, hladena voda u evaporativnom kondenzatoru postiže najnižu temperaturu za 3-4°C veću od temperature vlažnog termometra za parametre okolišnog zraka. Radi osiguranja odvođenja topline kondenzacije, uvjetuje se temperatura kondenzacije za 5-10°C viša od temperature hladene vode.

Odabrana temperatura kondenzacije u evaporativnom kondenzatoru:

$$\vartheta_{kond,1} = 22,5 + 3,5 + 9 = 35^{\circ}\text{C}$$

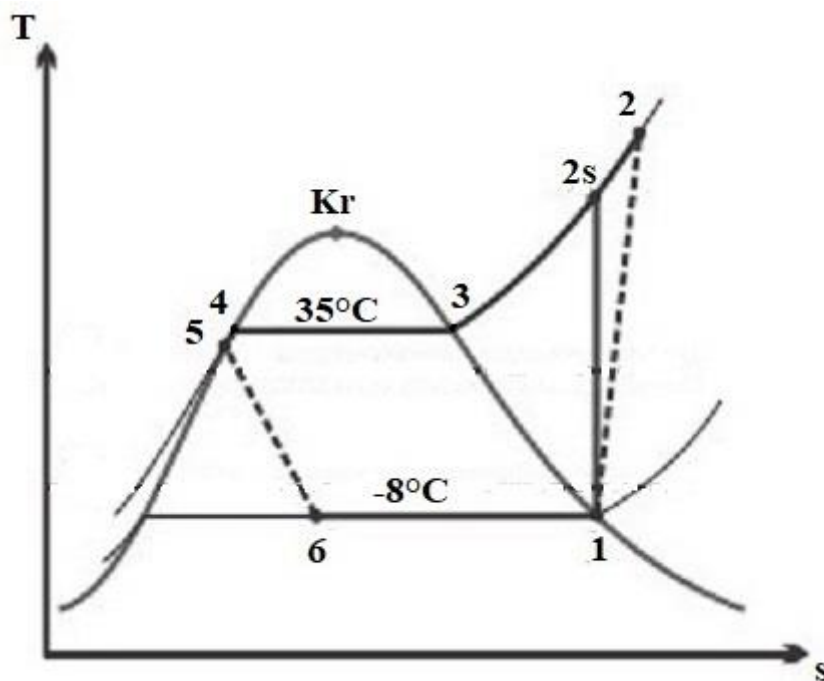
Kružni termodinamički proces postojećeg postrojenja definiran je sljedećim parametrima:

$$\Phi_{0,1} = \Phi_{lv,1} = 3500\text{kW} \quad - \text{ rashladno opterećenje isparivača}$$

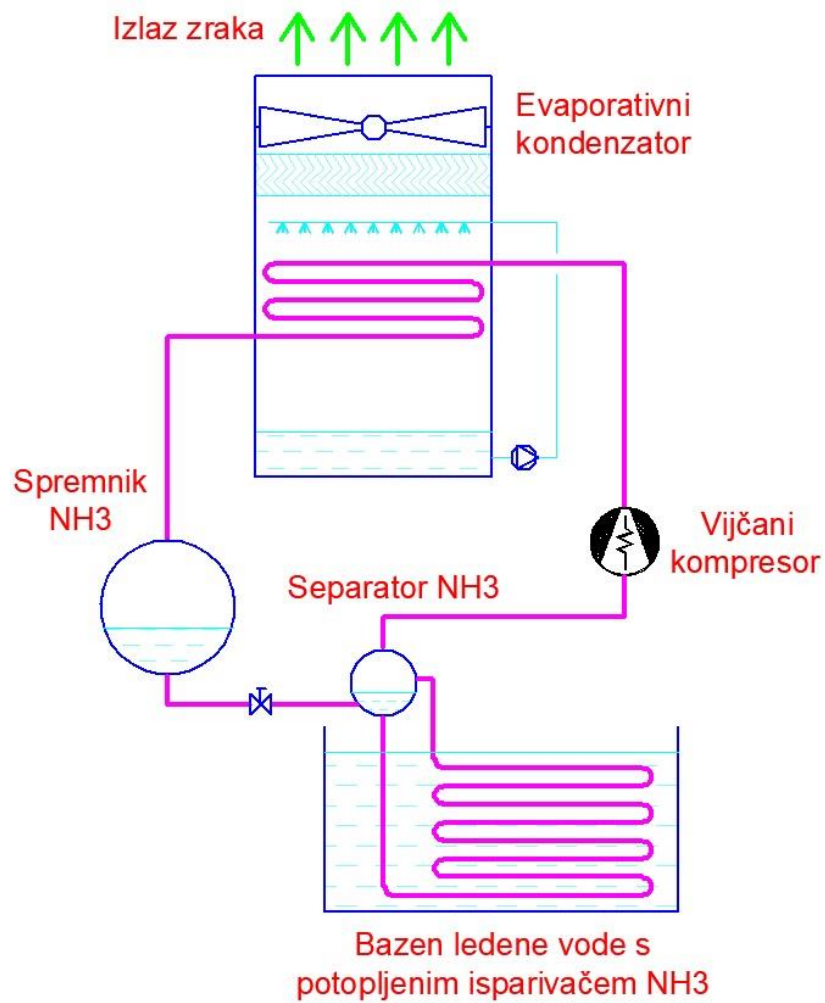
$$\vartheta_{kond,1} = 35^{\circ}\text{C} \quad - \text{ temperatura kondenzacije}$$

$$\vartheta_{isp,1} = -8^{\circ}\text{C} \quad - \text{ temperatura isparivanja}$$

$$\eta_s = 0,8 \quad - \text{ izentropski stupanj djelovanja kompresora}$$



Slika 10. T-s dijagram kružnog procesa postojećeg postrojenja



Slika 11. Shema rashladnog procesa postojećeg postrojenja

Karakteristične vrijednosti pojedinih točaka procesa određene su za radnu tvar amonijak R717 prema [3]. Vrijednost entalpije točke 2 korigirana je prema izentropskom stupnju djelovanja kompresora:

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2)$$



**Tablica 1. Vrijednosti veličina stanja karakterističnih točaka rashladnog procesa postojećeg postrojenja**

Točka	$\vartheta$ [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s[kJ/kgK]
1	-8	3,1556	1371,157	3,27786
2	119,3	13,525	1635,461	3,41694
2s	99,3	13,525	1582,603	3,27786
3	35	13,525	1397,377	2,73079
4	35	13,525	288,452	-0,86787
5	30	13,525	264,787	
6	-8	3,1556	264,787	

Iz izračunatog rashladnog opterećenja isparivača moguće je dobiti maseni protok radne tvari amonijaka R717 prema:

$$q_{m,1} = \frac{\Phi_{0,1}}{h_1 - h_6} = 3,1635 \frac{kg}{s} = 11389 \frac{kg}{h} \quad (3)$$

Potrebna snaga vijčanih kompresora postojećeg postrojenja za kompresiju radne tvari nakon isparivanja računa se prema:

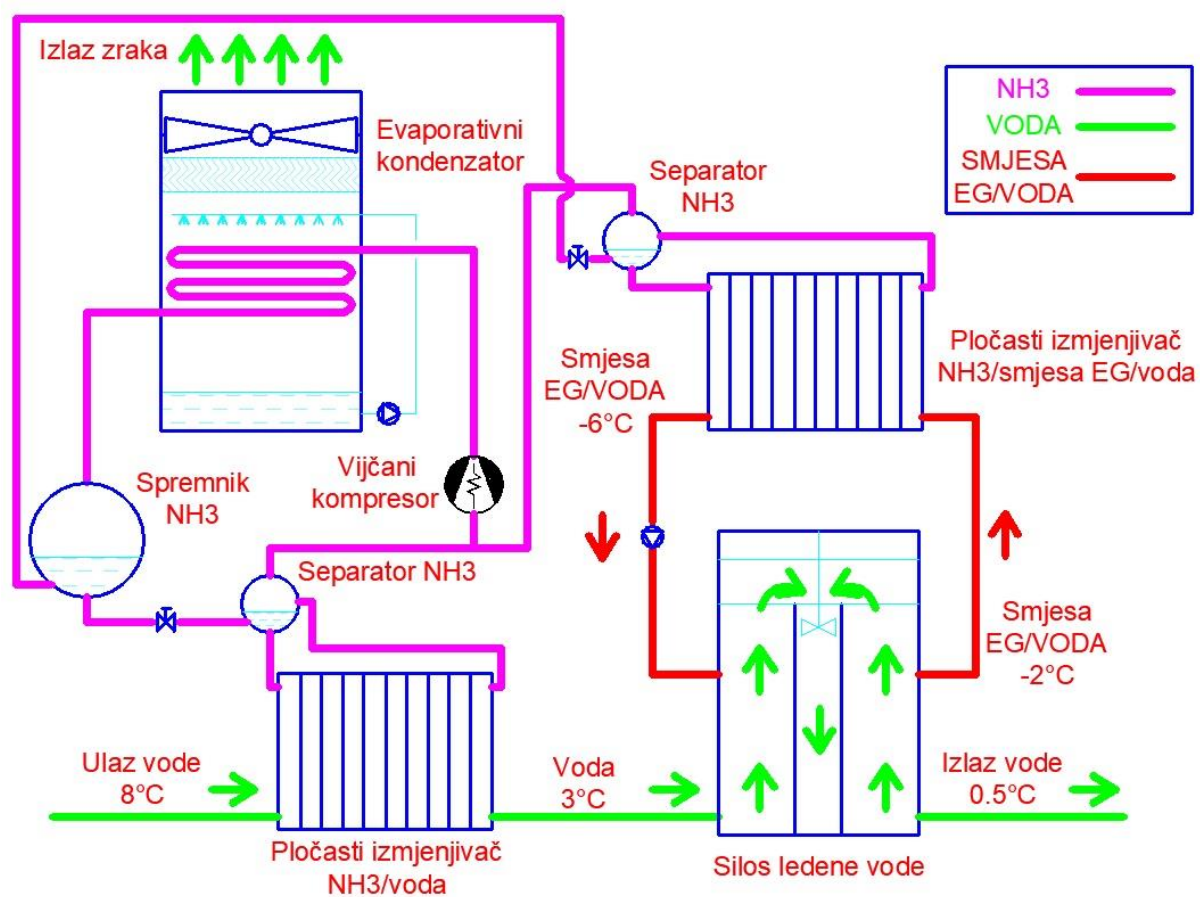
$$P_{komp,1} = q_{m,1} * (h_2 - h_1) = 836 kW \quad (4)$$

Toplinski učinak evaporativnih kondenzatora postojećeg postrojenja računa se prema:

$$\Phi_{kond,1} = q_{m,1} * (h_2 - h_5) = 4336 kW \quad (5)$$

### 3.2. Analiza potrošnje rashladne energije novog postrojenja

Rekonstruirano postrojenje za pripremu ledene vode rashlađivat će vodu u dva stupnja. U prvom stupnju voda će se prethlađivati na suhom tipu pločastog isparivača s radnom tvari amonijakom R717. Ispareni amonijak nakon separacije kapljevite i parne faze odlazi dalje prema vijčanim kompresorima, odakle se nakon kompresije odvodi u evaporativne kondenzatore, a potom u spremnik za amonijak, odakle se šalje dalje u sustav prema potrebi. U drugom stupnju prethlađena voda odvodi se u silos ledene vode s akumulacijom leda gdje se hladi do konačne željene temperature. Akumulacijski sustav izvest će se kao posredni sustav hlađenja sa smjesom etilen-glikola i vode. Shema rashladnog procesa novog postrojenja prikazana je na slici 12.



Slika 12. Shema rashladnog procesa novog postrojenja

### 3.2.1. Analiza potrošnje prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja

Kako bismo mogli usporediti kvalitetu procesa novog i postojećeg postrojenja, uzimamo jednak ulazni volumenski protok vode. U prvom stupnju rashladnog procesa novog postrojenja potrebno je pripremiti 400 m<sup>3</sup>/h vode ulazne temperature 8°C, dok je izlazna zahtijevana temperatura vode 3°C. Prosječne vrijednosti gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta se zanemarivo mijenjaju u odnosu na uzete vrijednosti kod proračuna rashladne energije postojećeg postrojenja. Iz toga slijedi:

$$\Phi_{lv,2a} = q_{v,lv} * \rho_{lv} * c_{lv} * (\vartheta_{ul,lv} - \vartheta_{izl,lv}) = 2330 \text{ kW} \quad (6)$$

pri čemu je:

$\Phi_{lv,2a}$  - rashladno opterećenje prethlađivanja vode novog postrojenja

$q_{v,lv}$  - volumenski protok ledene vode = 400 m<sup>3</sup>/h

$\rho_{lv}$  - prosječna gustoća vode = 999,9 kg/m<sup>3</sup>

$c_{lv}$  - prosječni specifični toplinski kapacitet vode = 4,20 kJ/kgK

$\vartheta_{ul,lv}$  - ulazna temperatura vode = 8°C

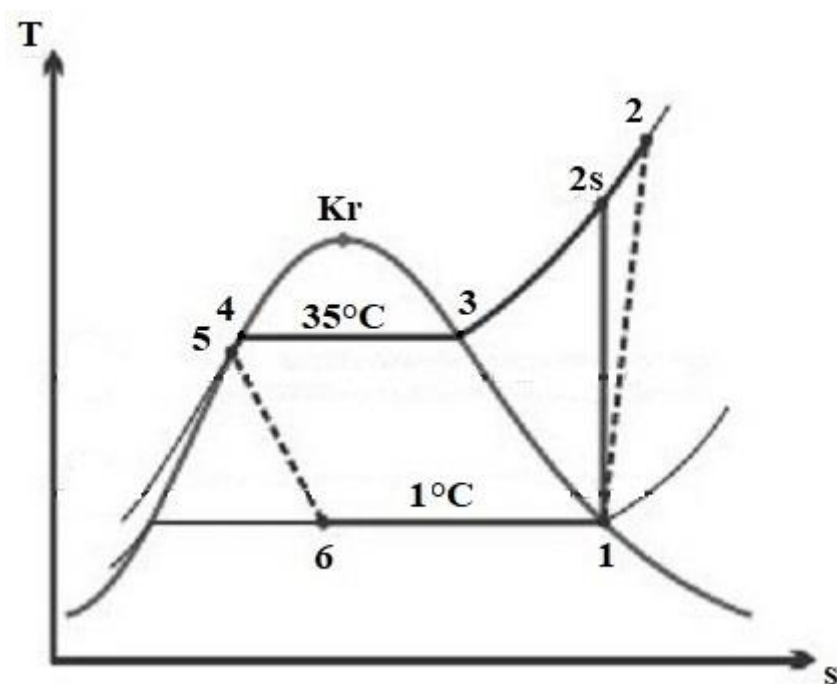
$\vartheta_{izl,lv}$  - izlazna temperatura vode = 3°C

Temperatura kondenzacije određena je na identičan način kao i kod proračuna postojećeg postrojenja. Usvaja se jednaka temperatura kondenzacije u evaporativnom kondenzatoru:

$$\vartheta_{kond,2} = \vartheta_{kond,1} = 35^\circ\text{C}$$

Kružni termodinamički proces prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja definiran je sljedećim parametrima:

- $\Phi_{0,2a} = \Phi_{lv,2a} = 2330 \text{ kW}$  - rashladno opterećenje isparivača  
 $\vartheta_{kond,2} = 35^\circ\text{C}$  - temperatura kondenzacije  
 $\vartheta_{isp,2a} = 1^\circ\text{C}$  - temperatura isparivanja  
 $\eta_s = 0,8$  - izentropski stupanj djelovanja kompresora



Slika 13. T-s dijagram kružnog procesa prvog stupnja novog postrojenja

Karakteristične vrijednosti pojedinih točaka procesa određene su za radnu tvar amonijak R717 prema [3]. Vrijednost entalpije točke 2 korigirana je prema izentropskom stupnju djelovanja kompresora, odnosno prema jednadžbi (2).

**Tablica 2. Vrijednosti veličina stanja karakterističnih točaka prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja**

Točka	$\vartheta$ [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s[kJ/kgK]
1	1	4,4652	1380,045	3,15275
2	96,9	13,525	1576,176	3,26044
2s	82,5	13,525	1536,950	3,15275
3	35	13,525	1397,377	2,73079
4	35	13,525	288,452	-0,86787
5	30	13,525	264,787	
6	1	4,4652	264,787	

Iz izračunatog rashladnog opterećenja isparivača moguće je dobiti maseni protok radne tvari amonijaka R717 prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja prema:

$$q_{m,2a} = \frac{\Phi_{0,2}}{h_1 - h_6} = 2,089 \frac{kg}{s} = 7521 \frac{kg}{h} \quad (7)$$

Potrebna snaga vijčanih kompresora prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja za kompresiju radne tvari nakon isparivanja računa se prema:

$$P_{komp,2a} = q_{m,2a} * (h_2 - h_1) = 410 kW \quad (8)$$

Toplinski učinak evaporativnih kondenzatora prvog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja računa se prema:

$$\Phi_{kond,2a} = q_{m,2a} * (h_2 - h_5) = 2739 kW \quad (9)$$

### 3.2.2. Analiza potrošnje drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja

U drugom stupnju rashladnog procesa novog postrojenja volumni protok vode vrijednosti  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  i ulazne temperature  $3^\circ\text{C}$ , dovodi se u silos ledene vode s akumulacijom leda na dodatno hlađenje do izlazne zahtijevane temperature  $0,5^\circ\text{C}$ . Iz toga slijedi:

$$\Phi_{lv,2b} = q_{v,lv} * \rho_{lv} * c_{lv} * (\vartheta_{ul,lv} - \vartheta_{izl,lv}) = 1170 \text{ kW} \quad (10)$$

pri čemu je:

$\Phi_{lv,2b}$  - rashladno opterećenje hlađenja vode u akumulacijskom silosu novog postrojenja

$q_{v,lv}$  - volumenski protok ledene vode =  $400 \text{ m}^3/\text{h}$

$\rho_{lv}$  - prosječna gustoća vode =  $999,8 \text{ kg}/\text{m}^3$

$c_{lv}$  - prosječni specifični toplinski kapacitet vode =  $4,21 \text{ kJ}/\text{kgK}$

$\vartheta_{ul,lv}$  - ulazna temperatura vode =  $3^\circ\text{C}$

$\vartheta_{izl,lv}$  - izlazna temperatura vode =  $0,5^\circ\text{C}$

Ledena voda hladi se pomoću smjese etilen-glikola i vode koja se u procesu zagrijava od temperature  $-6^\circ\text{C}$  do temperature  $-2^\circ\text{C}$ . Nakon prolaska kroz silos ledene vode s akumulacijom leda zagrijava smjesa etilen-glikola i vode odvodi se na pločaste izmjenjivače topline gdje predaje toplinu potrebnu za isparavanje amonijaka. Amonijak preuzima toplinu od smjese etilen-glikola i vode koja se tim postupkom ponovno hladi na temperaturu  $-6^\circ\text{C}$  te se odvodi nazad u akumulacijski silos gdje kreće novi krug ciklusa.

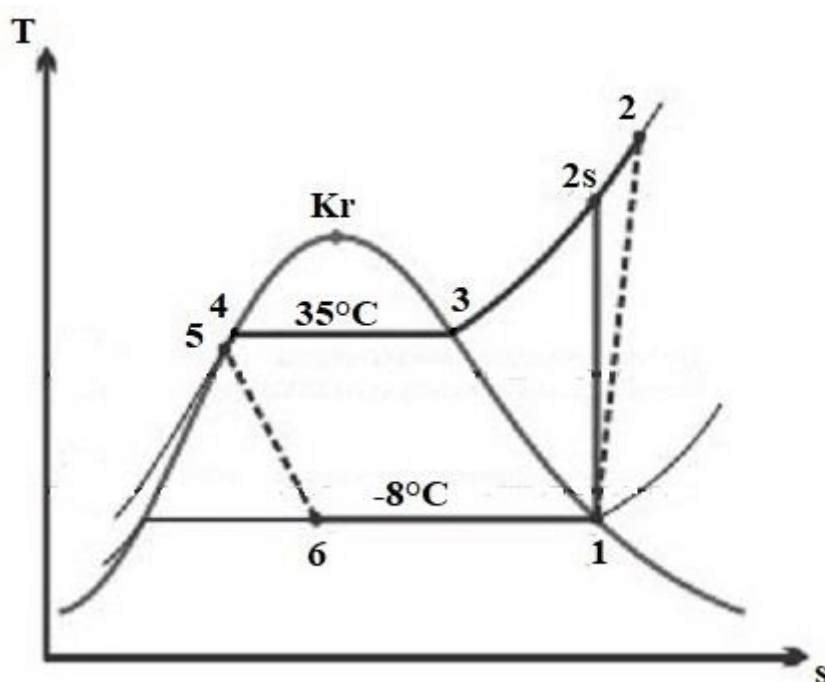
Kružni termodinamički proces s radnom tvari amonijakom R717 drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja definiran je sljedećim parametrima:

$$\Phi_{0,2b} = \Phi_{lv,2b} = 1170 \text{ kW} \quad - \text{ rashladno opterećenje isparivača}$$

$$\vartheta_{kond,2} = 35^\circ\text{C} \quad - \text{ temperatura kondenzacije}$$

$$\vartheta_{isp,2b} = -8^\circ\text{C} \quad - \text{ temperatura isparivanja}$$

$$\eta_s = 0,8 \quad - \text{ izentropski stupanj djelovanja kompresora}$$



Slika 14. T-s dijagram kružnog procesa drugog stupnja novog postrojenja

Karakteristične vrijednosti pojedinih točaka procesa određene su za radnu tvar amonijak R717 prema [3]. Vrijednost entalpije točke 2 korigirana je prema izentropskom stupnju djelovanja kompresora, odnosno prema jednadžbi (2).

**Tablica 3. Vrijednosti veličina stanja karakterističnih točaka drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja**

Točka	$\vartheta$ [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s[kJ/kgK]
1	-8	3,1556	1371,157	3,27786
2	119,3	13,525	1635,465	3,41695
2s	99,3	13,525	1582,603	3,27786
3	35	13,525	1397,377	2,73079
4	35	13,525	288,452	-0,86787
5	30	13,525	264,787	
6	-8	3,1556	264,787	

Iz izračunatog rashladnog opterećenja isparivača moguće je dobiti maseni protok radne tvari amonijaka R717 drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja prema:

$$q_{m,2b} = \frac{\Phi_{0,2b}}{h_1 - h_6} = 1,058 \frac{kg}{s} = 3807 \frac{kg}{h} \quad (11)$$

Potrebna snaga vijčanih kompresora drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja za kompresiju radne tvari nakon isparivanja računa se prema:

$$P_{komp,2b} = q_{m,2b} * (h_2 - h_1) = 280 kW \quad (12)$$

Toplinski učinak evaporativnih kondenzatora drugog stupnja rashladnog procesa novog postrojenja računa se prema:

$$\Phi_{kond,2b} = q_{m,2b} * (h_2 - h_5) = 1450 kW \quad (13)$$



Ukupno rashladno opterećenje pripreme ledene vode novog postrojenja jednako je zbroju rashladnog opterećenja prethlađivanja vode i rashladnog opterećenja hlađenja vode u akumulacijskom silosu. Iz navedenog slijedi:

$$\Phi_{lv,2} = \Phi_{lv,2a} + \Phi_{lv,2b} = 3500 \text{ kW} \quad (14)$$

Ukupna potrebna električna snaga za pogon kompresora novog postrojenja računa se prema:

$$P_{komp,2} = P_{komp,2a} + P_{komp,2b} = 690 \text{ kW} \quad (15)$$

Ukupni toplinski učinak evaporativnih kondenzatora novog postrojenja računa se prema:

$$\Phi_{kond,2} = \Phi_{kond,2a} + \Phi_{kond,2b} = 4189 \text{ kW} \quad (16)$$

### 3.3. Usporedba potrošnje rashladne energije postojećeg i novog postrojenja

Ukupna rashladna opterećenja pripreme ledene vode postojećeg i novog postrojenja su jednaka, što je i logično zbog jednakog ulaznog volumenskog protoka vode i jednake temperaturne razlike ulazne i izlazne vode. Rekonstruirano postrojenje izvest će se na način da će se kod prvog stupnja procesa, odnosno prethlađivanja vode na isparivaču temperatura isparivanja moći podići na vrijednost 1°C. Podizanjem temperature isparivanja automatski se podiže i tlak isparivanja. Zbog toga se taj prvi dio procesa provodi pri višem početnom tlaku uz isti tlak kondenzacije, odnosno dolazi do smanjenja potrebnog kompresijskog omjera, a time i do manje potrebne snage za kompresiju. Smanjenjem potrebne snage kompresije dolazi do povećanja faktora hlađenja postrojenja.

Faktor hlađenja postojećeg postrojenja određen je prema:

$$\varepsilon_{hl,1} = \frac{\Phi_{lv,1}}{P_{komp,1}} = 4,187 \quad (17)$$

Faktor hlađenja novog postrojenja odredit će se proračunom vrijednosti potrebne rashladne energije na bazi vremenskog perioda od 24 sata. Aproximirano vrijeme stvaranja leda u akumulacijskom silosu iznosi 8 sati za vrijeme trajanja tarife jeftinije struje. Preostalih 16 sati sustav troši rashladnu energiju nastalu akumulacijom leda, odnosno led se topi i na taj način hladi vodu do željene temperature.

Ukupna potrebna rashladna energija tijekom 24 sata rada postrojenja određena je prema:

$$Q_{lv,2} = \Phi_{lv,2} * 24h = 84000 \text{ kWh} \quad (18)$$

Tijekom 8 sati noćnog rada postrojenja smjesa etilen-glikola i vode mora hladiti vodu ulazne temperature 3°C na željenu izlaznu temperaturu 0,5°C, te osigurati hlađenje dodatnog protoka ulazne vode za akumulaciju leda. Nastali led mora osigurati hlađenje vode tijekom preostalih 16 sati dnevnog rada postrojenja. Ukupna potrebna akumulirana energija silosa leda određena je prema:

$$Q_l = \Phi_{lv,2b} * 16h = 18720 \text{ kWh} \quad (19)$$

Dodatni protok ulazne vode za akumulaciju leda određen je prema:

$$q_{m,l} = \frac{Q_l}{q_l * t_{a,l}} = 6,985 \frac{kg}{s} = 25146 \frac{kg}{h} \quad (20)$$

pri čemu je:

$$q_l \quad - \text{specifična toplina koptjenja leda} \quad = 335 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{a,l} \quad - \text{period akumulacije leda} \quad = 8\text{h}$$

Rashladno opterećenje isparivača potrebno za hlađenje ulazne vode do temperature 0°C i pretvaranje u led određeno je prema:

$$\Phi_l = q_{m,l} * c_w * \Delta\vartheta_w + q_{m,l} * q_l = 2428 \text{ kW} \quad (21)$$

Iz izračunatog rashladnog opterećenja isparivača moguće je dobiti maseni protok radne tvari amonijaka R717 za stvaranje leda u akumulacijskom silosu:

$$q_{m,2c} = \frac{\Phi_l}{h_1 - h_6} = 2,194 \frac{kg}{s} = 7900 \frac{kg}{h} \quad (22)$$

Potrebna snaga vijčanih kompresora za kompresiju radne tvari nakon isparivanja određena je prema:

$$P_{komp,2c} = q_{m,2c} * (h_2 - h_1) = 580 \text{ kW} \quad (23)$$

Ukupna električna energija za pogon vijčanih kompresora jednaka je zbroju energije potrošene na kompresiju radi prethlađivanja vode (24h rada), energije potrošene na kompresiju radi hlađenja vode do konačne temperature (8h rada) i energije potrošene na kompresiju radi stvaranja leda u akumulacijskom silosu (8h rada). Prema navedenom, ukupna električna energija za pogon kompresora određena je prema:

$$E_{komp,2} = P_{komp,2a} * 24h + P_{komp,2b} * 8h + P_{komp,2c} * 8h = 16720 \text{ kWh} \quad (24)$$

Faktor hlađenja novog postrojenja određen je prema:

$$\varepsilon_{hl,2} = \frac{Q_{lv,2}}{E_{komp,2}} = 5,024 \quad (25)$$

Na temelju izvora [17] napravljen je okvirni proračun uštede na cijeni električne energije. Cijena električne energije za 24-satni rad postojećeg postrojenja određena je prema:

$$C_{post} = P_{komp,1} * t_{VT} * C_{VT} + P_{komp,1} * t_{NT} * C_{NT} = 9263 kn \quad (26)$$

pri čemu je:

$t_{VT}$	- vrijeme trajanja visoke tarife električne energije	= 16 h
$C_{VT}$	- cijena visoke tarife električne energije	= 0,520 kn/kWh
$t_{NT}$	- vrijeme trajanja niske tarife električne energije	= 8 h
$C_{NT}$	- cijena niske tarife električne energije	= 0,345 kn/kWh

Cijena električne energije za 24-satni rad novog postrojenja određena je prema:

$$C_{novo} = P_{komp,2a} * (t_{VT} * C_{VT} + t_{NT} * C_{NT}) + (P_{komp,2b} + P_{komp,2c}) * t_{NT} * C_{NT}$$

$$C_{novo} = 6917 kn \quad (27)$$

Aproksimirana mjesečna ušteda na električnoj energiji:

$$\Delta C_{uk} = (C_{post} - C_{novo}) * 30 \approx 70400 kn$$

$$\Delta C_{uk} = \frac{C_{post} - C_{novo}}{C_{post}} * 100\% = 25,3\% \quad (28)$$

## 4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN SUHOG TIPRA ISPARIVAČA ZA PRETHLAĐIVANJE VODE

Odabrani isparivač za prethlađivanje vode je suhog tipa i pločaste izvedbe s direktnom ekspanzijom amonijaka u isparivaču. U radu će biti odabrana dva isparivača pojedinačnog rashladnog učina isparivača 1200kW.

### 4.1. Termodinamičke karakteristike radnog i sekundarnog medija

Ulazni podatci za proračun pločastog isparivača određeni su analizom potrošnje rashladne energije novog postrojenja u poglavlju 3.2. Prema navedenom slijedi:

- 1) Rashladno opterećenje isparivača:  $\Phi_0 = 1200 \text{ kW}$
- 2) Ulazna temperatura vode:  $\vartheta_{ul,lv} = 8^\circ\text{C}$
- 3) Izlazna temperatura vode:  $\vartheta_{izl,lv} = 3^\circ\text{C}$
- 4) Temperaturna razlika na strani vode:  $\Delta\vartheta_{lv} = 5^\circ\text{C}$
- 5) Srednja temperatura vode:  $\vartheta_{sr,lv} = 5,5^\circ\text{C}$
- 6) Radni medij: R717 amonijak
- 7) Temperatura isparivanja radne tvari:  $\vartheta_{isp} = 1^\circ\text{C}$
- 8) Entalpija radne tvari na ulazu u isparivač:  $h_6 = 264,787 \text{ kJ/kg}$
- 9) Entalpija radne tvari na izlazu iz isparivača:  $h_1 = 1380,045 \text{ kJ/kg}$
- 10) Specifični učinak isparivača:  $q_0 = 1115,258 \text{ kJ/kg}$

Termodinamičke karakteristike sekundarnog medija vode koja se hladi uzete su za srednju temperaturu hlađenja vode kao prosječne vrijednosti prema [9]:

$\rho_{lv}$	- gustoća vode	= 999,9 kg/m <sup>3</sup>
$c_{lv}$	- specifični toplinski kapacitet vode	= 4,20 kJ/kgK
$\lambda_{lv}$	- toplinska provodnost vode	= 0,571 W/mK
$\eta_{lv}$	- dinamička viskoznost vode	= 1,497x10 <sup>-3</sup> Pas
$\nu_{lv}$	- kinematička viskoznost vode	= 1,497x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
$Pr_{lv}$	- Prandtlov broj	= 11,104

Termodinamičke karakteristike radne tvari amonijaka koji isparuje uzete su za temperaturu isparivanja kao vrijednosti za stanja vrele kapljevine i suhozasićene pare prema [3]:

$\rho_{vk}$	- gustoća vrele kapljevine	= 637,2 kg/m <sup>3</sup>
$c_{vk}$	- specifični toplinski kapacitet vrele kapljevine	= 4,605 kJ/kgK
$\lambda_{vk}$	- toplinska provodnost vrele kapljevine	= 0,5380 W/mK
$\eta_{vk}$	- dinamička viskoznost vrele kapljevine	= 1,880 x10 <sup>-4</sup> Pas
$\nu_{vk}$	- kinematička viskoznost vrele kapljevine	= 0,295 x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
$\rho_{szp}$	- gustoća suhozasićene pare	= 4,488 kg/m <sup>3</sup>
$c_{szp}$	- specifični toplinski kapacitet suhozasićene pare	= 2,520 kJ/kgK
$\lambda_{szp}$	- toplinska provodnost suhozasićene pare	= 0,0233 W/mK
$\eta_{szp}$	- dinamička viskoznost suhozasićene pare	= 9,523 x10 <sup>-6</sup> Pas
$\nu_{szp}$	- kinematička viskoznost suhozasićene pare	= 2,653 x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s

## 4.2. Konstrukcijske dimenzije isparivača

Odabrane su sljedeće dimenzije isparivača:

- 1) Visina isparivača:  $H_{isp} = 1,0 \text{ m}$
- 2) Duljina isparivača:  $L_{isp} = 1,231 \text{ m}$
- 3) Kut orebrenja isparivača:  $\beta = 60^\circ$
- 4) Faktor površine isparivača:  $\Phi = 1,22$
- 5) Dubina orebrenja (širina kanala) isparivača:  $b_{isp} = 0,001 \text{ m}$
- 6) Ekvivalentni promjer kanala isparivača:  $d_{h,isp} = 0,001639 \text{ m}$
- 7) Broj ploča isparivača:  $N_{isp} = 176$
- 8) Površina jednog kanala isparivača:  $A_{c,isp} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

Ekvivalentni promjer kanala isparivača određen je prema:

$$d_{h,isp} = 2 * \frac{b_{isp}}{\Phi} = 0,001639 \text{ m} \quad (29)$$

Površina jednog kanala isparivača određena je prema:

$$A_{c,isp} = H_{isp} * b_{isp} = 0,001 \text{ m}^2 \quad (30)$$

### 4.3. Prijelaz topline na strani vode

Maseni protok vode određen je prema:

$$q_{m,lv} = \frac{\Phi_0}{c_{lv} * \Delta\vartheta_{lv}} = 57,14 \text{ kg/s} \quad (31)$$

Broj kanala za strujanje vode određen je prema:

$$N_{lv} = \frac{N_{isp}}{2} = 88 \quad (32)$$

Brzina strujanja vode kroz kanal određena je prema:

$$w_{lv} = \frac{q_{m,lv}}{A_{c,isp} * N_{lv} * \rho_{lv}} = 0,6494 \text{ m/s} \quad (33)$$

Reynoldsova značajka strujanja vode određena je prema:

$$Re_{lv} = \frac{w_{lv} * d_{h,isp}}{\nu_{lv}} = 711,1 \quad (34)$$

Nusseltova značajka određena je prema:

$$Nu_l = 3,65 * \beta^{-0,455} * \Phi^{0,661} * Re_{lv}^{0,339} = 5,986 \quad (35)$$

$$m = 0,646 + 0,0011 * \beta = 0,712 \quad (36)$$

$$Nu_t = 12,6 * \beta^{-1,142} * \Phi^{1-m} * Re_{lv}^m = 13,341 \quad (37)$$

$$Nu_{lv} = (Nu_l^3 + Nu_t^3)^{1/3} * Pr_{lv}^{\frac{1}{3}} = 15,962 \quad (38)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode određen je prema:

$$\alpha_{lv} = \frac{Nu_{lv} * \lambda_{lv}}{d_{h,isp}} = 5559,6 \frac{W}{m^2 K} \quad (39)$$



#### 4.4. Prijelaz topline na strani radne tvari amonijaka R717

Kako bi se mogao odrediti koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari amonijaka R717, potrebno je provesti iterativan proračun s prvotnom pretpostavkom specifičnog toplinskog toka. Iz pretpostavljenog specifičnog toplinskog toka na kraju se dobiva ukupan koeficijent prolaza topline iz kojeg se provjerava pretpostavka i izvodi sljedeća iteracija. U proračunu se mijenjao broj ploča isparivača kako bismo dobili što bliže vrijednosti pretpostavljenog i dobivenog specifičnog toplinskog toka, uz uvjet da isparivač bude dimenzijama što bliži optimalnom, odnosno da ne bude predimenzioniran.

Pretpostavljeni specifični toplinski tok za početak proračuna:

$$q_{pret} = 4603 \frac{W}{m^2}$$

Srednja logaritamska razlika temperatura određena je prema:

$$\Delta\theta_m = \frac{(\vartheta_{isp} - \vartheta_{ul,lv}) - (\vartheta_{isp} - \vartheta_{izl,lv})}{\ln \frac{\vartheta_{isp} - \vartheta_{ul,lv}}{\vartheta_{isp} - \vartheta_{izl,lv}}} = 4,0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (40)$$

Broj kanala za strujanje radne tvari određen je prema:

$$N_{NH_3} = \frac{N_{isp}}{2} - 1 = 87 \quad (41)$$

Gustoća masenog protoka radne tvari određena je prema:

$$G_{NH_3} = \frac{q_{m,NH_3}}{A_{c,isp} * N_{NH_3}} = 12,01 \frac{kg}{m^2s} \quad (42)$$

Boilingova značajka određena je prema:

$$Bo_{NH_3} = \frac{q_{pret}}{G_{NH_3} * q_0} = 3,437 \times 10^{-4} \quad (43)$$

Dinamička viskoznost radne tvari u ovisnosti o sadržaju pare određuje se prema:

$$\eta_{NH_3} = \eta_{vk} + x * (\eta_{szp} - \eta_{vk}) \quad (44)$$

Koeficijent toplinske provodnosti radne tvari u ovisnosti o sadržaju pare određuje se prema:

$$\lambda_{NH_3} = \lambda_{vk} + x * (\lambda_{szp} - \lambda_{vk}) \quad (45)$$

Reynoldsova značajka strujanja radne tvari određuje se prema:

$$Re_{NH_3} = \frac{G_{NH_3} * d_{h,isp}}{\eta_{NH_3}} \quad (46)$$

Nusseltova značajka određuje se prema:

$$Nu_{NH_3} = 30 * Re_{NH_3}^{0,875} * Bo_{NH_3}^{0,714} \quad (47)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari određuje se prema:

$$\alpha_{NH_3} = \frac{Nu_{NH_3} * \lambda_{NH_3}}{d_{h,isp}} \quad (48)$$

U tablici 4. prikazani su rezultati proračuna koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari u ovisnosti o sadržaju pare.

**Tablica 4. Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari u ovisnosti o sadržaju pare**

$x[\text{kg/kg}]$	$\eta_{\text{NH}_3}[\text{Pas}]$	$\lambda_{\text{NH}_3}[\text{W/mK}]$	$Re_{\text{NH}_3}$	$Nu_{\text{NH}_3}$	$\alpha_{\text{NH}_3}[\text{W/m}^2\text{K}]$
0,1	$1,70 \times 10^{-4}$	0,4865	115,8	6,451	1914,3
0,2	$1,52 \times 10^{-4}$	0,4351	129,5	7,114	1888,2
0,3	$1,34 \times 10^{-4}$	0,3836	146,9	7,944	1858,8
0,4	$1,17 \times 10^{-4}$	0,3321	168,2	8,945	1812,1
0,5	$9,88 \times 10^{-5}$	0,2807	199,2	10,371	1775,9
0,6	$8,09 \times 10^{-5}$	0,2292	243,3	12,354	1727,2
0,7	$6,31 \times 10^{-5}$	0,1777	311,9	15,354	1664,3
0,8	$4,52 \times 10^{-5}$	0,1262	435,4	20,559	1582,7
0,9	$2,74 \times 10^{-5}$	0,0748	718,3	31,858	1453,6

Srednji koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari određen je prema:

$$\alpha_{\text{NH}_3, \text{sr}} = \frac{\sum \alpha_{\text{NH}_3}}{9} = 1741,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (49)$$

Koeficijent prolaza topline određen je prema:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{lv}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{NH}_3, \text{sr}}}} = 1150,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (50)$$

pri čemu je:

$\lambda_{\text{c}}$  - koeficijent toplinske provodnosti čelika = 52 W/mK

$\delta$  - debljina čelične ploče = 0,006 m

Stvarni specifični toplinski tok određen je prema:

$$q_{stv} = k * \Delta\vartheta_m = 4603,2 \text{ W} \quad (51)$$

Pretpostavljeni specifični toplinski tok je približno jednak izračunatom stvarnom specifičnom toplinskom toku, odnosno može se zaključiti da pretpostavka specifičnog toplinskog toka ima zadovoljavajuću vrijednost.

Potrebna površina izmjene topline određena je prema:

$$A_{potr} = \frac{\Phi_0}{q_{stv}} = 260,7 \text{ m}^2 \quad (52)$$

Stvarna površina izmjene topline određena je prema:

$$A_{stv} = \Phi * L_{isp} * H_{isp} * N_{isp} = 264,3 \text{ m}^2 \quad (53)$$

Predimenzioniranost isparivača topline određena je prema:

$$\Delta A = 100 * \left( \frac{A_{stv}}{A_{potr}} - 1 \right) < 2 \% \quad (54)$$

Stvarna površina veća je od potrebne površine izmjene topline za manje od 2%, što je zadovoljavajući postotak predimenzioniranosti izmjenjivača.

#### 4.5. Proračun pada tlaka u isparivaču

Proračun pada tlaka u isparivaču napravljen je za dvofazno strujanje na temelju izvora [11]. Ukupan pad tlaka pločastog isparivača bit će jednak zbroju pojedinih komponenti pada tlaka koje su sljedeće:

- 1) Statički pad tlaka
- 2) Pad tlaka zbog ubrzanja strujanja radnog medija
- 3) Pad tlaka uslijed trenja

Za određivanje statičkog pada tlaka koji nastaje zbog djelovanja gravitacije na strujanje radne tvari potrebno je odrediti vrijednost gustoće dvofaznog strujanja. Ona se određuje u ovisnosti o sadržaju pare radne tvari prema:

$$\rho_{ds} = \left( \frac{x}{\rho_{szp}} + \frac{1-x}{\rho_{vk}} \right)^{-1} \quad (55)$$

U tablici 5. prikazani su rezultati proračuna gustoće dvofaznog strujanja radne tvari u ovisnosti o sadržaju pare.

**Tablica 5. Vrijednosti gustoće dvofaznog strujanja u ovisnosti o sadržaju pare**

x[kg/kg]	$\rho_{ds}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0,1	42,20
0,2	21,83
0,3	14,72
0,4	11,10
0,5	8,91
0,6	7,45
0,7	6,39
0,8	5,60
0,9	4,98

Srednja vrijednost gustoće dvofaznog strujanja određena je prema:

$$\rho_{ds,sr} = \frac{\sum \rho_{ds}}{9} = 13,687 \frac{kg}{m^3} \quad (56)$$

Statički pad tlaka određen je prema:

$$\Delta p_{stat} = \rho_{ds,sr} * g * L_{isp} = 165,3 Pa \quad (57)$$

Pad tlaka zbog ubrzanja strujanja radnog medija, koje nastaje zbog povećanja sadržaja pare radne tvari strujanjem od ulaznog do izlaznog presjeka pločastog isparivača, određuje se prema:

$$\Delta p_{ubr} = G_{NH3}^2 * \Delta x * \left( \frac{1}{\rho_{szp}} - \frac{1}{\rho_{vk}} \right) \quad (58)$$

U tablici 6. prikazani su rezultati proračuna pada tlaka zbog ubrzanja radnog medija u ovisnosti o sadržaju pare.

**Tablica 6. Vrijednosti pada tlaka zbog ubrzanja radne tvari u ovisnosti o sadržaju pare**

x[kg/kg]	$\Delta p_{ubr}$ [Pa]
0,1	3,191
0,2	6,383
0,3	9,574
0,4	12,765
0,5	15,956
0,6	19,148
0,7	22,339
0,8	25,530
0,9	28,721
1,0	31,913

Srednja vrijednost pada tlaka zbog ubrzanja radne tvari određena je prema:

$$\Delta p_{ubr,z,sr} = \frac{\sum \Delta p_{ubr,z}}{10} = 17,6 \text{ Pa} \quad (59)$$

Za određivanje pada tlaka koji nastaje zbog djelovanja trenja potrebno je odrediti vrijednost Fanningovog faktora trenja. On se određuje pomoću Reynoldsovog broja strujanja samo parne faze radnog medija. Iz navedenog slijedi:

$$Re_{szp} = \frac{G_{NH3} * d_{h,isp}}{\eta_{szp}} = 2067 \quad (60)$$

$$f = 15,08 * Re_{szp}^{-0,467} = 0,4267 \quad (61)$$

Pad tlaka uslijed trenja određen je prema:

$$\Delta p_{tr} = \frac{f * 2 * L_{isp} * G_{NH3}^2}{d_{h,isp} * \rho_{ds,sr}} = 6754,8 \text{ Pa} \quad (62)$$

Ukupan pad tlaka dvofaznog strujanja u pločastom isparivaču određen je prema:

$$\Delta p_{uk} = \Delta p_{stat} + \Delta p_{ubr,z,sr} + \Delta p_{tr} = 6937,7 \text{ Pa} \quad (63)$$

#### 4.6. Proračun dimenzija cjevovoda

Proračun dimenzija cjevovoda proveden je za usisni, tlačni i kapljevinski vod radne tvari R717 te za cjevovod ulazne vode.

Brzine strujanja radne tvari i posrednog prijenosnika energije odabrane su prema izvoru [14].

Odabrane su sljedeće brzine strujanja u cjevovodima:

- 1) Usisni vod radne tvari R717  $w_{u,NH_3} = 15 \text{ m/s}$
- 2) Tlačni vod radne tvari R717  $w_{t,NH_3} = 20 \text{ m/s}$
- 3) Kapljevinski vod radne tvari R717  $w_{k,NH_3} = 0,8 \text{ m/s}$
- 4) Cjevovod ulazne vode  $w_{lv} = 1,5 \text{ m/s}$

Odgovarajuće gustoće radnih medija očitane su za karakteristične točke procesa:

- 1) Gustoća radne tvari R717 na usisu u kompresor  $\rho_{u,NH_3} = 4,488 \text{ kg/m}^3$
- 2) Gustoća radne tvari R717 na izlazu iz kompresora  $\rho_{t,NH_3} = 8,333 \text{ kg/m}^3$
- 3) Gustoća radne tvari R717 na izlazu iz kondenzatora  $\rho_{k,NH_3} = 595,0 \text{ kg/m}^3$
- 4) Srednja gustoća vode  $\rho_{lv} = 999,9 \text{ kg/m}^3$



#### 4.6.1. Proračun dimenzija cjevovoda usisnog voda radne tvari R717

Volumenski protok u usisnom vodu cjevovoda radne tvari R717 određen je prema:

$$q_{vu,NH_3} = \frac{q_{m,NH_3}}{\rho_{u,NH_3}} = 0,2327 \frac{m^3}{s} \quad (64)$$

Poprečni presjek cijevi usisnog voda određen je prema:

$$A_u = \frac{q_{vu,NH_3}}{w_{u,NH_3}} = 0,01551 m^2 \quad (65)$$

Promjer cijevi usisnog voda određen je prema:

$$d_u = \sqrt{4 * \frac{A_u}{\Pi}} = 0,1405 m \quad (66)$$

Odabrana standardna dimenzija cijevi prema [1]:

- čelična bešavna cijev DN150 -  $\phi 159 \times 4,5$

Stvarna brzina strujanja radne tvari u usisnom vodu određena je prema:

$$w_{u,NH_3} = 4 * \frac{q_{vu,NH_3}}{d_u^2 * \Pi} = 13,2 \frac{m}{s} \quad (67)$$

#### 4.6.2. Proračun dimenzija cjevovoda tlačnog voda radne tvari R717

Volumenski protok u tlačnom vodu cjevovoda radne tvari R717 određen je prema:

$$q_{vt,NH_3} = \frac{q_{m,NH_3}}{\rho_{t,NH_3}} = 0,1253 \frac{m^3}{s} \quad (68)$$

Poprečni presjek cijevi tlačnog voda određen je prema:

$$A_t = \frac{q_{vt,NH_3}}{w_{t,NH_3}} = 0,006265 m^2 \quad (69)$$

Promjer cijevi tlačnog voda određen je prema:

$$d_t = \sqrt{4 * \frac{A_t}{\Pi}} = 0,08931 m \quad (70)$$

Odabrana standardna dimenzija cijevi prema [1]:

- čelična bešavna cijev DN100 -  $\phi 108 \times 3,6$

Stvarna brzina strujanja radne tvari u tlačnom vodu određena je prema:

$$w_{t,NH_3} = 4 * \frac{q_{vt,NH_3}}{d_t^2 * \Pi} = 15,70 \frac{m}{s} \quad (71)$$

#### 4.6.3. Proračun dimenzija cjevovoda kapljevinskog voda radne tvari R717

Volumenski protok u kapljevinskom vodu cjevovoda radne tvari R717 određen je prema:

$$q_{vk,NH_3} = \frac{q_{m,NH_3}}{\rho_{k,NH_3}} = 1,755 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} \quad (72)$$

Poprečni presjek cijevi kapljevinskog voda određen je prema:

$$A_k = \frac{q_{vk,NH_3}}{w_{k,NH_3}} = 2,194 \times 10^{-3} m^2 \quad (73)$$

Promjer cijevi kapljevinskog voda određen je prema:

$$d_k = \sqrt{4 * \frac{A_k}{\Pi}} = 0,05285 m \quad (74)$$

Odabrana standardna dimenzija cijevi prema [1]:

- čelična bešavna cijev DN50 -  $\phi 60,3 \times 2,9$

Stvarna brzina strujanja radne tvari u kapljevinskom vodu određena je prema:

$$w_{k,NH_3} = 4 * \frac{q_{vk,NH_3}}{d_k^2 * \Pi} = 0,7523 \frac{m}{s} \quad (75)$$

#### 4.6.4. Proračun dimenzija cjevovoda sekundarnog medija vode

Volumenski protok vode određen je prema:

$$q_{v,lv} = \frac{q_{m,lv}}{\rho_{lv}} = 0,05715 \frac{m^3}{s} \quad (76)$$

Poprečni presjek cijevi određen je prema:

$$A_{lv} = \frac{q_{v,lv}}{w_{lv}} = 0,0381 m^2 \quad (77)$$

Promjer cijevi određen je prema:

$$d_{lv} = \sqrt{4 * \frac{A_{lv}}{\Pi}} = 0,2203 m \quad (78)$$

Odabrana standardna dimenzija cijevi prema [1]:

- čelična bešavna cijev DN250 -  $\phi 267 \times 6,3$

Stvarna brzina strujanja vode određena je prema:

$$w_{lv} = 4 * \frac{q_{v,lv}}{d_{lv}^2 * \Pi} = 1,124 \frac{m}{s} \quad (79)$$

## 5. PRORAČUN PUNJENJA AMONIJAKA

U ovom poglavlju prikazani su provedeni proračuni punjenja amonijaka za postojeće i planirano rekonstruirano postrojenje.

### 5.1. Proračun ukupne mase radne tvari amonijaka R717 postojećeg postrojenja

Kako bi se odredila ukupna masa radne tvari prvo je potrebno odrediti vrijednost gustoće dvofaznog strujanja. U Lindeovom potopljenom isparivaču ulazna mokra para zauzima 2/3 ukupne visine vertikalnih cijevi, dok ostatak od 1/3 ukupne visine zauzima suhozasićena para.

Srednja gustoća radne tvari u isparivaču određena je prema:

$$\rho_{s,1} = \frac{1}{3} * \rho_{szp} + \frac{2}{3} * \rho_{mp} = 373,2 \frac{kg}{m^3} \quad (80)$$

pri čemu se vrijednosti gustoće suhozasićene i mokre pare uzimaju za temperaturu isparivanja radne tvari amonijaka R717 vrijednosti  $-8^{\circ}C$ .

Ukupan volumen cijevi isparivača kroz koje struji radna tvar određen je prema:

$$V_{c,1} = \frac{D_c^2 * \Pi}{4} * L_c = 20,58 m^3 \quad (81)$$

pri čemu je:

$$D_c \quad - \text{unutarnji promjer cijevi postojećeg isparivača} \quad = 39,3 \text{ mm}$$

$$L_c \quad - \text{ukupna duljina cijevi postojećeg isparivača} \quad = 16965 \text{ m}$$

Masa radne tvari u cijevima isparivača određena je prema:

$$m_{c,1} = \rho_{s,1} * V_{c,1} = 7681 kg \quad (82)$$

Masa radne tvari u spremniku postrojenja jednaka je:

$$m_s = 2000 - 3000 kg$$

Srednja gustoća radne tvari u evaporativnom kondenzatoru aproksimira se prema:

$$\rho_{s,k} = \frac{1}{2} * \rho_{szp} + \frac{1}{2} * \rho_{vk} = 298,9 \frac{kg}{m^3} \quad (83)$$

pri čemu se vrijednosti gustoće suhozasićene pare i vrele kapljevine uzimaju za temperaturu kondenzacije radne tvari amonijaka R717 vrijednosti 35°C.

Ukupan volumen cijevi evaporativnog kondenzatora kroz koje struji radna tvar određen je prema:

$$V_k = \frac{D_k^2 * \Pi}{4} * L_k = 1,89 m^3 \quad (84)$$

pri čemu je:

$D_k$  - unutarnji promjer cijevi evaporativnog kondenzatora = 32,8 mm

$L_k$  - ukupna duljina cijevi evaporativnog kondenzatora = 2236 m

Masa radne tvari u cijevima evaporativnog kondenzatora određena je prema:

$$m_k = \rho_{s,k} * V_k = 565 kg \quad (85)$$

Ukupna masa radne tvari u sustavu jednaka je zbroju mase radne tvari u cijevima isparivača, mase radne tvari u spremniku i masi radne tvari u evaporativnim kondenzatorima. Prema navedenom slijedi:

$$m_{uk,1} = m_{c,1} + m_s + m_k \cong 11000 kg \quad (86)$$

## 5.2. Proračun ukupne mase radne tvari amonijaka R717 novog postrojenja

Srednja gustoća radne tvari u isparivaču novog postrojenja određena je jednačom (56).

$$\rho_{ds,sr} = \frac{\sum \rho_{ds}}{9} = 13,687 \frac{kg}{m^3} \quad (56)$$

Preporučena količina radne tvari u pločastim izmjenjivačima topline prema [15] iznosi:

$$N_{prep} = \frac{2 \text{ dm}^3 \text{ radne tvari}}{m^2 \text{ površine izmjene topline}}$$

Ukupan volumen radne tvari u isparivaču određen je prema:

$$V_{c,2} = N_{prep} * A_{stv} = 0,5286 \text{ m}^3 \quad (87)$$

Masa radne tvari pločastog isparivača određena je prema:

$$m_{c,2} = \rho_{s,2} * V_{c,2} = 7,2 \text{ kg} \quad (88)$$

Masa radne tvari u spremniku postrojenja ostaje jednaka:

$$m_s = 2000 - 3000 \text{ kg}$$

Masa radne tvari u cijevima evaporativnog kondenzatora ostaje jednaka:

$$m_k = 565 \text{ kg}$$

Ukupna masa radne tvari u novom sustavu određena je prema:

$$m_{uk,2} = m_{c,2} + m_s + m_k \cong 3000 \text{ kg} \quad (89)$$

### 5.3. Usporedba specifične potrošnje radne tvari postojećeg i novog postrojenja

Iz provedene analize potrošnje rashladne energije u poglavlju 3.1. i 3.2. te iz izračunatih aproksimiranih ukupnih masa radne tvari amonijaka R717 u poglavlju 5.1. i 5.2. moguće je usporediti specifične potrošnje radne tvari postojećeg i novog postrojenja.

Specifična potrošnja radne tvari postojećeg postrojenja određena je prema:

$$g_1 = \frac{m_{uk,1}}{\Phi_{lv,1}} = 3,143 \frac{kg}{kW} \quad (90)$$

Specifična potrošnja radne tvari novog postrojenja određena je prema:

$$g_2 = \frac{m_{uk,2}}{\Phi_{lv,2}} = 0,8571 \frac{kg}{kW} \quad (91)$$

Smanjenje specifične potrošnje radne tvari određeno je prema:

$$\Delta g = \left( \frac{g_1}{g_2} \right) * 100\% = 366,7 \% \quad (92)$$



## 6. ZAKLJUČAK

Tema ovog rada bila je rekonstrukcija postojećeg amonijačnog postrojenja za hlađenje vode koji se koristi za potrebe hlađenja u industriji mlijeka. Idejno rješenje rekonstrukcije sustava je zamjena postojećeg potopljenog isparivača s velikim punjenjem radne tvari s pločastim isparivačima na kojima bi se voda prethlađivala i sa silosom ledene vode s akumulacijom leda na kojem bi se voda dodatno hladila do zahtijevane temperature. Ciljevi novoprojektiranog sustava su bili smanjiti količinu radne tvari amonijaka R717, te po mogućnosti povećati faktor iskoristivosti postrojenja.

U ovom radu napravljena je usporedba potrošnje rashladne energije, odnosno termodinamičkih ciklusa, te usporedba punjenja radne tvari postojećeg i novoplaniranog postrojenja.

Na temelju provedene usporedbe potrošnje rashladne energije, može se zaključiti da će se faktor hlađenja postrojenja povećati s vrijednosti 4,187 na vrijednost 5,024 zbog podizanja temperature isparivanja u procesu prethlađivanja vode na pločastim isparivačima, odnosno zbog smanjenja potrebne uložene električne energije za pogon kompresora i zbog korištenja akumulirane topline silosa ledene vode.

Okvirnim proračunom uštede električne energije utvrđeno je da će ušteda u troškovima za pogon kompresora iznositi otprilike 25,3 %.

Iz proračuna punjenja radne tvari može se zaključiti da će se specifična potrošnja radne tvari smanjiti s vrijednosti 3,143 kg/kW na vrijednost 0,8571 kg/kW, odnosno bit će potrebno 366,7% manje radne tvari u novoplaniranom postrojenju nego što je to slučaj kod postojećeg postrojenja.

Također, u ovom radu napravljeni su i termodinamički proračun planiranih pločastih isparivača za prethlađivanje vode na temelju kojeg su određene konstrukcijske dimenzije isparivača, proračun pada tlaka u isparivaču te proračun dimenzija cjevovoda.

Ovaj diplomski rad izveden je u suradnji s mljekarskom industrijom Dukat d.d. gdje je rekonstrukcija postojećeg sustava na način opisan u ovom radu planirana za 2019. godinu.

## LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1997.
- [2] <https://lacpatrick.com/milk-cooling-and-storage/> na datum: 11.05.2018.
- [3] Kancir, Švaić, Uhlik: Monografija „Radne tvari u tehnici hlađenja“, Poglavlje amonijak R717, Zagreb, 1981.
- [4] Bryan A. Flynn: Plate Heat Exchangers - Preventative Maintenance and Service Guidelines, Newcastlewest CO. Limerick Ireland
- [5] [https://www.intel-trade.hr/files/HR\\_2012\\_Cristopia.pdf](https://www.intel-trade.hr/files/HR_2012_Cristopia.pdf) na datum: 14.05.2018.
- [6] <https://www.frigoterm.hr/> na datum: 14.05.2018.
- [7] Petar Mikulaj: Rashladni sustavi u mljekarskoj industriji, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [8] Marko Topić: Akumulacija rashladnog učinka bankom leda, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [9] Fakultet strojarstva i brodogradnje: Toplinske Tablice, Zagreb, 2010.
- [10] Filip Hlapčić: Rashladnik kapljevine za hlađenje u procesnoj industriji, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [11] Valentin Solotych, Donghyeon Lee, Jungho Kim, Raffaele L.Amalfi, John R.Thome: Boiling heat transfer and two-phase pressure drops within compact plate heat exchangers: Experiments and flow visualizations
- [12] Radia Eldeeb, Vikrant Aute, Reinhard Radermacher: A survey of correlations for heat transfer and pressure drop for evaporation and condensation in plate heat exchangers
- [13] Volker Grabenstein, Anja-Elsa Polzin, Stephan Kabelac: Experimental investigation of the flow pattern, pressure drop and void fraction of two-phase flow in the corrugated gap of a plate heat exchanger
- [14] Vladimir Soldo, Marino Grozdek: Hlađenje i dizalice topline – podloge za predavanja, FSB, Zagreb 2015.
- [15] G.F. Hundy, A.R. Trott, T.C. Welch: Refrigeration and Air-Conditioning
- [16] Svetozar Stanišić: Optimizacija toplinskih parametara i konstruktivnih svojstava postrojenja za sterilizaciju mlijeka
- [17] Opći uvjeti za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom (NN br. 85/2015)

## **PRILOZI**

- I. CD-R disk
- II. Tehnička dokumentacija