

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Tomislav Horvat**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Rashladna komora za hlađenje i zamrzavanje robe**

Mentor:

Doc. dr. sc. Vladimir Soldo

Student:

Tomislav Horvat

Zagreb, 2012.

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

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Zvonimiru Soldi na strpljenju i pomoći pri izradi rada.

Tomislav Horvat

zadatok

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	6
POPIS OZNAKA .....	7
SAŽETAK .....	8
1.UVOD.....	9
2.TEHNIČKI OPIS ISPITNOG SUSTAVA .....	10
2.1.Rashladna komora.....	10
2.2.Radna tvar .....	11
2.3.Opis rashladnog procesa .....	12
2.4.Komponente rashladnog sustava.....	14
2.5.Prikupljanje podataka.....	19
3.ANALIZA REZULTATA MJERENJA.....	21
3.1.Temperaturu hlađenja i isparavanja.....	21
3.2.Kompresijski omjer.....	23
3.3.Protok rashladne vode.....	24
3.4.Učinek kondenzatora.....	25
3.5.Protok radne tvari.....	26
3.6.Učinek isparivača.....	27
3.7.Snaga kompresora.....	28
4.PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG SUSTAVA .....	29
4.1.Proračun isparivača.....	29
4.2.Proračun cijevovoda.....	35
5.ZAKLJUČAK.....	37
PRILOZI.....	38
LITERATURA.....	39

**POPIS SLIKA**

Slika 1. ....Rashladna komora.....	10
Slika 2. ....T,s dijagram klasičnog rashladnog procesa.....	12
Slika 3. ....Shematski prikaz rashladnog uređaja.....	13
Slika 4. ....Poluhermetički stapni kompresor .....	14
Slika 5. ....Vodom hlađen kondenzator.....	15
Slika 6. ....Isparivač.....	16
Slika 7. ....Akvizijski sustav Agilent .....	19
Slika 8. ....Prikaz mjerne linije.....	20
Slika 9. ....Dijagram promjene temperature hlađenja i isparavanja .....	21
Slika 10. ....Promjena kompresijskog omjera u vremenu .....	23
Slika 11. ....Protok rashladne vode u vremenu.....	24
Slika 12. ....Učinak kondenzatora kroz vrijeme.....	25
Slika 13. ....Protok radne tvari kroz vrijeme .....	26
Slika 14. ....Učinak isparivača kroz vrijeme .....	27
Slika 15. ....Snaga kompresora kroz vrijeme.....	28
Slika 16. ....Isparivač.....	29
Slika 17. ....Dimenzije isparivača.....	34

**POPIS OZNAKA**

$c_p$	$\text{kJ/kgK}$	specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku
$h$	$\text{kJ/kg}$	specifična entalpija
$P$	$W$	snaga
$p$	$\text{bar}$	tlak
$q_m$	$\text{kg/s}$	maseni protok
$q_v$	$\text{m}^3/\text{s}$	volumni protok
$T$	$K$	apsolutna temperatura
$s$	$\text{kJ/kgK}$	specifična entropija
$x$	$\text{kg/kg}$	sadržaj pare/vlage
$\eta$	$Pa\cdot s$	dinamička viskoznost
$\lambda$	$W/mK$	koeficijent toplinske vodljivosti
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	gustoća
$\Phi_0$	$W$	učinak isparivača
$\Phi_k$	$W$	učinak kondenzatora
$\vartheta$	$^{\circ}C$	temperatura
$A$	$\text{m}^2$	površina
$L$	$m$	duljina
$H$	$m$	visina
$k$	$W/m^2K$	koeficijent prolaza topline
$t$	$s$	vrijeme
$d$	$m$	promjer
$\alpha$	$W/m^2K$	koeficijent prijelaza topline
$w$	$\text{m/s}$	brzina
Re	-	Reynoldsova značajka
Nu	-	Nusseltova značajka

## **SAŽETAK**

Zamrzavanje i čuvanje hrane provodi se u rashladnim komorama na različitim temperaturama, ovisno o vrsti robe i trajanju čuvanja. Temperature hlađenja u komorama često idu i ispod  $-25^{\circ}\text{C}$ .

U ovom radu potrebno je napraviti mjerenja pri upuštanju takve komore u rad, do temperature hlađenja od  $-25^{\circ}\text{C}$ .

U uvodu su opisane komore i čuvanje hrane u komorama te je u nastavku izrađen toplinski proračun isparivača te su dani crteži rashladnog sustava, shema spajanja i regulacije kao i analiza rezultata mjerenja.



## 1. UVOD

Namirnice koje kupujemo u trgovinama ili na tržnici najčešće su se u distributivnom lancu više puta nalazile u rashladnim komorama – bilo da se radilo o zamrzavanju, čuvanju, transportu ili izlaganju u hlađenom izlogu trgovine.

Čuvanje hrane na niskim temperaturama je ljudima poznato odavno ali je tek sredinom 18. stoljeća objašnjeno usporavanje kemijskih procesa i utjecaj bakterija na kvarenje hrane.

Danas je prehrambena industrija nezamisliva bez tehnologije hlađenja: od proizvodnje, čuvanja, prerade i na kraju izlaganja u hlađenim vitrinama trgovina. Različite vrste hrane (meso, povrće) zahtijevaju i različite načine čuvanja; tako će se npr. voće čuvati na temperaturama malo iznad temperature ledišta dok će se meso u relativno kratkom vremenu duboko smrznati te time omogućiti čuvanje hrane na duže vremenske periode.

Uloga rashladne komore je da na najbolji način izolira robu koju zamrzavamo ili čuvamo od utjecaja okoline. Stoga, komore primarno moraju biti dobro toplinski izolirane. Kao izolacija zidova i stropa (krova) često se koriste predfabricirani paneli izvana obloženi limom a ispunjeni poliuretanskom pjenu.

Rashladni sustav mora svojim rashladnim učinkom savladati hlađenje robe ali i ostale toplinske dobitke: toplinu dobivenu rasvjetom; toplinu od ljudi; transmisivske gubitke kroz strop, pod i zidove komore na koje otpada i do 50% rashladnog kapaciteta.

Kod konstrukcije rashladne komore mora se uzeti u obzir i difuzija vodene pare prema hlađenom prostoru komore te se zbog toga u izolaciju postavlja i parna brana.

Također, prilikom izgradnje komore, u pod se obično ugrađuju električni grijači da se spriječi smrzavanje vlage iz tla u temeljima što bi ozbiljno ugrozilo konstrukciju.

U komore se ugrađuju brzozatvarajuća klizna vrata kako bi se smanjili toplinski gubici.

Isparivači se obično ugrađuju konzolno na zid pri stropu da se ne oduzima korisna površina poda za smještaj paleta s hlađenom robom.

## 2. TEHNIČKI OPIS ISPITNOG SUSTAVA

Komora i rashladni sustav na kojemu su provedena mjerenja nalazi se u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

### 2.1. Rashladna komora

Rashladna komora je dimenzija 3 x 4 x 2,5 m, izolirana je panelima punjenima poliuretanskom pjenom. U komori je na visinu od 2m postavljen isparivač.



Slika 1. Rashladna komora

## 2.2. Radna tvar

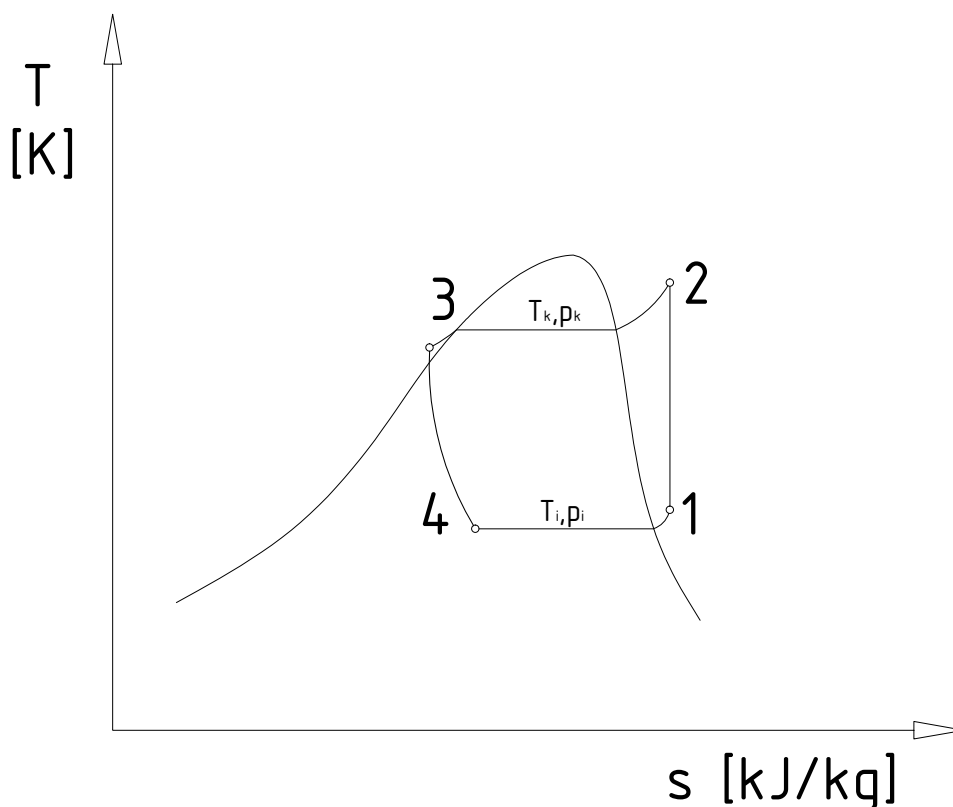
Radna tvar u rashladnom procesu je R404A. R404A je zeotropna smjesa. Karakteristika zeotropnih smjesa je da pri promjeni agregatnog stanja mijenjaju i temperaturu. Ta promjena temperature se naziva i klizanje temperature a u slučaju R404A iznosi oko  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

R404A je smjesa triju hidrofluorkarbonata – R125, R134A i R143A u masenom omjeru 44:4:52.

R404A je ekološki prihvatljiva zamjenska radna tvar za R502. Prednosti su duži vijek trajanja, manji troškovi u odnosu na R502, lako servisiranje te sigurna i laka upotreba.

Eventualne štetne posljedice se mogu pojaviti kod udisanja visokih koncentracija para i može uzrokovati nesvjesticu, nepravilnosti u radu srca ili smrt. Kontakt s kapljevnom uzrokuje ozeblinae.

### 2.3. Opis rashladnog procesa



Slika 2. T,s dijagram klasičnog rashladnog procesa

Rashladni proces ispitnog sustava je klasični ljevokretni parni proces.

Kompresor usisava pregrijane pare radne tvari pri tlaku isparavanja (točka 1, slika 2, T,s dijagram) te ih izentropski komprimira na tlak kondenzacije (točka 2, slika 2).

U kondenzatoru se radna tvar koja je uslijed kompresije još više pregrijana prvo hladi na temperaturu kondenzacije te potpuno kondenzira i još se pothladi za par stupnjeva (točka 3, slika 2). Time predaje toplinu okolini.

Nakon toga se pothlađeni kondenzat prigušuje prigušnim ventilom na tlak isparavanja (točka 4, slika 2) te u isparivaču potpuno isparava i pregrije se za par stupnjeva čime osiguravamo suhi usis na kompresoru. Potpunim isparavanjem u isparivaču se ostvaruje rashladni učin.

Kompresor ponovno usisava pregrijane pare radne tvari te se ciklus ponavlja.

**Slika 3. Shematski prikaz rashladnog uređaja**

## 2.4. Komponente rashladnog sustava

### 2.4.1. Kompresor

Kompresor komprimira radnu tvar na tlak kondenzacije koji je u mjeranju bio održavan na 14,3bar čemu po krivulji napetosti odgovara temperatura kompresije od 30°C.

Izmjerena temperatura radne tvari na izlazu iz kompresora je bila oko 65°C.

U mjerenom rashladnom sustavu je kompresor marke Bitzer, model LH64/ 2U-3.2Y, trofazni, poluhermetički, jednostupanjski, snage  $P_{EM} = 2,2kW$ .

Kompresor je podmazivan uljem Ester BSE 32. Ulje u sustavu cirkulira zajedno s radnom tvari te se sakuplja u separatoru ulja i vraća nazad u karter kompresora.

Na kompresor je spojen i diferencijalni presostat ulja koji prati razliku tlaka ulja te isključuje sustav ako razlika tlaka ulja padne ispod određene granice. Na taj je način izvedena zaštita od zaribavanja kompresora.



Slika 4. Poluhermetički stepni kompresor

### 2.4.2. Kondenzator

Kondenzator je dio rashladnog sustava koji predaje toplinu toplinskom ponoru (okolišnji zrak ili voda). Po snazi, kondenzator je najjača komponenta rashladnog sustava a snaga kondenzatora je jednaka zbroju rashladnog učina i snage kompresora.

$$\Phi_k = \Phi_0 + P_k$$

U mjernoj liniji je kondenzacijska jedinica izvedena na način da kondenzator može biti hlađen zrakom ili vodom. Mjerenja su provedena za vodom hlađen kondenzator.

U kondenzatoru se pare radne tvari hlade na temperaturu kondenzacije, zatim kondenziraju te pothlađuju a sve pri konstantnom tlaku kondenzacije  $p_k = 14,3 \text{ bar}$ . Kondenzator je izveden kao koaksijalni, protustrujni, cijev u cijevi izmjenjivač. Kroz unutarnju cijev promjera 19,7mm struji rashladna voda a oko unutarnje cijevi u vanjskoj cijevi promjera 35mm kondenzira radna tvar.



Slika 5. Vodom hlađen kondenzator

### 2.4.3. Isparivač

Isparivač je smješten u rashladnoj komori, na zidu pri stropu. Proizvođač je Küba Kältetechnik, tip SGLE 91 rashladnog učina  $\Phi_0 = 4,5kW$ .



Slika 6. Isparivač

U isparivaču se nalazi snop od 6 redova bakrenih cijevi s orebrenjima na strani strujanja zraka.

Orebrenje se izvodi na strani zraka da bi se povećala površina izmjene topline i na taj način kompenzirao nizak koeficijent prijelaza topline na strani zraka. Razmak između orebrenja (aluminjske ploče) je u ovom slučaju veći, 8mm zbog eventualnih naslaga leda koji se stvori na isparivaču kada vlaga iz robe kondenzira i smrzne na pregradama odnosno cijevima isparivača i uslijed temperatura ispod  $0^{\circ}C$ . Također, ispod isparivača se postavlja kadica za sakupljanje kondenzata koji se cijevima odvodi iz komore. Često su te cijevi i grijane da se kondenzat ne smrzne uslijed niskih temperatura u komorama.

Za osiguranje pregrijanja radne tvari u isparivaču koristi se termoekspanzijski ventil – preko termoosjetnika, prislonjenog na cijev na izlazu iz isparivača dobiva povratnu informaciju da li je sva radna tvar isparila i pregrijala se te na temelju toga dozira količinu radne tvari u isparivaču. To je važno jer se mora osigurati da kompresor u svom usisnom vodu usiše pregrijanu paru a ne kapljevinu da se izbjegne hidraulički udar i havarija kompresora.

Za ravnomjernu distribuciju radne tvari po cijevima isparivač koristi se razdjeljna ruža.



Za strujanje zraka preko isparivača i distribuciju u komori zadužen je ventilator. Ventilator vuče zrak preko isparivača da osigura bolju pokrivenost izmjenjivačke površine. Brzine strujanja zraka na izlazu iz isparivača ovise o namjeni komore (skladištenje, brzo zamrzavanje) a mogu biti i veće od 10m/s.

#### 2.4.4. *Regulacijska i sigurnosna oprema*

Osnovna regulacija je temperaturna. Kada se u komori postigne zadana temperatura hlađenja, termostat javlja centralnoj regulacijskoj jedinici i ona isključuje kompresor. Kada termostat osjeti porast temperature u komori, ponovno pokreće kompresor. Na taj način se temperatura održava u zadanim granicama.

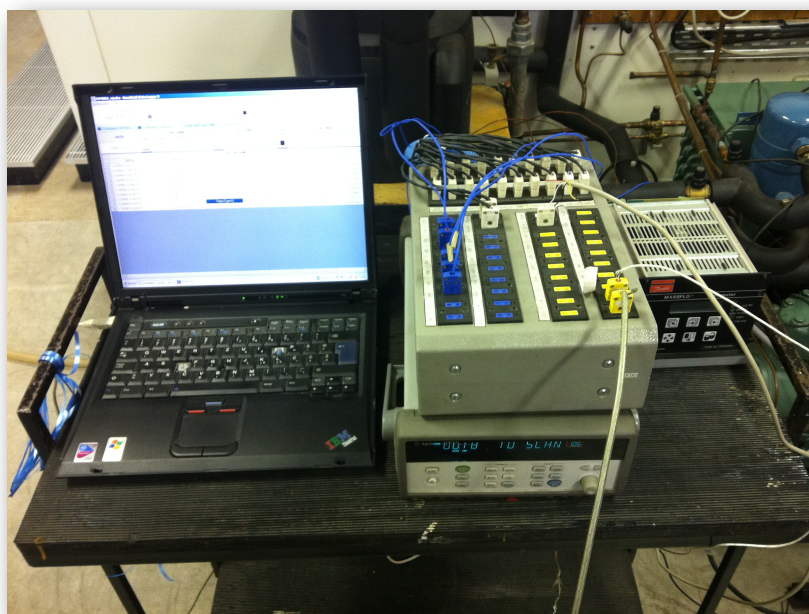
Rashladni sustav je osim regulacijom temperature, opremljen i presostatima koji održavaju odnosno kontroliraju tlakove ili razlike tlakova u sustavu a to su:

- Presostat niskog tlaka – održava tlak isparavanja  $p_i$  u zadanim granicama. Može poslužiti i kao regulacijski element koji regulira tlak isparavanja (kao što termostat regulira temperaturu isparavanja odn. hlađenja)
- Presostat visokog tlaka – štiti od prekoračenja dozvoljenog tlaka kondenzacije. U slučaju da na primjer pregori ventilator zračno hlađenog ili pumpa vodeno hlađenog kondenzatora, porast će tlak kondenzacije i presostat visokog tlaka će preventivno prekinuti rad sustava. Za ponovno pokretanje sustava, stručno osoblje održavanja mora provjeriti ispravnost sustava i pustiti sustav u rad.
- Diferencijalni presostat ulja – mjeri najmanju dozvoljenu razliku tlaka na dva voda te ako padne vrijednost zadane razlike tlaka, prekinut će strujni krug. U ovom slučaju se koristi kao zaštita kompresora od gubitka tlaka u sustavu podmazivanja.

#### 2.4.5. *Ostala oprema*

- Spremnik ukapljene radne tvari – služi kao prihvat radne tvari iz kondenzatora te kao akumulacija ukapljene radne tvari za potrebe isparivača a može služiti i kao pothlađivač radne tvari. Spremnik je dio kondenzacijske jedinice Bitzer LH64/2U-3,2Y
- Odvajač ulja – kompresor u tlačni vod s radnom tvari izbacuje i ulje za podmazivanje koje slobodno struji sustavom. To ulje se mora vratiti nazad u kompresor. Odvajač ulja u sustavu je Danfoss QUB4.
- Filter radne tvari
- Ogledno stakalce
- Manometri ulja, visokog i niskog tlaka
- Regulator kapaciteta Danfoss KVC12

## 2.5. Prikupljanje podataka



**Slika 7. Akvizicijski sustav Agilent**

Prikupljanje podataka s ispitnog sustava izvedeno je preko akvizicijskog sustava Agilent – pretvornik signala na koji su spojeni termoparovi (termosjetnici) i modul za mjerenje protoka radne tvari. Mjereni su slijedeći parametri:

- $\vartheta_{h1}$  – temperatura hlađenja (u rashladnoj komori)
- $\vartheta_{amb}$  – temperatura okoline
- $\vartheta_{preg}$  – temperatura pregrijanja radne tvari na izlazu iz isparivača
- $\vartheta_{komp}$  – temperatura nakon kompresije
- $\vartheta_{poth1}$  – temperatura pothlađenja radne tvari na izlazu iz kondenzatora
- $\vartheta_{w1}$  – temperatura polaza rashladne vode
- $\vartheta_{w2}$  – temperatura povrata rashladne vode
- $q_{mRT}$  – maseni protok radne tvari

Dotatno, volumetrijski je mjeren protok rashladne vode u vremenu uz pomoć vage – izmjerena je masa vode u jedinici vremena te je tako dobiven protok u 7 točaka a ostali podaci su ekstrapolirani kao što je prikazano u dijagramu.

Tlakovi isparavanja su također očitavani s analognog manometra niskog tlaka te su podaci ekstrapolirani a iz podataka tlakova su dobiveni podaci temperatura isparavanja.

Mjerenja su obavljena u periodu od 40 minuta u razmacima od 30 sekundi. Sveukupno je učinjeno 81 mjerenje.

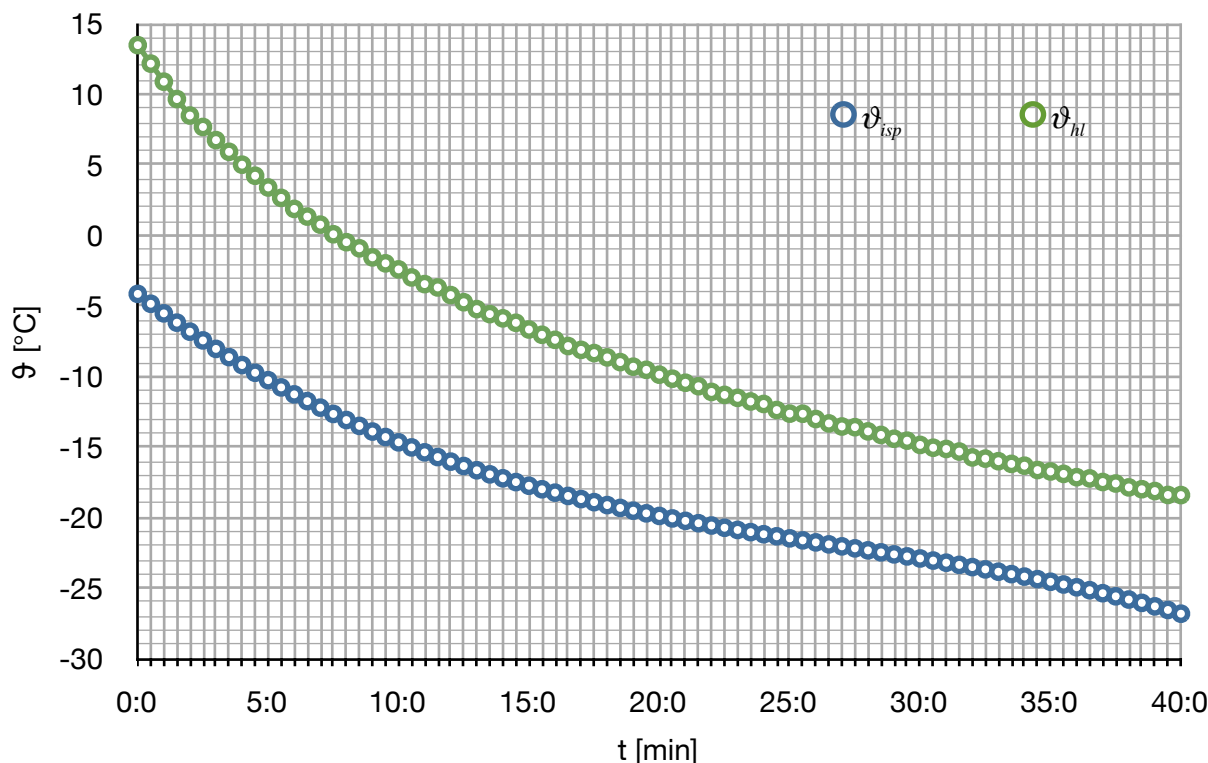


Slika 8. Prikaz mjerne linije

### 3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Akvizijski sustav Agilent je mjerene podatke isporučio u .csv formatu, pogodnom za obradu u tabličnom kalkulatoru. Podaci su obrađeni tablično a zanimljivi predstavljeni pomoću dijagrama.

#### 3.1. Temperatura hlađenja i isparavanja



Slika 9. Dijagram promjene temperature hlađenja i isparavanja

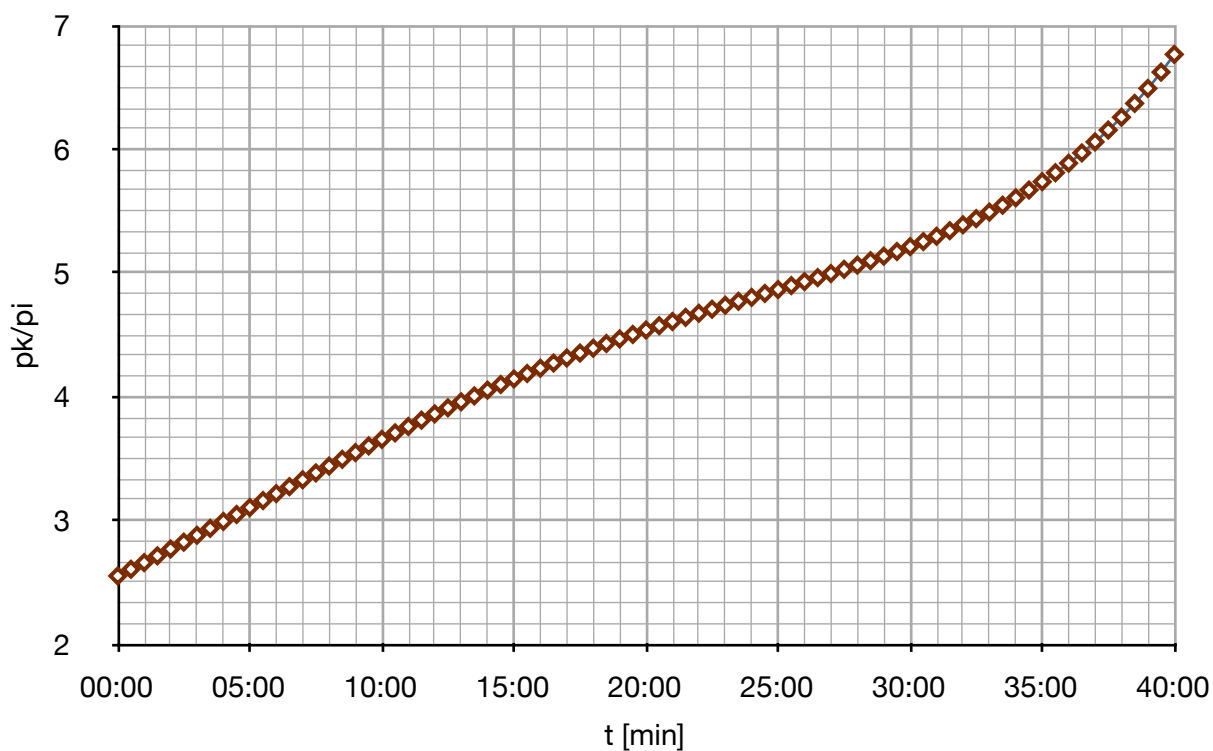
Temperatura isparavanja nije bila direktno mjerena već je posredno dobivena iz tlaka isparavanja. Kako po krivulji napetosti svakom tlaku promjene agregatnog stanja, u ovom slučaju isparavanja, odgovara jedna temperatura, tako su i dobivene temperature isparavanja.

Podaci mjerenja tlakova isparavanja su ekstrapolirani po polinomu 3. stupnja i za te podatke su dobivene temperature isparavanja. Očekivano, radom rashladnog uređaja temperatura isparavanja pada i od početnih  $-4^{\circ}\text{C}$  spustila se na  $-27^{\circ}\text{C}$  i na slici 9 je prikazana u ovisnosti o vremenu plavom bojom.

Temperatura hlađenja je temperatura u rashladnoj komori. Dobivena je preko termoosjetnika smještenog u komori i na slici 9 je prikazana zelenom bojom.

Temperatura hlađenja je vezana za temperaturu isparivanja te i ona pada od početnih 13,5°C na zadnje izmjerenu temperaturu od -18,4°C. Razlika između temperature isparavanja i hlađenja  $\Delta\vartheta$  iznosi prosječnih 8°C i to je u biti temperaturna razlika zbog koje na isparivaču dolazi do izmjene topline.

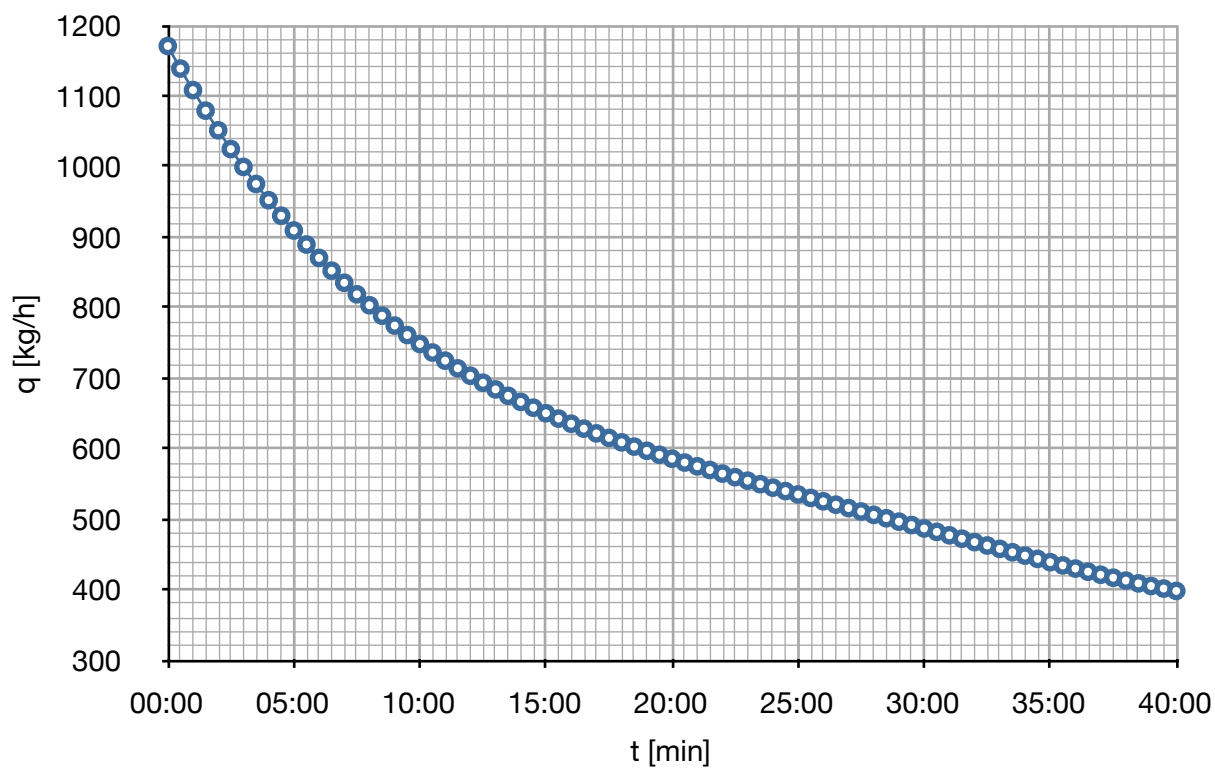
### 3.2. Kompresijski omjer



Slika 10. Promjena kompresijskog omjera u vremenu

Kako tlak isparavanja pada a tlak kondenzacije držimo konstantnim, kompresijski omjer  $\frac{p_k}{p_i}$  raste od 2,5 do 7. Granica kompresijskog omjera u praksi je 10–12. Kako i temperature nakon kompresije nisu kritičnih vrijednosti, ne postoji potreba za višestupanjskom kompresijom.

### 3.3. Protok rashladne vode

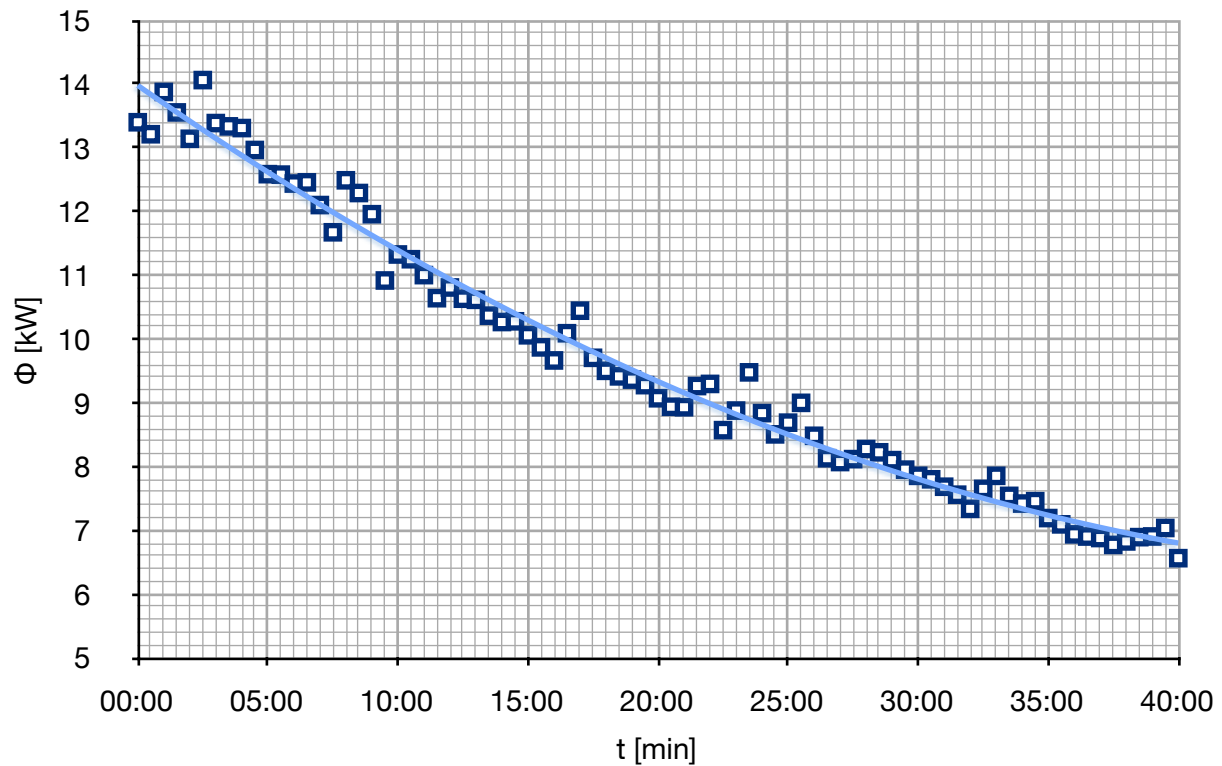


Slika 11. Protok rashladne vode u vremenu

Protok rashladne vode je mjeren vaganjem vode u vremenskom intervalu. Obavljeno je 7 mjerenja te su dobivene vrijednosti ekstrapolirane i dobiveni su potpuni podaci prikazani na gornjem dijagramu.



### 3.4. Učinak kondenzatora



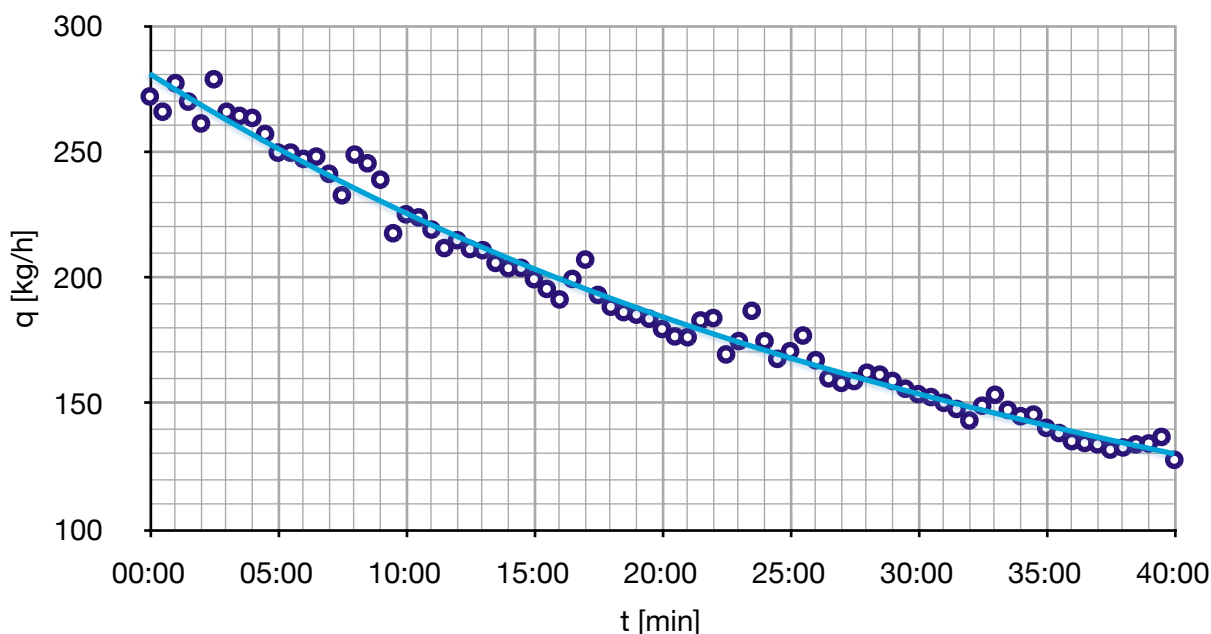
Slika 12. Učinak kondenzatora kroz vrijeme

S podacima za protok rashladne vode i mjerenim podacima za ulaznu i izlaznu temperaturu rashladne vode jednostavno dobijemo učinak kondenzatora:

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

Prema jednadžbi, vidi se da uz pad protoka rashladne vode kojim smo održavali temperaturu odn. tlak kompresije pada i učin kondenzatora.

### 3.5. Protok radne tvari



Slika 13. Protok radne tvari kroz vrijeme

Iako smo mjerili i protok radne tvari, zbog premale količine radne tvari u sustavu, u prvom dijelu mjerenja su dobiveni nekonzistentni podaci te je protok radne tvari dobiven na dolje opisan način.

Na strani radne tvari, za učin kondenzatora vrijedi slijedeći izraz:

$$\Phi_k = q_{m,RT} \cdot (h_2 - h_3)$$

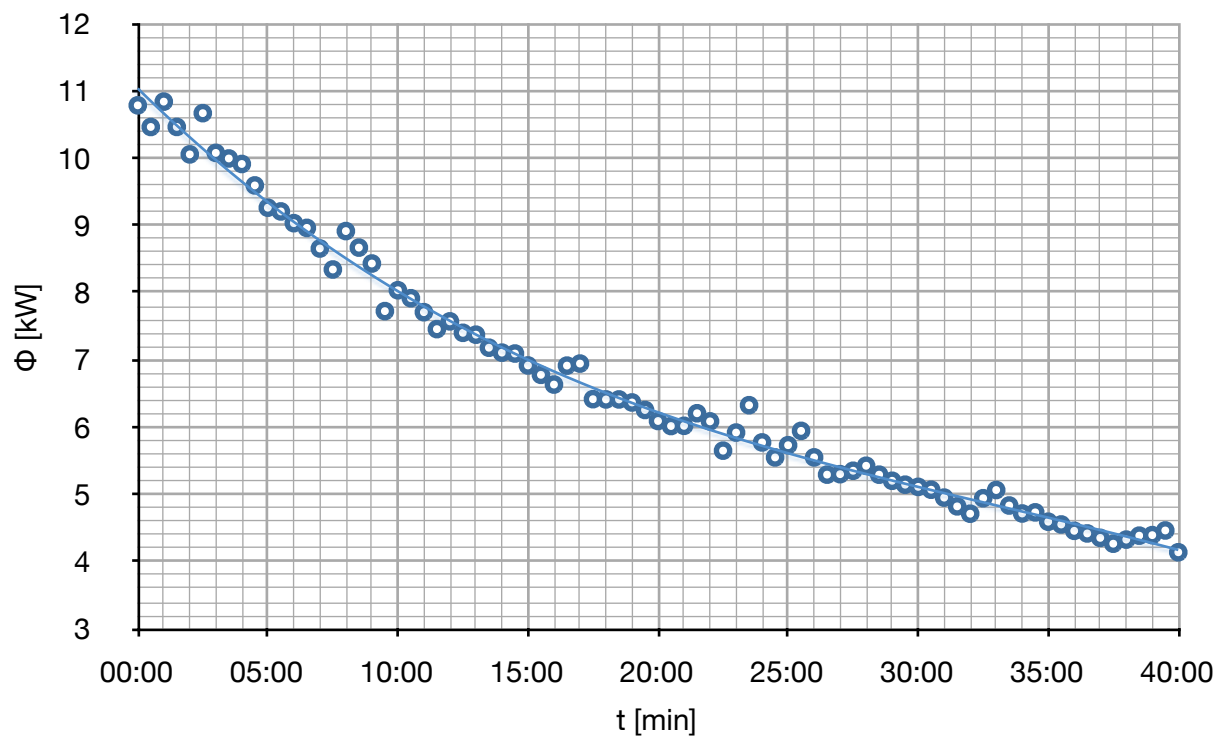
Vrijednosti entalpija u točkama 2 i 3 prema T,s dijagramu na slici 2, za tlak kondenzacije i mjerenih temperatura nakon kompresije (točka 2) i nakon pothlađenja u kondenzatoru (točka 3) su dobiveni pomoću programa REFPROP a učinak kondenzatora je iz točke 4.2.

Protok radne tvari se dobije iz izraza:

$$q_{m,RT} = \frac{\Phi_k}{h_2 - h_3}$$

Vidljivo je kako maseni protok radne tvari kroz sustav pada kako se smanjuje tlak isparivanja. To objašnjavamo činjenicom da je zbog većeg kompresijskog omjera smanjena dobava kompresora tj. kompresor usisava manju masu radne tvari jer je gustoća na manjim tlakovima manja pa je i maseni protok radne tvari manji.

### 3.6. Učinak isparivača



Slika 14. Učinak isparivača kroz vrijeme

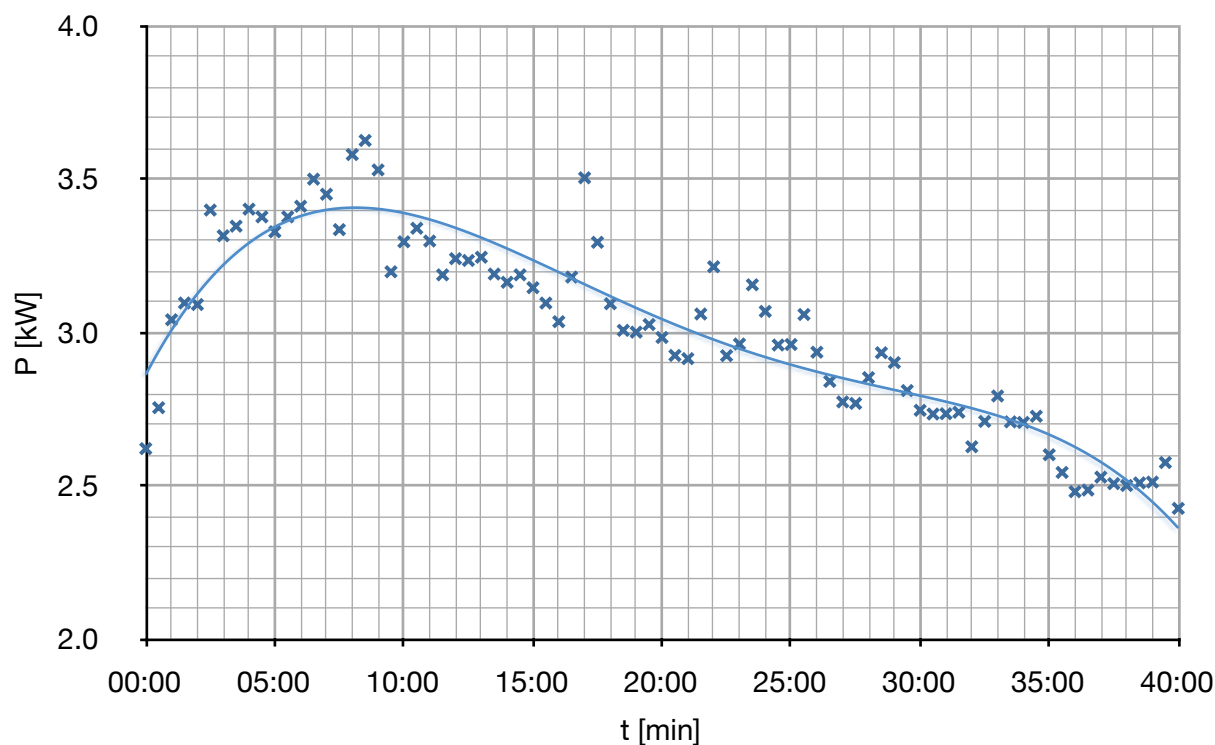
Kao i kod kondenzatora, učinak isparivača također pada što također možemo objasniti jednadžbom:

$$\Phi_0 = q_{m,RT} \cdot (h_1 - h_4)$$

Padom tlaka isparivanja, osim što je pokazano da pada maseni protok radne tvari, smanjuje se i entalpijska razlika  $h_1 - h_4$  jer se točka 4 (slika 2) nakon prigušenja pomiče sve više u desno što u konačnici dovodi do smanjenog učinka isparivača.

Vrijednosti  $h_1$  su dobivene pomoću programa REFPROP za ekstrapolirane vrijednosti tlakova isparavanja i temperature pregrijanja dok su vrijednosti  $h_4$  indentične vrijednostima entalpije nakon pothlađenja u kondenzatoru  $h_3$  jer se radi o prigušenju a prigušenje se provodi pri konstantnoj entalpiji.

### 3.7. Snaga kompresora



Slika 15. Snaga kompresora kroz vrijeme

Konačno, prema relaciji  $\Phi_k = \Phi_0 + P_k$  ili  $P_k = q_{m,RT} \cdot (h_2 - h_1)$  snaga kompresora je jednaka razlici učinka kondenzatora i isparivača odnosno umnošku masenog protoka radne tvari i entalpijske razlike prije i nakon kompresije.

I ovdje se vidi da uslijed smanjene dobave kompresora to jest smanjenog masenog protoka radne tvari pada i snaga kompresora, iako razlika entalpija nakon pregrijanja u isparivaču i nakon kompresije raste jer se točka 1 (slika 2) pomiče prema dolje odnosno pada tlak isparavanja i raste kompresijski omjer.

## 4. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG SUSTAVA

### 4.1. Proračun isparivača

Za zadane parametre treba proračunati koeficijente prijelaza topline, površinu i dimenzije isparivača kao i pad tlaka.



Slika 16. Isparivač

Projektni parametri:

$$\Phi_e = 4,2kW \quad \text{rashladni učinak}$$

isparivača

$$\vartheta_{a1} = -16^{\circ}C \quad \text{temperatura zraka na ulazu u isparivač}$$

$$\vartheta_{a2} = -20^{\circ}C \quad \text{temperatura zraka na izlazu iz isparivača}$$

$$\vartheta_e = -26^{\circ}C \quad \text{temperatura isparavanja}$$

Konstruktivski parametri:

$$d_e = 12mm \quad \text{vanjski promjer cijevi}$$

$$d_i = 10mm \quad \text{unutarnji promjer cijevi}$$

$$s_1 = s_2 = 40mm \quad \text{razmak između cijevi}$$

$$s_f = 8mm \quad \text{razmak između rebra}$$

$$f_t = 0,5mm \quad \text{debljina rebra}$$

$$i_r = 6 \quad \text{broj redova cijevi}$$

$$i_t = 12 \quad \text{broj cijevi u redu}$$

$$i_m = 4 \quad \text{broj ulaznih cijevi}$$

Izračun površina za 1m orebrene cijevi:

$$A_{mi} = \pi \cdot d_e \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = 0,035343m^2 / m \quad \text{vanjska površina cijevi između rebara}$$

$$A_f = 2 \cdot (s_1 \cdot s_2 - \pi \cdot \frac{d_e^2}{4}) / s_f = 0,3717m^2 / m \quad \text{površina rebara}$$

$$A_{e1} = A_{mt} + A_f = 0,40707m^2 / m \quad \text{vanjska površina za izmjenu topline po 1m}$$

$$A_{i1} = \pi \cdot d_i = 0,031416m^2 / m \quad \text{unutarnja površina za izmjenu topline po 1m}$$

$$\beta = \frac{A_{e1}}{A_{i1}} = 12,96 \quad \text{omjer između vanjske i unutarnje površine}$$

Visina izmjenjivača topline:

$$H = i_t \cdot s_1 = 0,48m$$

Dubina izmjenjivača topline:

$$L = i_r \cdot s_2 = 0,24m$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\vartheta_{a1} - \vartheta_{a2}}{\ln \frac{\vartheta_{a1} - \vartheta_e}{\vartheta_{a2} - \vartheta_e}} = 7,83^\circ C$$

Srednja temperatura zraka:

$$\vartheta_{am} = \vartheta_e + \Delta\vartheta_m = -18,17^\circ C$$

Svojstva zraka za  $\vartheta_{am}$ :

$$\rho_a = 1,366kg / m^3 \quad \text{gustoća}$$

$$c_a = 1004,5J / kgK \quad \text{specifični toplinski kapacitet}$$

$$\lambda_a = 0,0227W / mK \quad \text{koeficijent toplinske vodljivosti}$$

$$\nu_a = 1,632 \cdot 10^{-5} m^2 / s \quad \text{kinematička žilavost}$$

$$x_1 = 0,843g / kg \quad \text{sadržaj vlage}$$

$$h_1 = -13,998kJ / kg \quad \text{entalpija}$$

Proračun koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari:

$$h_e = 355,9kJ / kg \quad \text{entalpija radne tvari na izlazu iz isparivača}$$

$$h_c = 239,2kJ / kg \quad \text{entalpija radne tvari na ulazu u isparivač}$$

$$q_{m,RT} = \frac{\Phi_e}{h_e - h_c} = 0,036 \text{ kg / s} \quad \text{maseni protok radne tvari}$$

$$G = q_{m,RT} / (i_{in} \cdot \pi \cdot d_i^2 / 4) = 114,56 \text{ kg / m}^2 \text{ s} \quad \text{brzina radne tvari u cijevima}$$

$$q_i = 2000 \text{ W / m}^2 \quad \text{specifični toplinski tok}$$

$$\alpha_R = C \cdot \frac{G^{0,1} \cdot q_i^{0,7}}{d_i^{0,5}} = 558,56 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad \text{koeficijent prijelaza na strani radne tvari}$$

Proračun koeficijenta prijelaza topline na vanjskoj, zračnoj strani:

$$R_o = 0,0002 \text{ m}^2 \text{ K / W} \quad \text{faktor onečišćenja}$$

$$R_t = \frac{\delta_t}{\lambda_t} = 2,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K / W} \quad \text{toplinski otpor cijevi}$$

$$\vartheta_s = \vartheta_e + \left( \frac{1}{\alpha_R} + R_1 + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + R_o \cdot \frac{1}{\beta} \right) \cdot q_i = -22,4^\circ \text{C} \quad \text{temperatura zasićenja}$$

$$h_s = -22,1 \text{ kJ / kg} \quad \text{entalpija zasićenog zraka za } \vartheta_s$$

$$x_s = 0,483 \text{ g / kg} \quad \text{sadržaj vlage}$$

Svojstva izlaznog zraka:

$$x_2 = x_1 - (x_1 - x_s) \cdot \left( \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\vartheta_1 - \vartheta_s} \right) = 0,699 \text{ g / kg} \quad \text{sadržaj vlage}$$

$$h_2 = 1,005 \cdot \vartheta_{a2} + x_2 \cdot (2501 + 1,863 \cdot \vartheta_{a2}) = -18,38 \text{ kJ / kg} \quad \text{entalpija}$$

Površina za prijelaz topline:

$$A_i = \frac{\Phi_e}{q_i} = 2,1 \text{ m}^2$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ov} = \frac{A_i}{A_{i1}} = 66,85 \text{ m}$$

Duljina cijevi u jednom redu:

$$L_1 = \frac{L_{ov}}{i_r} = 11,14m$$

Širina izmjenjivača:

$$B = \frac{L_1}{i_t} = 0,93m$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka:

$$q_{m,a} = \frac{\Phi_e}{h_1 - h_2} = 0,9589kg / s \quad \text{protočna masa zraka}$$

$$q_{v,a} = \frac{q_{m,a}}{\rho_a} = 0,7m^3 / s \quad \text{protočni volumen zraka}$$

$$A_z = L_1 \cdot \frac{(s_1 - d_e)}{\left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right)} = 0,3327m^2 \quad \text{najmanja površina gdje prolazi zrak}$$

$$w = \frac{q_{v,a}}{A_z} = 2,11m / s \quad \text{brzina u najmanjoj prestrujnoj površini}$$

$$d_{eqv} = \frac{2 \cdot (s_1 - d_e) \cdot (s_f - f_t)}{(s_1 - d_e + s_f - f_t)} = 0,01183m \quad \text{ekvivalentni promjer}$$

$$Re = \frac{w \cdot d_{eqv}}{\nu_a} = 1528 \quad \text{Reynoldsov broj}$$

$$n = 0,45 + 0,0066 \cdot \frac{L}{d_{eqv}} = 0,5839$$

$$m = -0,28 + 0,08 \cdot \frac{Re}{1000} = 0,1577$$

$$C_{1A} = 0,2$$

$$C_{1B} = 1,36 - 0,24 \cdot \frac{Re}{1000} = 0,9931$$



$$C_1 = C_{1A} \cdot C_{1B} = 0,1986$$

$$Nu = C_1 \cdot Re^n \cdot \left( \frac{L}{d_{eqv}} \right)^m = 8,936 \quad \text{Nusseltov broj}$$

$$\alpha_a = Nu \cdot \frac{\lambda_a}{d_{eqv}} \cdot 1,1 = 18,832 W / m^2 K \quad \text{Koeficijent prijelaza topline na zračnoj strani}$$

Povećanje koeficijenta zbog kondenzacije na vanjskoj površini:

$$\xi_w = 1 + 2500 \cdot \frac{(x_1 - x_s)}{(\vartheta_{a1} - \vartheta_s)} = 1,123$$

$$\alpha_{aw} = \xi_w \cdot \alpha_a = 21,15 W / m^2 K$$

Proračun koeficijenta prijelaza topline svedenog na unutarnji promjer:

$$C_k = 0,99 \quad \lambda_f = 209 W / mK \quad m_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{aw}}{f_t \cdot \lambda_f}} = 20,12 m^{-1}$$

$$B_f = \sqrt{(s_1 / 2)^2 + s_2^2} = 0,04472 m$$

$$\rho_f = 1,27 \cdot \left( \frac{B_f}{d_e} \right) \cdot \sqrt{\frac{A_f}{B_f}} - 0,3 = 13,4$$

$$h_f = 0,5 \cdot d_e \cdot (\rho_f - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln \rho_f) = 0,1419 m$$

$$E = \frac{th(m_f \cdot h_f)}{m_f \cdot h_f} = 0,989$$

$$\alpha_{ai} = \frac{\alpha_{aw} \cdot (A_f \cdot E \cdot C_k + A_{mt})}{A_{i1}} = 268,8 W / m^2 K$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline sveden na unutrašnju stijenku cijevi:

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + R_o \cdot \frac{1}{\beta} + R_t \cdot \frac{d_i}{d_m} + R_i + \frac{1}{\alpha_R}} = 180,9 W / m^2 K$$

Specifični toplinski tok:

$$q_i = k_i \cdot \Delta\vartheta_m = 1416 \text{ W / m}^2$$

Unutrašnja površina izmjene topline:

$$A_i = \frac{\Phi_e}{q_i} = 2,965 \text{ m}^2$$

Konačni rezultati svedeni na vanjsku površinu cijevi:

$$k_e = \frac{k_i}{\beta} = 13,96 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad \text{ukupni koeficijent prolaza topline}$$

$$A_e = A_i \cdot \beta = 38,42 \text{ m}^2 \quad \text{vanjska površina izmjene topline}$$

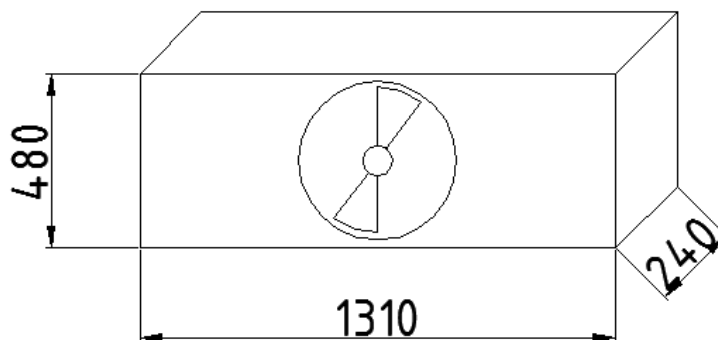
$$B = 1,31 \text{ m} \quad \text{dužina izmijenjivača}$$

Ulazna brzina zraka:

$$w_f = \frac{q_{v,a}}{B \cdot H} = 1,115 \text{ m / s}$$

Pad tlaka:

$$\Delta p = 0,233 \cdot i_r \cdot \left[ s_2 / (s_f - f_t) \right]^{0,42} \cdot (w \cdot \rho_a)^{1,8} = 6 \text{ Pa}$$



Slika 17. Dimenzije isparivača

## 4.2. Proračun cijevovoda

Protočna masa radne tvari:

$$q_{m,RT} = 0,036 \text{ kg / s}$$

Usisni vod kompresora:

$$\vartheta_{preg} = -20^\circ\text{C} \quad p_i = 2,566 \text{ bar}$$

$$\rho_1 = 12,93 \text{ kg / m}^3 \quad \text{gustoća radne tvari}$$

$$w_{uv} = 10 \text{ m / s} \quad \text{brzina radne tvari}$$

$$A_{uv} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_1 \cdot w_{uv}} = 0,0002784 \text{ m}^2 \quad \text{površina poprečnog presjeka cijevi}$$

$$d_{uv} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{uv}}{\pi}} = 0,018828 \text{ m} = 18,83 \text{ mm}$$

Odabrana cijev – Cu  $\phi$  22x1mm

Tlačni vod kompresora:

$$\vartheta_{komp} = 41,27^\circ\text{C} \quad p_k = 14,3 \text{ bar}$$

$$\rho_2 = 69,35 \text{ kg / m}^3 \quad \text{gustoća radne tvari}$$

$$w_{tv} = 12 \text{ m / s} \quad \text{brzina radne tvari}$$

$$A_{tv} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_2 \cdot w_{tv}} = 0,00004326 \text{ m}^2 \quad \text{površina poprečnog presjeka cijevi}$$

$$d_{tv} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{tv}}{\pi}} = 0,00742 \text{ m} = 7,42 \text{ mm}$$

Odabrana cijev – Cu  $\phi$  10x1mm

Kapljevinski vod:

$$\vartheta_{\text{pothl}} = 27^{\circ}\text{C} \quad p_k = 14,3\text{bar}$$

$$\rho_3 = 1037\text{kg} / \text{m}^3 \quad \text{gustoća radne tvari}$$

$$w_{kv} = 0,6\text{m} / \text{s} \quad \text{brzina radne tvari}$$

$$A_{kv} = \frac{q_{m,RT}}{\rho_3 \cdot w_{kv}} = 0,00005786\text{m}^2 \quad \text{površina poprečnog presjeka cijevi}$$

$$d_{kv} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{kv}}{\pi}} = 0,008583\text{m} = 8,58\text{mm}$$

Odabrana cijev – Cu  $\phi$  12x1mm

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu dani su i obrađeni mjereni podaci pri upuštanju u rad rashladne komore.

Pokazano je kako temperatura hlađenja u komori pada zajedno s padom temperature odnosno tlaka isparavanja te kako temperaturna razlika teži konstantnoj vrijednosti.

Održavanjem konstantnog tlaka odnosno temperature kondenzacije a padom tlaka isparavanja vidi se porast kompresijskog omjera.

Porast kompresijskog omjera za posljedicu ima smanjenu dobavu kompresora. To znači smanjenje protoka radne tvari i posljedično, smanjenje učinka kondenzatora, isparivača kao i snage kompresora.

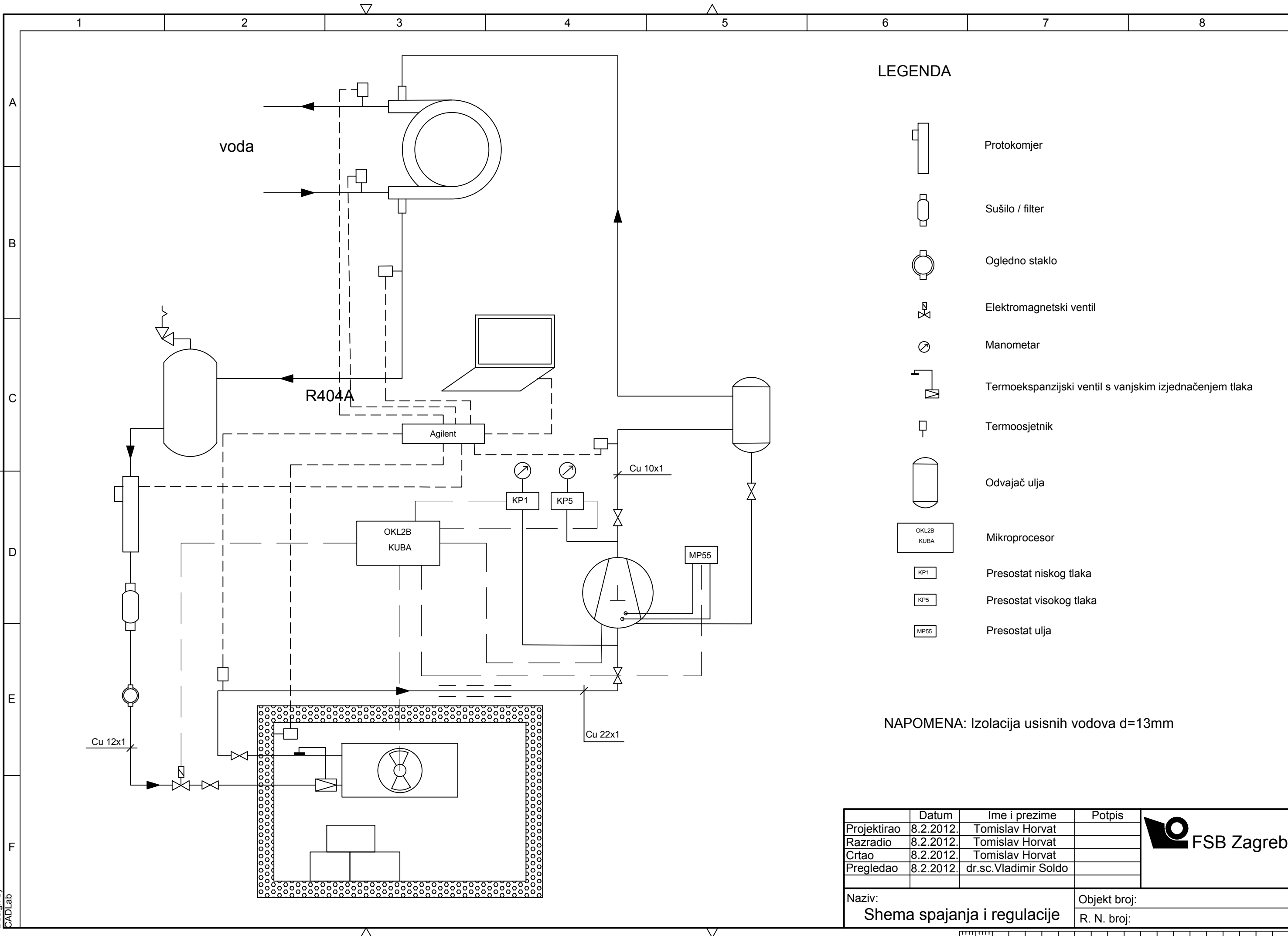
U izvedenom proračunu isparivača i cjevovoda za zadane parametre hlađenja dobivene su dimenzije koje se podudaraju s realnim stanjem rashladnog sustava.

## **PRILOZI**








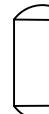
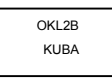



- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

## LITERATURA

- [1] Hundy, G.F., Trott, A.R., Welch, T.C.: Refrigeration and Air Conditioning, Butterworth-Heinemann, 2008.
- [2] ASHRAE, Refrigeration, 2006.
- [3] Ćurko, T.: Hlađenje i dizalice topline, radni udžbenik, Zagreb, 2008.
- [4] Toplinske tablice, Zagreb, 2008.
- [5] Kraut B.: Krautov strojarski priručnik, Axiom, Zagreb, 1997.
- [6] Ćurko, T., Malinovec, M.: Radne tvari u tehnici hlađenja, Zagreb, 2000.
- [7] <http://www.bitzer.de>



LEGENDA

-  Protokomjer
-  Sušilo / filter
-  Ogledno staklo
-  Elektromagnetski ventil
-  Manometar
-  Termoekspanzijski ventil s vanjskim izjednačenjem tlaka
-  Termosjetnik
-  Odvajač ulja
-  OKL2B KUBA Mikroprocesor
-  KP1 Presostat niskog tlaka
-  KP5 Presostat visokog tlaka
-  MP55 Presostat ulja

NAPOMENA: Izolacija usisnih vodova d=13mm

	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	8.2.2012.	Tomislav Horvat	
Razradio	8.2.2012.	Tomislav Horvat	
Crtao	8.2.2012.	Tomislav Horvat	
Pregledao	8.2.2012.	dr.sc.Vladimir Soldo	



Naziv: <b>Shema spajanja i regulacije</b>	Objekt broj:
	R. N. broj:

