

# Rashladne komore za lijekove

---

**Riljin, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:869308>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marko Riljin**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Marko Riljin

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se Prof. dr. sc. Vladimiru Soldi, dipl. ing. na mentorstvu i pomoći prilikom izrade ovog završnog rada.

Također zahvalio bih se i asistentu Dinu Mišeu na ustupljenom vremenu i savjetovanju prilikom proračuna komponenti sustava.

Marko Riljin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove.  
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarški

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Riljin**

JMBAG: **0035225081**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rashladne komore za lijekove**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Cold stores for drugs**

Opis zadatka:

Za potrebe hlađenja i skladištenja lijekova na temperaturu 2 do 8 °C potrebno je proračunati paletno skladište površine 1000 m<sup>2</sup> i 1100 paletnih mjesta. Kondenzator je hlađen zrakom. Radnu tvar odabrati prema važećim standardima.

Postrojenje se nalazi na području grada Splita.

Projekt treba sadržavati:

1. Proračun rashladnog opterećenja skladišnih komora.
2. Postavku procesa i proračun komponenti sustava.
3. Dimenzioniranje cjevovoda i odabir armature rashladnog postrojenja.
4. Shemu spajanja i automatske regulacije.
5. Dispozicijski crtež rashladnog sustava.

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

Zadatak zadan:

30.11.2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zdao:

*V Soldo*  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Predsjednik Povjerenstva:

*V Soldo*  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1 OSNOVE LJEVOKRETNOG KRUŽNOG PROCESA I SVOJSTVA RADNE TVARI 1	
1.2. LIJEKOVI .....	2
1.2.1. Kapljeviti antibiotici.....	2
1.2.2. Sirupi za liječenje kašlja.....	3
1.2.3. Kapi za oči.....	3
2. PRORAČUN TOPLINSKIH OPTEREĆENJA KOMORA.....	5
2.1 ULAZNI PODACI .....	5
2.2. TRANSMISIJSKI GUBICI.....	6
2.2.1. Koeficijent prolaza topline .....	7
2.2.2. Transmisijski gubitak komore 1 .....	9
2.2.3. Transmisijski gubitak komore 2 .....	10
2.2.4. Transmisijski gubitak komore 3 .....	11
2.3. TOPLINSKI GUBICI USLIJED INFILTRACIJE ZRAKA.....	11
2.4. TOPLINSKO OPTEREĆENJE OD HLAĐENIH PROIZVODA .....	14
2.4.1. Toplinsko opterećenje od robe (lijekova).....	14
2.4.2. Toplinsko opterećenje od pakiranja .....	15
2.5. UNUTRAŠNJE TOPLINSKO OPTEREĆENJE.....	17
2.5.1. Toplinsko opterećenje od rasvjete.....	17
2.5.2. Toplinsko opterećenje od ljudi .....	18
2.5.3. TOPLINSKO OPTEREĆENJE OD ELEKTROMOTORA HLADNJAKA .....	19
2.6. UKUPNO TOPLINSKO OPTEREĆENJE .....	19
3. TERMODINAMIČKI PRORAČUN .....	21
3.1. LJEVOKRETNI KRUŽNI PROCES (R290) .....	21
3.2. PRORAČUN KONDENZATORA .....	24
3.2.1. Termodinamička svojstva okolišnjeg zraka .....	25
3.2.2. Hlađenje radne tvari-podjela na zone.....	26
3.2.3. Konstrukcijski parametri .....	27
3.2.4. Srednja logaritamska razlika temperatura .....	29
3.2.5. Koeficijent prolaza i površina izmjene topline .....	30
3.3. DIMENZIONIRANJE CJEVOVODA I ODABIR ARMATURE .....	38

3.3.1. Usisni vod.....	38
3.3.2. Tlačni vod.....	38
3.3.3. Kapljevinski vod .....	38
3.3.4. Vod posrednog rashladnog medija.....	39
3.3.5. Prigušni element.....	40
3.3.6. Pločasti kompaktni isparivač.....	41
3.3.7. Kondenzator V oblika .....	41
3.3.8. Kompresor.....	42
3.3.9. Pomoćna oprema rashladnog uređaja.....	43
4.ZAKLJUČAK .....	46
LITERATURA.....	47
PRILOZI.....	48

**POPIS SLIKA**

Slika 1. 1. Osnovni ljevokretni kružni proces .....	1
Slika 1. 2. Kemijska formula propana = C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> .....	2
Slika 1. 3. Amoksicilin .....	3
Slika 1. 4. Sirup za liječenje kašlja.....	3
Slika 1. 5. Kapi za oči .....	4
Slika 2. 1. Prikaz europaleta .....	5
Slika 2. 2. Rashladne komore s predprostorom i kontrolnom sobom .....	6
Slika 2. 3. Presjek zida i stropa rashladne komore .....	8
Slika 2. 4. Presjek poda rashladne komore.....	9
Slika 2. 5. Mollierov dijagram .....	12
Slika 2. 6. Polistirenske kutije .....	16
Slika 2. 7. Odavanje toplinskog toka s ljudskog tijela .....	18
Slika 3. 1. Shema indirektnog sustava hlađenja .....	21
Slika 3. 2. Log(p)-h dijagram s karakterističnim točkama procesa.....	22
Slika 3. 3. T-s dijagram s karakterističnim točkama procesa .....	23
Slika 3. 4. Zrakom hlađeni kondenzator .....	25
Slika 3. 5. Ovisnost temperature medija o presjeku kondenzatora (ḡ-A dijagram) .....	25
Slika 3. 6. Osnovni konstrukcijski oblik kondenzatora.....	27
Slika 3. 7. Bakrene cijevi .....	29
Slika 3. 8. Dimenzije zrakom hlađena kondenzatora .....	31
Slika 3. 9. Elektronski ekspanzijski ventil .....	40
Slika 3. 10. Pločasti kompaktni isparivač .....	41
Slika 3. 11. Kondenzator V izvedbe.....	42
Slika 3. 12. Stapni kompresor .....	42
Slika 3. 13. Filter sušać .....	43
Slika 3. 14. Kontrolno stakalce .....	44
Slika 3. 15. Zaporni ventil.....	44



**POPIS TABLICA**

Tablica 2. 1. Transmisijsko opterećenje rashladne komore 1 .....	10
Tablica 2. 2. Transmisijsko opterećenje rashladne komore 2 .....	10
Tablica 2. 3. Transmisijsko opterećenje rashladne komore 3 .....	11
Tablica 2. 4. Broj izmjena zraka u 24 sata .....	13
Tablica 2. 5. Infiltracijski toplinski gubici rashladnih komora .....	13
Tablica 2. 6. Toplinsko opterećenje od neto mase lijekova .....	15
Tablica 2. 7. Toplinsko opterećenje od ambalaže i pakiranja .....	17
Tablica 2. 8. Toplinsko opterećenje od rasvjete .....	18
Tablica 2. 9. Toplinsko opterećenje uslijed rada elektromotora hladnjaka.....	19
Tablica 2. 10. Ukupno toplinsko opterećenje rashladnih komora.....	19
Tablica 3. 1. Karakteristične točke kružnog procesa .....	23
Tablica 3. 2. Ovisnost $C_{1A}$ o $L/dekv$ .....	32

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

<b>BROJ CRTEŽA</b>	<b>Naziv iz sastavnice</b>
1.	Shema spajanja i automatske regulacije
2.	Dispozicijski crtež rashladnog sustava

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\vartheta$	$^{\circ}\text{C}$	Relativna temperatura
T	K	Apsolutna temperatura
$\varphi$	%	Relativna vlažnost
$\Phi$	W	Toplinski tok
k	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Koeficijent prolaza topline
A	$m^2$	Površina
$\alpha$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Koeficijent prijelaza topline
$\delta$	m	Debljina
$\lambda$	$\frac{W}{m \cdot K}$	Toplinska provodnost
$\dot{V}_v$	$\frac{m^3}{s}$	Volumenski protok
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	Gustoća
h	$\frac{J}{kg}$	Specifična entalpija
V	$m^3$	Volumen
h	m	Visina
$\tau$	h	Vrijeme
m	kg	Masa
c	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Specifični toplinski kapacitet
q	$\frac{W}{m^2}$	Gustoća toplinskog toka
$q_m$	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok
s	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Specifična entropija
$\eta$	%	Učinkovitost
p	Pa	Tlak
P	W	Snaga
w	$\frac{J}{kg}$	Specifični rad
d	m	Promjer
$\eta$	Pa·s	Dinamička viskoznost
$\nu$	$\frac{m^2}{s}$	Kinematička viskoznost

*Marko Riljin*

*Završni rad*

w	$\frac{m}{s}$	Brzina
L	m	Duljina
B	m	Širina
R	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$	Toplinski otpor

## **SAŽETAK**

Tema završnog rada jest projektiranje rashladnih komora za skladištenje lijekova pri prikladnim temperaturama, u ovom slučaju između 2 i 8 °C. Lijekovi u komorama koje su na području grada Splita su antibiotici u kapljevitom obliku, sirupi za liječenje kašlja te kapi za oči i iznimno je važno da su isti čuvani na traženim temperaturama kako ne bi izgubili svoja djelotvorna svojstva. Proces hlađenja je indirektan, odnosno posredan, što znači da radna tvar, u ovom slučaju propan (R290), koji inače spada u grupu ugljikovodika, odnosno tvari organskog porijekla, na isparivaču hladi glikolnu smjesu, a ista na hladnjaku zrak u rashladnim komorama. U radu prikazan je proračun toplinskog opterećenja komora, termodinamička postavka procesa bitna za proračun toplinskih učina isparivača i kondenzatora te snage kompresora. Također u radu su dimenzionirani svi potrebni cjevovodi, odabrana je prikladna armatura rashladnog postrojenja i prikazana je shema spajanja i automatske regulacije kao i dispozicijski crtež rashladnog sustava.

Ključne riječi: skladištenje lijekova, toplinsko opterećenje rashladnih komora, komponente rashladnog uređaja.

## **SUMMARY**

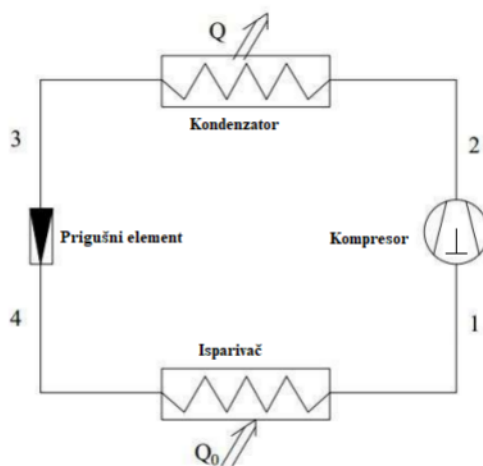
Topic of undergraduate thesis is designing the cold stores in purpose for storing the medicines on appropriate temperatures, in this case between 2 i 8 °C. Medicines in stores which are on the city area of Split are liquid antibiotics, cold medicines and eye drops and it is exceptionally important that they are stored on desired temperatures so they would not lose their effective traits. The cooling process is indirect, which means that the working substance, in this case propane (R290), which belongs to the group of hydrocarbons, or substances of organic origin, is cooling the glycol mixture on evaporator, and the one is doing the same for air in cold stores via the coolers. In thesis the calculation of cold stores heat load has been shown as well as the thermodynamic setting of the process important for calculation of evaporator and condenser heat effects and the power of compressor. Also in thesis all the needed pipelines have been dimensioned and coupling scheme and automatic regulations have been shown as well as the cooling system disposition drawing.

Key words: medicines storage, cold stores heat load, cooling device components.

## 1. UVOD

### 1.1 OSNOVE LJEVOKRETNOG KRUŽNOG PROCESA I SVOJSTVA RADNE TVARI

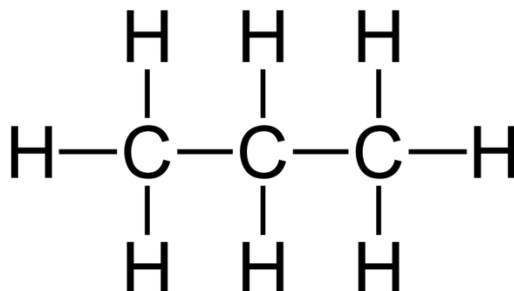
Lijek je pripravak koji ublažava simptome neke bolesti, sprječava je ili iscjeljuje i isti može biti prirodnog ili sintetičkog podrijetla. Postoje lijekovi koji moraju biti čuvani u hladnim uvjetima, najčešće su to oni koji su u kapljevitom obliku i zbog svoje osjetljivosti jako je bitno da im stvorimo traženi temperaturni raspon van kojeg se neće ići, a upravo to će se postići u rashladnim komorama ljevokretnim kružnim procesom. Radna tvar u tom slučaju preuzima toplinu s tijela niže temperature i predaje ju tijelu više temperature što je upravo glavna odlika nečega što se zove dizalica topline [1]. Kako bi se pak omogućio prijenos topline s tijela niže na tijelo više temperature potrebno je sustavu dovesti energiju. Prema osnovnoj podjeli sustava s obzirom na energiju koju troše, oni mogu biti kompresijski, sorpcijski, ejektorski, termoelektrični, magnetski i drugi, a u ovom slučaju sustav će biti kompresijski.



Slika 1. 1. Osnovni ljevokretni kružni proces

Osnovni kompresijski rashladni sustav sastoji se od četiri glavna dijela: isparivača, kompresora, kondenzatora te prigušnog elementa i odabir samih komponenti sustava, ovisiti će o korištenoj radnoj tvari, ovdje će se veličina i učinak svih komponenti prilagođavati potrebama i osobinama propana (R290). Uvjeti koje radna tvar mora ispuniti su termodinamičke, sigurnosne, funkcionalne prirode i jako je važan njezin utjecaj na okoliš. Propan je radna tvar koja se među prvima koristila u mehaničkim rashladnim uređajima. Pripada skupini ugljikovodika HC (kemijska formula C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) te ima dobra termofizikalna i

ekološka svojstva u smislu da je bez utjecaja na razgradnju ozonskog sloja (ODP=0) i da ima mali utjecaj za zagrijavanje atmosfere (GWP=3).



Slika 1. 2. Kemijska formula propana = C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

Nedostatak propana njegova je zapaljivost, a spada u sigurnosnu grupu A3, ali zato nije otrovan i po tom kriteriju spada u sigurnosnu grupu B1. Temperatura zapaljenja za propan iznosi 470°C, a zapaljiv je ako je njegova koncentracija u zraku između donje i gornje granice zapaljivosti 1,7 i 10,9 vol%. Općenito, zapaljenje HC radne tvari može se dogoditi samo kada se istovremeno pojave tri bitna preduvjeta: propuštanje radne tvari, koncentracija HC i zraka unutar donje i gornje granice zapaljivosti te prisutnost aktivnog izvora plamena određene razine energije ili temperature.

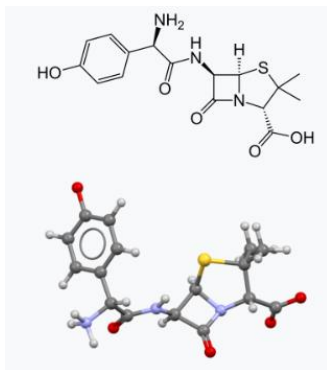
## 1.2. LIJEKOVI

Lijekovi koji će se hladno skladištiti u već rečenim komorama će biti kapljevitih antibiotici, sirupi za liječenje kašlja i kapi za oči.

### 1.2.1. Kapljevitih antibiotici

Najpoznatiji primjer antibiotika u kapljevitom obliku jest amoksisilin koji se koristi za liječenje brojnih bakterijskih infekcija uključujući infekciju srednjeg uha, upalu pluća, infekcije kože i za brojne druge namjene [2].





Slika 1. 3. Amoksicilin

Njegova visoka učinkovitost u borbi protiv raznih bakterija objašnjava zašto ga stručnjaci svrstavaju u grupu snažnih antibiotika.

### 1.2.2. Sirupi za liječenje kašlja

Sirupi za liječenje kašlja ili također poznati kao lijekovi protiv prehlade skupina su lijekova koji se uzimaju pojedinačno ili u kombinaciji za liječenje simptoma obične prehlade i sličnih stanja gornjih dišnih puteva [3].



Slika 1. 4. Sirup za liječenje kašlja

U današnje vrijeme jedni su od najpoznatijih lijekova i studije pokazuju da se njihovo korištenje iz godine u godinu povećava.

### 1.2.3. Kapi za oči

Kao što i samo ime navodi kapljevita su oblika i nanose se izravno na površinu oka obično u malim količinama kao što je jedna kap ili pak njih nekoliko [4].



Slika 1. 5. Kapi za oči

Obično sadrže fiziološku otopinu koja odgovara slanosti oka i koriste se kao umjetne suze za liječenje suhih očiju ili jednostavne iritacije oka kao što su svrbež i crvenilo.

## 2. PRORAČUN TOPLINSKIH OPTEREĆENJA KOMORA

### 2.1 ULAZNI PODACI

Dimenzija komore:

Komora 1:

25 m x 8 m x 6,5 m

Komora 2:

25 m x 24 m x 6,5 m

Komora 3:

25 m x 8 m x 6,5 m

Svijetla visina svih komora iznosi 6,5 metara.

Dimenzije europaleta:

1200 mm x 800 mm x 144 mm



Slika 2. 1. Prikaz europaleta

Temperatura i relativna vlažnost skladištenja u uvjetima kontrolirane atmosfere:

$\vartheta_o = 2^\circ\text{C}$  i  $\varphi=90\%$ .

Vanjska projektna temperatura:

$\vartheta_v = 35^\circ\text{C}$

Temperatura predprostora:

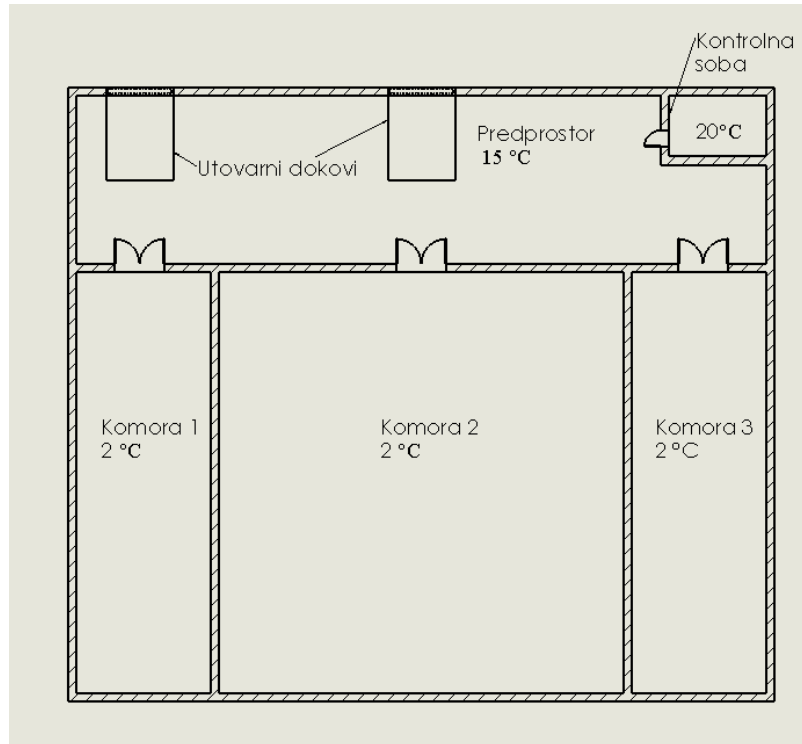
$\vartheta_{pp} = 15^\circ\text{C}$

Temperatura tla:

$\vartheta_{tlo} = 20^\circ\text{C}$

Ulazna temperatura proizvoda u prostoriju:

$\vartheta_{\text{ulazna}} = 10^{\circ}\text{C}$  (pretpostavljamo da će se lijekovi ipak malo zagrijati prilikom transporta)



Slika 2. 2. Rashladne komore s predprostorom i kontrolnom sobom

## 2.2. TRANSMISIJSKI GUBICI

Izraz za toplinski tok dobiven kroz zidove, pod i strop pod vanjskim projektnim uvjetima [5]:

$$\Phi_{\text{tr}} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta$$

$\Phi_{\text{tr}}$  [W] - toplinski tok transmisijom

$k$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] - koeficijent prolaza topline

$A$  [ $\text{m}^2$ ] – vanjska površina plohe

$\Delta\vartheta$  [K] - razlika između vanjske temperature zraka (projektne) i temperature hlađenog prostora

Površina poda i stropa:

$$A_{\text{pod}} = A_{\text{strop}} = 1\,000\ \text{m}^2$$

Površina zidova ( sjever i jug ):

$$A_{\text{jug}} = A_{\text{sjever}} = 260 \text{ m}^2$$

Površina zidova ( zapad i istok ):

$$A_z = A_i = 162,5 \text{ m}^2$$

### 2.2.1. Koeficijent prolaza topline

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o}}$$

a) Strop, vanjski i unutarnji zidovi

unutarnji koeficijent prijelaza topline za zrak (za dinamičko hlađenje u hlađenom prostoru) ,  $\alpha_i = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

vanjski koeficijent prijelaza topline za zrak (za srednji intenzitet vjetra),  $\alpha_o = 18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

debljina panela od ekspaniranog poliuretana ,  $\delta_p = 100 \text{ mm}$

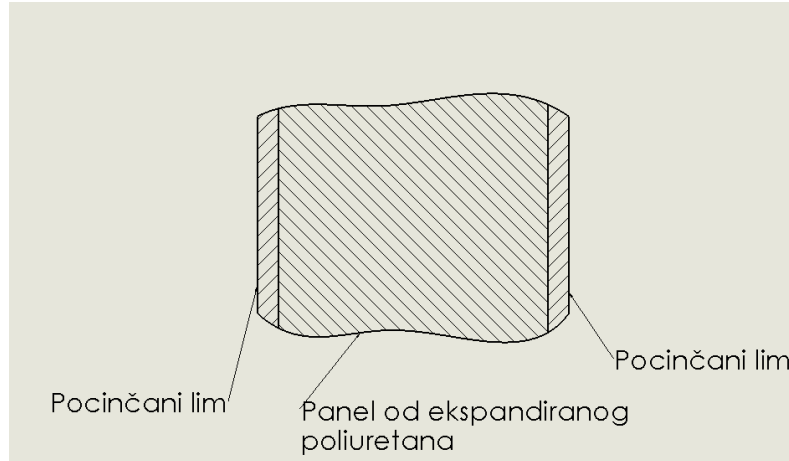
koeficijent toplinske vodljivosti panela,  $\lambda_p = 0,025 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

debljina pocinčanog lima,  $\delta_l = 1 \text{ mm}$

toplinska provodnost pocinčanog lima,  $\lambda_l = 50 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

$$k_{vz} = k_{uz} = k_s = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_l}{\lambda_l} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{\delta_l}{\lambda_l} + \frac{1}{\alpha_o}}$$

$$k_{vz} = k_{uz} = k_s = 0,244 \text{ W/m}^2\text{K}$$



Slika 2. 3. Presjek zida i stropa rashladne komore

b) Pod

debljina morta,  $\delta_m = 20 \text{ mm}$

toplinska provodnost morta,  $\lambda_m = 0,72 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

debljina armiranog betona,  $\delta_{ab} = 150 \text{ mm}$

toplinska provodnost armiranog betona,  $\lambda_{ab} = 1,396 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

debljina mineralne vune,  $\delta_{mv} = 60 \text{ mm}$

toplinska provodnost mineralne vune,  $\lambda_{mv} = 0,036 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

debljina bitumena,  $\delta_{bt} = 5 \text{ mm}$

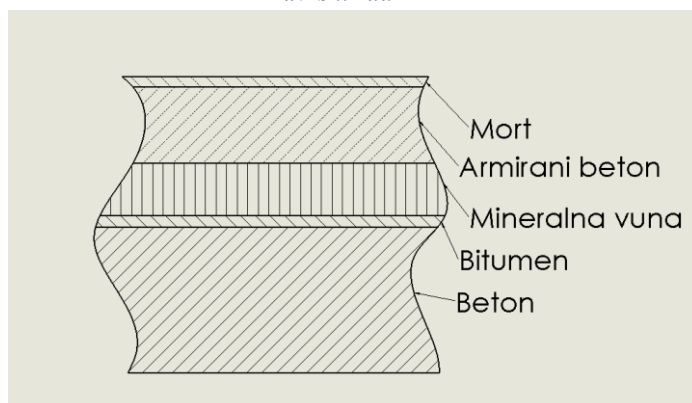
toplinska provodnost bitumena,  $\lambda_{bt} = 0,71 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

debljina betona,  $\delta_b = 250 \text{ mm}$

toplinska provodnost betona,  $\lambda_b = 1,29 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_{ab}}{\lambda_{ab}} + \frac{\delta_{mv}}{\lambda_{mv}} + \frac{\delta_{bt}}{\lambda_{bt}} + \frac{\delta_b}{\lambda_b}}$$

$$k_p = 0,487 \text{ W/m}^2\text{K}$$



Slika 2. 4. Presjek poda rashladne komore

### 2.2.2. Transmisijski gubitak komore 1

Dodaci na vanjsku projektnu temperaturu (svijetla boja površine):

$$\Delta\vartheta_{\text{istočni zid}} = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{južni zid}} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{zapadni zid}} = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{ravni krov}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Rashladna komora 1	Površina plohe, A[m <sup>2</sup> ]	Temperatura hlađenja, $\vartheta_0$ [°C]	Temperature susjednih prostora (uzeti u obzir dodaci na vanjsku projektnu temperaturu), $\vartheta$ [°C]	Koeficijent prolaza topline, k[W/m <sup>2</sup> K]	Transmisijski gubitak, $\Phi_{tr}$ [W]
Pod	200	2	20	0,487	1 753,8
Strop	200	2	40	0,244	1 854,4
Sjeverni zid	52	2	15	0,244	164,9
Južni zid	52	2	37	0,244	444,1
Istočni zid	162,5	2	2	0,244	0
Zapadni zid	162,5	2	38	0,244	1 427,4

Ukupno od komore 1					<b>5 644,6</b>
--------------------	--	--	--	--	----------------

Tablica 2. 1. Transmisijsko opterećenje rashladne komore 1

Transmisijski gubitak komore 1:

$$\Phi_{tr1} = 5\,644,6 \text{ W}$$

### 2.2.3. Transmisijski gubitak komore 2

Rashladna komora 2	Površina plohe, A[m <sup>2</sup> ]	Temperatura hlađenja, $\vartheta_o$ [°C]	Temperature susjednih prostora (uzeti u obzir dodaci na vanjsku projektnu temperaturu), $\vartheta$ [°C]	Koeficijent prolaza topline, k[W/m <sup>2</sup> K]	Transmisijski gubitak, $\Phi_{tr}$ [W]
Pod	600	2	20	0,487	5 261,3
Strop	600	2	40	0,244	5 563,2
Sjeverni zid	156	2	15	0,244	494,8
Južni zid	156	2	37	0,244	1 332,2
Istočni zid	162,5	2	2	0,244	0
Zapadni zid	162,5	2	2	0,244	0
Ukupno od komore 2					<b>12 651,6</b>

Tablica 2. 2. Transmisijsko opterećenje rashladne komore 2

Transmisijski gubitak komore 2:

$$\Phi_{tr2} = 12\,651,6 \text{ W}$$



### 2.2.4. Transmisijski gubitak komore 3

Rashladna komora 3	Površina plohe, A[m <sup>2</sup> ]	Temperatura hlađenja, $\vartheta_0$ [°C]	Temperature susjednih prostora (uzeti u obzir dodaci na vanjsku projektnu temperaturu), $\vartheta$ [°C]	Koeficijent prolaza topline, k[W/m <sup>2</sup> K]	Transmisijski gubitak, $\Phi_{tr}$ [W]
Pod	200	2	20	0,487	1 753,8
Strop	200	2	40	0,244	1 854,4
Sjeverni zid	52	2	15	0,244	164,9
Južni zid	52	2	37	0,244	444,1
Istočni zid	162,5	2	38	0,244	1 427,4
Zapadni zid	162,5	2	2	0,244	0
Ukupno od komore 3					<b>5 644,6</b>

Tablica 2. 3. Transmisijsko opterećenje rashladne komore 3

Transmisijski gubitak komore 3:

$$\Phi_{tr3} = 5\,644,6 \text{ W}$$

### 2.3. TOPLINSKI GUBICI USLIJED INFILTRACIJE ZRAKA

Infiltracija se najčešće pojavljuje zbog razlike u gustoći zraka između prostorija.

Zračna masa koja ulazi jednaka je zračnoj masi koja izlazi.

Izraz za toplinski tok od zraka koji je izvana ušao u prostoriju:

$$\Phi_V = \dot{V}_V \cdot \rho_0 \cdot (h_V - h_u)$$

Gustoća zraka pri temperaturi skladištenja:

$$\rho_0 = -0,004 \cdot \vartheta_0 + 1,277 = 1,269 \text{ kg/m}^3$$

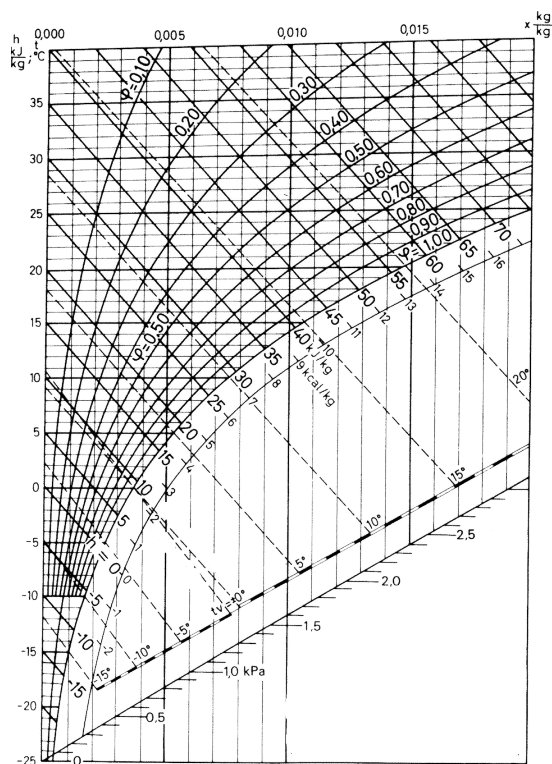
## Zrak u prostoriji:

- temperatura :  $\vartheta_o = 2^\circ\text{C}$
- relativna vlažnost:  $\varphi=90\%$
- specifična entalpija:  $h_u = 12\ 000\ \text{J/kg}$

## Infiltrirani vanjski zrak:

- temperatura:  $\vartheta_v = 35^\circ\text{C}$
- relativna vlažnost:  $\varphi=65\%$
- specifična entalpija:  $h_v = 92\ 000\ \text{J/kg}$

Specifična entalpija zraka očitana iz Mollierova dijagrama za poznatu temperaturu i relativnu vlažnost [6].



Slika 2. 5. Mollierov dijagram

$\dot{V}_V$  – volumenski protok vanjskog zraka koji je dospio u prostoriju

$$\dot{V}_V = n_i \cdot V_g$$

$n_i$  – broj izmjena zraka u 24 sata

Volumen hladene prostorije $V_g$ , m <sup>3</sup>	Broj izmjena za 24 sata, $n_i$	Volumen hladene prostorije $V_g$ , m <sup>3</sup>	Broj izmjena za 24 sata, $n_i$
5,66	44	226	5,5
14,5	26	566	3,5
56,6	12	1130	2,3
113,0	8,2	2830	1,4

Tablica 2. 4. Broj izmjena zraka u 24 sata

Za komore volumena većeg od 2830 m<sup>3</sup>, broj izmjena zraka  $n_i$  računa se prema sljedećem izrazu:

$$n_i = \frac{75}{\sqrt{V_g}}$$

	Volumen komore, $V_g$ [m <sup>3</sup> ]	Broj izmjena zraka, $n_i$ [1/(24h)]	Volumenski protok zraka, $\dot{V}_V$ [m <sup>3</sup> /s]	Gustoća zraka u prostoriji, $\rho_o$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Specifična entalpija hlađenog zraka, $h_u$ [J/kg]	Specifična entalpija vanjskog zraka, $h_u$ [J/kg]	Toplinsko opterećenje komore infiltracijom $\Phi_V$ [W]
Komora 1	1 300	2,21	0,03325	1,269	12 000	92 000	<b>3 375,8</b>
Komora 2	3 900	1,20096	0,05421	1,269	12 000	92 000	<b>5 503,4</b>
Komora 3	1 300	2,21	0,03325	1,269	12 000	92 000	<b>3 375,8</b>

Tablica 2. 5. Infiltracijski toplinski gubici rashladnih komora

Broj izmjena zraka u komorama 1 i 3 dobili procesom interpolacije između vrijednosti za dva volumena:  $V_g = 1\,130\text{ m}^3$  i  $V_g = 2\,830\text{ m}^3$ .

Infiltracijski gubici komore 1:  $\Phi_{V1} = 3\,375,8\text{ W}$

Infiltracijski gubici komore 2:  $\Phi_{V2} = 5\,503,4\text{ W}$

Infiltracijski gubici komore 3:  $\Phi_{V3} = 3\,375,8\text{ W}$

## 2.4. TOPLINSKO OPTEREĆENJE OD HLAĐENIH PROIZVODA

### 2.4.1. Toplinsko opterećenje od robe (lijekova)

$$\Phi_r = \frac{m \cdot c_p \cdot (\vartheta_{ul} - \vartheta_o)}{3\,600 \cdot \tau}$$

Specifični toplinski kapaciteti svih vrsta lijekova pretpostavljeni na istu vrijednost:

$$c_{p,l} = 3\,500 \text{ J/(kgK)}$$

Nasipna gustoća svih vrsta lijekova također zaokružena na istu vrijednost:

$$\rho_l = 300 \text{ kg/m}^3$$

Pretpostavljeno da će na jednoj paleti ukupni volumen koji će zauzeti lijekovi sa svojim pakiranjima iznositi 1,2 m x 0,8 m x 1,5 m, odnosno 1,44 m<sup>3</sup>.

Neto volumen antibiotika i sirupa za liječenje kašlja iznositi će četvrtinu od volumena predviđenog da stoji na jednoj paleti pomnoženo s brojem paleta, dok će za kapi za oči biti neto volumen biti jednak umnošku broja paleta na kojima će isti stajati i dvanaestine volumena predviđenog da stoji na paleti. Razlog tomu je taj što u kutijama u kojima dolaze kapi za oči veći dio odlazi na samu ambalažu jer je u istim mala količina kapi.

Amoksicilin:

- Volumen u jednoj boci:  $V_a = 150 \text{ mL}$
- Broj boca na jednoj paleti :  $n_a = 2\,400$
- Broj paleta:  $n_{p1} = 220$
- Ukupna masa:  $m_a = V_a \cdot n_a \cdot \rho_a \cdot n_{p1}$

Sirup za liječenje kašlja:

- Volumen u jednoj boci:  $V_s = 150 \text{ mL}$
- Broj boca na jednoj paleti :  $n_s = 2\,400$
- Broj paleta:  $n_{p2} = 660$
- Ukupna masa:  $m_s = V_s \cdot n_s \cdot \rho_s \cdot n_{p2}$

Kapi za oči:

- Volumen u jednoj boci:  $V_k = 5 \text{ mL}$

- Broj boca na jednoj paleti:  $n_k = 24\ 000$
- Broj paleta:  $n_{p3} = 220$
- Ukupna masa:  $m_k = V_k \cdot n_k \cdot \rho_k \cdot n_{p3}$

Dnevni unos mase svih lijekova iznosi 30% od ukupne navedene!

	Ukupna masa lijekova, m [kg]	Specifični toplinski kapacitet lijeka, $c_p$ [J/(kg·K)]	Ulazna temperatura proizvoda, $\vartheta_{ul}$ [°C]	Temperatura skladištenja proizvoda, $\vartheta_o$ [°C]	Potrebno vrijeme hlađenja, $\tau$ [h]	Toplinsko opterećenje od robe, $\Phi_r$ [W]
Komora 1- amoksisicilin	23 760	3 500	10	2	10	<b>5 544</b>
Komora 2- sirup za liječenje kašlja	71 280	3 500	10	2	10	<b>16 632</b>
Komora 3- kapi za oči	7 920	3 500	10	2	10	<b>1 848</b>

Tablica 2. 6. Toplinsko opterećenje od neto mase lijekova

Toplinsko opterećenje od robe u komori 1:  $\Phi_{r1} = 5\ 544\ \text{W}$

Toplinsko opterećenje od robe u komori 2:  $\Phi_{r2} = 16\ 632\ \text{W}$

Toplinsko opterećenje od robe u komori 3:  $\Phi_{r3} = 1\ 848\ \text{W}$

#### 2.4.2. Toplinsko opterećenje od pakiranja

$$\Phi_{pak} = \frac{m_p \cdot c_{pp} \cdot (\vartheta_{ul} - \vartheta_o)}{3600 \cdot \tau}$$



Slika 2. 6. Polistirenske kutije

Ambalaža amoksicilina i sirupa za liječenje kašlja: lijek će biti u staklenoj boci s čepom napravljenim od polietilena visoke gustoće (HDPE), svaka boca biti će u posebnom kartonskom pakiranju i sve skupa će se nalaziti u polistirenskim kutijama.

Ambalaža kapiju za oči: jedina razlika između prijašnje dvije navedene vrsta lijekova će biti ta što će se kapi za oči naći u bocama od polietilena visoke gustoće (HDPE).

Specifični toplinski kapacitet stakla:

$$c_{p,s} = 840 \text{ J/(kgK)}$$

Specifični toplinski kapacitet polietilena visoke gustoće:

$$c_{p,p} = 2\,250 \text{ J/(kgK)}$$

Specifični toplinski kapacitet kartona:

$$c_{p,k} = 1\,400 \text{ J/(kgK)}$$

Specifični toplinski kapacitet polistirenske kutije:

$$c_{p,p} = 1\,450 \text{ J/(kgK)}$$

Vrijeme hlađenja :  $\tau = 10 \text{ h}$

Masa stakla iznositi će 3 puta više nego masa lijeka koja je unutar istog.

$$m_s = m_{\text{lijek}} \cdot 3$$

Masa jednog polietilenskog čepa iznositi će 5 grama.

Čepovi:

$$m_{\text{HDPE-čep}} = m_{\text{HDPE-1 čep}} \cdot n_{\text{boca-ukupni}}$$

Masa kartona koji štiti jednu bocu amoksicilina, odnosno sirupa za liječenje kašlja iznositi će 10 grama, dok ona za kapi za oči težiti će 4 grama.

Masa polietilenske boce također će iznositi 1,5 puta više nego li masa kapiju za oči unutar nje.

Kartoni:

$$m_{karton} = m_{1\ karton} \cdot n_{boca-ukupni}$$

Masa polistirenskih kutija iznositi će između 2 i 5 % mase proizvoda.

	Masa stakla po komori, $m_s$ [kg]	Masa polietilena po komori, $m_{HPDE}$ [kg]	Masa kartona po komori, $m_k$ [kg]	Masa polistirena po komori, $m_s$ [kg]	Ukupno toplinsko opterećenje od pakiranja po komori, $\Phi_{pak}$ [W]
Komora 1	71 280	2 640	5 280	2059,2	<b>5 079,9</b>
Komora 2	213 840	7 920	15 840	6 177,6	<b>15 238,6</b>
Komora 3	0	28 880	5 280	2 059,2	<b>5 023,9</b>

Tablica 2. 7. Toplinsko opterećenje od ambalaže i pakiranja

Toplinsko opterećenje od pakiranja u komori 1:  $\Phi_{pak1} = 5\ 079,9\ W$

Toplinsko opterećenje od pakiranja u komori 2:  $\Phi_{pak2} = 15\ 238,6\ W$

Toplinsko opterećenje od pakiranja u komori 3:  $\Phi_{pak3} = 5\ 023,9\ W$

## 2.5. UNUTRAŠNJE TOPLINSKO OPTEREĆENJE

### 2.5.1. Toplinsko opterećenje od rasvjete

$$\Phi_{rasvj} = \frac{A \cdot q_A \cdot \tau}{24}$$

$q_A$  –intenzitet rasvjete (snaga električne rasvjete po 1 m<sup>2</sup> površine poda)

Intenzitet električne rasvjete ovisi o tipu hlađenog prostora i njegovom volumenu i može se pretpostaviti da je između vrijednosti 5 i 10 W/m<sup>2</sup>.

	Površina poda, A [m <sup>2</sup> ]	Intenzitet rasvjete, q <sub>A</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Broj sati uključenosti rasvjete po danu, τ[h]	Toplinsko opterećenje od rasvjete, Φ <sub>rasvj</sub> [W]
Komora 1	200	5	4	<b>167</b>
Komora 2	600	5	4	<b>500</b>
Komora 3	200	5	4	<b>167</b>

Tablica 2. 8. Toplinsko opterećenje od rasvjete

Toplinsko opterećenje od rasvjete u komori 1:  $\Phi_{rasvj1} = 167$  W

Toplinsko opterećenje od rasvjete u komori 2:  $\Phi_{rasvj2} = 500$  W

Toplinsko opterećenje od rasvjete u komori 3:  $\Phi_{rasvj3} = 167$  W

### 2.5.2. Toplinsko opterećenje od ljudi

$$\Phi_{lj} = \frac{q_p \cdot n_p \cdot \tau}{24}$$

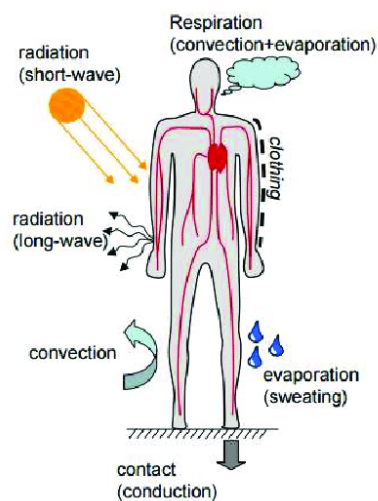
Toplinsko opterećenje osobe:

$$q_p = 272 - 6 \cdot \vartheta_o = 260 \text{ W/(osoba)}$$

-u svakoj komori vrijeme će provoditi po 3 osobe

Vrijeme provedeno u hladnom prostoru:

$$\tau = 4 \text{ h}$$



Slika 2. 7. Odavanje toplinskog toka s ljudskog tijela



Iznos toplinskog toka po komori:  $\Phi_{lj} = 260 \text{ W}$

Toplinsko opterećenje od ljudi u komori 1:  $\Phi_{lj1} = 130 \text{ W}$

Toplinsko opterećenje od ljudi u komori 2:  $\Phi_{lj2} = 130 \text{ W}$

Toplinsko opterećenje od ljudi u komori 3:  $\Phi_{lj3} = 130 \text{ W}$

### 2.5.3. TOPLINSKO OPTEREĆENJE OD ELEKTROMOTORA HLADNJAKA

$$\Phi_{EM} = f \cdot \sum \Phi_i$$

Faktor za procjenu rada ventilatora za skladištenje u hladnom:

$$f = 0,05$$

$\Phi_i$  – suma svih toplinskih gubitaka komore

	Suma toplinskih opterećenja za pojedinu komoru, $\Phi_i$ [W]	Toplinsko opterećenje uslijed rada elektromotora hladnjaka, $\Phi_{EM}$ [W]
Komora 1	19 940,56	<b>997</b>
Komora 2	50 655,56	<b>2 532,8</b>
Komora 3	16 022,21	<b>801,1</b>

Tablica 2. 9. Toplinsko opterećenje uslijed rada elektromotora hladnjaka

Toplinsko opterećenje od elektromotora u komori 1:  $\Phi_{EM1} = 997 \text{ W}$

Toplinsko opterećenje od elektromotora u komori 2:  $\Phi_{EM2} = 2 532,8 \text{ W}$

Toplinsko opterećenje od elektromotora u komori 3:  $\Phi_{EM3} = 801,1 \text{ W}$

Toplinski tok uslijed stvaranja inja na hladnjacima zanemarivog je mala iznosa (po komora manja od 0,002 W).

### 2.6. UKUPNO TOPLINSKO OPTEREĆENJE

Komora 1	Komora 2	Komora 3	
<b>20 937,6</b>	<b>53 188,3</b>	<b>16 823,3</b>	<b>W</b>

Tablica 2. 10. Ukupno toplinsko opterećenje rashladnih komora

Rashladno opterećenje komore 1:  $\Phi_{k1} = 20\,937,6\text{ W}$

Rashladno opterećenje komore 2:  $\Phi_{k2} = 53\,188,3\text{ W}$

Rashladno opterećenje komore 3:  $\Phi_{k3} = 16\,823,3\text{ W}$

**Ukupno rashladno opterećenje svih komora zajedno:  $\Phi_k = 90\,949,2\text{ W}$**

### 3. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

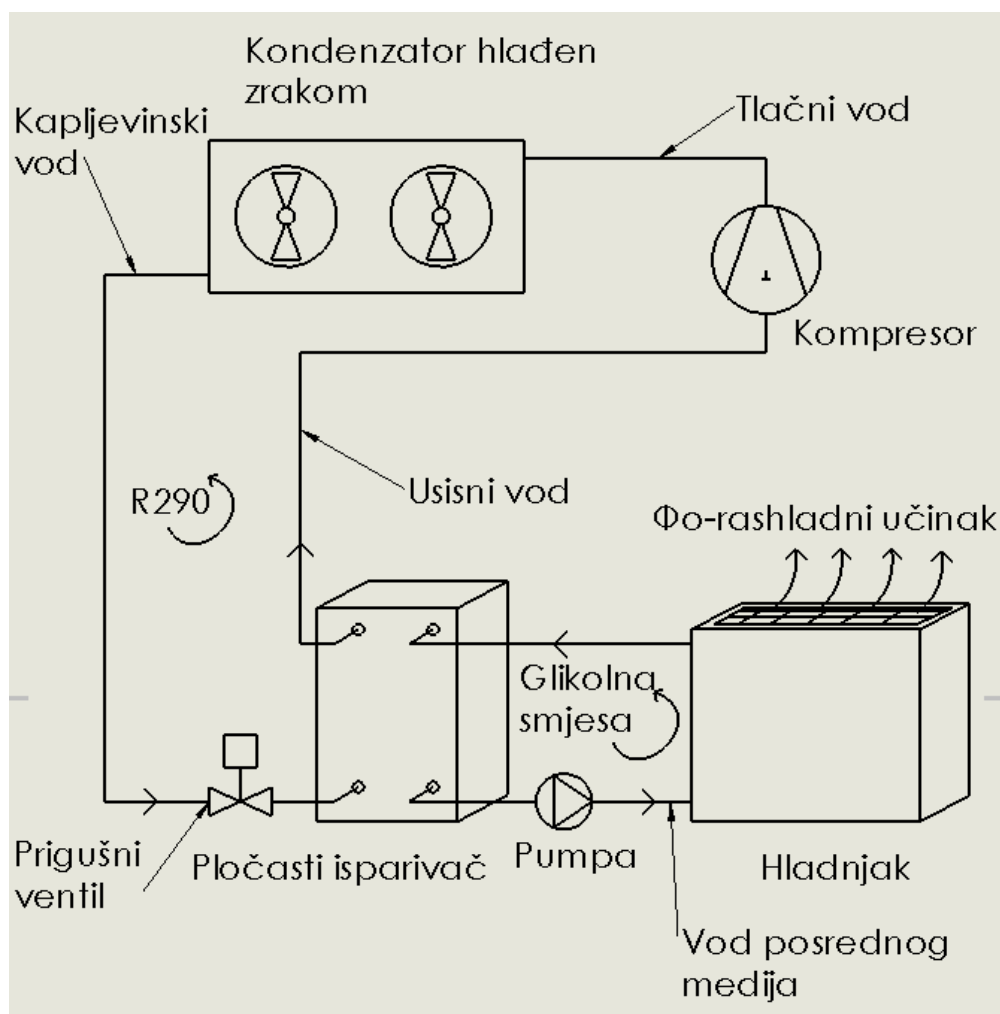
#### 3.1. LJEVOKRETNI KRUŽNI PROCES (R290)

Sustav hlađenja je indirektna (posredna) gdje propan (R290) kao radna tvar u strojnici hladi glikolnu smjesu koja u rashladnim komorama hladi zrak.

Izbjegavamo sustave u kojima propan izravno hladi zrak u rashladnim komorama zbog sigurnosnih razloga, točnije zbog propanove zapaljivosti i eksplozivnosti i sustav obavezno mora sadržavati senzore koji će prepoznati curenje propana. Propan nije otrovan, ali isti istiskuje kisik i otežava disanje u prostoriji.

Temperatura hlađenja:  $\vartheta_0 = 2^\circ\text{C}$

Temperaturni režim glikolne smjese:  $-5/-1^\circ\text{C}$



Slika 3. 1. Shema indirektnog sustava hlađenja

Temperatura isparavanja:  $\vartheta_i = -9^\circ\text{C}$

Tlak isparavanja:  $p_i = 3,54 \text{ bar}$

Temperatura kondenzacije:  $\vartheta_k = 45^\circ\text{C}$

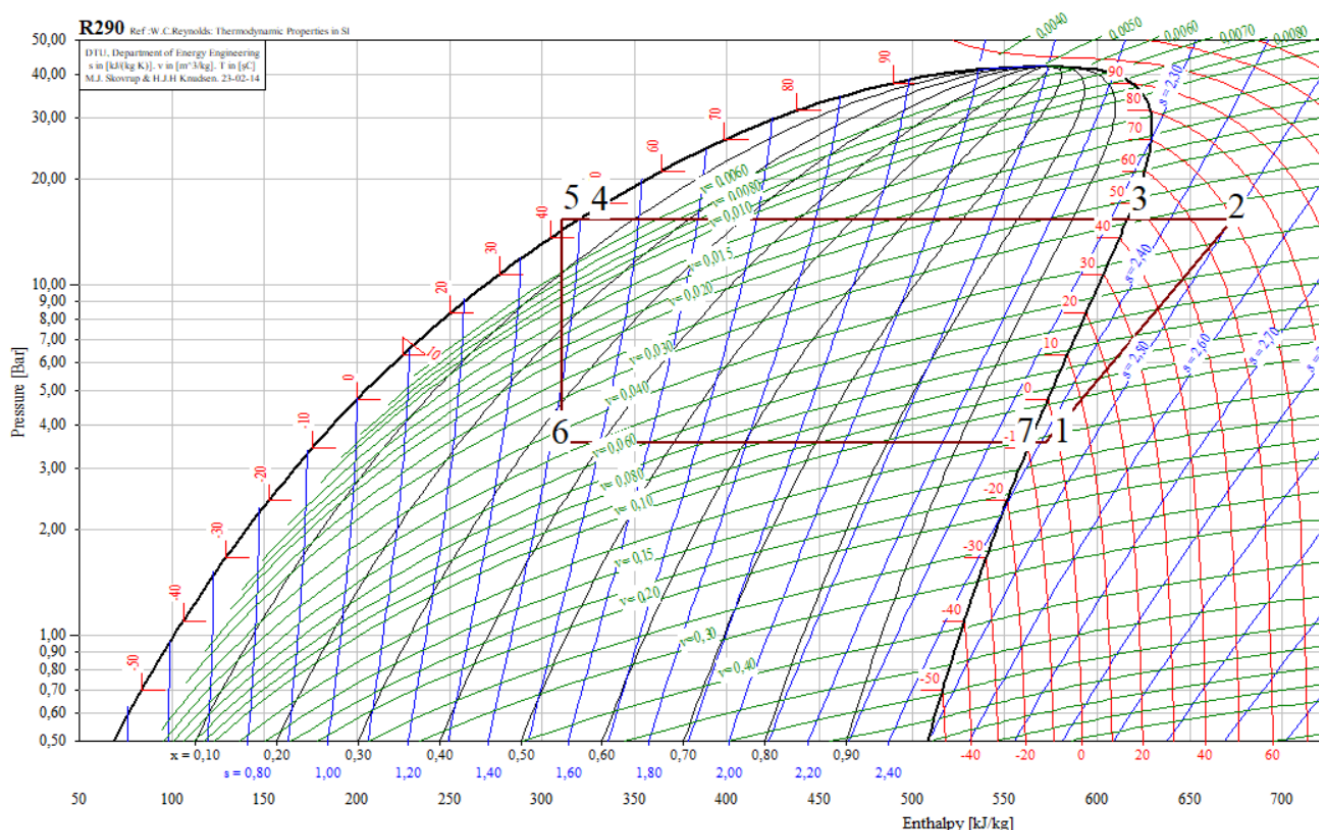
Tlak kondenzacije:  $p_k = 15,315 \text{ bar}$

Pregrijanje radne tvari:  $\Delta\vartheta_{\text{pregr}} = 5^\circ\text{C}$

Pothlađenje radne tvari:  $\Delta\vartheta_{\text{pohl}} = 3^\circ\text{C}$

Izentropski stupanj djelovanja kompresora:  $\eta_{is} = 0,7$

$$\eta_{is} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$



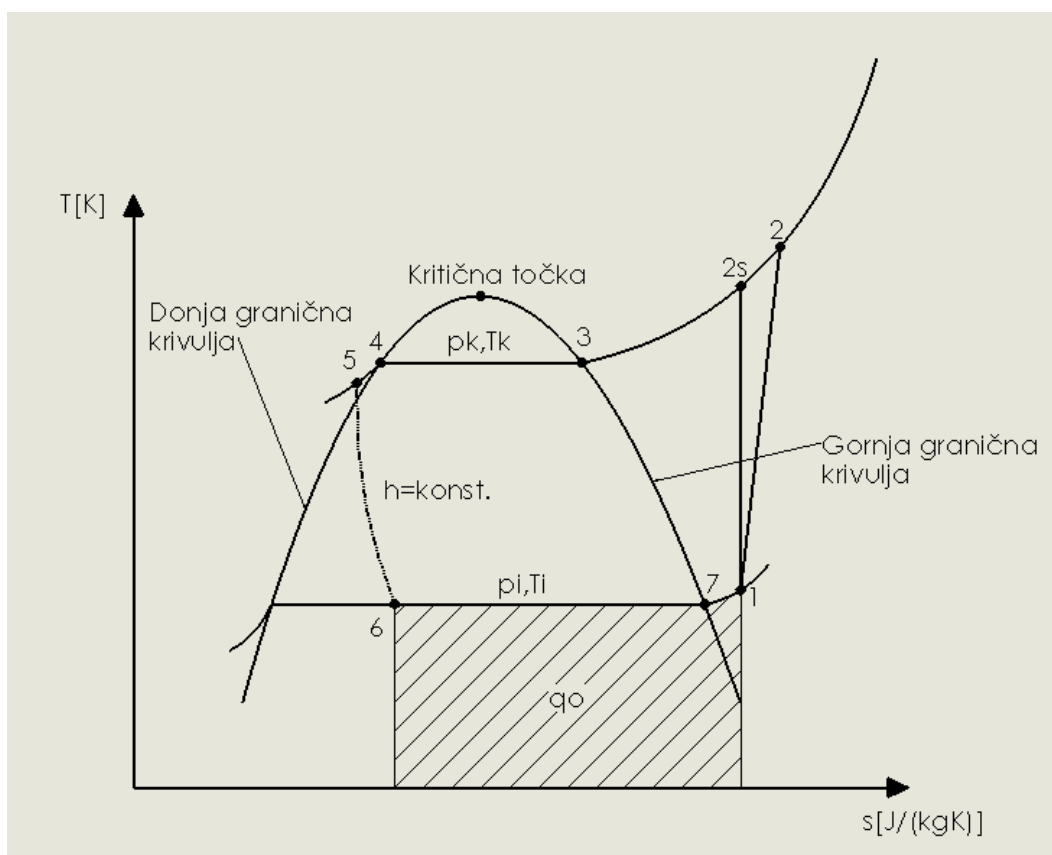
Slika 3. 2. Log(p)-h dijagram s karakterističnim točkama procesa

Log(p)-h dijagram konstruiran pomoću Coolpack programa [7].

	Temperatura, $\vartheta[^\circ\text{C}]$	Tlak, $p[\text{bar}]$	Specifična entalpija, $h[\text{J/kg}]$	Specifična entropija, $s[\text{J}/(\text{kgK})]$
1	-4	3,54	572 125	2 410,7
2s	56,2	15,315	642 513	2 410,7

2	69,41	15,315	672 679
3	45	15,315	616 150
4	45	15,315	319 270
5	42	15,315	310 648
6	-9	3,54	310 648
7	-9	3,54	563 590

Tablica 3. 1. Karakteristične točke kružnog procesa



Slika 3. 3. T-s dijagram s karakterističnim točkama procesa

U strojarnici će biti dva isparivača, oba jednaka rashladna učina:

$$\Phi_i = \frac{\Phi_k}{2}$$

$$\Phi_i = 45\,474,6 \text{ W}$$

Specifični rashladni učin:

$$q_i = h_1 - h_6 = 261\,477 \text{ J/kg}$$

Protočna masa radne tvari kroz pojedini rashladni krug:

$$q_{m,RT} = \frac{\Phi_i}{q_i} = 0,1739 \text{ kg/s}$$

Specifični rad kompresora:

$$w = h_2 - h_1 = 100\,554 \text{ J/kg}$$

Snaga kompresora:

$$P = w \cdot q_{m,RT} = 17\,487,8 \text{ W}$$

Specifični učin kondenzatora:

$$q_k = h_2 - h_5 = 362\,031 \text{ J/kg}$$

Toplinski učinak kondenzatora:

$$\Phi = q \cdot q_{m,RT} = 62\,962,4 \text{ W}$$

Ispunjen je uvjet:  $\Phi = \Phi_i + P$

Faktor hlađenja:

$$\varepsilon_o = \frac{\Phi_i}{P} = 2,6$$

### 3.2. PRORAČUN KONDENZATORA

- kondenzator služi kao izmjenjivač topline na kojem će se kondenzirati propan, a zagrijavati zrak [8]

- ideja je izračunati osnovne dimenzije izmjenjivača (duljina, širina, visina), koeficijente prolaza topline na svim potrebnim presjecima, površine izmjene topline i pad tlaka na strani zraka [16]

Temperatura radne tvari (propana) na ulazu u kondenzator:  $\vartheta_2 = 69,41 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura kondenzacije:  $\vartheta_3 = \vartheta_4 = \vartheta_k = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura radne tvari (propana) na izlazu iz kondenzatora:  $\vartheta_5 = 42 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura zraka na ulazu u kondenzator:  $\vartheta_{a1} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura zraka na izlazu iz kondenzatora:  $\vartheta_{a2} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

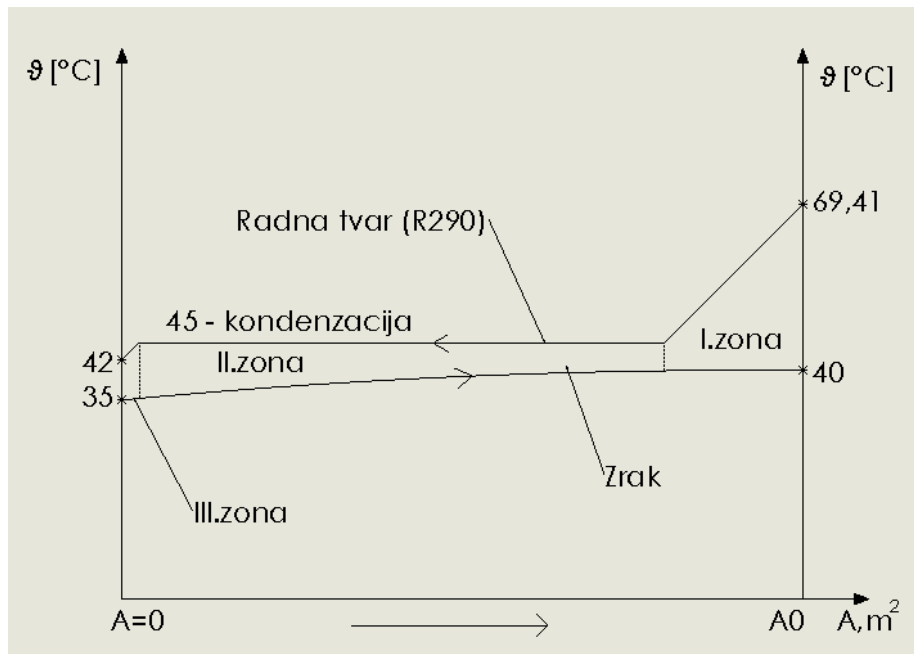
Zrak će se na kondenzatoru zagrijati za  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

U jednom rashladnom krugu radna tvar otići ide u dva kondenzatora, svaki učinka polovice ukupnog izračunatog za jedan rashladni krug:  $\Phi_{1k} = 31\,481,2 \text{ W}$ .

Kondenzatori su V izvedbe.



Slika 3. 4. Zrakom hlađeni kondenzator



Slika 3. 5. Ovisnost temperature medija o presjeku kondenzatora ( $\theta$ -A dijagram)

### 3.2.1. Termodinamička svojstva okolišnjeg zraka

Sva fizikalna svojstva zraka uzet ćemo s obzirom na njegovu srednju temperaturu na kondenzatoru:

$$\vartheta_{a,sr} = \frac{\vartheta_{a1} + \vartheta_{a2}}{2} = 37,5^{\circ}\text{C}$$

Fizikalna svojstva zraka za navedenu temperaturu pri atmosferskom tlaku (1 bar) [9]:

- Gustoća:  $\rho_a = 1,14 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet:  $c_{p,a} = 1\,006,82 \text{ J/(kgK)}$
- Toplinska provodnost:  $\lambda_a = 0,0272 \text{ W/(mK)}$
- Dinamička viskoznost:  $\eta_a = 1,906 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$
- Kinematička viskoznost:  $\nu_a = \frac{\eta_a}{\rho_a} = 1,679 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Maseni protok zraka:

$$q_{m,a} = \frac{\Phi_{1k}}{c_{p,a} \cdot (\vartheta_{a2} - \vartheta_{a1})} = 6,26 \text{ kg/s}$$

Volumni protok zraka:

$$q_{v,a} = \frac{q_{m,a}}{\rho_a} = 5,51 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3.2.2. Hlađenje radne tvari-podjela na zone

Hlađenje radne tvari podijeliti ćemo na tri zone:

- 1.zona: hlađenje radne tvari od temperature pri kojoj ulazi u kondenzator ( $69,41^{\circ}\text{C}$ ) do temperature kondenzacije, točnije do stanja suhozasićene pare
- 2.zona: kondenzacija radne tvari pri temperaturi od  $45^{\circ}\text{C}$ , od suhozasićene pare do vrele kapljevine
- 3.zona: pothlađivanje radne tvari od stanja vrele kapljevine pri temperaturi kondenzacije do stanja pothlađene kapljevine temperature  $42^{\circ}\text{C}$

Izračun toplinskog toka provodimo zbog toga da nađemo točni presjek kondenzatora pri kojem jedna zona prestaje, a druga počinje kako bi za svaku zonu izračunali njezinu srednju logaritamsku razliku temperatura, koeficijent prolaza topline i površinu izmjene topline.



$$q_{m,R290-1k} = \frac{q_{m,R290}}{2} = 0,087 \frac{kg}{s}$$

1.zona:

$$q_{kond,1.zona} = h_2 - h_3 = 56\,029 \text{ J/kg}$$

$$\Phi_{kond,1.zona} = q_{kond,1.zona} \cdot q_{m,R290-1k} = 4\,915,6 \text{ W}$$

2.zona:

$$q_{kond,2.zona} = h_3 - h_4 = 296\,880 \text{ J/kg}$$

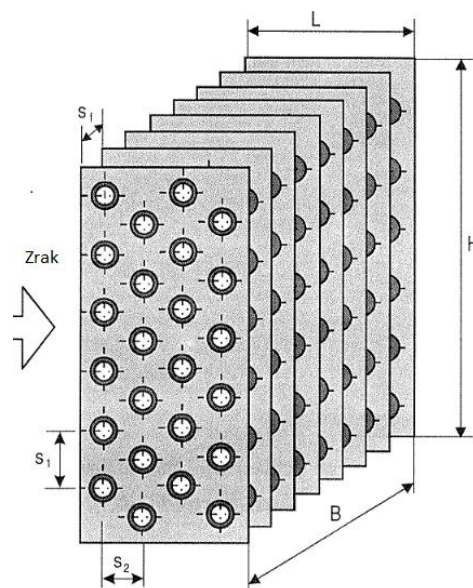
$$\Phi_{kond,2.zona} = q_{kond,2.zona} \cdot q_{m,R290-1k} = 25\,815,9 \text{ W}$$

3.zona:

$$q_{kond,3.zona} = h_4 - h_5 = 8\,622 \text{ J/kg}$$

$$\Phi_{kond,3.zona} = q_{kond,3.zona} \cdot q_{m,R290-1k} = 749,7 \text{ W}$$

### 3.2.3. Konstrukcijski parametri



Slika 3. 6. Osnovni konstrukcijski oblik kondenzatora

Cijevi su izrađene iz bakra: Cu 10 x 1 mm [10].

Vanjski promjer cijevi:  $d_e = 10 \text{ mm}$

Unutarnji promjer cijevi:  $d_i = 8 \text{ mm}$

Vertikalni razmak između cijevi:  $s_1 = 25 \text{ mm}$

Horizontalni razmak između cijevi:  $s_2 = 25 \text{ mm}$

Razmak između lamela:  $s_f = 2,5 \text{ mm}$

Debljina lima lamela:  $f_t = 0,15 \text{ mm}$

Broj redova cijevi:  $i_r = 4$

Broj cijevi u jednom redu:  $i_t = 40$

Broj ulaznih otvora cijevi:  $i_{in} = 40$

Broj prolaza radne tvari:  $n_{prolaz} = \frac{i_t \cdot i_r}{i_{in}} = 4$

Vrijednosti  $A_{mt}$ ,  $A_f$ ,  $A_{e1}$  i  $A_{i1}$  izračunate su po 1 metru duljine cijevi.

Vanjska površina cijevi između limova:

$$A_{mt} = \pi \cdot d_e \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = 0,0295 \frac{m^2}{m}$$

Površina limova:

$$A_f = 2 \cdot \left(s_1 \cdot s_2 - \frac{\pi \cdot d_e^2}{4}\right) \cdot \frac{1}{s_f} = 0,437 \frac{m^2}{m}$$

Vanjska površina izmjene topline po jednom metru dužine cijevi:

$$A_{e1} = A_{mt} + A_f = 0,467 \frac{m^2}{m}$$

Unutarnja površina izmjene topline po jednom metru dužine cijevi:

$$A_{i1} = \pi \cdot d_i = 0,025 \frac{m^2}{m}$$

Omjer između vanjske i unutarnje površine izmjene topline:

$$\beta = \frac{A_{e1}}{A_{i1}} = 18,57$$

**Visina izmjenjivača topline:**

$$H = i_t \cdot s_1 = 1 \text{ m}$$

**Dubina izmjenjivača topline:**

$$L = i_r \cdot s_2 = 0,1 \text{ m}$$

Bakrene cijevi:



Slika 3. 7. Bakrene cijevi

- Toplinska provodnost:  $\lambda_{Cu} = 386 \text{ W/(mK)}$
- Debljina stijenke cijevi:  $\delta_{Cu} = \frac{d_e - d_i}{2} = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$

Faktor onečišćenja na strani zraka na stijenci cijevi u odnosu na srednji promjer cijevi:

$$R_{Cu} = \frac{\delta_{Cu}}{\lambda_{Cu}} = 2,591 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Faktor onečišćenja na strani zraka od ostalih nečistoća izvan cijevi:

$$R_{\text{ost}} = 0,0003 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

### 3.2.4. Srednja logaritamska razlika temperatura

Potrebne temperature zraka izračunati ćemo iz toplinskih opterećenja svake pojedine zone.

$$\Phi_{k,1.zona} = 4\,915,6 \text{ W}$$

$$\Phi_{k,2.zona} = 25\,815,8 \text{ W}$$

$$\Phi_{k,3.zona} = 749,7 \text{ W}$$

Temperatura zraka na granici prve i druge zone:

$$\vartheta_{a-1} = \vartheta_{a2} - \frac{\Phi_{k,1.zona}}{q_{m,a} \cdot c_{p,a}} = 39,22^\circ\text{C}$$

Temperatura zraka na granici druge i treće zone:

$$\vartheta_{a-II.} = \vartheta_{a-I.} - \frac{\Phi_{k,2.zona}}{q_{m,a} \cdot c_{p,a}} = 35,12^{\circ}\text{C}$$

Provjera:

Temperatura zraka na samom izlazu mora biti 35°C:

$$\vartheta_{a1.} = \vartheta_{a-II.} - \frac{\Phi_{k,3.zona}}{q_{m,a} \cdot c_{p,a}} = 35^{\circ}\text{C}$$

Dokazano da vrijedi!

Srednja logaritamska razlika temperatura 1.zone:

$$\Delta\vartheta_{mI} = \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_{a2.}) - (\vartheta_k - \vartheta_{a-I.})}{\ln\left(\frac{(\vartheta_2 - \vartheta_{a2.})}{(\vartheta_k - \vartheta_{a-I.})}\right)} = 14,56^{\circ}\text{C}$$

Srednja logaritamska razlika temperatura 2.zone:

$$\Delta\vartheta_{mII} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{a-II.}) - (\vartheta_k - \vartheta_{a-I.})}{\ln\left(\frac{(\vartheta_k - \vartheta_{a-II.})}{(\vartheta_k - \vartheta_{a-I.})}\right)} = 7,65^{\circ}\text{C}$$

Srednja logaritamska razlika temperatura 3.zone:

$$\Delta\vartheta_{mIII} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{a-II.}) - (\vartheta_5 - \vartheta_{a1.})}{\ln\left(\frac{(\vartheta_k - \vartheta_{a-II.})}{(\vartheta_5 - \vartheta_{a1.})}\right)} = 8,36^{\circ}\text{C}$$

### 3.2.5. Koeficijent prolaza i površina izmjene topline

Pretpostavljena gustoća toplinskog toka:

$$q_{i,tr} = 4\,568,89 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Unutarnja površina izmjene topline:

$$A_i = \frac{\Phi_1}{q_{i,tr}} = 6,89 \text{ m}^2$$

Ukupna dužina cijevi:

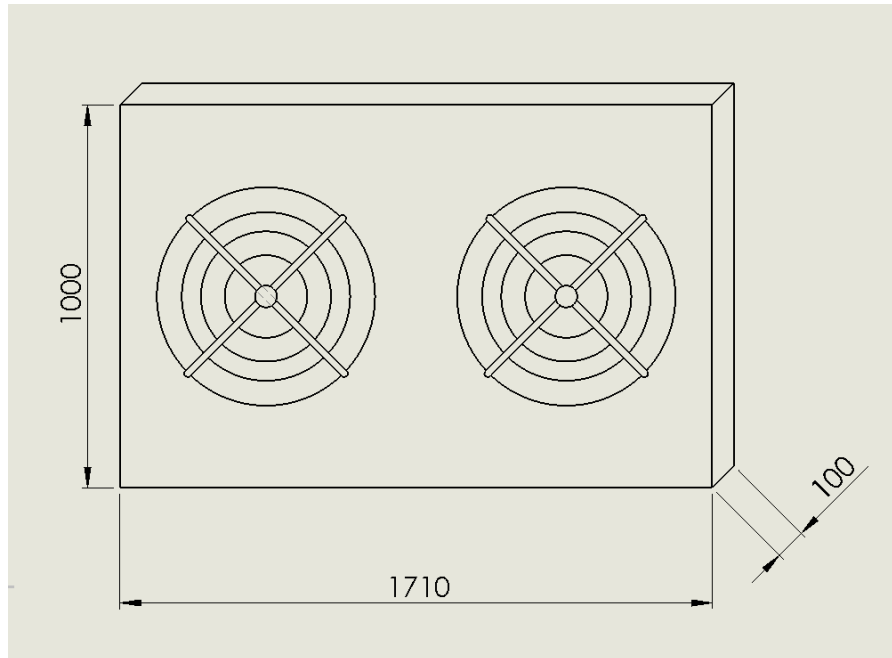
$$L_{uk} = \frac{A_i}{A_{i1}} = 274,32 \text{ m}$$

Dužina cijevi u jednom redu:

$$L_1 = \frac{L_{uk}}{i_r} = 68,58 \text{ m}$$

#### **Potrebna širina kondenzatora:**

$$B = \frac{L_1}{i_t} = 1,71 \text{ m}$$



Slika 3. 8. Dimenzije zrakom hlađena kondenzatora

Najmanja površina strujanja zraka između cijevi i lamela:

$$A_z = L_1 \cdot (s_1 - d_e) \cdot \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = 0,97 \text{ m}^2$$

Brzina strujanja zraka na najužem presjeku:

$$w_z = \frac{q_{v,a}}{A_z} = 5,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Koeficijent prijelaza topline na strani zraka:**

Ekvivalentni promjer:

$$d_{ekv} = \frac{2 \cdot (s_1 - d_e) \cdot (s_f - f_t)}{(s_1 - d_e + s_f - f_t)} = 4,06 \text{ mm}$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{w_{us} \cdot d_{ekv}}{\nu_a} = 1\,379,52$$

Daljni proračun vrijedi za Reynoldsov broj između vrijednosti 500 i 10 000.

$$\frac{L}{d_{ekv}} = 24,6$$

Izračun n koeficijenta:

$$n = 0,45 + 0,0066 \cdot \frac{L}{d_{ekv}} = 0,61$$

Izračun m koeficijenta:

$$m = -0,28 + 0,08 \cdot \left(\frac{Re}{1000}\right) = -0,17$$

$\frac{L}{d_{ekv}}$	5	10	20	30	40	50
$C_{1A}$	0,412	0,326	0,201	0,125	0,08	0,0475

Tablica 3. 2. Ovisnost  $C_{1A}$  o  $\frac{L}{d_{ekv}}$

$C_{1A}$  (dobiveno postupkom interpolacije iz tablice 3.2.) = 0,16

$$C_{1B} = 1,36 - 0,24 \cdot \left(\frac{Re}{1000}\right) = 1,03$$

$$C_1 = C_{1A} \cdot C_{1B} = 0,17$$

Nusseltov broj:

$$Nu = C_1 \cdot Re^n \cdot \left(\frac{L}{d_{ekv}}\right)^m = 8,06$$

Za šahovski raspored izračunati koeficijent prijelaza topline na strani zraka uvećavamo za 10%:

$$\alpha_{a,st} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{d_{ekv}} \cdot 1,1 = 59,32 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Koeficijent otpora na kontaktu između cijevi i lamela:

$$C_k = 0,99$$

Toplinska provodnost aluminija:

$$\lambda_f = 209 \text{ W/(mK)}$$

Izračun  $m_f$  koeficijenta:

$$m_f = \sqrt{\frac{\alpha_{a,st} \cdot 2}{f_t \cdot \lambda_f}} = 61,517 \frac{1}{m}$$

Izračun  $B_f$  koeficijenta:

$$B_f = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2}\right)^2 + s_2^2} = 27,95 \text{ mm}$$

Izračun  $\rho_f$  koeficijenta (vrijedi za šahovski raspored cijevi i za  $\frac{s_1}{2} < s_2$ ):

$$\rho_f = 1,27 \cdot \left(\frac{B_f}{d_e}\right) \cdot \sqrt{\frac{A_f}{B_f}} - 0,3 = 2,737$$

Izvedena visina lamela:

$$h_f = 0,5 \cdot d_e \cdot (\rho_f - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln(\rho_f)) = 11,74 \text{ mm}$$

Efikasnost lamela:

$$E = \frac{th(m_f \cdot h_f)}{(m_f \cdot h_f)} = 0,856$$

Koeficijent prijelaza topline zraka sveden na unutrašnji promjer cijevi:

$$\alpha_{ai} = \frac{\alpha_a \cdot (A_f \cdot E \cdot C_k + A_{mt})}{A_{i1}} = 944,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari – propana:**

### **Izona:**

**Termodinamička svojstva propana u 1.zoni pri osrednjennoj temperaturi 57,2°C [11]:**

- Gustoća:  $\rho_{R290-I} = 31,18 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet:  $c_{p,R290-I} = 2\,247,47 \text{ J/(kgK)}$
- Toplinska provodnost:  $\lambda_{R290-I} = 0,0237 \text{ W/(mK)}$
- Dinamička viskoznost:  $\eta_{R290-I} = 9,42 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$
- Kinematička viskoznost:  $\nu_{R290-I} = \frac{\eta_{R290-I}}{\rho_{R290-I}} = 3,02 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Volumenski protok radne tvari:

$$q_{v,R290-I} = \frac{q_{m,R290-Ik}}{\rho_{R290-I}} = 0,0028 \frac{m^3}{s}$$

Brzina strujanja radne tvari u cijevima:

$$w_I = \frac{q_{v,R290-I}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}} = 1,39 \frac{m}{s}$$

Reynolds-ov broj:

$$Re = \frac{w_L \cdot d_i}{\nu_{R-290-I}} = 36\,819 > 10\,000 - \text{riječ o turbulentnom strujanju!}$$

Koeficijent  $B_1$ :

$$B_1 = 0,023 \cdot \rho_{R290-I}^{0,8} \cdot c_{p,R290-I}^{0,4} \cdot \lambda_{R290-I}^{0,6} \cdot \eta_{R290-I}^{-0,4} = 85,57$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari za turbulentno strujanje:

$$\alpha_{R290-I} = B_1 \cdot \frac{w_L^{0,8}}{d_i^{0,2}} = 292,54 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Toplinska otpornost uslijed stvaranja naslaga na strani radne tvari:

$$R_i = 0 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

Srednji promjer cijevi:

$$d_m = \frac{d_i + d_e}{2} = 0,09 \text{ m}$$

Koeficijent prolaza topline (sveden na unutrašnju površinu za izmjenu topline) [12]:

$$k_{iI} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + \frac{R_{ost}}{\beta} + R_{Cu} \cdot \frac{d_i}{d_m} + R_i + \frac{1}{\alpha_{R290-I}}} = 222,48 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Gustoća toplinskog toka u zoni I:

$$q_{i,I} = k_{iI} \cdot \Delta\vartheta_{mI} = 3\,271,61 \frac{W}{m^2}$$

Potrebna površina prijenosa topline u prvoj zoni:

$$A_{iI} = \frac{\Phi_{k,1.zona}}{q_{i,I}} = 1,5 \text{ m}^2$$

## **II.zona:**

**Termodinamička svojstva propana u 2.zoni – suhozasićena para [13]:**

$$\vartheta_{R290-II.-szp} = 45^\circ\text{C}$$

- Gustoća:  $\rho_{R290-II.-szp} = 34,15 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet:  $c_{p,R290-II.-szp} = 2\,371,35 \text{ J/(kgK)}$
- Toplinska provodnost:  $\lambda_{R290-II.-szp} = 0,022 \text{ W/(mK)}$
- Dinamička viskoznost:  $\eta_{R290-II.-szp} = 9,13 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$
- Kinematička viskoznost:  $\nu_{R290-II.-szp} = \frac{\eta_{R290-II.-szp}}{\rho_{R290-II.-szp}} = 2,68 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

**Termodinamička svojstva propana u 2.zoni – vrela kapljevina:**



$$\vartheta_{R290-II.-vk} = 45^{\circ}\text{C}$$

- Gustoća:  $\rho_{R290-II.-vk} = 458,4 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet:  $c_{p,R290-II.-vk} = 2\,994,58 \text{ J/(kgK)}$
- Toplinska provodnost:  $\lambda_{R290-II.-vk} = 0,0849 \text{ W/(mK)}$
- Dinamička viskoznost:  $\eta_{R290-II.-vk} = 7,84 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$
- Kinematička viskoznost:  $\nu_{R290-II.-vk} = \frac{\eta_{R290-II.-vk}}{\rho_{R290-II.-vk}} = 1,71 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Gustoća masenog toka radne tvari:

$$G = \frac{q_{m,R290-1k}}{i_{in} \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}} = 43,35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Reynolds-ov broj za zasićeni medij:

$$Re_{II.} = \frac{G \cdot d_i}{\eta_{R290-II.-vk}} = 4\,423,6$$

Prandtl-ov broj:

$$Pr_{II.} = \frac{c_{p,R290-II.-vk} \cdot \eta_{R290-II.-vk}}{\lambda_{R290-II.-vk}} = 2,77$$

Pošto je:

$$1) \text{ Re}_{II.} < 5000$$

$$2) \text{ Re}_{II.} \cdot \left( \frac{\rho_{R290-II.-vk}}{\rho_{R290-II.-szp}} \right)^{0,5} = 16\,208,2 < 20\,000$$

Proračun nastavljamo s idućim jednažbama:

Nusselt-ov broj:

$$Nu_{II.} = 13, \cdot Pr_{II.}^{\frac{1}{3}} \cdot \left[ \frac{h_3 - h_4}{c_{p,R290-vk} \cdot \Delta\vartheta_{mII}} \right]^{\frac{1}{6}} \cdot \left( \text{Re}_{II.} \cdot \left( \frac{\rho_{R290-II.-vk}}{\rho_{R290-II.-szp}} \right)^{0,5} \right)^{0,2} = 208,3$$

Koeficijent prijelaza topline na strani propana:

$$\alpha_{R290-II.} = \frac{Nu_{II.} \cdot \lambda_{R290-II.-vk}}{d_i} = 2\,209,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Koeficijent prolaza topline (sveden na unutrašnju površinu za izmjenu topline):

$$k_{i,II.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + \frac{R_{ost}}{\beta} + R_{Cu} \cdot \frac{d_i}{d_m} + R_i + \frac{1}{\alpha_{R290-II.}}} = 654,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Gustoća toplinskog toka u zoni II:

$$q_{i,II} = k_{i,II} \cdot \Delta\vartheta_{mII} = 5\,000,05 \frac{W}{m^2}$$

Potrebna površina prijenosa topline u zoni II:

$$A_{III.} = \frac{\Phi_{k,2.zona}}{q_{i,II.}} = 5,17 \text{ m}^2$$

### **III.zona:**

**Termodinamička svojstva propana u 3.zoni pri osrednjoj temperaturi 43,5°C:**

- Gustoća:  $\rho_{R290-III.} = 461,41 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet:  $c_{p,R290-III.} = 2\,965,27 \text{ J/(kgK)}$
- Toplinska provodnost:  $\lambda_{R290-III.} = 0,09 \text{ W/(mK)}$
- Dinamička viskoznost:  $\eta_{R290-III.} = 7,98 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$
- Kinematička viskoznost:  $\nu_{R290-III.} = \frac{\eta_{R290-III.}}{\rho_{R290-III.}} = 1,73 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Volumenski protok radne tvari:

$$q_{v,R290-III.} = \frac{q_{m,R290-1k}}{\rho_{R290-III.}} = 0,000189 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Brzina strujanja radne tvari u cijevima:

$$w_{III.} = \frac{q_{v,R290-III.}}{i_{in} \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}} = 0,09 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynolds-ov broj:

$$Re_{III.} = \frac{w_{III.} \cdot d_i}{\nu_{R-290-III.}} = 4\,343 < 10\,000$$

Vrijednost Reynoldsova broja jako slična onoj u drugoj zoni. Razlog tomu su međusobno slična termodinamička svojstva propana, jer u drugoj zoni uzimamo svojstva vrele kapljevine propana.

Koeficijent  $B_1$ :

$$B_1 = 0,023 \cdot \rho_{R290-III.}^{0,8} \cdot c_{p,R290-III.}^{0,4} \cdot \lambda_{R290-III.}^{0,6} \cdot \eta_{R290-III.}^{-0,4} = 759,18$$

Dodatak jer je Reynoldsov broj manji od 10 000:

$$f_w = -0,0101183 \cdot \left(\frac{Re_{III.}}{1000}\right)^2 + 0,18978 \cdot \left(\frac{Re_{III.}}{1000}\right) + 0,106247 = 0,74$$

Koeficijent prijelaza topline na strani rashladne tvari:

$$\alpha_{R290-III.} = f_w \cdot B_1 \cdot \frac{w_{III.}^{0,8}}{d_i^{0,2}} = 222,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Koeficijent prolaza topline (sveden na unutrašnju površinu za izmjenu topline):

$$k_{i,III.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + \frac{R_{ost}}{\beta} + R_{Cu} \cdot \frac{d_i}{d_m} + R_i + \frac{1}{\alpha_{R290-III.}}} = 179,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Gustoća toplinskog toka u zoni III:

$$q_{i,III.} = k_{i,III.} \cdot \Delta\vartheta_{mIII} = 2\,638,5 \frac{W}{m^2}$$

Potrebna površina prijenosa topline u trećoj zoni:

$$A_{iIII.} = \frac{\Phi_{k,3.zona}}{q_{iIII.}} = 0,29 \text{ m}^2$$

Ukupna površina za prijenos topline:

$$A_i = A_{iI.} + A_{iII.} + A_{iIII.} = 6,96 \text{ m}^2$$

Gustoća toplinskog toka (na unutarnjoj površini cijevi):

$$q_{i,tr} = \frac{\Phi_{1k}}{A_i} = 4\,528,4 \frac{W}{m^2}$$

-dovoljno slično početnoj pretpostavci

-cjelokupni proračun vođen procesom iteracije u programu Microsoft Excel

Brzina struje zraka na ulazu u kondenzator:

$$w_f = \frac{q_{v,a}}{B \cdot H} = 3,21 \frac{m}{s}$$

**Pad tlaka zraka:**

$$\Delta p_a = 0,233 \cdot i_r \cdot \left[ \frac{s_2}{(s_f - f_t)} \right]^{0,42} \cdot (w_z \cdot \rho_a)^{1,8} = 72,52 \text{ Pa}$$

### 3.3. DIMENZIONIRANJE CJEVOVODA I ODABIR ARMATURE

Ideja je proračunati promjer svih potrebnih cijevi i odabrati one standardnih dimenzija. Pri tom proračunu potreban će nam biti maseni protok medija koji struji kroz cijevi, gustoća i preporučena brzina istog medija.

#### 3.3.1. Usisni vod

Maseni protok propana:  $q_{m,R290} = 0,174 \text{ kg/s}$

Preporučena brzina strujanja propana u usisnom vodu:  $w_u = 10 \text{ m/s}$

Gustoća propana:  $\rho_u = 7,659 \text{ kg/s}$

Jednadžba za maseni protok radne tvari:  $q_{m,R290} = A_u \cdot w_u \cdot \rho_u$

Površina poprečnog presjeka usisnog voda:  $A_u = 0,00227 \text{ m}^2$

Promjer usisnog voda izračunat iz površine poprečnog presjeka:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot A_u}{\pi}} = 0,05377 \text{ m}$$

Odabrana bakrena cijev: Cu 54 x 2 mm.

#### 3.3.2. Tlačni vod

Maseni protok propana:  $q_{m,R290} = 0,1174 \text{ kg/s}$

Preporučena brzina strujanja propana u usisnom vodu:  $w_t = 12,5 \text{ m/s}$

Gustoća propana:  $\rho_t = 29,034 \text{ kg/m}^3$

Jednadžba za maseni protok radne tvari:  $q_{m,R290} = A_t \cdot w_t \cdot \rho_t$

Površina poprečnog presjeka tlačnog voda:  $A_t = 0,00048 \text{ m}^2$

Promjer usisnog voda izračunat iz površine poprečnog presjeka:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot A_t}{\pi}} = 0,0247 \text{ m}$$

Odabrana bakrena cijev: Cu 28 x 1,5 mm.

#### 3.3.3. Kapljevinski vod

Maseni protok propana:  $q_{m,R290} = 0,174 \text{ kg/s}$

Preporučena brzina strujanja propana u usisnom vodu:  $w_k = 0,8 \text{ m/s}$

Gustoća propana:  $\rho_k = 466,3744 \text{ kg/m}^3$

Jednadžba za maseni protok radne tvari:  $q_{m,R290} = A_k \cdot w_k \cdot \rho_k$

Površina poprečnog presjeka kapljevinskog voda:  $A_k = 0,0005 \text{ m}^2$

Promjer usisnog voda izračunat iz površine poprečnog presjeka:

$$d_k = \sqrt{\frac{4 \cdot A_k}{\pi}} = 0,02436 \text{ m}$$

Odabrana bakrena cijev: Cu 28 x 1,5 mm.

### 3.3.4. Vod posrednog rashladnog medija

- kroz njega struji smjesa u kojoj je udio etilen-glikola 27%, a ostatak je voda [14]

Sve vrijednosti odnose se na glikolu smjesu [15]:

Gustoća:  $\rho_{gl} = 1040 \text{ kg/m}^3$

Specifični toplinski kapacitet:  $c_{p,gl} = 4 \text{ 000 J/(kgK)}$

Temperaturna promjena u krugu strujanja:  $\Delta\vartheta_{gl} = 4^\circ\text{C}$

Maseni protok po svakom rashladnom krugu radne tvari, ukupno ih 2:

$$q_{m,gl-1} = \frac{\Phi_1}{c_{p,gl} \cdot \Delta\vartheta_{gl}} = 2,841 \text{ kg/s}$$

Ukupni maseni protok :  $q_{m,gl} = 2 \cdot q_{m,gl-1} = 5,68 \text{ kg/s}$

Preporučena brzina strujanja u usisnom vodu:  $w_{gl} = 0,55 \text{ m/s}$

Površina cijevi koje vode od isparivača do spremnika glikolne smjese:

$$A_{gl-1} = \frac{q_{m,gl-1}}{\rho_{gl} \cdot w_{gl}} = 0,00497 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi koja spaja isparivač i spremnik glikolne smjese:

$$d_{gl-1} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{gl-1}}{\pi}} = 0,07954 \text{ mm}$$

Odabrana bakrena cijev: Cu 76 x 2 mm.

Površina cijevi koje vode od spremnika glikolne smjese do hladnjaka u komorama:

$$A_{gl} = \frac{q_{m,gl}}{\rho_{gl} \cdot w_{gl}} = 0,00994 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi koja spaja isparivač i spremnik glikolne smjese:

$$d_{gl-1} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{gl-1}}{\pi}} = 0,1125 \text{ mm}$$

Odabrana bakrena cijev: Cu 108 x 2,5 mm.

### 3.3.5. Prigušni element

Element koji će imati zadaću da priguši radnu tvar s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja biti će elektronski ekspanzijski ventil koji zamjenjuje elektromagnetski i termoekspanzijski ventil. Sastoji se od mehaničkog ventila sa sapnicom, pogona i osjetnika temperature i tlaka koji u svezi s upravljačkom jedinicom reguliraju rad ventila. Iako skuplji od kombinacije elektromagnetskog i termoekspanzijskog ventila, elektronski ekspanzijski ima i brojne prednosti kao što su sustav prigušenja hidrauličkih udara, široko regulacijsko područje (10-100%), zamjenjive sapnice, pogodan je za sve radne tvari, i brojne druge.

Odabran elektronski ekspanzijski ventil ETS 6-40, marke Danfoss [17].

Maksimalni kapacitet ventila:  $\Phi_o = 46\,320 \text{ W}$

Temperatura isparavanja:  $\vartheta_i = -9^\circ\text{C}$

Temperatura kondenzacije:  $\vartheta_k = 45^\circ\text{C}$

Pregrijanje radne tvari:  $\Delta\vartheta_{\text{preg}} = 5^\circ\text{C}$

Pothlađenje radne tvari:  $\Delta\vartheta_{\text{pohl}} = 3^\circ\text{C}$

Radna tvar: R290

Ventil odabran po kriteriju da je pri punom traženom rashladnom opterećenju od 45 474,6 W, otvoren nešto više od 98 %.



Slika 3. 9. Elektronski ekspanzijski ventil

### 3.3.6. Pločasti kompaktni isparivač

Odabran pločasti kompaktni isparivač SWEF DB650.



Slika 3. 10. Pločasti kompaktni isparivač

Isparivač odabran tako da nam u svakom trenutku može isporučiti traženo rashladno opterećenje od 45 474,6 W.

Temperatura isparivanja radne tvari:  $\vartheta_i = -9^{\circ}\text{C}$

Temperatura kondenzacije radne tvari:  $\vartheta_k = 45^{\circ}\text{C}$

Pregrijanje radne tvari:  $\Delta\vartheta_{\text{pregr}} = 5^{\circ}\text{C}$

Radna tvar: R290

Temperaturni režim glikolne smjese:  $-5/-1^{\circ}\text{C}$

### 3.3.7. Kondenzator V oblika

Odabran kondenzator V-shape compact type GFDC marke Guntner.

Kondenzator odabran tako da nam u svakom trenutku može isporučiti traženo opterećenje od 31 481,2 W (odabrani kondenzator iznos svog maksimalnog opterećenja imati će malo iznad tražanog od 31,5 kW). Bitno je za naglasiti da su dva kondenzatora V izvedbe u jednom rashladnom krugu.



Slika 3. 11. Kondenzator V izvedbe

Pogodan je za urbane gradske sredine jer ispunjava stroge zahtjeve za bukom.

Temperatura isparivanja radne tvari:  $\vartheta_i = -9^{\circ}\text{C}$

Temperatura kondenzacije radne tvari:  $\vartheta_k = 45^{\circ}\text{C}$

Pothlađenje radne tvari:  $\Delta\vartheta_{\text{pothl}} = 3^{\circ}\text{C}$

Radna tvar: R290

### 3.3.8. Kompresor

Odabran kompresor Copeland YB\*K1G marke Emerson, pogodan za propan kao radnu tvar.



Slika 3. 12. Stapni kompresor

Odabrani kompresor je stapni maksimalne električne snage od 22 kW i pogodan je za rashladni učinak od 45,5 kW.

Temperatura isparivanja radne tvari:  $\vartheta_i = -9^{\circ}\text{C}$



Temperatura kondenzacije radne tvari:  $\vartheta_k = 45^\circ\text{C}$

Pregrijanje radne tvari:  $\Delta\vartheta_{\text{pregr}} = 5^\circ\text{C}$

Radna tvar: R290

### 3.3.9. Pomoćna oprema rashladnog uređaja

Odabran filter sušač DCL 30 7s, marke Danfoss.

Pad tlaka:  $\Delta p = 0,034 \text{ bar}$ .



Slika 3. 13. Filter sušač

Unutar filtera čvrsta je jezgra koja se sastoji od molekularnog sita, aktivnog aluminij oksida i poliesterskog sita. Čvrsta jezgra zajedno s poliesterskim sitom djeluje i kao filter nečistoća, molekularna sita apsorbiraju vlagu, a aktivni aluminij oksid osim vlage apsorbira i kiseline.

Odabrano kontrolno stakalce SGP 22s, marke Danfoss.

Pad tlaka:  $\Delta p = 0,012 \text{ bar}$ .



Slika 3. 14. Kontrolno stakalce

Točka promjene boje indikatora vlage određena je topivošću vode u radnoj tvari:

- zelena boja: nema vlage u sustavu
- žuta boja: vlaga u sustavu
- smeđa boja: čestice prljavštine u sustavu

Želimo izbjeći svu prašinu i prljavštinu u sustavu jer tada imamo veću opasnost od istrošenosti dijelova i blokiranja ventila i filtera.

Odabrani zaporni ventili u kapljevinskom vodu BML 22, marke Danfoss.

Pad tlaka:  $\Delta p = 0,111 \text{ bar}$ .



Slika 3. 15. Zaporni ventil

Zaporni ventil stavlja se u vod s namjenom da u potpunosti obustavi protok radne tvari, najčešće u svrhu da prilikom zamjene određene komponente rashladnog uređaja ne dođe do nepotrebnog istjecanja radne tvari iz sustava.

## 4.ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu projektirane su tri rashladne komore za skladištenje lijekova na području grada Splita. Tri vrste lijekova (amoksicilin, sirup za liječenje kašlja i kapi za oči) svaka u svojoj komori predviđene su da budu skladištene na temperaturnom rasponu između 2 i 8°C, a tu zadaću ima indirektni (posredni) sustav hlađenja u kombinaciji s propanom na jednoj i glikolnom smjesom na drugoj strani. Propan ne hladi izravno zrak u komorama zbog svoje zapaljivosti, eksplozivnosti i tendencijom da istisne kisik iz prostorije, a time prilikom njegova slučajna propuštanja iz sustava želimo zaštititi i ljude i robu. Glikolna smjesa (kojoj upravo propan spušta temperaturu) hladi se u dva rashladna kruga, u svakom se nalazi po jedan isparivač rashladnog učinka nešto većeg od 45,4 kW, dva kompresora u paralelnom radu snage nešto veće od 17,4 kW i zrakom hlađen kondenzator toplinskog učinka od gotovo 63 kW. Faktor hlađenja iznosi 2,6 i isti je općenito odličan pokazatelj efikasnosti rashladnog sustava. Proračunati zrakom hlađeni kondenzator biti će dimenzija 1710 x 1000 x 100 mm i pad tlaka zraka na istom će biti oko 72,5 Pa.

## LITERATURA

- [1] Soldo, V., Grozdek, M.: Podloge za predavanje Hlađenje i dizalice topline, Zagreb, 2021.
- [2] <https://www.drugs.com/amoxicillin.html>
- [3] <https://medlineplus.gov/coldandcoughmedicines.html>
- [4] <https://www.scielo.br/j/abo/a/3NnflVHyf6vjm8F7mmvVbsG/?format=pdf&lang=en>
- [5] Soldo, V.: Podloge za predavanje Projektiranje rashladnih sustava, Zagreb, 2021.
- [6] [https://www.engineeringtoolbox.com/psychrometric-chart-mollier-d\\_27.html](https://www.engineeringtoolbox.com/psychrometric-chart-mollier-d_27.html)
- [7] <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>
- [8] Ciconkov, R.: Refrigeration Solved Examples, Faculty of mechanical engineering University „Saint Cyril and Methodius“, 2004
- [9] Halasz B, Galović A, Boras I.: Toplinske tablice, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [10] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 2001.
- [11] <http://www.coolprop.org/>
- [12] Galović, A.: Termodinamika II, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [13] Tables and diagrams for the refrigeration industry, R290 propane
- [14] Kodba D., završni projekt preddiplomskog studija: Usporedba direktnog i indirektnog sustava hlađenja objekta, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [15] [https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d\\_146.html](https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html)
- [16] Jerković, P., Diplomski rad: Rashladnik kapljevine za niskotemperaturno hlađenje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [17] Danfoss: Coolselector application

## **PRILOZI**

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