

# Rashladni tuneli za duboko zamrzavanje mesa

---

**Borojević, 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:235:909383>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marko Borojević**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Marko Borojević

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se prof. Soldi na mentorstvu i ukazanoj pomoći tokom izrade ovog završnog rada.

Marko Borojević



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 brodstrojarski

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Borojević** JMBAG: **0023116682**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rashladni tuneli za duboko zamrzavanje mesa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Cold tunnels or meat freezing**

Opis zadatka:

Za potrebe industrijskog rashladnog postrojenja potrebno je projektirati dva rashladna tunela za duboko zamrzavanje mesa na šarže. Dimenzije tunela iznose 10x5x3 m. Za kondenzaciju radne tvari koristi se evaporativni kondenzatori. Radna tvar je amonijak. Postrojenje se nalazi na području grada Vrbovca.

Rad treba sadržavati:

1. Proračun rashladnog opterećenja tunela.
2. Postavku procesa i proračun komponenti sustava.
3. Termodinamički proračun isparivača.
4. Shemu sustava i automatske regulacije.
5. Dispozicijski crtež isparivača.

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 zadao:

*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
2. PRORAČUN RASHLADNOG OPTEREĆENJA TUNELA .....	2
2.1. Transmisijski dobici.....	3
2.2. Toplinsko opterećenje od hlađenih proizvoda .....	6
2.3. Toplinsko opterećenje od pakiranja .....	8
2.4. Toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača .....	8
2.5. Ukupno toplinsko opterećenje .....	9
3. PRORAČUN RASHLADNOG PROCESA.....	10
4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN ISPARIVAČA.....	14
4.1. Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari .....	17
4.2. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka .....	21
4.3. Koeficijent prolaza topline.....	24
5. PRORAČUN DIMENZIJA CJEVOVODA .....	26
5.1. Uisni vod donjeg kruga .....	26
5.2. Tlačni vod donjeg kruga .....	27
5.3. Uisni vod gornjeg kruga .....	28
5.4. Tlačni vod gornjeg kruga .....	29
5.5. Kapljevinski vod gornjeg kruga.....	30
5.6. Kapljevinski vod donjeg kruga .....	31
5.7. Kapljevinski vod prema tunelima za smrzavanje .....	32
6. SPECIFIKACIJA KOMPONENTI SUSTAVA.....	33
7. ZAKLJUČAK.....	35

---

LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	37

## POPIS SLIKA

Slika 1. Tlocrt tunela za zamrzavanje .....	2
Slika 2. Shema rashladnog procesa .....	10
Slika 3. Mollierov dijagram vlažnog zraka .....	11
Slika 4. Konstrukcijski parametri isparivača za zrak .....	15
Slika 5. Dimenzije isparivača.....	25



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Koeficijenti toplinske provodnosti materijala poda .....	4
Tablica 2. Karakteristične točke procesa.....	12
Tablica 3. Termodinamička svojstva zraka od -32,10 °C .....	17
Tablica 4. Termodinamička svojstva radne tvari .....	18
Tablica 5. Komponente sustava.....	33

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

0023116682-01	Shema spajanja i regulacije
0023116682-01	Dispozicijski crtež isparivača

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
A	$m^2$	površina
B	m	širina
$\beta$	/	omjer unutarnje i vanjske površine cijevi
c	$\text{kJ}/(\text{kgK})$	specifični toplinski kapacitet
d	m	promjer
E	/	učinkovitost rebra
f	m	debljina
H	m	visina
h	$\text{kJ}/\text{kg}$	specifična entalpija
h	$\text{kJ}/\text{kg}$	toplina zamrzavanja
i	/	broj
k	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	koeficijent prolaza topline
L	m	dužina
m	kg	masa
$\dot{m}$	$\text{kg}/\text{s}$	maseni protok
P	W	snaga
p	bar	tlak
Q	J	toplina
q	$\text{kJ}/\text{kg}$	specifični rashladni učin
$q_i$	$\text{W}/\text{m}^2$	gustoća toplinskog toka
R	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$	toplinski otpor
s	$\text{kJ}/(\text{kgK})$	specifična entropija
s	m	razmak između lamele
V	$\text{m}^3$	volumen
$\dot{V}$	$\text{m}^3/\text{s}$	volumni protok
w	$\text{m}/\text{s}$	brzina
x	$\text{g}/\text{kg}$	sadržaj vlage

$\alpha$	W/(m <sup>2</sup> K)	koeficijent prijelaza topline
$\delta$	m	debljina
$\varepsilon$	/	faktor hlađenja
$\eta$	Pas	dinamička žilavost
$\eta_s$	/	izentropski stupanj djelovanja kompresora
$\vartheta$	°C	temperatura
$\lambda$	W/(mK)	toplinska provodnost
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\tau$	h	vrijeme
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematička žilavost
$\Phi_{EM}$	W	toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača
$\Phi_M$	W	toplinsko opterećenje od mesa
$\Phi_{PAK}$	W	toplinsko opterećenje od pakiranja
$\Phi_i$	W	rashladni učin isparivača
$\Phi_{TR}$	W	transmisijski dobici
$\Phi_{UK}$	W	ukupno toplinsko opterećenje

#### Bezdimenzijske značajke

Nu	/	Nusseltov broj
Re	/	Reynoldsov broj

## **SAŽETAK**

U ovom radu je projektirano i proračunato amonijačno rashladno postrojenje s dvostupanjskim prigušivanjem i dvostupanjskom kompresijom za duboko zamrzavanje mesa, točnije svinjetine i govedine. Proračunata su 2 tunela za duboko zamrzavanje dimenzija 10x5x3 m. Temperatura u rashladnom tunelu iznosi -32 °C. U radu je proveden proračun toplinskog opterećenja tunela, proračun komponenti sustava te proračun i dizajn isparivača. Priložena je shema sustava i automatske regulacije te dispozicijski crtež isparivača.

Ključne riječi: tunel za zamrzavanje mesa, rashladno postrojenje, amonijak

**SUMMARY**

In this thesis the ammonia refrigeration system with two-stage damping and two-stage compression is designed and calculated. We are freezing meat, more precisely pork and beef. Two meat freezing tunnels, dimensions 10x5x3 m, have been calculated. Temperature in freezing tunnel is -32 °C. In this thesis there have been calculations of heat load, components of refrigeration system, and evaporator design and calculation. The scheme of connection with automatic regulation and disposition drawing of evaporator are attached.

Key words: meat freezing tunnel, refrigeration system, ammonia

## 1. UVOD

Cilj hlađenja robe u hladionicama je osigurati njeno čuvanje, pohranjivanje i distribuciju bez gubitka kvalitete. Snižavanjem temperature se produljuje postojanost hrane jer na taj način usporavamo kemijske reakcije i krvarenje hrane usljed utjecaja bakterija. Robu koju zamrzavamo moramo ohladiti na temperaturu znatno nižu od točke zamrzavanja. Bitna nam je i kontrola temperature i vlage kod hlađenja radi očuvanja kvalitete i težine robe. Zamrzavanje robe nam osigurava da postignemo kvalitetu što sličniju onoj pri ulasku u proces obrade hlađenjem. Meso koje ulazi u proces hlađenja mora se pakirati suho jer se uz prisustvo vlage mogu razviti bakterije koje čine površinu sluzavom. Prije nego što meso stavimo u tunel za duboko smrzavanje, moramo ga prvo predhladiti na temperaturu što bližoj točki smrzavanja kako bi izbjegli vlagu koja ishlapljuje s površine kože i stvaranja leda. Kako stanice mesa sadrže otopine soli i šećera, tu robu moramo dovoljno brzo zamrznuti da nam kristali koji nastaju pri smrzavanju ne budu preveliki. To loše utječe na kvalitetu mesa jer povećani kristali probijaju membranu stanica robe te prilikom otapanja tekstura robe je oštećena. Jednom smrznuto meso se ne smije otopiti i ponovno smrznuti. Meso koje unosimo u rashladni tunel moramo posložiti tako da se omogući prolaz hladnog zraka između paketa kako bi se osigurala jednolika raspodjela temperature po cijelom tunelu.

## 2. PRORAČUN RASHLADNOG OPTEREĆENJA TUNELA

Kako bi smo mogli odrediti rashladno opterećenje u tunelu moramo odrediti transmisivne dobitke, toplinska opterećenja od hlađenih proizvoda, toplinska opterećenja od pakiranja (kutije, palete) te toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača. Meso u tunelu kada se stavi, smrzava se 22 sata bez otvaranja vrata, tako da nemamo ventilacijske dobitke niti toplinske dobitke od ljudi. U tunelu za zamrzavanje polovinu mase zauzimaju svinjske polovice, a polovinu mase goveđe polovice. Masu mesa koju možemo pakirati izračunavamo iz prostorne gustoće slaganja mesa s obzirom na volumen tunela za zamrzavanje.

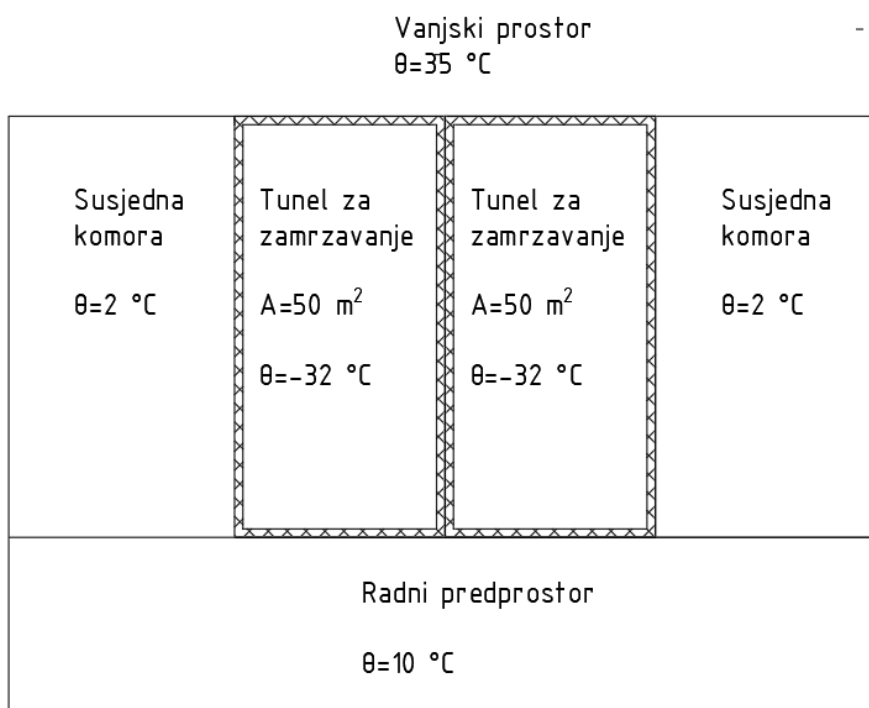
Prostorna gustoća slaganja:  $\rho_s = 325 \frac{kg}{m^3}$

Volumen tunela za zamrzavanje:  $V_t = 10 * 5 * 3 = 150 m^3$

Masa mesa u tunelu za zamrzavanje:  $m_m = \rho_s * V_t = 325 * 150 = 48750 kg$

Od kojeg masa svinjskih polovica iznosi 24375 kg, a goveđih polovica 24375 kg.

Meso u tunelu za zamrzavanje je posloženo na 48 paleta dimenzija 1200x800x114 te na svakoj paleti se nalazi 32 kutije za pakiranje mesa.



**Slika 1. Tlocrt tunela za zamrzavanje**



## 2.1. Transmisijski dobici

Transmisijske dobitke računamo kroz sve zidove hladionice, te kroz pod i strop. Stražnji zid je vanjski zid te je orijentiran prema istoku. Bočni zidovi gledaju prema komorama za skladištenje, a prednji zid gleda prema predprostoru.

Ulazni podaci:

- Površina poda:  $A_{pod} = 50 \text{ m}^2$
- Površina stropa:  $A_{str} = 50 \text{ m}^2$
- Površina bočnih zidova:  $A_{bok} = 30 \text{ m}^2$
- Površina stražnjeg zida:  $A_{st} = 15 \text{ m}^2$
- Površina prednjeg zida:  $A_{pr} = 15 \text{ m}^2$
- Temperatura u rashladnom tunelu:  $\vartheta_r = -32 \text{ }^\circ\text{C}$
- Vanjska projektna temperatura:  $\vartheta_v = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
- Relativna vlažnost zraka:  $\varphi = 50 \%$
- Temperatura susjednih komora:  $\vartheta_{kom} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura predprostora:  $\vartheta_p = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
- Vanjska temperatura poda:  $\vartheta_{pod} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$
- Unutranji koeficijent prijelaza topline za dinamično hlađenje u hlađenom prostoru:

$$\alpha_i = 20 \frac{W}{m^2K}$$

- Koeficijent prijelaza topline u komorama za skladištenje i predprostoru za miran zrak:

$$\alpha_p = 9,5 \frac{W}{m^2K}$$

- Vanjski koeficijent prijelaza topline za srednji intezitet vjetra:

$$\alpha_o = 18 \frac{W}{m^2K}$$

- Koeficijent toplinske provodnosti zidova:  $\lambda = 0,025 \frac{W}{mK}$

Konstrukcija poda na mora biti čvrsta kako bi mogla izdržati veliku količinu tereta i uporabu viljuškara. Materijali koji se koriste pri njegovoj konstrukciji te njihovi koeficijenti toplinske provodnosti i debljine su prikazani u sljedećoj tablici.

**Tablica 1. Koeficijenti toplinske provodnosti materijala poda**

Slojevi	Koeficijent toplinske provodnosti $\lambda$ [W/mK]	Debljina [mm]
Mort	0,72	20
Arminirani beton	1,396	150
Mineralna vuna	0,036	120
Bitumen	0,71	5
Beton	1,29	250

Toplinski tok dobiven kroz zidove, pod i strop se računa pomoću izraza:

$$\phi_{tr} = k * A * \Delta\vartheta$$

gdje je:

- $\phi_{tr}$  [W] -toplinski tok
- $A$  [m<sup>2</sup>] -površina kroz koju se odvija prolaz topline
- $\Delta\vartheta$  [°C] -temperatura razlika zraka hlađenog prostora i susjednog prostora
- $k$  [W/m<sup>2</sup>K] -koeficijent prolaza topline

Koeficijent prolaza topline na stražnjem zidu te na stropu prema vanjskom okolišu:

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o}} = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0,15}{0,025} + \frac{1}{18}} = 0,1638 \frac{W}{m^2K}$$

Koeficijent prolaza topline na prema komorama za skladištenje i predprostoru:

$$k_k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_p}} = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0,15}{0,025} + \frac{1}{9,5}} = 0,1625 \frac{W}{m^2K}$$

Koeficijent prolaza topline prema podu:

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \Sigma \left( \frac{\delta}{\lambda} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0,02}{0,72} + \frac{0,15}{1,396} + \frac{0,12}{0,036} + \frac{0,005}{0,71} + \frac{0,25}{1,29}} = 0,2690 \frac{W}{m^2K}$$

Transmisijски dobiti na vanjskom zidu:

Pri računu transmisijских dobitaka prema vanjskom zidu moramo uzeti u obzir zagrijavanje vanjske stjenke radi sunčevog zračenja. Tako da na vanjsku temperaturu za istočni zid svijetle površine moramo dodati 3 °C, tako nam sada vanjska temperatura iznosi:  $\vartheta_{vs} = 35 + 3 = 38 \text{ °C}$ .

$$\phi_{tr,van} = k_s * A_{st} * \Delta\vartheta = 0,1638 * 15 * (38 - (-32)) = 172 \text{ W}$$

Transmicijски dobiti na krovu:

Na krovu također moramo uzati u obzir zagrijavanje radi sunčevog zračenja i na vanjsku temperaturu za ravni krov svijetle površine dodajemo 5 °C tako da nam vanjska temperatura sada iznosi  $\vartheta_{vk} = 35 + 5 = 40 \text{ °C}$ .

$$\phi_{tr,strop} = k_s * A_s * \Delta\vartheta = 0,1638 * 50 * (40 - (-32)) = 590 \text{ W}$$

Transmisijски dobiti od komora za skladištenje:

$$\phi_{tr,kom} = k_k * A_{bok} * \Delta\vartheta = 0,1625 * 30 * (2 - (-32)) = 166 \text{ W}$$

Transmisijski dobici od predprostora:

$$\phi_{tr,pred} = k_k * A_{pr} * \Delta\vartheta = 0,1625 * 15 * (10 - (-32)) = 102 \text{ W}$$

Transmisijski dobici od poda:

$$\phi_{tr,pred} = k_p * A_{pod} * \Delta\vartheta = 0,2690 * 15 * (12 - (-32)) = 178 \text{ W}$$

Ukupni transmisijski dobici:

$$\begin{aligned} \phi_{tr,uk} &= \phi_{tr,van} + \phi_{tr,strop} + \phi_{tr,kom} + \phi_{tr,pred} + \phi_{tr,pred} \\ &= 172 + 590 + 166 + 102 + 178 = 1208 \text{ W} \end{aligned}$$

## 2.2. Toplinsko opterećenje od hlađenih proizvoda

U ovom djelu proračuna računamo koliko topline trebamo odvesti mesu kako bi ga doveli do zadovoljavajuće temperature. Prvo računamo toplinu do temperature smrzavanja, zatim toplinu koju je potrebno odvest za smrzavanje i na kraju toplinu koju odvodimo da meso dovedemo do zadovoljavajuće temperature.

Ulazni podaci:

- Masa svinjskih polovica:  $m_{sv} = 24375 \text{ kg}$
- Masa goveđih polovica:  $m_{gov} = 24375 \text{ kg}$
- Specifični toplinski kapacitet svinjskih polovica ( $>0 \text{ }^\circ\text{C}$ ):  $c_{p,sv} = 2,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- Specifični toplinski kapacitet goveđih polovica ( $>0 \text{ }^\circ\text{C}$ ):  $c_{p,gov} = 3,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- Specifični toplinski kapacitet svinjskih polovica ( $<0 \text{ }^\circ\text{C}$ ):  $c_{p,sv,z} = 1,34 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- Specifični toplinski kapacitet goveđih polovica ( $<0 \text{ }^\circ\text{C}$ ):  $c_{p,gov,z} = 1,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- Toplina smrzavanja svinjećih polovica:  $h_{sv} = 153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

- Toplina smrzavanja goveđih polovica:  $h_{gov} = 200 \frac{kJ}{kg}$
- Ulazna temperatura mesa:  $\vartheta_{m,ul} = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Temperatura na koju moramo smrznuti meso:  $\vartheta_{m,kon} = -18 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Vrijeme hlađenja i zamrzavanja mesa:  $\tau = 22 \text{ h}$

Ukupnu količinu topline koju trebamo odvesti kako bismo smrznuli meso na traženu temperaturu se računa sljedećim izrazom:

$$Q = m * (c_p * \Delta\vartheta + h + c_{p,z} * \Delta\vartheta)$$

Količina topline potrebna za smrzavanje svinjskih polovica:

$$Q_{sv} = m_{sv} * [c_{p,sv} * (\vartheta_{m,ul} - 0) + h_{sv} + c_{p,sv,z} * (0 - \vartheta_{m,kon})]$$

$$Q_{sv} = 24375 * [2,14 * (4 - 0) + 153 + 1,34 * (0 + 18)] = 4526925 \text{ kJ}$$

Količina topline potrebna za smrzavanje goveđih polovica:

$$Q_{gov} = m_{gov} * [c_{p,gov} * (\vartheta_{m,ul} - 0) + h_{gov} + c_{p,gov,z} * (0 - \vartheta_{m,kon})]$$

$$Q_{gov} = 24375 * [3,25 * (4 - 0) + 200 + 1,76 * (0 + 18)] = 5964075 \text{ kJ}$$

Rashladni kapacitet potreban za hlađenje, smrzavanje i pothlađivanje mesa se računa prema sljedećoj formuli:

$$\phi_m = \frac{Q_{sv} + Q_{gov}}{\tau * 3600}$$

$$\phi_m = \frac{4526925 + 5964075}{22 * 3600} = 132,462 \text{ kW}$$

### 2.3. Toplinsko opterećenje od pakiranja

Meso koje zamrzavamo stavljamo u kutije i na palete te moremo uzeti u obzir i njihovo toplinsko opterećenje. Masa pakiranja se izračunava kao 2 – 5 % ukupne mase proizvoda.

$$m_{pak} = 0,03 * m_m = 0,03 * 48750 = 1462,5 \text{ kg}$$

Ulazni podaci:

- Masa pakiranja:  $m_{pak} = 1462,5 \text{ kg}$
- Specifični toplinski kapacitet pakiranja:  $c_{pp} = 1,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

Toplinsko opterećenje računamo prema sljedećoj formuli:

$$\phi_{pak} = \frac{m_{pak} * c_{pp} * (\vartheta_{ul} - \vartheta_{kon})}{3600 * \tau}$$

$$\phi_{pak} = \frac{1462,5 * 1,92 * (4 + 18)}{3600 * 24} = 715 \text{ W}$$

### 2.4. Toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača

Elektromotr isparivača, odnosno motor koji pogoni ventilator na isparivaču nam odaje toplinu.

Tu toplinu računamo pomoću sljedećeg izraza:

$$\phi_{EM} = f * \sum_1^i \phi_i$$

gdje je:

f – faktor za procjenu rada ventilatora i za brzo smrzavanje iznosi 0,06

$\phi_i$  – suma toplinskih opterećenja usljed transmisijskih gubitaka, hlađenja proizvoda i pakiranja proizvoda

$$\phi_{EM} = f * (\phi_{tr,uk} + \phi_m + \phi_{pak})$$

$$\phi_{EM} = 0,06 * (1208 + 132462 + 715) = 8063 \text{ W}$$

## 2.5. Ukupno toplinsko opterećenje

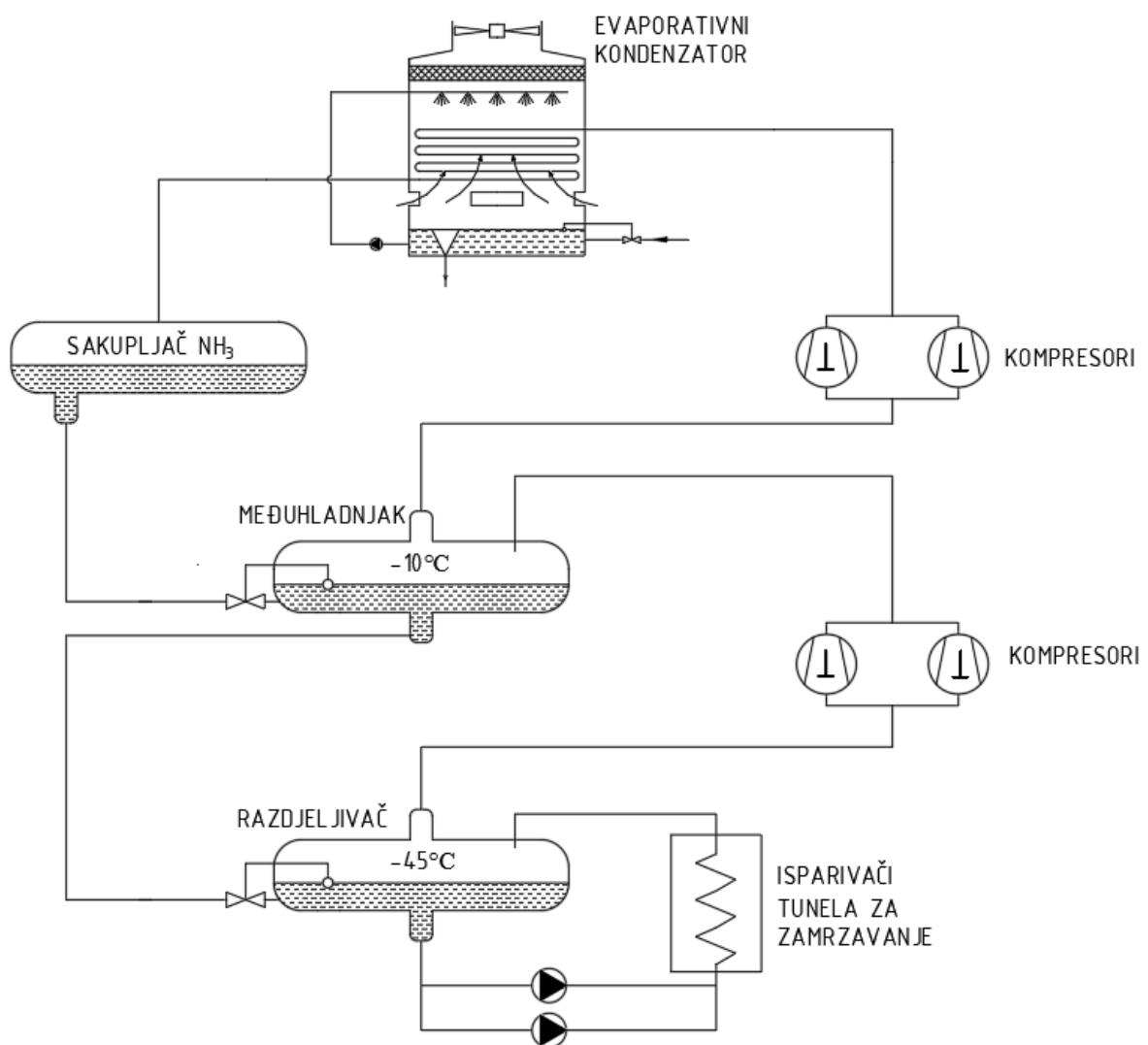
Ukupno toplinsko opterećenje nam je zbroj svih prethodno izračunatih opterećenja.

$$\phi_{UK} = \phi_{tr,uk} + \phi_m + \phi_{pak} + \phi_{EM}$$

$$\phi_{UK} = 1208 + 132462 + 715 + 8063 = 142448 \text{ W} \approx 142 \text{ kW}$$

### 3. PRORAČUN RASHLADNOG PROCESA

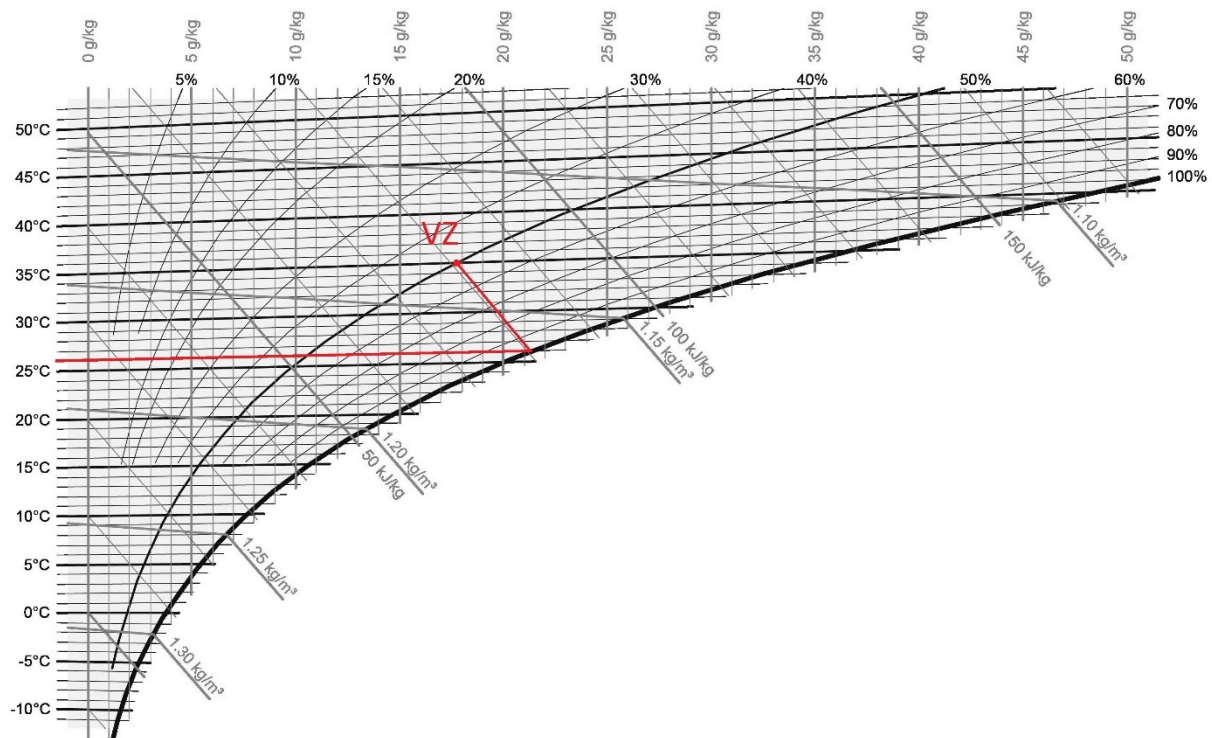
Rashladni proces pomoću kojeg zamrzavamo meso se sastoji od dvostupanjskog prigušivanja te dvostupanjske kompresije, a višak topline nam se odvodi preko evaporativnog kondenzatora kao što je prikazano na slici 1. Za svaki stupanj kompresije imamo dva kompresora radi bolje regulacije i radi velikog kapaciteta hlađenja. Proračunavamo dva rashladna tunela, svaki kapaciteta 142 kW. U svakom tunelu imamo 3 isparivača po 45 kW. Radna tvar koju koristimo pri izvedbi ovog procesa je amonijak (R717).



Slika 2. Shema rashladnog procesa



Temperatura na kojoj kondenzira radna tvar je 10 °C iznad temperature vlažnog termometra za zadane vanjske projektne uvjete, a tu temperaturu određujemo pomoću Mollierovog dijagrama.



Slika 3. Mollierov dijagram vlažnog zraka

Očitano:

- $\vartheta_{VT} = 26 \text{ °C}$

$$\vartheta_{kond} = \vartheta_{VT} + 10 = 26 + 10 = 36 \text{ °C}$$

Ulazni podaci:

- Temperatura kondenzacije:  $\vartheta_{kond} = 36 \text{ °C}$
- Temperatura isparivanja:  $\vartheta_i = -45 \text{ °C}$
- Rashladni učin isparivača:  $\phi_i = 290 \text{ kW}$
- Izentropski stupanj djelovanja kompresora:  $\eta_s = 0,8$
- Pothlađenje:  $\Delta\vartheta_{kond} = 5 \text{ °C}$

Tablica 2. Karakteristične točke procesa

	$\vartheta$ [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]
<b>1</b>	-45	0,54398	1319,448	3,8948
<b>2s</b>		2,9106	1545,234	3,8948
<b>2t</b>		2,9106	1601,68	
<b>3</b>	-10	2,9106	1368,962	3,3067
<b>4s</b>		13,916	1598,328	3,3067
<b>4t</b>		13,916	1655,67	
<b>5</b>	31	13,916	269,528	
<b>6</b>	-10	2,9106	269,528	
<b>7</b>	-10	2,9106	74,484	
<b>8</b>	-45	0,54398	74,484	

Vijčani kompresori koji se koriste u ovom sustavu su podmazivani uljem koje osim podmazivanja služi i za hlađenje kompresora. Zbog toga se dio energije pregrijanih para predaje ulju koje se pritom zagrijava i smanjuje temperaturu radne tvari na izlazu iz kompresora.

Entalpija točki 2t i 4t su izračunate preko izentropskog stupnja djelovanja kompresora.

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2t} - h_1}$$

$$\eta_s = \frac{h_{4s} - h_3}{h_{4t} - h_3}$$

Maseni protok radne tvari:

$$\dot{m}_d = \frac{\phi_i}{h_1 - h_8} = \frac{290}{1319,448 - 74,484} = 0,2329 \frac{kg}{s}$$

Snaga kompresora u prvom stupnju kompresije:

$$P_{K1} = \dot{m}_d * (h_{2t} - h_1) = 0,2329 * (1601,68 - 1319,448) = 65,73 \text{ kW}$$

Kompresora su dva, što znači da je u prvom stupnju kompresije snaga svakoga je 32,865 kW.

Bilanca međuhladnjaka:

$$\dot{m}_g * h_6 + \dot{m}_d * h_2 = \dot{m}_g * h_3 + \dot{m}_d * h_8$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_d * \frac{h_8 - h_{2t}}{h_6 - h_3} = 0,2329 * \frac{74,484 - 1601,68}{269,528 - 1368,962} = 0,3235 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Snaga kompresora u drugom stupnju kompresije:

$$P_{K2} = \dot{m}_g * (h_{4t} - h_3) = 0,3235 * (1655,67 - 1368,962) = 92,75 \text{ kW}$$

I u drugom stupnju kompresije imamo dva kompresora što znači da je snaga svakog 46,375 kW.

Učin kondenzatora:

$$\phi_K = \dot{m}_g * (h_{4t} - h_5) = 0,3235 * (1655,67 - 269,528) = 448,42 \text{ kW}$$

Faktor hlađenja:

$$\varepsilon_{hl} = \frac{\phi_i}{P_{K1} + P_{K2}} = \frac{290}{65,73 + 92,75} = 1,83$$

#### 4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN ISPARIVAČA

U ovom dijelu proračuna proračunavamo jedan od 3 isparivača koji se nalazi u tunelu za zamrzavanje. Proračunavamo koeficijente prijelaza topline, površinu izmjene topline, dimenzije isparivača te pad tlaka na strani zraka.

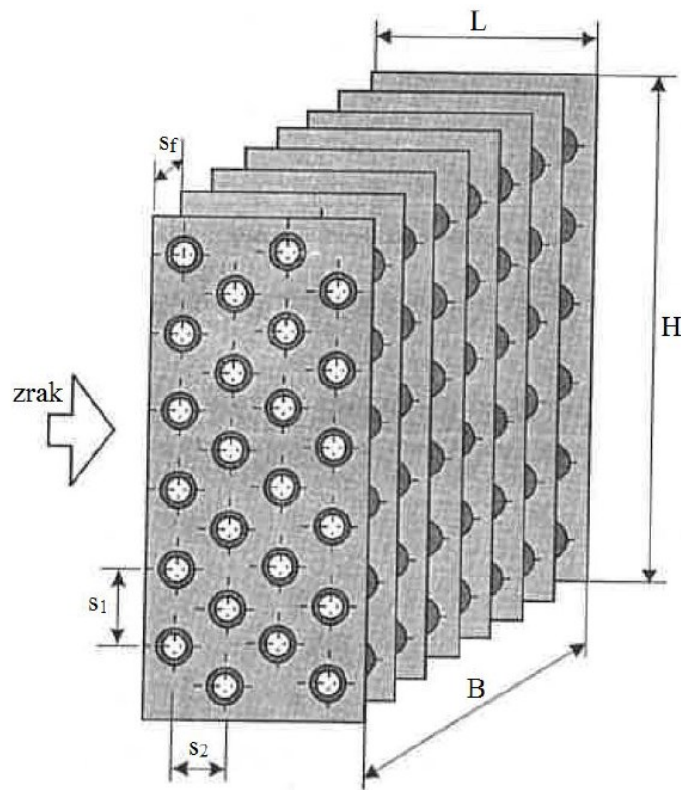
Ulazni podaci:

- Učin isparivača:  $Q_e = 45 \text{ kW}$
- Ulazna temperatura zraka:  $\vartheta_{a1} = -30 \text{ °C}$
- Izlazna temperatura zraka:  $\vartheta_{a2} = -34 \text{ °C}$
- Temperatura isparivanja:  $\vartheta_i = -45 \text{ °C}$
- Radna tvar:  $R717 (\text{NH}_3)$

Konstruktivski parametri isparivača:

- Materijal cijevi: Čelik
- Toplinska provodnost čelika:  $\lambda_t = 45 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$
- Vanjski promjer cijevi:  $d_e = 26,9 \text{ mm}$
- Unutarnji promjer cijevi:  $d_i = 22,3 \text{ mm}$
- Srednji promjer cijevi:  $d_m = 24,6 \text{ mm}$
- Debljina stjenke cijevi:  $\delta_t = 2,3 \text{ mm}$
- Vertikalni razmak između cijevi:  $s_1 = 58 \text{ mm}$
- Horizontalni razmak između cijevi:  $s_2 = 58 \text{ mm}$
- Razmak između rebara:  $s_f = 13 \text{ mm}$
- Debljina rebara:  $f_t = 0,5 \text{ mm}$
- Broj redova:  $i_r = 6$

- Broj cijevi u redu:  $i_t = 26$
- Broj ulaznih cijevi:  $i_{in} = 13$



Slika 4. Konstrukcijski parametri isparivača za zrak

Prvo proračunavamo potrebne površine po metru cijevi.

Površina cijevi između rebara:

$$A_{mt} = \pi * d_e * \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = \pi * 0,0269 * \left(1 - \frac{0,0005}{0,013}\right) = 0,08126 \frac{m^2}{m}$$

Površina rebara:

$$A_f = \frac{2 * \left(s_1 * s_2 - \frac{d_e^2 * \pi}{4}\right)}{s_f} = \frac{2 * \left(0,058 * 0,058 - \frac{0,0269^2 * \pi}{4}\right)}{0,013} = 0,4301 \frac{m^2}{m}$$

Vanjska površina za prolaz topline:

$$A_{e1} = A_{mt} + A_f = 0,08126 + 0,4301 = 0,51136 \frac{m^2}{m}$$

Unutarnja površina za prolaz topline:

$$A_{i1} = \pi * d_i = \pi * 0,0223 = 0,07006 \frac{m^2}{m}$$

Odnos između unutarnje i vanjske površine za prolaz topline:

$$\beta = \frac{A_{e1}}{A_{i1}} = \frac{0,51136}{0,07006} = 7,299$$

Visina izmjenjivača topline:

$$H = i_t * s_1 = 26 * 0,058 = 1,508 \text{ m}$$

Dužina izmjenjivača topline:

$$L = i_r * s_2 = 6 * 0,058 = 0,348 \text{ m}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\vartheta_{a1} - \vartheta_{a2}}{\ln\left(\frac{\vartheta_{a1} - \vartheta_i}{\vartheta_{a2} - \vartheta_i}\right)} = \frac{-30 - (-34)}{\ln\left(\frac{-30 - (-45)}{-34 - (-45)}\right)} = 12,90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednja temperatura zraka:

$$\vartheta_{am} = \vartheta_i + \Delta\vartheta_m = -45 + 12,90 = -32,10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tablica 3. Termodinamička svojstva zraka od -32,10 °C

$\rho_a$	1,47 kg/m <sup>3</sup>
$c_a$	1010 J/kgK
$\lambda_a$	0,0215 W/mK
$\nu_a$	1,06x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
$\varphi$	95 %
$h_1$	-32,42 kJ/kg
$x_1$	0,167 g/kg

#### 4.1. Koeffcijent prijelaza topline na strani radne tvari

Maseni protok radne tvari koji isparivač:

$$\dot{m}_{R1} = \frac{Q_e}{h_e'' - h_e'} = \frac{45}{1319,448 - (-84,158)} = 0,03206 \frac{kg}{s}$$

gdje je  $h_e'' - h_e'$  latentna toplina isparivanja amonijaka na -45 °C.

U amonijačnim sustavima s pumpom protok radne tvari kroz isparivač je tri do osam puta veći od količine koja ispari.

$$\dot{m}_R = 5 * \dot{m}_{R1} = 5 * 0,03206 = 0,1603 \frac{kg}{s}$$

Tablica 4. Termodinamička svojstva radne tvari

$\rho_R$	696,17 kg/m <sup>3</sup>
$c_R$	4387,2 J/kgK
$\lambda_R$	0,70512 W/mK
$\nu_R$	4,384 x10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s
$\eta_r$	3,052x10 <sup>-4</sup> Pas

Volumni protok radne tvari:

$$\dot{V}_R = \frac{\dot{m}_R}{\rho_R} = \frac{0,1603}{696,17} = 0,0002303 \frac{m^3}{s}$$

Brzina radne tvari u cijevima:

$$w_r = \frac{\dot{V}_R}{i_{in} * \frac{d_i^2 * \pi}{4}} = \frac{0,0002303}{13 * \frac{0,0223^2 * \pi}{4}} = 0,04535 \frac{m}{s}$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{w_r * d_i}{\nu_R} = \frac{0,04535 * 0,0223}{4,384 * 10^{-7}} = 2307$$

Formula za koeficijent prijelaza topline u cijevima:

$$\alpha_R = \alpha_{R1} * \left[ 1 + \left( \frac{\alpha_{R2}}{\alpha_{R1}} \right)^{1,5} \right]^{\frac{2}{3}}$$

Izrazi za  $\alpha_{R1}$  i  $\alpha_{R2}$  su sljedeći

$$\alpha_{R1} = B_r * \frac{w_r^{0,8}}{d_i^{0,2}}$$

$$\alpha_{R2} = 2,2 * p_e^{0,21} * q_i^{0,7}$$



gdje je

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

Za potrebe izračuna koeficijenta prijelaza topline moramo pretpostaviti specifični toplinski tok.

Pretpostavka:  $q_i = 1434 \frac{W}{m^2}$

$$B_r = 0,023 * 696,17^{0,8} * 4387,2^{0,4} * 0,70512^{0,6} * (3,052 \times 10^{-4})^{-0,4} = 161,4$$

$$\alpha_{R1} = 161,4 * \frac{0,04535^{0,8}}{0,0223^{0,2}} = 29,07 \frac{W}{m^2K}$$

$$\alpha_{R2} = 2,2 * 0,54398^{0,21} * 1434^{0,7} = 313,67 \frac{W}{m^2K}$$

$$\alpha_R = 29,07 * \left[ 1 + \left( \frac{313,67}{29,07} \right)^{1,5} \right]^{\frac{2}{3}} = 319,55 \frac{W}{m^2K}$$

Toplinski otpor na strani zraka:

$$R_0 = 0,001 \frac{m^2K}{W}$$

Toplinski otpor materijala cijevi:

$$R_t = \frac{\delta_t}{\lambda_t} = \frac{0,0023}{45} = 5,111 * 10^{-5} \frac{m^2K}{W}$$

Srednja temperatura vanjske površine cijevi  $\vartheta_s$ :

$$\vartheta_s = \vartheta_i + \left( \frac{1}{\alpha_R} + R_t * \frac{d_i}{d_m} + R_0 * \frac{1}{\beta} \right)$$

$$\vartheta_s = -45 + \left( \frac{1}{319,55} + 5,111 * 10^{-5} * \frac{0,0223}{0,0246} + 0,001 * \frac{1}{7,299} \right) = -40,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura  $t_s$  predstavlja temperaturu zasićenog zraka što znači da je relativna vlažnost 100%. Iz Molierovog dijagrama stanje tog zraka je:

- Entalpija:  $h_s = -40,279 \frac{kJ}{kg}$
- Masa vlage:  $x_s = 0,077 \frac{g}{kg}$

Zbog činjenice da  $x_s < x_1$  dolazi do kondenzacije vlage iz zraka na površinu cijevi.

Izlazni zrak je sada sljedećeg stanja:

$$x_2 = x_1 - \frac{(x_1 - x_s) * (\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\vartheta_1 - \vartheta_s}$$

$$x_2 = 0,167 - \frac{(0,167 - 0,077) * (-30 - (-34))}{-30 - (-40,25)} = 0,132 \frac{g}{kg}$$

$$h_2 = 1,005 * \vartheta_2 + x_2 * (2501 + 1,863 * \vartheta_2)$$

$$h_2 = 1,005 * (-34) + 0,000132 * (2501 + 1,863 * (-34)) = -33,849 \frac{kJ}{kg}$$

Površina za prolaz topline:

$$A_i = \frac{Q_e}{q_i} = 1434 = 31,38 m^2$$

Ukupna dužina cijevi:

$$L_{ov} = \frac{A_i}{A_{i1}} = \frac{31,38}{0,07006} = 447,93 m$$

Dužina cijevi u jednom redu:

$$L_1 = \frac{L_{ov}}{i_r} = \frac{447,93}{6} = 74,65 m$$

Potrebna širina izmjenjivača:

$$B = \frac{L_1}{i_t} = \frac{138,852}{26} = 2,87 m$$

## 4.2. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

Maseni protok zraka:

$$\dot{m}_a = \frac{Q_e}{h_1 - h_2} = \frac{45}{-32,42 - (-33,849)} = 31,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Volumni protok zraka:

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} = \frac{31,5}{1,47} = 21,43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Površina najuže sekcije kroz koju zrak prolazi:

$$A_z = L_1 * \frac{s_1 - d_e}{1 - \frac{f_t}{s_f}} = 74,65 * \frac{0,058 - 0,0269}{1 - \frac{0,0005}{0,013}} = 2,23 \text{ m}^2$$

Brzina zraka u najužoj sekciji:

$$w = \frac{\dot{V}_a}{A_z} = \frac{21,43}{2,23} = 9,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Za koeficijent prijelaza toplina na strani zraka moramo izračunati Nusseltov broj koji se računa prema idućoj formuli:

$$Nu = C * C_r * C_s * \left(\frac{d_e}{s_f}\right)^{-0,54} * \left(\frac{h}{s_f}\right)^{-0,14} * Re^n$$

Za šahovski raspored cijevi koeficijenti C, n i C<sub>r</sub> iznose:

- C = 0,23
- n = 0,65
- C<sub>r</sub> = 1

Koeficijent C<sub>s</sub> za šahovski raspored se računa prema formuli:

$$C_s = \left(\frac{s_1 - d_e}{s_{2d} - d_e}\right)^{0,2}$$

gdje je

$$s_{2d} = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2}\right)^2 + s_2^2} = \sqrt{\left(\frac{0,058}{2}\right)^2 + 0,058^2} = 0,0648 \text{ m}$$

$$C_s = \left(\frac{0,058 - 0,0269}{0,0648 - 0,0269}\right)^{0,2} = 0,96$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{w * s_f}{\nu_a} = \frac{9,6 * 0,013}{1,06 * 10^{-5}} = 11772$$

U jednadžbi za Nusseltov broj, h nam označava visinu rebra, a ona iznosi:

$$h = \frac{s_1 - d_e}{2} = \frac{0,058 - 0,0269}{2} = 0,0156 \text{ m}$$

Nusseltov broj sada iznosi:

$$Nu = 0,23 * 1 * 0,96 * \left(\frac{0,0269}{0,013}\right)^{-0,54} * \left(\frac{0,0156}{0,013}\right)^{-0,14} * 11772^{0,65} = 70,031$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka:

$$\alpha_a = \frac{Nu * \lambda_a}{s_f} = \frac{70,031 * 0,0215}{0,013} = 115,82 \frac{W}{m^2K}$$

Kako je  $x_2 < x_1$  površina cijevi je mokra, što znači da je koeficijent prijelaza intenzivniji što je sadržano u koeficijentu  $\xi_w$ .

$$\xi_w = 1 + 2500 * \frac{x_1 - x_s}{t_1 - t_s}$$

$$\xi_w = 1 + 2500 * \frac{0,000167 - 0,000077}{-30 - (-40,25)} = 1,022$$

$$\alpha_{aw} = \xi_w * \alpha_a = 1,022 * 115,82 = 118,36 \frac{W}{m^2K}$$

Koeficijent prijelaza topline vezan za unutarnji promjer cijevi:

$$\alpha_{ai} = \alpha_{aw} * \frac{A_f * E * C_k + A_{mt}}{A_{i1}}$$

Koeficijent  $C_k$  sadrži vrijednost otpora između dodira cijevi i rebra. Iznosi  $C_k=0,98$ .

Efikasnost rebra:

$$E = \frac{\tanh(m_f * h_f)}{m_f * h_f}$$

$$m_f = \sqrt{\frac{2 * \alpha_{aw}}{f_t * \lambda_f}} = \sqrt{\frac{2 * 118,36}{0,0005 * 45}} = 102,57 \text{ m}^{-1}$$

Izvedena visina rebra:

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

Za šahovski raspored i  $\frac{s_1}{2} < s_2$  vrijedi:

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

$$A_f = s_1 = 0,058 \text{ m}$$

$$B_f = s_{2d} = 0,0648 \text{ m}$$

$$\rho_f = 1,27 * \left(\frac{0,0648}{0,0269}\right) * \sqrt{\frac{0,058}{0,0648} - 0,3} = 2,36$$

$$h_f = 0,5 * 0,0269 * (2,36 - 1) * (1 + 0,35 * \ln(2,36)) = 0,0238 \text{ m}$$

$$E = \frac{\tanh(102,57 * 0,0238)}{102,57 * 0,0238} = 0,4035$$

Konačni koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{ai} = 118,36 * \frac{0,058 * 0,4035 * 0,98 + 0,08126}{0,07006} = 176 \frac{W}{m^2 K}$$

### 4.3. Koeficijent prolaza topline

Koeficijent prolaza topline vezan za unutarnju površinu cijevi iznosi:

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + R_0 * \frac{1}{\beta} + R_t * \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_R}}$$

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{176} + 0,001 * \frac{1}{7,299} + 5,111 * 10^{-5} * \frac{0,0223}{0,0246} + \frac{1}{319,55}} = 111,2 \frac{W}{m^2K}$$

Specifični toplinski tok nam iznosi:

$$q_i = k_i * \Delta\vartheta_m = 111,2 * 12,9 = 1434 \frac{W}{m^2}$$

što nam je gotovo jednako kao i početna pretpostavka.

Koeficijent prolaza topline vezan na vanjsku površinu cijevi:

$$k_e = \frac{k_i}{\beta} = \frac{111,193}{7,299} = 15,23 \frac{W}{m^2K}$$

Vanjska površina za prijelaz topline:

$$A_e = A_i * \beta = 31,38 * 7,299 = 229,05m^2$$

Brzina nastrujavanja zraka:

$$w_f = \frac{\dot{V}_a}{B * H} = \frac{12,43}{2,87 * 1,508} = 4,95 \frac{m}{s}$$

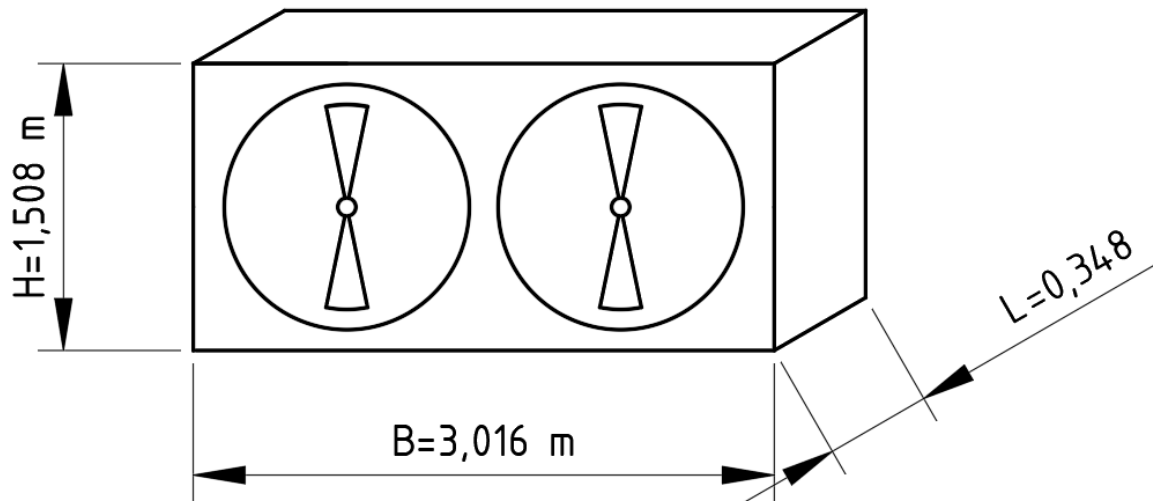
Pad tlaka zraka za šahovski raspored cijevi:

$$\Delta p = 0,233 * i_r * \left( \frac{s_2}{s_f - f_t} \right)^{0,42} * (w * \rho_a)^{1,8}$$

$$\Delta p = 0,233 * 6 * \left( \frac{0,058}{0,013 - 0,0005} \right)^{0,42} * (9,6 * 1,47)^{1,8} = 312 Pa$$

Konačne dimenzije isparivača:

- $H=1,508$  m
- $L=0,348$  m
- $B=3,016$  m



Slika 5. Dimenzije isparivača

## 5. PRORAČUN DIMENZIJA CJEVOVODA

Proračun cijevi amonijačnog rashladnog sustava proveden je prema preporučenim brzinama strujanja

### 5.1. Usisni vod donjeg kruga

Ulazni podaci:

- Maseni protok:  $\dot{m}_d = 0,2329 \frac{kg}{s}$
- Gustoća radne tvari:  $\rho_R = 0,49737 \frac{kg}{m^3}$
- Preporučena brzina strujanja:  $10 - 20 \frac{m}{s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja:  $w_R = 15 \frac{m}{s}$

Potreban promjer cjevovoda:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * \pi * w_R}}$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * 0,2329}{0,49737 * \pi * 15}} = 0,1994 m = 199,4 mm$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN200, unutarnjeg promjera  $d_u = 206,5 mm$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_R = \frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * d_u^2 * \pi}$$

$$w_R = \frac{4 * 0,2329}{0,49737 * 0,2065^2 * \pi} = 13,98 \frac{m}{s}$$



## 5.2. Tlačni vod donjeg kruga

Ulazni podaci:

- Maseni protok:  $\dot{m}_d = 0,2329 \frac{kg}{s}$
- Gustoća radne tvari:  $\rho_R = 1,79 \frac{kg}{m^3}$
- Preporučena brzina strujanja:  $15 - 25 \frac{m}{s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja:  $w_R = 20 \frac{m}{s}$

Potreban promjer cjevovoda:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * \pi * w_R}}$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * 0,2329}{1,79 * \pi * 20}} = 0,091 \text{ m} = 91 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN80, unutarnjeg promjera  $d_u = 82,5 \text{ mm}$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_R = \frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * d_u^2 * \pi}$$

$$w_R = \frac{4 * 0,2329}{1,79 * 0,0825^2 * \pi} = 24,34 \frac{m}{s}$$

### 5.3. Usisni vod gornjeg kruga

Ulazni podaci:

- Maseni protok:  $\dot{m}_g = 0,3235 \frac{kg}{s}$
- Gustoća radne tvari:  $\rho_R = 2,402 \frac{kg}{m^3}$
- Preporučena brzina strujanja:  $10 - 20 \frac{m}{s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja:  $w_R = 15 \frac{m}{s}$

Potreban promjer cjevovoda:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * \pi * w_R}}$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * 0,3235}{2,402 * \pi * 15}} = 0,1069 m = 106,9 mm$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN100, unutarnjeg promjera  $d_u = 106,3 mm$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_R = \frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * d_u^2 * \pi}$$

$$w_R = \frac{4 * 0,3235}{2,402 * 0,1063^2 * \pi} = 15,16 \frac{m}{s}$$

#### 5.4. Tlačni vod gornjeg kruga

Ulazni podaci:

- Maseni protok:  $\dot{m}_g = 0,3235 \frac{kg}{s}$
- Gustoća radne tvari:  $\rho_R = 7,987 \frac{kg}{m^3}$
- Preporučena brzina strujanja:  $15 - 25 \frac{m}{s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja:  $w_R = 20 \frac{m}{s}$

Potreban promjer cjevovoda:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * \pi * w_R}}$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * 0,3235}{7,987 * \pi * 20}} = 0,0508 \text{ m} = 50,8 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN50, unutarnjeg promjera  $d_u = 51,2 \text{ mm}$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_R = \frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * d_u^2 * \pi}$$

$$w_R = \frac{4 * 0,3235}{7,987 * 0,0512^2 * \pi} = 19,67 \frac{m}{s}$$

## 5.5. Kapljevinski vod gornjeg kruga

Ulazni podaci:

- Maseni protok:  $\dot{m}_g = 0,3235 \frac{kg}{s}$
- Gustoća radne tvari:  $\rho_R = 593,45 \frac{kg}{m^3}$
- Preporučena brzina strujanja:  $0,5 - 1,2 \frac{m}{s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja:  $w_R = 0,8 \frac{m}{s}$

Potreban promjer cjevovoda:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * \pi * w_R}}$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * 0,3235}{593,45 * \pi * 0,8}} = 0,0295m = 29,5 mm$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN32, unutarnjeg promjera  $d_u = 32,8 mm$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_R = \frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * d_u^2 * \pi}$$

$$w_R = \frac{4 * 0,3235}{593,45 * 0,0328^2 * \pi} = 0,65 \frac{m}{s}$$

## 5.6. Kapljevinski vod donjeg kruga

Ulazni podaci:

- Maseni protok:  $\dot{m}_d = 0,2329 \frac{kg}{s}$
- Gustoća radne tvari:  $\rho_R = 652,07 \frac{kg}{m^3}$
- Preporučena brzina strujanja:  $0,5 - 1,2 \frac{m}{s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja:  $w_R = 0,8 \frac{m}{s}$

Potreban promjer cjevovoda:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * \pi * w_R}}$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * 0,2329}{652,07 * \pi * 0,8}} = 0,0238 \text{ m} = 23,8 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN25, unutarnjeg promjera  $d_u = 24,8 \text{ mm}$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_R = \frac{4 * \dot{m}_g}{\rho_R * d_u^2 * \pi}$$

$$w_R = \frac{4 * 0,2329}{652,07 * 0,0248^2 * \pi} = 0,74 \frac{m}{s}$$

## 5.7. Kapljevinski vod prema tunelima za smrzavanje

Ulazni podaci:

- Maseni protok:  $\dot{m}_d = 0,2329 \frac{kg}{s}$
- Gustoća radne tvari:  $\rho_R = 696,19 \frac{kg}{m^3}$
- Preporučena brzina strujanja:  $0,5 - 1,2 \frac{m}{s}$
- Pretpostavljena brzina strujanja:  $w_R = 0,8 \frac{m}{s}$

Potreban promjer cjevovoda:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_d}{\rho_R * \pi * w_R}}$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 * 0,2329}{696,19 * \pi * 0,8}} = 0,0231 m = 23,1 mm$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN25, unutarnjeg promjera  $d_u = 24,8 mm$

Stvarna brzina strujanja:

$$w_R = \frac{4 * \dot{m}_d}{\rho_R * d_u^2 * \pi}$$

$$w_R = \frac{4 * 0,2329}{696,19 * 0,0248^2 * \pi} = 0,69 \frac{m}{s}$$

## 6. SPECIFIKACIJA KOMPONENTI SUSTAVA

Tablica 5. Komponente sustava

KOMPONENTA	JEDINICA MJERE	VRIJEDNOST MJERE
Orebreni potopljeni isparivač za hlađenje zraka. Radna tvar amonijak. Rashladni učinak 45 kW $T_Z = -30/-34\text{ °C}$ $T_i = -45\text{ °C}$	kom	6
Vijčani amonijačni kompresor donjeg stupnja: Rashladni učinak: 145 kW Električna snaga: 33 kW $T_i = -45\text{ °C} / T_m = -10\text{ °C}$	kom	2
Vijčani amonijačni kompresor gornjeg stupnja Rashladni učinak: 145 kW Električna snaga: 46 kW $T_m = -10\text{ °C} / T_K = 36\text{ °C}$	kom	2
Evaporativni kondenzator Toplinski učinak: 448,4 kW Radna tvar: R717 $T_K = 36\text{ °C}$	kom	1
Sakupljač radne tvari	kom	1
Separator radne tvari	kom	2

Odvajač ulja	kom	2
Zaporni ventil	kom	26
Nepovratni ventil	kom	10
Sigurnosni ventil	kom	3
Elektromagnetski ventil	kom	6
Ventil s plovkom	kom	2
Regulator razine	kom	2
Pretvarač tlaka	kom	4
Osjetnik temperature	kom	4
Presostat visokog tlaka	kom	2
Presostat niskog tlaka	kom	2
Regulator tlaka kondenzacije	kom	1
Amonijačna pumpa	kom	5
Čelični cjevovod		
DN 200	m	2
DN 100	m	2
DN 80	m	2
DN 50	m	10
DN 32	m	10
DN 25	m	22



## 7. ZAKLJUČAK

Dubokim zamrzavanjem mesa mesu produljujemo rok trajanja te mu očuvamo kvalitetu što sličniju onoj prije početka smrzavanja. Meso koje smrzavamo te kasnije skladištimo moramo smrznuti na temperaturu  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , što znači da temperatura u tunelu za zamrzavanje iznosi  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jednom kada se unese roba u tunel za zamrzavanje, vrata ostaju zatvorena i meso se smrzava idućih 22 sata. Ukupna masa mesa koju možemo smrznuti u jednom tunelu je 48750 kg. Također moramo meso tako posložiti da omogućimo strujanje hladnog zraka između paketa mesa kako bi se svo meso jednoliko smrzlo. Rashladni učin tunela za zamrzavanje je 142 kW te nam taj učin osiguravaju tri isparivača, svaki učina 45 kW i temperaturom isparivanja od  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Radna tvar koju koristimo pri ovom procesu je amonijak (R717). Rashladni krug se sastoji od dvostupanjskog prigušivanja te dvostupanjske kompresije, a u svakom stupnju kompresije imamo 2 kompresora. Višak topline nam se odovodi preko evaporativnog kondenzatora učina 448,42 kW.

**LITERATURA**

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Kovačević, D.: Kemija i tehnologija mesa i ribe, Prehrambeno tehnološki fakultet, Osijek, 2001.
- [3] C.F. Müller: Der Kälteanlagenbauer
- [4] C.F. Müller: Pohlmann Taschenbuch der Kältetechnik
- [5] Halasz, B., Galović, A., Boras, I.: Toplinske tablice, Zagreb, 2017.
- [6] Soldo, V., Grozdek, M.: Podloge za predavanja Hlađenje i dizalice topline, Zagreb, 2021.
- [7] Cinkokov, R.: Refridgeration solved examples, Skopje, 2004.
- [8] Kancir, B., Švaić, S., Uhlík, B.: Radne tvari u tehnici hlađenja: Amonijak, Zagreb, 1981.
- [9] Abdrassy, M.: Stapni kompresori, FSB, Zagreb, 2016.
- [10] Soldo, V.: Rashladne komore: Projektiranje rashladnih sustava, Zagreb, 2021.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Shema spajanja i automatske regulacije
- III. Dispozicijski crtež isparivača