

# Mjerenje pada tlaka propana u koaksijalnom cijev-u-cijevi kondenzatoru

---

**Grubišić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:894618>

*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

**Ivan Grubišić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Ivan Grubišić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Vladimiru Soldi na pomoći, na ustupljenoj literaturi i uloženom vremenu prilikom izrade završnog rada.

Zahvaljujem obitelji i prijateljima na potpori i pomoći tijekom čitavog školovanja.

Ivan Grubišić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске 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 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Grubišić**

JMBAG: **0035220358**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje pada tlaka propana u koaksijalnom cijev-u-cijevi kondenzatoru**

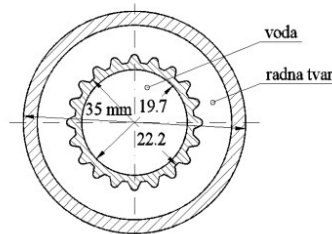
Naslov rada na engleskom jeziku: **Measurement of propane pressure drop in coaxial tube-in-tube condenser**

Opis zadatka:

U Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje Fakulteta strojarstva i brodogradnje izvedena je mjerna linija koja se koristiti za ispitivanje parametara procesa i komponenti rashladnog sustava pri različitim radnim uvjetima temperature isparavanja i kondenzacije radne tvari. Eksperimentalni sustav opremljen je sofisticiranom mjernom opremom koja omogućuje određivanje parametara rada, prijelaza topline, tokova energije, pada tlaka i učinkovitosti sustava.

U radu je potrebno provesti mjerenja pada tlaka pri strujanju dvofaznog medija u kondenzatoru eksperimentalnog rashladnog uređaja u radu s propanom. Ispitni sustav koristi se za hlađenje glikolne smjese.

Kondenzator hlađen vodom sastoji se od orebrene unutarnje Cu cijevi dimenzija  $\phi 22.2 \times 1.25$  mm. Promjer vanjskog plašta iznosi 35 mm, a debljina stjenke 2,5 mm. (Slika 1). Ukupna duljina kondenzatora iznosi 6 m.



Slika 1. Presjek koaksijalnog, cijev u cijevi kondenzatora

Rad treba sadržavati:

1. Mjerenja pada tlaka radne tvari u koaksijalnom kondenzatoru za različite protoke radne tvari.
2. Usporedbu rezultata mjerenja s numeričkim rezultatima dobivenim korištenjem dostupnih izraza za pad tlaka u literaturi.
3. Dispozicijski crtež propanskog rashladnog uređaja.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2021.

**1. rok:** 24. 2. 2022.  
**2. rok (izvanredni):** 6. 7. 2022.  
**3. rok:** 22. 9. 2022.

**1. rok:** 28. 2. – 4. 3. 2022.  
**2. rok (izvanredni):** 8. 7. 2022.  
**3. rok:** 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	3
POPIS TABLICA .....	4
POPIS OZNAKA.....	5
SAŽETAK .....	7
SUMMARY .....	8
1. OSNOVE RASHLADNOG PROCESA .....	9
1.1. Rashladni stroj .....	9
1.2. Radna tvar R290 (Propan) .....	11
2. PREGLED IZRAZA ZA PAD TLAKA.....	12
2.1. Lockhart i Martinelli metoda .....	12
2.2. Grönnerud-ova metoda .....	13
2.3. Friedel-ova metoda .....	14
3. EKSPERIMENTALNI RASHLADNI UREĐAJ.....	17
3.1. Komponente eksperimentalnog rashladnog sustava .....	19
3.1.1. <i>Kondenzator</i> .....	19
3.1.2. <i>Kompresor</i> .....	20
3.1.3. <i>Koaksijalni isparivač</i> .....	22
3.1.4. <i>Odvajač ulja</i> .....	23
3.1.5. <i>Spremnik radne tvari („receiver“)</i> .....	24
3.1.6. <i>Međuzmjenjivač</i> .....	24
3.1.7. <i>Elektronički ekspanzijski ventil (EEV)</i> .....	25
3.2. Mjerna oprema .....	26
3.2.1. <i>Mjerenje tlaka pretvornicima tlaka</i> .....	26
3.2.2. <i>Mjerenje električne snage kompresora</i> .....	27
3.2.3. <i>Mjerenje temperature termoparovima</i> .....	27
3.2.4. <i>Analogno-digitalni pretvarač</i> .....	28
4. PRORAČUNAVANJE PADA TLAKA I USPOREDBA S MJERNIM REZULTATIMA. 29	
4.1. Ulazni podaci za radnu točku R290 na temperaturi kondenzacije 40°C (13,7 bar) .....	29

---

4.2.	Dodatne veličine .....	32
4.3.	Ukupni pad tlaka .....	34
4.5.	Komponenta akceleracije.....	35
4.6.	Komponenta trenja.....	35
4.6.1.	<i>Metoda Lockhart i Martinelli</i> .....	35
4.6.2.	<i>Metoda Grönnerud</i> .....	36
4.6.3.	<i>Metoda Friedel</i> .....	38
4.7.	Ukupni padovi tlaka za različite metode.....	40
4.8.	Rezultati mjerenja .....	41
4.9.	Usporedba proračunatog pada tlaka sa mjerenim rezultatima .....	42
	ZAKLJUČAK.....	43
	LITERATURA .....	44
5.	PRILOZI.....	45

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Rashladni krug [3]

Slika 2.  $T - s$  i  $\log p - h$  dijagrami rashladnog procesa [3]

Slika 3. Eksperimentalni sustav [5]

Slika 4. Shema eksperimentalnog sustava

Slika 5. Koaksijalni kondenzator [5]

Slika 6. Spiralni („scroll“) kompresor

Slika 7. Stadiji rada spiralnog kompresora

Slika 8. Presjek spiralnog kompresora [5]

Slika 9. Koaksijalni isparivač eksperimentalnog rashladnog uređaja [3]

Slika 10. Odvajač ulja

Slika 11. Spremnik radne tvari

Slika 12. Pločasti kompaktni međuzmjenjivač

Slika 13. Elektronički ekspanzijski ventil

Slika 14. Pretvornik tlaka

Slika 15. Sučelje za očitavanje električne snage kompresora

Slika 16. Princip rada termopara

Slika 17. Akvizicijski sustav s A/D pretvaračem

Slika 18. Proces u  $\log p - h$  dijagramu

Slika 19. Shema rashladnog procesa

Slika 20. Presjek koaksijalnog, cijev u cijevi kondenzatora

Slika 21. Prikaz rezultata mjerenog i proračunatog pada tlaka



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Tri klase zapaljivosti [2]

Tablica 2. Odabir C s obzirom na režim strujanja [1]

Tablica 3. Oprema eksperimentalnog sustava [11]

Tablica 4. Rezultati proračuna rashladnog procesa

Tablica 5. Svojstva R290 na tlaku kondenzacije 13,7 bar (40°C) [6]

Tablica 6. Mjerna točka za R290 na tlaku kondenzacije 13,7 bar (40°C)

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\Delta p_{uk}$	Pa	Ukupni pad tlaka
$\Delta p_g$	Pa	Pad tlaka uslijed gravitacije
$\Delta p_{akc}$	Pa	Pad tlaka uslijed akceleracije
$\Delta p_f$	Pa	Pad tlaka uslijed trenja
G	kg/m <sup>2</sup> s	Gustoća masenog toka
$f_L$	-	Faktor jednofaznog trenja za kapljevину
$f_G$	-	Faktor jednofaznog trenja za paru
L	m	Ukupna duljina kondenzatora
$q_m$	kg/s	Maseni protok radne tvari
$A_{RT}$	m <sup>2</sup>	Površina poprečnog presjeka strujanja radne tvari
$\rho_L$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća kapljevine radne tvari
$\rho_G$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća pare radne tvari
$x$	-	Sadržaj pare
$D_{ek}$	mm	Ekvivalentan promjer za strujanje u prstenu
$\mu_L$	Pa s	Dinamička viskoznost kapljevine
$\mu_G$	Pa s	Dinamička vizkosnost pare
$\Delta p_L$	Pa	Pad tlaka kapljevine
$\Delta p_G$	Pa	Pad tlaka pare
$Re_L$	-	Reynoldsov broj kapljevine
$Re_G$	-	Reynoldsov broj pare
$\chi_{tt}$	-	Martinelijev parametar
$\Phi_{Ltt}^2$	-	Dvofazni multiplikator kod Lockhart i Martinellija
$\Phi_{Gtt}^2$	-	Dvofazni multiplikator kod Lockhart i Martinellija
$\Phi_{gd}$	-	Dvofazni multiplikator kod Grönneruda

Oznaka	Jedinica	Opis
$Fr_L$	-	Froudeov broj
$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr}$	-	Gradijent tlaka trenja
$\Phi_{fr}^2$	-	Friedelov dvofazni multiplikator
$We_L$	-	Weberov broj
$\rho_H$	$kg/m^3$	Homogena gustoća
$\vartheta_i$	$^{\circ}C$	Temperatura isparavanja
$\vartheta_k$	$^{\circ}C$	Temperatura kondenzacije
$p_i$	bar	Tlak isparavanja
$p_k$	bar	Tlak kondenzacije
$D_v$	mm	Vanjski promjer vanjske cijevi
$d_v$	mm	Vanjski promjer unutarnje cijevi
$\delta$	mm	Debljina vanjske cijevi
$\eta_{iz}$	-	Izentropski stupanj djelovanja
$h$	$kJ/kg$	Specifična entalpija
$c_p$	$kJ/kgK$	Specifični toplinski kapacitet
$\lambda$	$W/mK$	Toplinska vodljivost
$s$	$kJ/kgK$	Specifična entropija
$v$	$dm^3/kg$	Specifični volumen
$P_k$	$kW$	Snaga kompresora

## **SAŽETAK**

Predviđanje dvofaznih padova tlaka u isparivačima i kondenzatorima prilikom projektiranja i optimizacije rashladnih, klimatizacijskih i toplinskih sustava je od iznimne važnosti. Ovaj završni rad bavi se mjerenjem pada tlaka na koaksijalnom kondenzatoru pri različitim protocima radne tvari. Koaksijalni kondenzator, koji se nalazi u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje, dio je eksperimentalnog rashladnog sustava. U unutarnjoj orebrenoj cijevi kondenzatora struji voda, dok u vanjskoj cijevi kondenzatora struji radna tvar. Sva mjerenja obavljena su na temperaturi kondenzacije 40°C i tlaku kondenzacije 13,7 bara. Za proračun pad tlaka korišteni su izrazi iz literature. Rezultati dobiveni pomoću izraza iz literature uspoređeni su s mjerenim rezultatima pada tlaka dobivenim u laboratoriju. Rad ispituje podudarnost, odnosno odstupanje proračunatih rezultata pada tlaka dobivenih korištenjem izraza i rezultata dobivenih mjerenjem.

Ključne riječi: pad tlaka, koaksijalni kondenzator, mjereni i proračunati rezultati

## **SUMMARY**

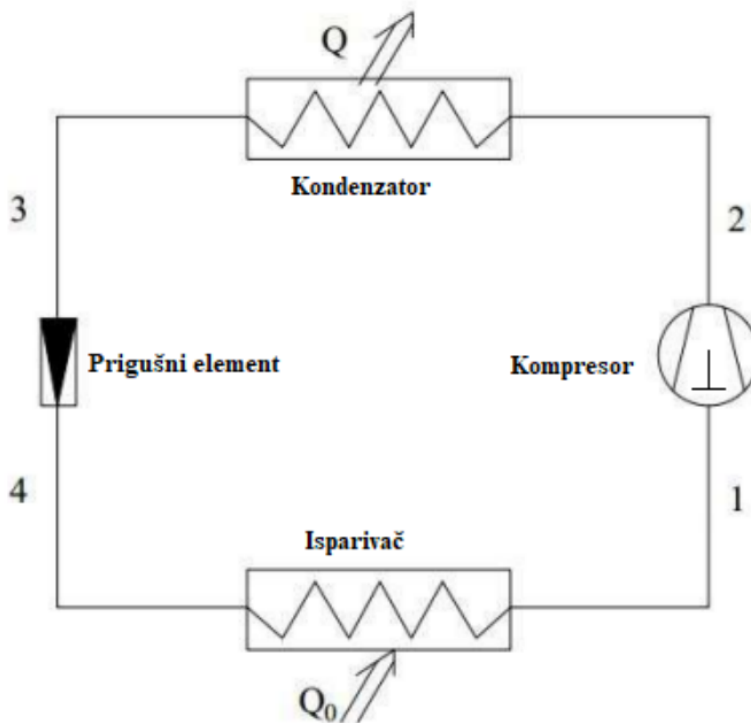
Prediction of two-phase pressure drop in evaporators and condensers when designing and optimizing cooling, air conditioning and heating systems is of crucial importance. This final paper deals with the measurement of the pressure drop on the coaxial condenser at different flow rates of the working substance. The coaxial condenser, located in the Laboratory for Heat and Thermal Devices, is part of the experimental cooling system. Water flows in the inner finned tube of the condenser, while the working substance flows in the outer tube of the condenser. All measurements were made at a condensation temperature of 40°C and a condensation pressure of 13,7 bar. Expressions from the literature were used to calculate the pressure drop. The results obtained using expressions from the literature were compared with the measured pressure drop results obtained in the laboratory. The paper examines the agreement, or deviation of the calculated pressure drop results obtained using the expression and the results obtained by measurement.

Key words: pressure drop, coaxial condenser, measured and calculated results

## 1. OSNOVE RASHLADNOG PROCESA

### 1.1. Rashladni stroj

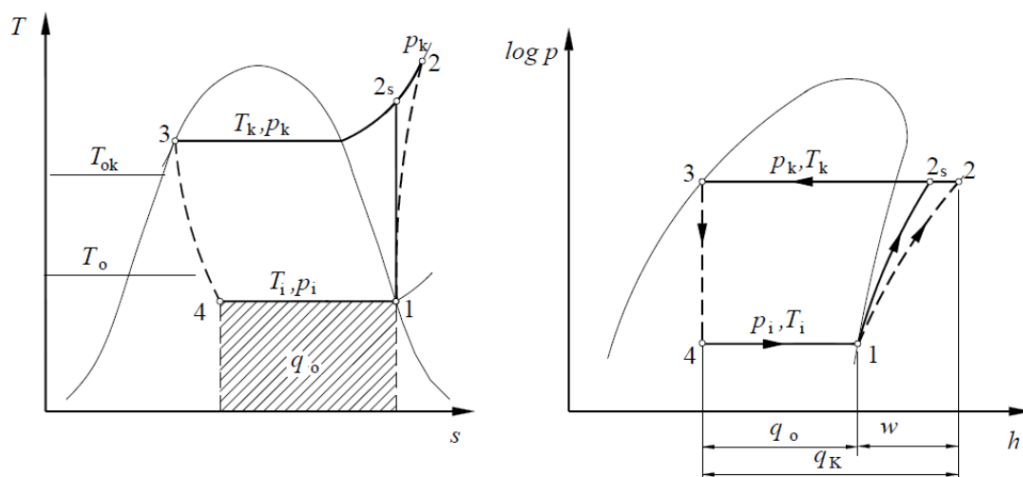
Rashladni stroj je uređaj kojim se postiže hlađenje nekog prostora, robe ili predmeta. Koristi ljevokretni kružni proces kako bi se prenijela toplina s toplinskog spremnika niže temperature na toplinski spremnik više temperature. Rashladni uređaj mora biti u mogućnosti održavati željenu temperaturu konstantnom kada se postigne odgovarajuća temperatura hladnijeg toplinskog spremnika.



Slika 1. Rashladni krug [3]

Radni medij se komprimira u kompresoru, zatim takav struji prema kondenzatoru gdje predaje toplinu toplinskom spremniku na višoj temperaturi. Predajući toplinu radna tvar kondenzira i struji dalje prema prigušnom elementu. Prigušni element je najčešće ekspanzijski ventil u

kojemu ukapljena radna tvar ekspandira na niži tlak. Takva ide dalje prema isparivaču gdje isparava preuzimajući toplinu od toplinskog izvora te nakon toga struji opet prema kompresoru. Ovaj proces se ponavlja. Slika 1. prikazuje četiri osnovna elementa kompresijskog rashladnog uređaja. Valja napomenuti da se u stvarnosti rashladni uređaj sastoji od više komponenata nego što je to navedeno na Slici 1. Veći broj dodatnih komponenata nam osigurava pravilan rad uređaja.



**Slika 2. T – s i log p – h dijagrami rashladnog procesa [3]**

Slika 2. prikazuje T – s i log p – h dijagrame rashladnog procesa u kojemu su opisane promjene stanja:

- 1 – 2 – kompresija
- 2 – 3 – kondenzacija
- 3 – 4 – prigušenje
- 4 – 1 – isparavanje

Prema opisu vidljivo je da je za rad rashladnog uređaja potrebno uložiti rad, odnosno kompenzacijsku energiju kako bi se toplina preuzeta na isparivaču na nižoj temperaturi, prenijela na viši energetski nivo te preko kondenzatora predala toplinskom spremniku na višoj temperaturi.

## 1.2. Radna tvar R290 (Propan)

Propan je plin iz skupine ugljikovodika, alkana, koji u svojoj strukturi ima 3 ugljikova atoma. Dobiva se iz nafte i zemnog plina, a predstavlja s ekološkog stajališta odličnu alternativu trenutačnim HFC radnim tvarima zastupljenima u rashladnoj tehnici. GWP (Global warming potential) mu iznosi 3, dok nema štetan utjecaj na ozon (ODP broj je 0). Zanimljivo mali GWP u odnosu na HFV spojeve. Najveća mana propana kao radne tvari je njegova zapaljivost u smjesi sa zrakom. Njegova klasifikacija je A3 sa stajališta zapaljivosti.

**Tablica 1. Tri klase zapaljivosti [2]**

		TOKSIČNOST	
		Niska	Visoka
ZAPALJIVOST	Nezapaljiva	A1	B1
	Slabo zapaljiva	A2L	B2L
		A2	B2
	Jako zapaljiva	A3	B3

Propan posjeduje dobra termodinamička svojstva uspoređujući ih s s HCFC i HFC radnim tvarima. Specifičnost propana je ta da se kao radna tvar relativno malo zagrije nakon kompresije, što vidimo i pomoću njegovog izentropskog koeficijenta koji iznosi 1,12. Osim toga posjeduje visok specifični toplinski kapacitet. Veliki problem propana je topivost propana u ulju. Viskoznost kompresijskog ulja smanjuje se s povećanjem količine otopljenog propana u njemu. Niža viskoznost ulja smanjuje performanse kompresora i povećava trošenje komponenti.



## 2. PREGLED IZRAZA ZA PAD TLAKA

### 2.1. Lockhart i Martinelli metoda

Metoda koja je predviđjela dvofazni pad tlaka uslijed trenja na temelju dvofaznog multiplikatora za kapljevinu i paru:

$$\Delta p_f = \Phi_{Ltt}^2 \cdot \Delta p_L$$

$$\Delta p_f = \Phi_{Gtt}^2 \cdot \Delta p_G$$

Gdje su:

$$\Delta p_L = 4 \cdot f_L \cdot \left(\frac{L}{d_i}\right) \cdot G^2 \cdot (1 - x^2) \cdot \left(\frac{1}{2\rho_L}\right)$$

$$\Delta p_G = 4 \cdot f_G \cdot \left(\frac{L}{d_i}\right) \cdot G^2 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{1}{2\rho_G}\right)$$

U formulama  $\rho$  predstavlja gustoću za kapljevinu i paru,  $x$  predstavlja sadržaj pare i ona ide od  $0 \leq x \leq 1$ ,  $G$  predstavlja gustoću masenog toka koja se računa kao omjer masenog toka radne tvari i površine poprečnog presjeka kroz koji struji radna tvar:

$$G = \frac{q_m}{A_{RT}}$$

Faktori jednofaznog trenja računaju se:

$$f_L = \frac{0,079}{Re_L^{0,25}}$$

$$f_G = \frac{0,079}{Re_G^{0,25}}$$

Njihovi odgovarajući dvofazni multiplikatori su:

$$\Phi_{Ltt}^2 = 1 + \frac{C}{\chi_{tt}} + \frac{1}{\chi_{tt}^2}, \text{ za } Re_L > 4000$$

$$\Phi_{Gtt}^2 = 1 + C\chi_{tt} + \chi_{tt}^2, \text{ za } Re_L < 4000$$

Gdje je  $\chi_{tt}$  Martinellijev parametar, a računa se:

$$\chi_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0.1}$$

Konstanta C se odabire s obzirom na režim strujanja kapljevine i pare.

**Tablica 2. Odabir C s obzirom na režim strujanja [1]**

Kapljevina	Para	C
Turbulentno	Turbulentno	20
Laminarno	Turbulentno	12
Turbulentno	Laminarno	10
Laminarno	Laminarno	5

## 2.2. Grönnerud-ova metoda

Grönnerud-ova metoda razvijena je posebno za rashladna sredstva, a računa se:

$$\Delta p_f = \Phi_{gd} \cdot \Delta p_L$$

Njegov dvofazni multiplikator izražava se:

$$\Phi_{gd} = 1 + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} \cdot \left[ \frac{\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)}{\left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0.25}} - 1 \right]$$

Dok je:

$$\Delta p_L = 4 \cdot f_L \cdot \left(\frac{L}{d_i}\right) \cdot G^2 \cdot \left(\frac{1}{2\rho_L}\right)$$

Njegov gradijent tlaka trenja ovisi o Froudeovom broju:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} = f_{Fr} \cdot [x + 4 \cdot (x^{1,8} - x^{1,0} \cdot f_{Fr}^{0,5})]$$

Ako je Froudeov broj za kapljevinu  $Fr_L \geq 1$  onda je  $f_{Fr} = 1,0$ , a ako je  $Fr_L < 1$  onda se  $f_{Fr}$  računa:

$$f_{Fr} = Fr_L^{0,3} + 0.0055 \left(\ln \frac{1}{Fr_L}\right)^2$$

Gdje je:

$$Fr_L = \frac{G^2}{g d_i \rho_L^2}$$

Grönnerud-ova metoda primjenjiva je za  $0 \leq x < 1$ .

### 2.3. Friedel-ova metoda

Friedelova metoda koristi dvofazni množitelj:

$$\Delta p_f = \Delta p_L \cdot \Phi_{fr}^2$$

I kod Friedelove metode  $\Delta p_L$  se računa:

$$\Delta p_L = 4 \cdot f_L \cdot \left(\frac{L}{d_i}\right) \cdot G^2 \cdot \left(\frac{1}{2\rho_L}\right)$$

Faktor trenja kod kapljevine i Reynoldsov broj izraženi su kao:

$$f_L = \frac{0,079}{Re_L^{0,25}}$$

$$Re_L = \frac{G \cdot d_i}{\mu_L}$$

Kod Reynoldsa koristimo dinamičku viskoznost za kapljevinu. Dvofazni multiplikator računa se:

$$\Phi_{fr}^2 = E + \frac{3,24 \cdot F \cdot H}{Fr_H^{0,045} \cdot We_L^{0,035}}$$

Faktori F, H, E,  $Fr_H$ ,  $We_L$  određeni su sljedećim jednažbama:

$$Fr_H = \frac{G^2}{g d_i \rho_H^2}$$

$$E = (1 - x)^2 + x^2 \cdot \frac{f_G \cdot \rho_L}{f_L \cdot \rho_G}$$

$$F = x^{0,78} \cdot (1 - x)^{0,224}$$

$$H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0,91} \cdot \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0,19} \cdot \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0,7}$$

$$We_L = \frac{G^2 \cdot d_i}{\sigma \cdot \rho_H}$$

Homogena gustoća koja se koristi u jednažbama određena je na temelju sadržaja pare x:

$$\rho_H = \left( \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right)^{-1}$$

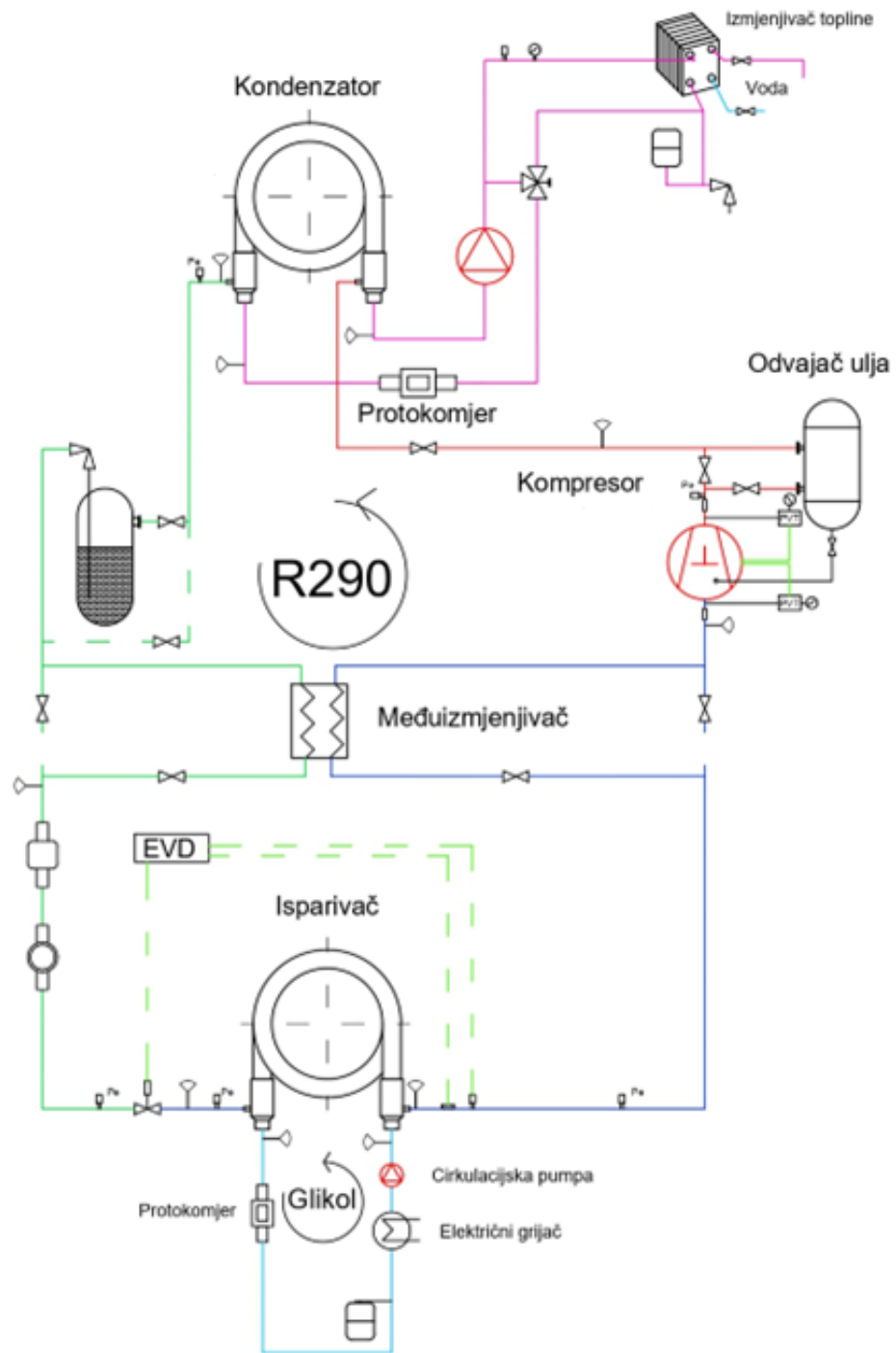
Ova metoda se preporučuje kada je  $\left( \frac{\mu_L}{\mu_G} \right) < 1000$  i primjenjiv na sadržaju pare od  $0 \leq x \leq 1$ .

### 3. EKSPERIMENTALNI RASHLADNI UREĐAJ

Eksperimentalni rashladni uređaj, koji se nalazi u *Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje*, sastoji se od tipičnih komponenti koje čine rashladni sustav: kompresor, kondenzator, ekspanzijski ventil i isparivač. Radnu tvar usisava kompresor koji ju komprimira. Takva radna tvar struji do koaksijalnog kondenzatora u kojem predaje toplinski tok vodi koja dolazi iz vodovoda te radna tvar ide do sakupljača radne tvari. Preuzimanjem toplinskog toka voda se cjevovodom slijeva u kanalizaciju. Daljnjim strujanjem radne tvari dolazi do međuzmjenjivača koji je postavljen u ovaj eksperimentalni rashladni uređaj kako bi se postigla veća efikasnost procesa. Uloga međuzmjenjivača je da se radna tvar dodatno pothlađuje/pregrijava. Nakon toga elektronički-ekspanzijski ventil prigušuje tlak na tlak isparavanja. Ulaskom u isparivač radna tvar preuzima toplinu od 30% smjese etilen-glikola. Krug etilen-glikola sadrži: električni grijač, pumpu i ekspanzijsku posudu. Odvajač ulja, sakupljač radne tvari i međuzmjenjivač moguće je zaobići obilaznim cjevovodima. Sve komponente sustava se nalaze na pomičnim kolicima.



Slika 3. Eksperimentalni sustav



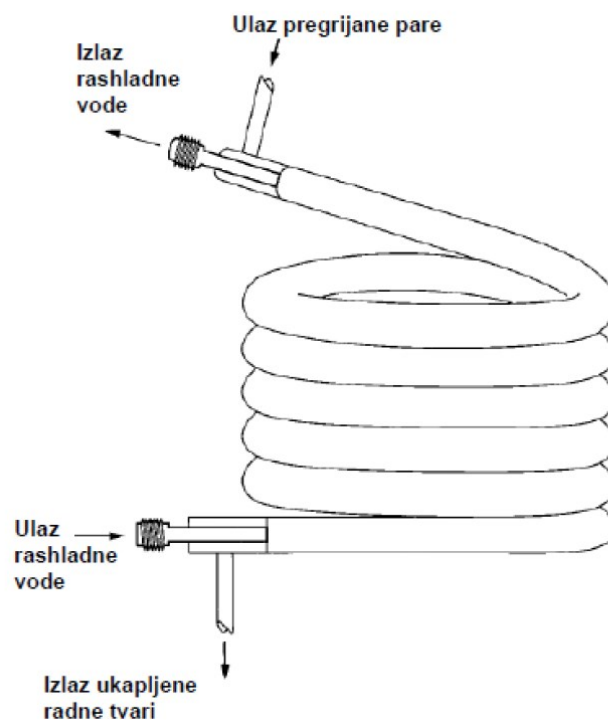
Slika 4. Shema eksperimentalnog sustava

Tablica 3. Oprema eksperimentalnog sustava [11]

Komponente	Proizvođač	Tip
Kondenzator	Alfa Laval	CC17
Isparivač	Alfa Laval	EC14
Ekspanzijski ventil	Emerson	Alco EX4
Kompresor	Emerson	Copeland ZB31KCU-TFMN
Odvajač ulja	Retax inverter	-
Međuizmjenjivač	Alfa Laval	Pločasti kompaktni

### 3.1. Komponente eksperimentalnog rashladnog sustava

#### 3.1.1. Kondenzator



Slika 5. Koaksijalni kondenzator [5]



Protusmjerno strujanje prednost je ovakvom tipu izmjenjivača jer omogućuje vrlo efektivnu izmjenu toplinskog toka. Kao radnu tvar koriste se ugljikovodici i halogenirani ugljikovodici („freoni“). Prijelaz topline obično se ostvaruje filmskom kondenzacijom na vodoravnoj cijevi ili u snopu cijevi, a turbulentnim strujanjem u cijevi.

### 3.1.2. Kompresor

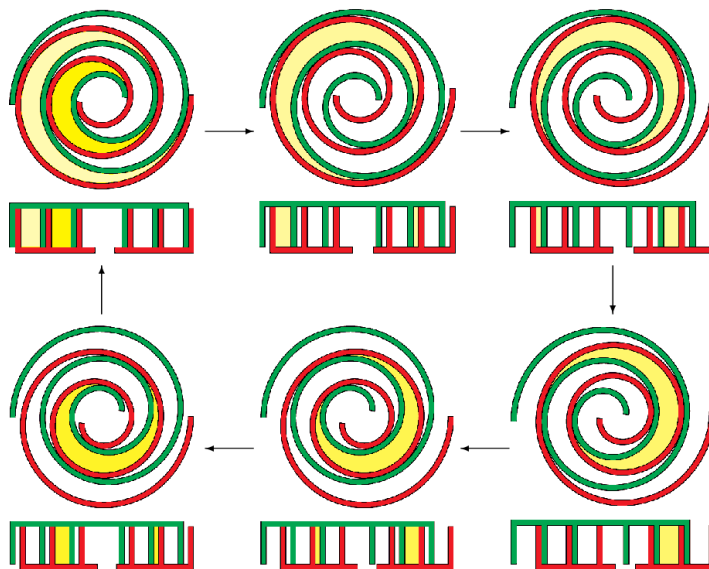
Vrsta kompresora koji se koristi kod ovoga rashladnog uređaja je spiralni („scroll“) kompresor. Za kompresor je važno osigurati da usisava radnu tvar u parovitoj fazi da nebi došlo do hidrauičkog udara. Upravo u njemu imamo dovodene kompenzacijske energije koja omogućuje prijenos topline s hladnijeg na topliji spremnik.



Slika 6. Spiralni („scroll“) kompresor

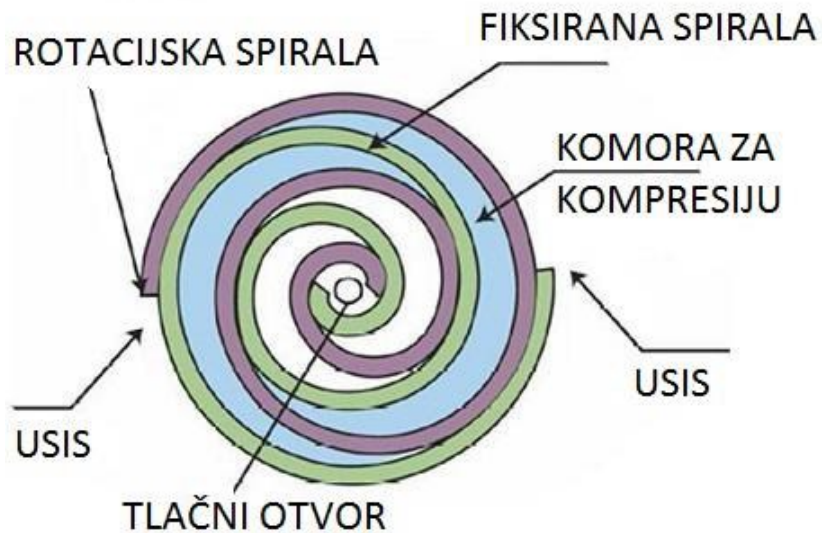
Princip rada spiralnog kompresora:

Nastaju razdvojene komore u kojima se istodobno odvijaju pojedini stadiji rada zbog neposrednog dodira spirale stapa i cilinda s najmanje 2 izvodnice. Na prvoj slici (lijevo gore) vidimo da se odvija usis radne tvari u kompresor, dok se istovremeno komprimira radna tvar, već od prije usisana, istiskuje u tlačni vod. U drugom stadiju vidimo da počinje komprimiranje radne tvari. Ovaj kompresor komprimiranje vrši pomoću svoje geometrije. U završnom stadiju komprimirana radna tvar se istiskuje kroz tlačni otvor. Proces transporta plina se istodobno odvija s obje strane pa se može reći da je spiralni kompresor dvoradni stroj. Nema samoradne ventile pa radi s prisilnim razvodom.



Slika 7. Stadiji rada spiralnog kompresora

Prednosti spiralnog kompresora su velika dobava zbog dovradnog kompromiranja i miran rad zbog mogućnosti balansiranja. Imaju minimalan broj pokretnih dijelova (stap i ekscentar). Nedostatci su prilagođavanje uvjetima tlačnog voda i brtvljenje. Pri ulasku radne tvari, ulaze i kapljice mazivnog ulja koje se zbog smanjenja brzine u usisnom prostoru kućišta taloži na dno, odakle da uljna pumpa tjera prema ležajevima. Ovakvi kompresori koriste se za uređaje manjeg učinka.



Slika 8. Presjek spiralnog kompresora [5]

### 3.1.3. Koaksijalni isparivač

Koaksijalni isparivač sastoji se od 9 manjih cijevi koje su umetnute u jednu veću cijev i savijene su u valjkasti oblik. Radna tvar struji kroz unutarnje cijevi, a medij koji se hladi struji kroz vanjsku cijev. Radna tvar koja struji kroz 9 manjih cijevi je propan (R290), dok je medij koji se hladi u većoj vanjskoj cijevi etilen-glikol. Ovakav tip isparivača se ne koristi na većim uređajima.



**Slika 9. Koaksijalni isparivač eksperimentalnog rashladnog uređaja [3]**

#### **3.1.4. Odvajač ulja**

Ulje u rashladnom sustavu od iznimne je važnosti jer podmazuje i hladi kompresor. Odvajači ulja odvajaju kaplice ulja koje se izbacuju iz kompresora u tlačni vod zajedno sa radnom tavrni nakon kompresije.



**Slika 10. Odvajač ulja**

### 3.1.5. Spremnik radne tvari („receiver“)

Posude pod tlakom, smještene iza kompresora, kojima je uloga prihvata ukapljene radne tvari. Može biti iza kondenzatora ili cijelog sustava. Osim prihvata ukapljene radne tvari zadatak mu je održavanje kondenzatora praznim, a ponekad kao i pothlađivač radne tvari.



**Slika 11. Spremnik radne tvari**

### 3.1.6. Međuzmjenjivač

Uloga međuzmjenjivača je da se dodatno pregrije/pothladi radna tvar i time povisi efikasnost samoga uređaja. Na mjernoj linije međuzmjenjivač je pločaste kompaktne izvedbe.



**Slika 12. Pločasti kompaktni međuizmjenjivač**

### ***3.1.7. Elektronički ekspanzijski ventil (EEV)***

Ne dođe li do potpunog isparavanja radne tvari tj. pregrijavanja riskira se dolazak kapljica radne tvari u kompresor i mogućnost hidrauličkog udara. Stabilno pregrijanje nam omogućuje elektronički ekspanzijski ventil. EEV objedinjuje funkcije elektromagnetskog ventila i termoekspanzijskog ventila. Za stabilno minimalno pregrijanje služi mu osjetnik temperature pregrijanja radne tvari koje se naslanja na izlaznu cijev isparivača, pretvarač tlaka koji je spojen na tlak radne tvari na izlazu iz isparivača, te kontroler koji iz dobivenih informacija otvara ventil točno onoliko koliko treba da održi minimalno stabilno pregrijanje. EEV se koristi za sve radne tvari, nije potrebno podešavanje.



**Slika 13. Elektronički ekspanzijski ventil**

## **3.2. Mjerna oprema**

### ***3.2.1. Mjerenje tlaka pretvornicima tlaka***

Pretvornici tlaka su mjerni instrumenti koji pretvaraju mjerni tlak u električni signal proporcionalan mjernom tlaku. Signal koji izlazi može biti frekvencija, struja ili napon. Na mjernoj liniji pretvornici tlaka su piezoelektrični. Oni funkcioniraju tako da se na površini posebno odreznog kristala, koji je elastično deformiran vanjskom silom, stvara električni naboj, a time i električni napon.



**Slika 14. Pretvornik tlaka**

### 3.2.2. Mjerenje električne snage kompresora

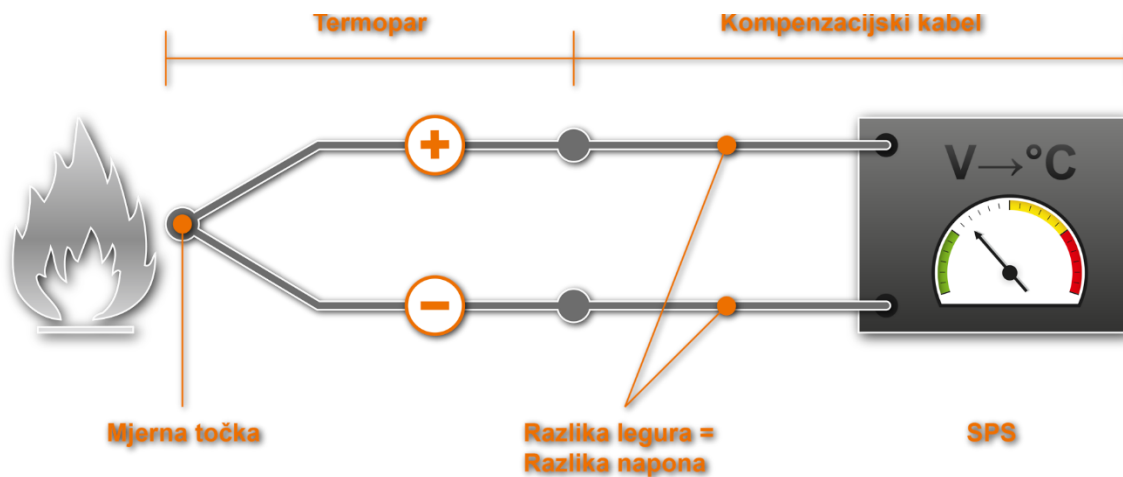
Električna snaga kompresora mjeri se digitalnim multimetrom.



Slika 15. Sučelje za očitavanje električne snage kompresora

### 3.2.3. Mjerenje temperature termoparovima

Termopar se sastoji od dva različita vodiča koja su spojena na jednom kraju, a služi za mjerenje temperature. Funkcionira na principu termoelektričnog efekta (Seebeckov efekt). Termoelektrični efekt je pojava razlike napona kad postoji gradijent temperature na spoju dva različita vodiča. Razlika napona je direktno proporcionalna razlici temperature. Potrebno je poznavati temperaturu na spoju s A/D pretvaračem da bi se dobilo točno očitavanje temperature.



Slika 16. Princip rada termopara



### 3.2.4. Analogno-digitalni pretvarač

Sve podatke koji daju osjetnici temperatura i tlakova su spojeni na sustav akvizicije podataka „Agilent“ s analogno-digitalnim pretvaračem koji je serijskom komunikacijom spojen na računalo. Podaci se očitavaju svakih 30 sekundi te se pohranjuju i prikazuju na računalu u obliku tabličnih vrijednosti.

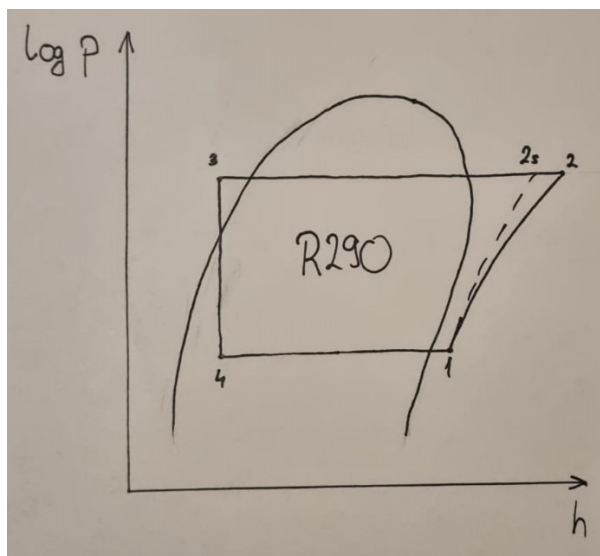


**Slika 17. Akvizicijski sustav s A/D pretvaračem**

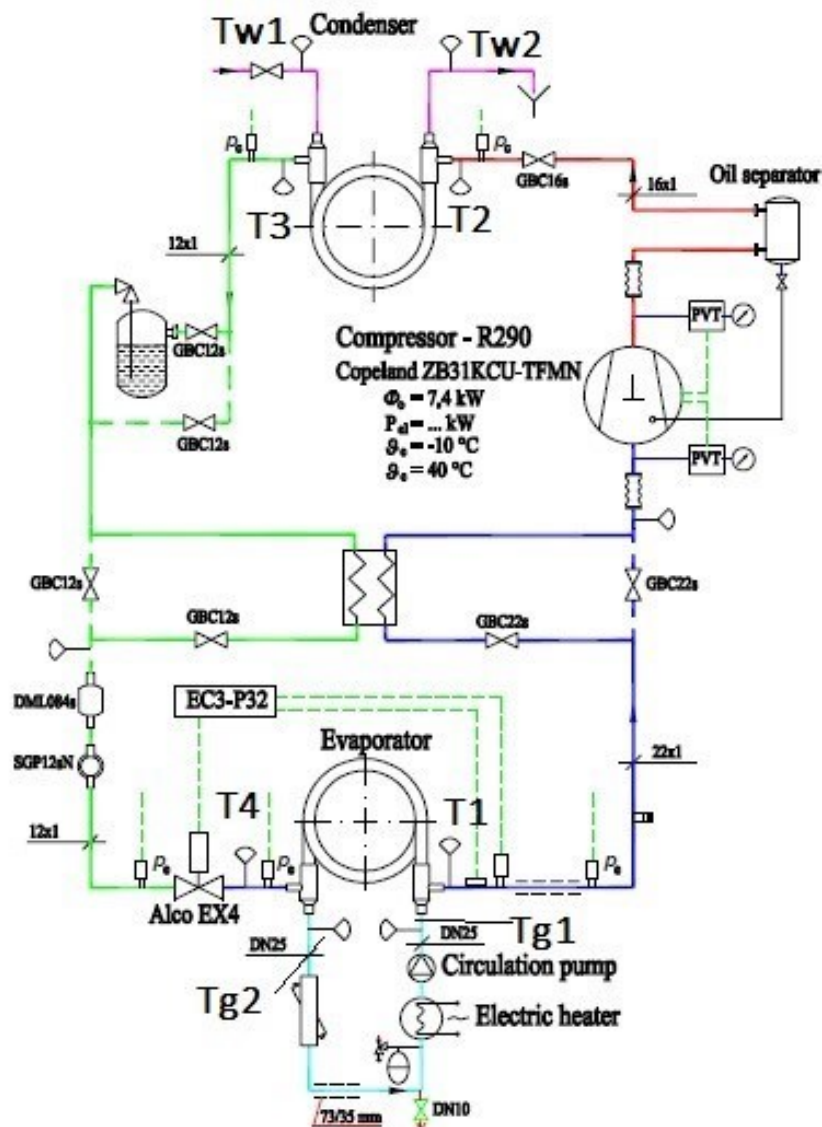
## 4. PRORAČUNAVANJE PADA TLAKA I USPOREDBA S MJERNIM REZULTATIMA

### 4.1. Ulazni podaci za radnu točku R290 na temperaturi kondenzacije 40°C (13,7 bar)

- |   |   |
|---|---|
| • Radna tvar                                | R290 (propan)                                   |
| • Temperatura isparavanja                   | $\vartheta_i = -7,5 \text{ °C}$                 |
| • Tlak isparavanja                          | $p_i = 3,8 \text{ bar}$                         |
| • Temperatura kondenzacije                  | $\vartheta_k = 40 \text{ °C}$                   |
| • Tlak kondenzacije                         | $p_k = 13,7 \text{ bar}$                        |
| • Rashladni učinak                          | $\phi_i = 7,8 \text{ kW}$                       |
| • Vanjski promjer vanjske cijevi            | $D_v = 35 \text{ mm}$                           |
| • Debljina vanjske cijevi                   | $\delta = 2,5 \text{ mm}$                       |
| • Vanjski promjer unutarnje cijevi          | $d_v = 22,2 \text{ mm}$                         |
| • Ukupna duljina kondenzatora               | $L = 6 \text{ m}$                               |
| • Pregrijanje                               | $\Delta\vartheta_{\text{preg}} = 5 \text{ °C}$  |
| • Pothlađenje                               | $\Delta\vartheta_{\text{pothl}} = 3 \text{ °C}$ |
| • Izračunati izentropski stupanj djelovanja | $\eta_{iz} = 0,72$                              |



Slika 18. Proces u log p – h dijagramu



Slika 19. Shema rashladnog procesa

- 1 – pregrijana para na izlazu iz isparivača
- 2s – pregrijana para nakon izentropske kompresije
- 2 – pregrijana para nakon realne kompresije
- 3 – pothlađena kapljevina na izlazu iz kondenzatora
- 4 – mokra para na izlazu iz ekspanzijskog ventila

Točka 1 definirana je temperaturom nakon pregrijanja i tlakom isparavanja:

$$\vartheta_1 = \vartheta_i + \Delta\vartheta_{\text{preg}}$$

$$p_1 = p_i$$

Točka 2s definirana je entropijom koja je jednaka entropiji točke 1 i tlakom kondenzacije:

$$p_{2s} = p_k$$

$$s_{2s} = s_1$$

Točka 2 definirana je tlakom kondenzacije i entalpijom koja ovisi o izentropskom stupnju djelovanja kompresora i entalpiji u točkama 1 i 2s:

$$p_2 = p_k$$

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

Točka 3 definirana je tlakom kondenzacije i temperaturom nakon pothlađenja:

$$p_3 = p_k$$

$$\vartheta_3 = \vartheta_k - \Delta\vartheta_{\text{pothl}}$$

Točka 4 definirana je tlakom isparavanja i entalpijom koja je jednaka entalpiji u točki 3 (prigušenje):

$$p_4 = p_i$$

$$h_4 = h_3$$

**Tablica 4. Rezultati proračuna rashladnog procesa**

Točka	$\vartheta$ [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	v [ $dm^3/kg$ ]	x [-]
1	-2,5	3,8	574,66	2,41	122,4	-
2s	50,1	13,7	636,61	2,41	35,54	-
2	61,3	13,7	660,7	2,5	37,97	-
3	37	13,7	298,5	1,33	2,114	-
4	-7,5	3,8	298,5	1,37	37,37	0,29

**Tablica 5. Svojstva R290 na tlaku kondenzacije 13,7 bar (40°C) [6]**

	h [kJ/kg]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [kJ/kgK]	$\mu$ [Pa s]	$\lambda$ [W/mK]	Pr [-]
Kapljevina (')	308,002	467,289	2,9433	0,00008249	0,0858	2,8297
Para (")	614,495	30,208	2,2797	0,00000942	0,0215	0,9988

Proračun je izvršen ručno, dok su svojstva isčitana iz [6]

Maseni protok radne tvari:

$$q_m = \frac{\Phi_i}{h_1 - h_4} = \frac{7,8}{568,32 - 298,3} = 0,0282 \text{ kg/s}$$

Snaga kompresora:

$$P_k = q_m \cdot (h_2 - h_1) = 0,0282 \cdot (660,7 - 574,66) = 2,5 \text{ kW}$$

Učink kondenzatora:

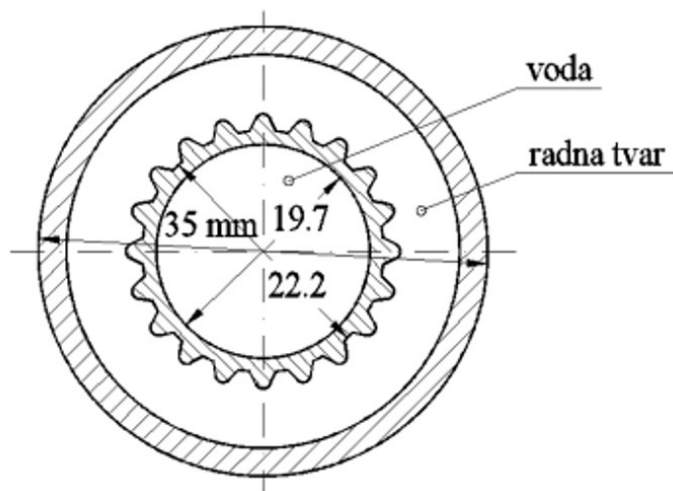
$$\Phi_k = q_m \cdot (h_2 - h_3) = 0,0282 \cdot (660,7 - 298,5) = 10,2 \text{ kW}$$

## 4.2. Dodatne veličine

Ekvivalentan promjer za strujanje u prstenu:

$$D_{ek} = (D_v - \delta) - d_v = (35 - 2,5) - 22,2 = 10,3 \text{ mm}$$

U sklopu eksperimentalnog postava kondenzator ima orebrenje na vanjskoj stijenci unutarnje cijevi. Zbog oskudnih istraživanja u području prijelaza topline za takvu konfiguraciju koaksijalnog kondenzatora, orebrenje je zanemareno u proračunu.



Slika 20. Presjek koaksijalnog, cijev u cijevi kondenzatora

Površina poprečnog presjeka strujanja R290:

$$A_{RT} = \frac{\pi \cdot (D_v - \delta)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d_v)^2}{4} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{35}{1000} - \frac{2,5}{1000}\right)^2}{4} - \frac{\pi \cdot \left(\frac{22,2}{1000}\right)^2}{4} = 0,000443 \text{ m}^2$$

Srednji sadržaj pare:

$$x_{sr} = \frac{1 + 0}{2} = 0,5$$

Gustoća masenog toka:

$$G = \frac{q_m}{A_{RT}} = \frac{0,0282}{0,000443} = 63,66 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Reynoldsov broj kapljevine:

$$Re' = \frac{G \cdot (1 - x) \cdot D_{ek}}{\mu'} = \frac{63,66 \cdot (1 - 0,5) \cdot \left(\frac{10,3}{1000}\right)}{0,00008249} = 3974,4$$

Reynoldsov broj pare:

$$Re'' = \frac{G \cdot x \cdot D_{ek}}{\mu''} = \frac{63,66 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{10,3}{1000}\right)}{0,00000942} = 34803,5$$

### 4.3. Ukupni pad tlaka

Pad tlaka u kondenzatoru specifičan je po tome što sadrži dvije faze, kapljevitu i parovitu. Upravo iz tog razloga i sam proračun pada tlaka računa se drugačije nego kod jednofaznog strujanja. Ukupni gradijent tlaka jednak je zbroju komponente trenja, komponente gravitacije i komponente akceleracije. Ukupni pad tlaka fluida posljedica je varijacije kinetičke i potencijalne energije tekućine i zbog trenja o stijenke protočnog kanala.

$$\Delta p_{uk} = \Delta p_g + \Delta p_{akc} + \Delta p_f$$

### 4.4. Komponenta gravitacije

Komponenta gravitacije računa se pomoću izraza:

$$\left(\frac{p_G}{dz}\right)_{tp} = [\alpha \cdot \rho'' + \rho' \cdot (1 - \alpha)] \cdot g \cdot \sin \theta$$

Faktor  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{1}{1 + S \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right) \cdot \frac{\rho''}{\rho'}}$$

Faktor S:

$$S = \left[1 - x \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho''}\right)\right]^{0,5} = \left[1 - 0,5 \cdot \left(1 - \frac{467,289}{30,208}\right)\right]^{0,5} = 2,8696$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + 2,8696 \cdot \left(\frac{1-0,5}{0,5}\right) \cdot \frac{30,208}{467,289}} = 0,8435$$

Komponenta gravitacije:

$$\left(\frac{p_G}{dz}\right)_{tp} = [0,8435 \cdot 30,208 + 467,289 \cdot (1 - 0,8435)] \cdot 9,80665 \cdot \sin 45^\circ = 683,8 \text{ Pa/m}$$

$$\Delta p_g = \left(\frac{p_G}{dz}\right)_{tp} \cdot L = 683,8 \cdot 6 = 4102,8 \text{ Pa}$$

## 4.5. Komponenta akceleracije

Komponenta akceleracije računa se pomoću izraza:

$$\left(\frac{p_A}{dz}\right)_{tp} = G^2 \cdot \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2}{\alpha \cdot \rho''} + \frac{(1-x)^2}{(1-x) \cdot \rho'} \right]$$

$$\left(\frac{p_A}{dz}\right)_{tp} = 63,66^2 \cdot \frac{d}{dz} \left[ \frac{0,5^2}{0,8435 \cdot 30,208} + \frac{(1-0,5)^2}{(1-0,5) \cdot 467,289} \right]$$

$$\left(\frac{p_A}{dz}\right)_{tp} = 54 \text{ Pa/m}$$

$$\Delta p_{akc} = \left(\frac{p_A}{dz}\right)_{tp} \cdot L = 54 \cdot 6 = 324 \text{ Pa}$$

## 4.6. Komponenta trenja

### 4.6.1. Metoda Lockhart i Martinelli

$$Re_L = \frac{G \cdot D_{ekv}}{\mu_L} = \frac{63,66 \cdot \left(\frac{10,3}{1000}\right)}{0,00008249} = 7948,8$$

Zbog  $Re_L > 4000$  koristimo:

$$\Phi_{Gtt}^2 = 1 + \frac{C}{\chi_{tt}} + \frac{1}{\chi_{tt}^2}$$

Oba strujanja su turbulentna pa C odabiremo iz tablice 2:

$$C = 20;$$

Martinellijev parametar:

$$\chi_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0,1}$$

$$\chi_{tt} = \left(\frac{1-0,5}{0,5}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{30,208}{467,289}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{0,00008249}{0,00000942}\right)^{0,1} = 0,31568$$



Dvofazni multiplikator:

$$\Phi_{Ltt}^2 = 1 + \frac{20}{0,31568} + \frac{1}{0,31568^2} = 74,39$$

Faktor jednofaznog trenja:

$$f_L = \frac{0,079}{Re_L^{0,25}}$$

$$f_L = \frac{0,079}{7948,8^{0,25}} = 0,00837$$

$$\Delta p_L = 4 \cdot f_L \cdot \left(\frac{L}{d_i}\right) \cdot G^2 \cdot (1-x)^2 \cdot \left(\frac{1}{2\rho_L}\right)$$

$$\Delta p_L = 4 \cdot 0,00837 \cdot \left(\frac{6}{\frac{10,3}{1000}}\right) \cdot 63,66^2 \cdot (1-0,5)^2 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 467,289}\right) = 21,14 \text{ Pa}$$

Komponenta trenja:

$$\Delta p_f = \Phi_{Ltt}^2 \cdot \Delta p_L$$

$$\Delta p_f = 74,39 \cdot 21,14 = 1572,6 \text{ Pa}$$

#### 4.6.2. Metoda Grönnnerud

Komponenta trenja računa se:

$$\Delta p_f = \Phi_{gd} \cdot \Delta p_L$$

Dvofazni multiplikator:

$$\Phi_{gd} = 1 + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} \cdot \left[ \frac{\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)}{\left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0,25}} - 1 \right]$$

Njegov gradijent tlaka trenja ovisi o Froudeovom broju:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} = f_{Fr} \cdot [x + 4 \cdot (x^{1,8} - x^{10} \cdot f_{Fr}^{0,5})]$$

Froudeov broj:

$$Fr_L = \frac{G^2}{gd_i \rho_L^2} = \frac{63,66^2}{9,80665 \cdot \left(\frac{10,3}{1000}\right) \cdot 467,289^2} = 0,184 < 1$$

Zbog uvjeta  $Fr_L < 1$  uzima se:

$$f_{Fr} = Fr_L^{0,3} + 0,0055 \left(\ln \frac{1}{Fr_L}\right)^2 = 0,184^{0,3} + 0,0055 \left(\ln \frac{1}{0,184}\right)^2 = 0,6176$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} = 0,6176 \cdot [0,5 + 4 \cdot (0,5^{1,8} - 0,5^{10} \cdot 0,6176^{0,5})] = 1,02$$

Zatim je dvofazni multiplikator:

$$\phi_{gd} = 1 + 1,02 \cdot \left[ \frac{\left(\frac{467,289}{30,208}\right)}{\left(\frac{0,00008249}{0,00000942}\right)^{0,25}} - 1 \right] = 9,1523$$

$$\Delta p_L = 4 \cdot f_L \cdot \left(\frac{L}{d_i}\right) \cdot G^2 \cdot \left(\frac{1}{2\rho_L}\right)$$

Faktor jednofaznog trenja za kapljevinu:

$$Re_L = \frac{G \cdot D_{ekv}}{\mu_L} = \frac{63,66 \cdot \left(\frac{10,3}{1000}\right)}{0,00008249} = 7948,8$$

$$f_L = \frac{0,079}{Re_L^{0,25}} = \frac{0,079}{7948,8^{0,25}} = 0,00837$$

$$\Delta p_L = 4 \cdot 0,00837 \cdot \left( \frac{6}{\frac{10,3}{1000}} \right) \cdot 63,66^2 \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 467,289} \right) = 84,57 \text{ Pa}$$

Pa je komponenta trenja:

$$\Delta p_f = \phi_{gd} \cdot \Delta p_L = 9,1523 \cdot 84,57 = 774 \text{ Pa}$$

#### 4.6.3. Metoda Friedel

Komponenta trenja se izračunava:

$$\Delta p_f = \Delta p_L \cdot \phi_{fr}^2$$

Nadalje računamo komponente:

$$\Delta p_L = 4 \cdot f_L \cdot \left( \frac{L}{d_i} \right) \cdot G^2 \cdot \left( \frac{1}{2\rho_L} \right)$$

Faktor jednofaznog trenja za kapljevinu:

$$f_L = \frac{0,079}{Re_L^{0,25}} = \frac{0,079}{7948,8^{0,25}} = 0,00837$$

$$Re_L = \frac{G \cdot d_i}{\mu_L} = \frac{63,66 \cdot \left( \frac{10,3}{1000} \right)}{0,00008249} = 7948,8$$

Faktor jednofaznog trenja za paru:

$$f_G = \frac{0,079}{Re_G^{0,25}} = \frac{0,079}{70693^{0,25}} = 0,00484$$

$$Re_G = \frac{G \cdot d_i}{\mu_G} = \frac{63,66 \cdot \left( \frac{10,3}{1000} \right)}{0,00000924} = 70693$$

Njegov dvofazni multiplikator:

$$\Phi_{fr}^2 = E + \frac{3,24 \cdot F \cdot H}{Fr_H^{0,045} \cdot We_L^{0,035}}$$

Homogena gustoća:

$$\rho_H = \left( \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right)^{-1} = \left( \frac{0,5}{30,208} + \frac{1-0,5}{467,289} \right)^{-1} = 56,75 \text{ kg/m}^3$$

$$Fr_H = \frac{G^2}{g d_i \rho_H^2} = \frac{63,66^2}{9,80665 \cdot \left( \frac{10,3}{1000} \right) \cdot 56,75^2} = 12,46$$

Faktor E:

$$E = (1-x)^2 + x^2 \cdot \frac{f_G \cdot \rho_L}{f_L \cdot \rho_G}$$

$$E = (1-0,5)^2 + 0,5^2 \cdot \frac{0,00484 \cdot 467,289}{0,00837 \cdot 30,208} = 2,49$$

Faktor F:

$$F = x^{0,78} \cdot (1-x)^{0,224} = 0,5^{0,78} \cdot (1-0,5)^{0,224} = 0,4986$$

Faktor H:

$$H = \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0,91} \cdot \left( \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0,19} \cdot \left( 1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0,7}$$

$$H = \left( \frac{467,289}{30,208} \right)^{0,91} \cdot \left( \frac{0,00000942}{0,00008249} \right)^{0,19} \cdot \left( 1 - \frac{0,00000942}{0,00008249} \right)^{0,7} = 7,35$$

Weberov broj:

$$We_L = \frac{G^2 \cdot d_i}{\sigma \cdot \rho_H} = \frac{63,66^2 \cdot \left( \frac{10,3}{1000} \right)}{0,015 \cdot 56,75} = 49$$

Gdje je  $\sigma$  očitana iz toplinskih tablica za R290 i iznosi 0,015 N/m.

Dvofazni multiplikator:

$$\phi_{fr}^2 = 2,49 + \frac{3,24 \cdot 0,4986 \cdot 7,35}{12,46^{0,045} \cdot 49^{0,035}} = 11,7$$

$$\Delta p_L = 4 \cdot 0,00837 \cdot \left( \frac{6}{\frac{10,3}{1000}} \right) \cdot 63,66^2 \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 467,289} \right) = 84,57 \text{ Pa}$$

Komponenta trenja:

$$\Delta p_f = 84,57 \cdot 11,7 = 989,5 \text{ Pa}$$

#### 4.7. Ukupni padovi tlaka za različite metode

Ukupni pad tlaka za metodu Lockhart i Martinelli:

$$\begin{aligned} \Delta p_{uk,LM} &= \Delta p_g + \Delta p_{akc} + \Delta p_{tr,LM} \\ \Delta p_{uk,LM} &= 4102,8 + 324 + 1572,6 = 5999,4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Ukupni pad tlaka za metodu Grönnerud:

$$\begin{aligned} \Delta p_{uk,G} &= \Delta p_g + \Delta p_{akc} + \Delta p_{tr,G} \\ \Delta p_{uk,G} &= 4102,8 + 324 + 774 = 5200,8 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Ukupni pad tlaka za metodu Friedel:

$$\begin{aligned} \Delta p_{uk,F} &= \Delta p_g + \Delta p_{akc} + \Delta p_{tr,F} \\ \Delta p_{uk,F} &= 4102,8 + 324 + 989,5 = 5416,3 \text{ Pa} \end{aligned}$$

#### 4.8. Rezultati mjerenja

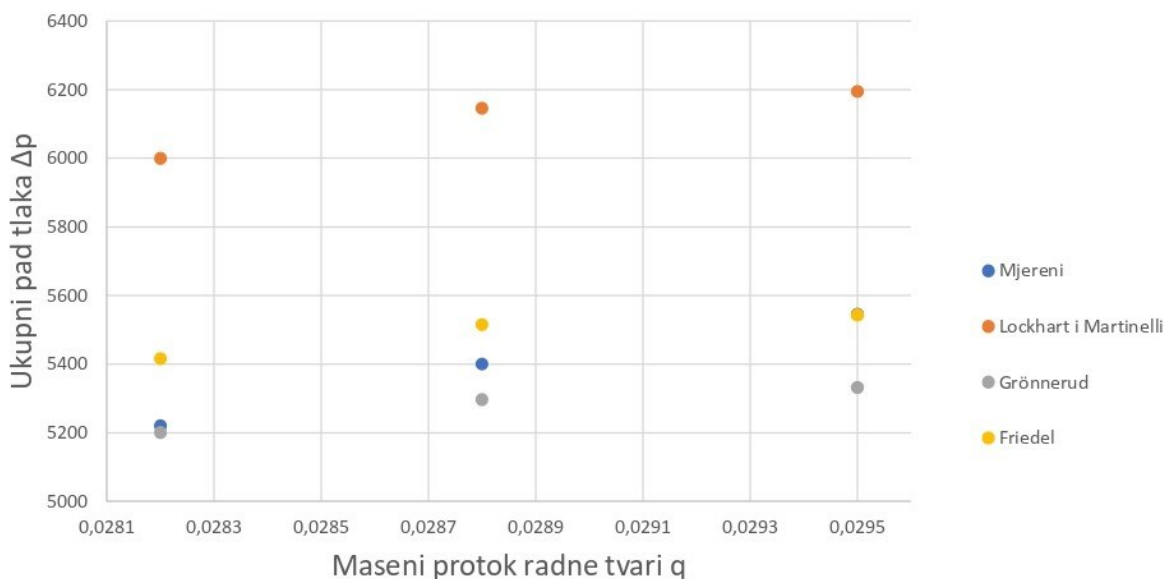
U ovom podnaslovu prikazani su mjerni rezultati na mjernoj liniji s propanom. Mjerenja su obavljena u laboratoriju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Rezultati su dobiveni pomoću akvizicijskog sustava s analogno-digitalnim pretvaračem. Mjerenja su bazirana na temperaturi kondenzacije i tlaku kondenzacije, padu tlaka radne tvari R290 te na mjerenju električne snage kompresora. Kod mjerenja međuzmjenjivač je isključen iz sustava kao i odvajač ulja.

**Tablica 6. Mjerna točka za R290 na tlaku kondenzacije 13,7 bar (40°C)**

Temperatura ulaza glikola	$\vartheta_{g1}$	2,55	[°C]
Temperatura izlaza glikola	$\vartheta_{g2}$	-2,23	[°C]
Temperatura ulaza vode	$\vartheta_{w1}$	29,35	[°C]
Temperatura izlaza vode	$\vartheta_{w2}$	34,90	[°C]
Temperatura isparavanja	$\vartheta_i$	-7,39	[°C]
Temperatura pregrijanja	$\vartheta_1$	-7,05	[°C]
Temperatura na kraju kompresije	$\vartheta_2$	65,57	[°C]
Temperatura pothlađenja	$\vartheta_3$	34,57	[°C]
Tlak na ulazu u isparivač	$p_{i1}$	3,80	[bar]
Tlak na izlazu iz isparivača	$p_{i2}$	3,71	[bar]
Tlak na ulazu u kondenzator	$p_{k1}$	13,69	[bar]
Tlak na izlazu iz kondenzatora	$p_{k2}$	13,64	[bar]
Električna snaga kompresora	$P_{el}$	3,09	[kW]
Učin isparivača	$\phi_i$	7,78	[kW]
Učin kondenzatora	$\phi_k$	10,9	[kW]
Pad tlaka na isparivaču	$\Delta p_i$	9000	[Pa]
Pad tlaka na kondenzatoru	$\Delta p_k$	5220	[Pa]

#### 4.9. Usporedba proračunatog pada tlaka sa mjerenim rezultatima

Slika 21. prikazuje usporedbu ukupnog mjerenog pada tlaka s ukupnim padovima tlaka proračunatih različitim metodama. Sve točke mjerene su za temperaturu kondenzacije 40°C i za tlak kondenzacije 13,7 bara. Svaka proračunata metoda obilježena je u grafu s određenom bojom točke. Točke različitih metoda kvalitativno prikazuju udaljenost proračunatih rezultata od mjerenih rezultata. Usporedba rezultata pada tlaka dobivenih tim proračunima i mjerenih rezultata pokazuje najmanje odstupanje za metode Friedel i Grönnerud. Metoda Lockhart i Martinelli, iako najviše odstupa od mjerenih rezultata, može se govoriti o relativnoj blizini rezultata jer je jedinica u kojem se tlakovi u grafu izražavaju jako mala [Pa]. Odstupanja bi bila još i manja kada bi se u obzir uzelo orebrenje vanjske stijenke unutarnje cijevi kondenzatora.



**Slika 21. Prikaz rezultata mjerenog i proračunatog pada tlaka**

## ZAKLJUČAK

U završnom radu provedena su mjerenja na eksperimentalnom rashladnom uređaju s propanom u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Svi mjereni podatci su prikupljeni akvizicijskim sustavom s analogno-digitalnim pretvaračem. Mjereni rezultati pada tlaka uspoređeni su sa proračunatim rezultatima. Za proračunavanje pada tlaka korištene su tri metode: Lockhart i Martinelli, Friedel i Grönnerud. Svaka od metoda daje karakteristično odstupanje od mjerenog rezultata za određeni protok radne tvari. Usporedbom rezultata vidi se da najbliže rezultate mjerenim rezultatima daju metode Friedel i Grönnerud, dok metoda Lockhart i Martinelli ima značajnije odstupanje. Dobivena odstupanja se jasno vide na slici 21. Odstupanje bi bilo manje da je uzeto u obzir orebrenje na vanjskoj stijenci unutarnje cijevi kondenzatora. Također, bitno opažanje je da nijedna od metoda ne pokazuje preveliko odstupanje od mjerenih rezultata zbog male mjerne jedinice [Pa]. Odstupanje proračunatih od mjerenih rezultata za sve metode iznosi od 0,4 do 10%.



## LITERATURA

- [1] J.R. Thome, Engineering Data Book III, Wolverine Tube, Inc, 2004.
- [2] V. Soldo, Podloge za predavanja iz kolegija Dizalice topline s OIE, 2022.
- [3] J. Brajković, A. Radenić, Eksperimentalna analiza utjecaja odvajanja ulja na radne parametre propanskog rashladnog uređaja, FSB, 2019., Rektorova nagrada
- [4] M. Andrassy, Stapni kompresori, FSB, Zagreb, 2004.
- [5] M. Tenčić, Eksperimentalna i teorijska analiza prijelaza topline u koaksijalnom kondenzatoru, FSB, 2018., Završni rad
- [6] Thermophysical properties R290, International institute of refrigeration, 2001.
- [7] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/martinelli-parameter>
- [8] A. Galović, Termodinamika II, FSB, Zagreb, 2003.
- [9] <https://www.alfalaval.com/products/>
- [10] <https://climate.emerson.com/en-us/brands/copeland>
- [11] V. Soldo, L. Boban, G. Lješić, Condensation Pressure Drop Characteristics of Propane in Helically Coiled tube-in-tube Heat Exchanger, FSB, 2021.

## **5. PRILOZI**

- I. Dispozicijski crtež propanskog rashladnog uređaja