

Eksperimentalna i teorijska analiza prijelaza topline u koaksijalnom kondenzatoru

Tenčić, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:976484>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Matej Tenčić

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc Vladimir Soldo, dipl.ing

Student:

Matej Tenčić

Zagreb, 2018.

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

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

Zahvaljujem se Ivanu Horvatu, mag. ing.mech na korisnim savjetima.

Zahvaljujem se Luki Bobanu, mag.ing. mech na ustupljenoj literaturi.

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

Matej Tenčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matej TENČIĆ** Mat. br.: 0035199047

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ekperimentalna i teorijska analiza prijelaza topline u koaksijalnom kondenzatoru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental and theoretical heat transfer analysis in coaxial condenser**

Opis zadatka:

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu se već niz godina provode ekperimentalna istraživanja s radnim tvarima koja su umnogome ovisna o važećoj regulativi. Dok su prije petnaestak godina istraživanja bila usmjerena na zamjenske radne tvari iz skupine fluorouglikovodika (HFC), slijedeći 'F-gas Regulativu' posljednjih je nekoliko godina provedeno više mjerenja s propanom kao radnom tvari. Danas se istraživanja sve više usmjeravaju na 'Low GWP' radne tvari i tehnologije za njihovo korištenje (propan, hidrofluoroolefini, ugljični dioksid).

Trenutno je u realizaciji izvedba mjerne linije koja će se koristiti za usporedbu parametara radnih tvari pri različitim radnim uvjetima temperature isparavanja i kondenzacije i utjecaja ugradnje pomoćnih komponenti na rad i učinkovitost sustava (odvajač ulja, spremnik radne tvari, međuzmjenjivač). Ekperimentalni sustav oprema se sofisticiranom mjernom opremom koja omogućuje određivanje parametara rada, prijelaza topline, tokova energije i učinkovitosti sustava. Osim ispitivanja s radnom tvari R 290 (propanom), ispitni sustav koristit će se za rad s radnim tvarima iz sigurnosne grupe A2L: R 32 i R 1234yf (R 1234ze).

U radu je potrebno provesti mjerenja i ispitivanje parametara rada ekperimentalnog rashladnog uređaja u radu s propanom. Ispitni sustav koristi se za hlađenje glikolne smjese. Kondenzator je hlađen vodom.

Rad treba sadržavati:

1. Termodinamički proračun koaksijalnog kondenzatora.
2. Analizu prijelaza topline u koaksijalnom kondenzatoru.
3. Shemu spajanja i automatske regulacije.
4. Dispozicijski crtež mjernog sustava.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

V Soldo

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Predsjednik Povjerenstva:

Igor Balen

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| SADRŽAJ | 5 |
| POPIS SLIKA | 7 |
| POPIS TABLICA..... | 8 |
| POPIS OZNAKA | 9 |
| SAŽETAK..... | 12 |
| SUMMARY | 13 |
| 1.UVOD | 14 |
| 2. RADNE TVARI I OKOLIŠ | 15 |
| 2.1. Ozonski sloj..... | 15 |
| 2.1.1. Kriteriji vrednovanja radnih tvari s obzirom na djelovanje na okoliš..... | 16 |
| 2.2. F-gas regulativa | 16 |
| 2.3. Svojstva radnih tvari | 17 |
| 2.4. Vrste radnih tvari | 18 |
| 2.4.1. Stupanj štetnosti radnih tvari | 18 |
| 2.5. Prirodne radne tvari | 19 |
| 2.5.1. Amonijak (R717) | 19 |
| 2.5.2. Ugljični dioksid (R744) | 19 |
| 2.5.3. Ugljikovodici (HC) | 19 |
| 3. IZMJENJIVAČI TOPLINE | 22 |
| 3.1. Kondenzacija | 22 |
| 4. KONDENZATORI | 23 |
| 4.1. Zrakom hlađeni kondenzatori..... | 24 |
| 4.1.1. Kondenzator s orebrenim cijevnim sekcijama..... | 24 |
| 4.2. Vodom hlađeni kondenzatori..... | 25 |
| 4.2.1. Kondenzator s cijevnom zavojnicom u bubnju („shell and coil“) | 25 |
| 4.2.2. Kondenzator cijev u cijevi | 26 |
| 4.2.3. Kondenzator s cijevima u plaštu („Shell and tube kondenzator“) | 27 |
| 4.2.4. Pločasti kondenzatori | 28 |
| 4.3. Kondenzatori hlađeni vodom i zrakom | 29 |
| 4.3.1. Protočni kondenzator s regenerativnim hlađenjem vode | 29 |
| 4.3.2. Evaporativni kondenzator | 30 |
| 5. EKSPERIMENTALNI RASHLADNI UREĐAJ | 31 |
| 5.1. Komponente eksperimentalnog rashladnog sustava..... | 33 |
| 5.1.1. Kompresor..... | 33 |

| | |
|---|----|
| 5.1.2. Odvajač ulja | 35 |
| 5.1.3. Spremnik radne tvari („receiver“)..... | 35 |
| 5.1.4. Međuzmjenjivač..... | 36 |
| 5.1.5 Elektronički ekspanzijski ventil (EEV)..... | 36 |
| 5.1.6 Koaksijalni isparivač..... | 37 |
| 5.2 Mjerna oprema..... | 38 |
| 5.2.1. Mjerenje temperature termoparovima..... | 38 |
| 5.2.2. Mjerenje tlaka pretvornicima tlaka | 39 |
| 5.2.3. Mjerenje električne snage kompresora | 39 |
| 6. TEORIJSKI PRORAČUN RASHLADNOG PROCESA..... | 40 |
| 6.1. Ulazni podaci..... | 40 |
| 6.2. Karakteristične točke procesa..... | 41 |
| 6.3. Dimenzioniranje cjevovoda..... | 44 |
| 7. TERMODINAMIČKI PRORAČUN KONDENZATORA | 45 |
| 7.1 Specifičnosti prijelaza topline koaksijalnog kondenzatora | 45 |
| 7.2 Proračun koeficijenta prijelaza topline na strani vode..... | 46 |
| 7.3. Proračun koeficijenta prijelaza topline u području kondenzacije na strani R290 | 50 |
| 7.3.1. Koeficijent prolaza topline u području kondenzacije | 51 |
| 7.4. Proračun koeficijenta prijelaza topline u području pothlađenja na strani R290..... | 52 |
| 7.4.1. Koeficijent prolaza topline u području pothlađenja..... | 54 |
| 7.5. Ukupna duljina kondenzatora..... | 54 |
| 8. PAD TLAKA U KONDENZATORU | 55 |
| 8.1 Komponenta trenja | 55 |
| 8.2 Komponenta gravitacije..... | 56 |
| 8.3 Komponenta akceleracije | 56 |
| 8.4 Ukupni pad tlaka..... | 57 |
| 9. REZULTATI MJERENJA | 58 |
| 10. ZAKLJUČAK | 62 |
| LITERATURA..... | 63 |
| 11. PRILOZI..... | 64 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Koncentracija ozona po visini [1] | 15 |
| Slika 2. Smanjenje konzumacije ODP-a nakon Montrealskog protokola [6] | 16 |
| Slika 3. Filmska kondenzacija [3] | 22 |
| Slika 4. Kapljičasta kondenzacija [3] | 22 |
| Slika 5. Raspodjela temperatura u kondenzatoru [2] | 23 |
| Slika 6. Kondenzator s orebrenim cijevnim sekcijama [4] | 24 |
| Slika 7. Kondenzacijska jedinica [4] | 25 |
| Slika 8. „Shell and coil“ kondenzator [2] | 25 |
| Slika 9. Koaksijalni cijev u cijevi kondenzator [5] | 26 |
| Slika 10. Kondenzator s cijevima u plaštu [6] | 27 |
| Slika 11. Pločasti kondenzator [6] | 28 |
| Slika 12. Protočni kondenzator s regenerativnim hlađenjem vode [5] | 29 |
| Slika 13. Rashladni toranj [5] | 29 |
| Slika 14. Evaporativni kondenzator [5] | 30 |
| Slika 15. Shema eksperimentalnog sustava [7] | 31 |
| Slika 16. Eksperimentalni sustav | 32 |
| Slika 17. 3D model eksperimentalnog rashladnog sustava | 32 |
| Slika 18. Faze rade „scroll“ kompresora [8] | 33 |
| Slika 19. Presjek „scroll“ kompresora [8] | 33 |
| Slika 20. Bočni presjek „scroll“ kompresora [8] | 34 |
| Slika 21. „Scroll“ kompresor [9] | 34 |
| Slika 22. Odvajač ulja [9] | 35 |
| Slika 23. Sakupljač radne tvari [9] | 35 |
| Slika 24. Međuizmjenjivač [4] | 36 |
| Slika 25. Elektronički ekspanzijski ventil [2] | 36 |
| Slika 26. Koaksijalni isparivač [10] | 37 |
| Slika 27. Princip rada termopara [1] | 38 |
| Slika 28. Različite karakteristike termoparova [1] | 38 |
| Slika 29. Piezoelektrični pretvornik tlaka [11] | 39 |
| Slika 30. Sučelje za očitavanje električne snage kompresora [4] | 39 |
| Slika 31. Proces u logp – h dijagramu | 40 |
| Slika 32. Shema rashladnog procesa [7] | 41 |
| Slika 33. Presjek cijevi kondenzatora [10] | 45 |
| Slika 34. Prikaz koaksijalnog kondenzatora [5] | 46 |
| Slika 35. Raspored temperatura po duljini kondenzatora | 47 |
| Slika 36. Geometrija zavojnice [14] | 48 |
| Slika 37. Prikaz procesa u logp-h dijagramu | 58 |
| Slika 38. Ovisnost izentropskog stupnja djelovanja o kompresijskom omjeru | 59 |
| Slika 39. Promjena snage kompresora u vremenu | 60 |
| Slika 40. Promjena faktora hlađenja u vremenu | 60 |
| Slika 41. Hlađenje glikola u vremenu | 61 |
| Slika 42. Pad tlaka na kondenzatoru u ovisnosti gustoće toplinskog toka | 61 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Stupanj štetnosti radnih tvari [2] | 18 |
| Tablica 2. Usporedba svojstva radnih tvari [2] | 20 |
| Tablica 3. Oprema eksperimentalnog postava [7]..... | 32 |
| Tablica 4. Rezultati proračuna procesa | 42 |
| Tablica 5. Svojstva R290 na tlaku kondenzacije 13,7 bar (40°C)..... | 43 |
| Tablica 6. Odabrane brzine strujanja..... | 44 |
| Tablica 7. Svojstva propana za 37,5 °C i 13,7 bara | 52 |
| Tablica 8. Mjerna točka za učin isparivača 7,5 kW | 58 |
| Tablica 9. Podaci izračunati iz mjerenih podataka..... | 59 |

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-------------------------|------------------------------------|
| A | m^2 | površina |
| c_p | kJ/kgK | specifični toplinski kapacitet |
| d, D | mm | promjer |
| De | - | Deanov broj |
| D_w | mm | promjer spirale |
| f_l | - | faktor |
| G | $\text{kg/m}^2\text{s}$ | gustoća masenog toka |
| h | kJ/kg | specifična entalpija |
| h_{nav} | mm | visinska razlika navoja |
| h_o | m | visina ugradnje unutarnje jedinice |
| k | $\text{W/m}^2\text{K}$ | koeficijent prolaza topline |
| L | m | duljina |
| LFL | kg/m^3 | donja granica zapaljenja RT |
| m | kg | masa |
| Nu | - | Nusseltov broj |
| p | Pa | tlak |
| P_k | W | snaga kompresora |
| Pr | - | Prandtlov broj |
| PL | kg/m^3 | praktična granica punjenja |
| q | W/m^2 | gustoća toplinskog toka |
| q_m | kg/s | maseni protok |
| Re | - | Reynoldsov broj |
| s | kJ/kgK | specifična entropija |
| V | m^3 | volumen |
| w | m/s | brzina strujanja |
| x | - | sadržaj pare |

Grčke oznake

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------------|--------------------|---|
| α | W/m ² K | koeficijent prijelaza topline |
| $\Delta\vartheta_m$ | °C | srednja logaritamska razlika temperatura |
| $\Delta\vartheta$ | °C | razlika temperatura |
| ε | - | faktor hlađenja/grijanja |
| ζ | - | faktor |
| η_{iz} | - | izentropski stupanj djelovanja kompresora |
| ϑ | °C | temperatura |
| λ | W/(mK) | toplinska vodljivost |
| μ | Pa s | dinamička viskoznost |
| χ | - | Martinellijev parametar |
| ρ | kg/m ³ | gustoća |
| Φ | W | učin, toplinski tok |
| Φ_t | - | dvofazni koeficijent trenja |

Indeksi

| | |
|--------------|------------------------|
| <i>A</i> | akceleracije |
| <i>el</i> | električno |
| <i>ekv</i> | ekvivalentni |
| <i>F</i> | trenja |
| <i>G</i> | gravitacije |
| <i>g1</i> | ulaz glikola |
| <i>g2</i> | izlaz glikola |
| <i>gr</i> | grijanja |
| <i>hl</i> | hlađenja |
| <i>i</i> | isparivača |
| <i>k</i> | kondenzatora |
| <i>kaplj</i> | kapljevinskog |
| <i>kond</i> | kondenzacije |
| <i>krit</i> | kritičan |
| <i>max</i> | maksimalno |
| <i>preg</i> | pregrijanja |
| <i>pothl</i> | pothlađenja |
| <i>prost</i> | prostora |
| <i>RT</i> | radne tvari |
| <i>s</i> | stijenke |
| <i>SV</i> | vanjske stijenke |
| <i>SU</i> | unutrašnje stijenke |
| <i>sr</i> | srednji |
| <i>tl</i> | tlačnog |
| <i>tp</i> | dvofazno |
| <i>u</i> | unutarnji |
| <i>uk</i> | ukupno |
| <i>us</i> | usisnog |
| <i>v</i> | vanjski |
| <i>w</i> | vode |
| <i>w1</i> | ulaza vode |
| <i>w2</i> | izlaza vode |
| <i>y</i> | na početku pothlađenja |
| <i>z</i> | zraka |
| ' | kapljevine |
| " | pare |

SAŽETAK

U završnom radu provedena je analiza prijelaza topline u koaksijalnom kondenzatoru. Koaksijalni kondenzator dio je eksperimentalnog rashladnog koji se nalazi u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje. Kondenzator je koaksijalan i u unutarnjoj cijevi struji voda, a u vanjskoj cijevi i oko unutarnje struji propan. S obzirom na 'F-gas regulativu', u zadnje vrijeme istraživanja se usmjeravaju na radne tvari s niskim GWP brojem pa su prikazani trendovi, regulative te osnovne karakteristike radnih tvari. Kao prirodna radna tvar propan ima sve važniju ulogu u primjeni. Nakon toga opisuju se kondenzatori. Slijedi opis eksperimentalnog postava koji se koristio za mjerenja. Prikazane su postavke rashladnog procesa i termodinamički proračun i proračun pada tlaka koaksijalnog kondenzatora. U sklopu rada provedena su mjerenja na eksperimentalnom uređaju. U prilogu se nalazi shema spajanja i automatske regulacije i dispozicijski crtež mjernog sustava.

Ključne riječi: koaksijalni kondenzator, termodinamički proračun kondenzatora, propan, GWP, eksperimentalni rezultati

SUMMARY

This bachelor's degree thesis analyses condensation heat transfer in helically coiled concentric tube-in-tube heat exchanger. This condenser is part of the experimental rig which is placed in Heat and heat devices laboratory. Condenser is coaxial with water flow in inner tube and with the propane flow in the annulus. Following the F-gas legislation, in the last few years research strives towards low GWP refrigerants, so legislations, main refrigerant properties and trends are shown. As a natural refrigerant, propane has an important role in refrigeration applications. After that, properties of condensers and description of experimental rig are given. Refrigeration cycle has been calculated, with thermodynamic calculation of condenser. In the capacity of this thesis, tests were made with the experimental rig. In the end there is a regulation scheme and three dimensional display of the experimental rig.

Key words: coaxial condenser, thermodynamic calculation of condenser, propane, GWP, experimental results

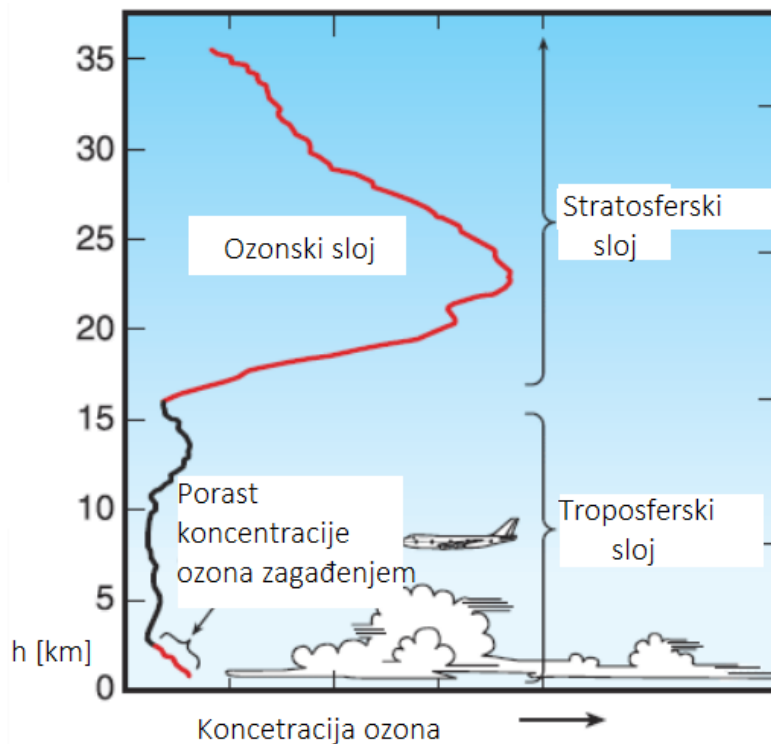
1.UVOD

U sklopu završnog rada preddiplomskog studija provedena je analiza prijelaza topline u koaksijalnom kondenzatoru. Kondenzator je dio eksperimentalnog rashladnog uređaja. Eksperimentalni uređaj će se koristiti za ispitivanje prirodnih radnih tvari s obzirom da se prema 'F-gas' regulativi s europskog tržišta izvrštavaju fluorirani staklenički plinovi i potiče se uporaba radnih tvari s malim utjecajem na globalno zagrijavanje. Međutim, potrebno je odrediti da li nove prirodne radne tvari imaju bolja ili lošija svojstva od radnih tvari koje se trenutno koriste. Kod proračuna rashladnog procesa odabrana je temperatura kondenzacije 40°C i temperatura isparivanja -10°C za rashladni učinak 7,4 kW. Kroz unutarnju cijev kondenzatora struji kondenzatorska voda koja se zagrije s 29 °C na 34 °C, a u vanjskoj i oko unutarnje cijevi struji propan. Ovakva vrsta kondenzatora najčešće se koristi za manje učine. Rashladni uređaj se koristi za hlađenje 30%-tne smjese etilen-glikola. Cilj ovog rada je usporediti teorijski i eksperimentalni pristup u analizi prijelaza topline koaksijalnog kondenzatora.

2. RADNE TVARI I OKOLIŠ

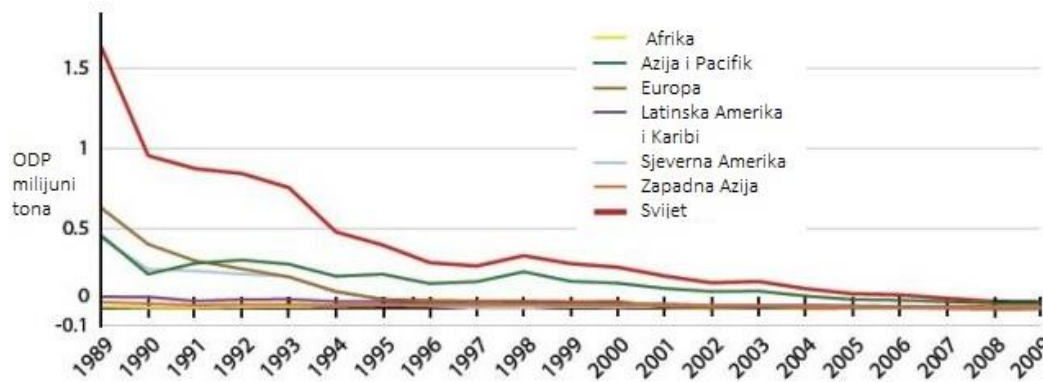
2.1. Ozonski sloj

Ozon je troatomni oblik kisika. Nastaje prirodno u gornjim slojevima atmosfere uz pomoć jakog ultraljubičastog zračenja koje dolazi od Sunca. Zračenje razbija molekule kisika, te se neki slobodni atomi vežu s drugim molekulama kisika i stvara se ozon. Ozon je bitan zato što upija UV zračenje sa Sunca i onemogućava da UV zračenje stigne do površine Zemlje. Ozonski omotač ima također veliku ulogu u raspodjeli temperatura, što utječe na klimu.



Slika 1. Koncentracija ozona po visini [1]

1973. kemičari Frank Sherwood Rowland i Mario Molina su otkrili razgrađivanje ozonskog omotača uzrokovano klorofluorogljicima (CFC). Međutim njihovo otkriće je bilo predmet rasprava i proizvođači CFC-a su žestoko kritizirali njihovu hipotezu. Ali nakon toga 1985. objavljeno je smanjenje koncentracije ozona iznad Antarktika. S obzirom na negativne posljedice po okoliš, 1987. donesen je Montrealski protokol kojim je zabranjena upotreba CFC i HCFC tvari. Daljnjim istraživanjima atmosfere zaključeno je kako staklenički plinovi zagrijavaju Zemljinu atmosferu pa je 1997. potpisan Kyoto protokol koji obvezuje zemlje potpisnice da smanje upotrebu radnih tvari s velikim GWP brojem (HFC). Potpisnice se usmjerava na korištenje prirodnih radnih tvari.



Slika 2. Smanjenje konzumacije ODP-a nakon Montrealskog protokola [6]

2.1.1. Kriteriji vrednovanja radnih tvari s obzirom na djelovanje na okoliš

Potencijal razgradnje ozona (ODP = Ozone Depletion Potential)

ODP je funkcija sposobnosti oslobađanja klora i broma, te vremenske postojanosti u atmosferi. Za referentnu vrijednost uzet je utjecaj freona (R-11 : ODP=1). Faktor ODP je posljedica svih potencijalnih djelovanja na ozon, koja traju do kraja raspada tvari.

Potencijal globalnog zagrijavanja (GWP = Global Warming Potential)

Zemljina atmosfera je propusna za kratkovalno Sunčevo zračenje, ali slabo propušta dugovalno zračenje Zemljine površine. Zbog toga dio energije koja uđe u atmosferu ostaje u njoj kao u stakleniku i zagrijava je. To je poznato pod nazivom efekt staklenika. GWP faktor tvari oslobođene u atmosferu prikazuje koliki je relativni utjecaj te tvari na zagrijavanje atmosfere u odnosu na utjecaj CO₂, koji je uzet kao referentna vrijednost (CO₂ : GWP=1). Zbog toga što ugljikov dioksid trajno ostaje u atmosferi, uvijek je potrebno navesti za koji vremenski period se GWP odnosi.

2.2. F-gas regulativa

Na europskoj razini donesena je uredba 842/2006 poznatija kao F-gas regulativa koja propisuje postupanje s fluoriranim stakleničkim plinovima (HFC, PFC, SF₆). 2014. regulativa je revidirana i trenutno je na snazi uredba 517/2014.

Regulativa propisuje kako treba postupati s fluoriranim stakleničkim plinovima od trenutka kad su proizvedeni do trenutka kad ih treba zbrinuti. Revidirana regulativa propisuje ograničavanje ukupne količine fluoriranih plinova koji se mogu prodati u Europskoj uniji od 2015. nadalje. Plan je da se emisije takvih plinova smanje za dvije trećine do 2030. Također zabranjuje se upotreba fluoriranih plinova u novoj opremi, ako za nju postoji manje štetna alternativa. Osim toga, sprečava se emisija fluoriranih plinova iz postojeće opreme tako da se propisuju redoviti pregledi, redoviti servis i sanacija plinova na kraju životnog vijeka opreme.

Umjesto HCF-a regulativa usmjerava na korištenje prirodnih radnih tvari poput amonijaka, ugljičnog dioksida, ugljikovodika te R1234yf.

2.3. Svojstva radnih tvari

Radna tvar prenosi energiju s jednog toplinskog spremnika na drugi.

Poželjno je da radne tvari ispunjavaju sljedeće uvjete:

Termodinamička svojstva

- umjereni tlak zasićenja pri temperaturi $35 \div 48 \text{ }^\circ\text{C}$
- niska temperatura isparivanja pri atmosferskom tlaku
- umjereni kompresijski omjer, kad su ispunjena prva dva uvjeta
- velika latentna toplina isparivanja i kondenzacije
- velika gustoća pri temperaturi isparivanja
- visoko položena kritična točka – veći je pojas isparivanja
- mali viskozitet
- veliki koeficijent toplinske provodnosti
- veliki dielektrični otpor za rad u hermetičkim i poluhermetičkim kompresorima
- niska točka smrzavanja

Funkcionalna svojstva

- nekorozivnost, kemijska i fizikalna stabilnost
- ne reagiranje fizikalno ili kemijsko s mazivim uljem

Sigurnosna svojstva

- nezapaljivost, čista tvar ili u smjesi sa zrakom, uljem i vlagom
- neotrovnost
- neeksplozivnost
- jednostavno otkrivanje prisutnosti u zraku

Utjecaj na okoliš

- bez utjecaja na razgradnju ozona (ODP)
- mali utjecaj na pojačavanje efekta staklenika (GWP)

Nema idealne radne tvari. Radnu tvar bираmo prema području primjene te prema zahtjevima procesa.

2.4. Vrste radnih tvari

Halogenirani ugljikovodici:

CFC – klorofluorougljici potpuno halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika

HCFC – klorofluorougljikovodici: djelomično halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika koji sadrže vodik i klor

HFC – fluorirani ugljikovodici: djelomično halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika koji sadrže vodik i ne sadrže klor

HFO – hidrofluorofelini: istražuju se u novije vrijeme

Prirodne radne tvari:

Amonijak (R717) : nezamjenjiv u industrijskoj primjeni

Ugljični dioksid (R744) : nema raširenu primjenu zbog nepovoljne termodinamičke karakteristike za standardne primjene hlađenja

Ugljikovodici (HC) : propan (R290), izobutan (R600a), propilen (R1270)

2.4.1. Stupanj štetnosti radnih tvari

Stupanj štetnosti radnih tvar nalazi se u normi HRN EN 378-1.

Postoje dvije klase otrovnosti : A i B (za A je granica izloženosti veća od 400 ppm, a za B granica izloženosti manja od 400 ppm) te tri klase zapaljivosti.

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

Tablica 1. Stupanj štetnosti radnih tvari [2]

2.5. Prirodne radne tvari

2.5.1. Amonijak (R717)

Amonijak je s energetskog i ekološkog stajališta najbolja radna tvar i u industrijskom postrojenjima je nezamjenjiva. Koriti se u sustavima za brzo hlađenje i skladištenje hrane, u mliječnog industriji i industriji pića. Sustavi s amonijakom imaju manje dimenzije cjevovoda i manje punjenje sustava u odnosu na sustave s R22. Također zbog male gustoće parovite i kapljevite faze amonijaka, padovi tlaka kroz sustav su puno manji što je veoma korisno u sustavima s dugim cjevovodima. S obzirom na zaštitu okoliša amonijak je najprihvatljivija radna tvar: ODP=0 ; GWP=0 .

Međutim zbog njegovih nedostataka ograničena mu je primjena. Stupanj štetnosti mu je B2L što znači da je otrovan u smjesi s zrakom u određenom volumnom udjelu. Spada u eksplozivne i zapaljive radne tvari. Također zbog toga što amonijak uz prisutnog vlage djeluje korozivno na bakar, ne može se koristiti kod poluhermetičkih i hermetičkih kompresora. Problem može predstavljati i strma položenost izobara u pregrijanom području zbog čega temperature na kraju kompresije često budu previsoke.

2.5.2. Ugljični dioksid (R744)

Ugljični dioksid se dugo vremena koristi u rashladnoj tehnici. Ne razgrađuje ozon (ODP=0) i ima mali utjecaj na efekt staklenika (GWP=1). Nije zapaljiv, nije toksičan i kemijski je stabilan. Opasnost predstavljaju velike količine CO₂ koje mogu uzrokovati gušenje. Volumetrički rashladni učinak CO₂ je puno veći nego kod R717 i R22 i to rezultira smanjenim dimenzijama uređaja. Negativna strana ugljikovog dioksida koja mu onemogućava široku primjenu su nepovoljne termodinamičke karakteristike za standardne primjene. Kritična temperatura CO₂ je samo 31,1 °C, a kritični tlak je 73 bara. U jednostupanjskim sustavima to zahtijeva tlak kondenzacije veći od 100 bara i transkritične radne parametre. Ugljični dioksid se koristi u industriji i većim komercijalnim rashladnim uređajima u donjoj kaskadi uređaja (temperaturni režim do -10 do -50°C) pa su u takvom slučaju radni parametri ispod kritičnog područja.

2.5.3. Ugljikovodici (HC)

Veliki problem ugljikovodika je zapaljivost (klasa zapaljivosti A3). Najčešće se primjenjuju izobutan, propan i propilen. Izobutan se koristi u kućanskim uređajima i zamjenjuje R12 i R134-a. Propilen se upotrebljava u komercijalnim uređajima, industrijskim uređajima, klimatizaciji i dizalicama topline. Propilen zamjenjuje R22, R404-a, R407C i R507A.

Propan (R290)

Propan ima dobra termo-fizikalna i ekološka svojstva. Propan se koristi u komercijalnim uređajima, industrijskim uređajima, hladnjacima, klimatizaciji i dizalicama topline. R290 je zamjena za R22, R404A, R407C i R507A. Propan ima relativno malu gustoću kapljevine pa u sustavima gdje zamjenjuje R22 punjenje se smanjuje oko 60%. Gustoća pare propana je manja u odnosu na tvari koje zamjenjuje, ali zbog veće topline isparavanja volumetrički učinci su podjednaki što znači da su jednake dimenzije kompresora za isti rashladni učinak. Zbog relativno velike topline isparavanja propana protok radne tvari je manji pa su manje i dimenzije cjevovoda.

| Svojstvo | R290 | R12 | R600-a | R134-a |
|--|---------------|--------|--------|--------|
| ODP | 0 | 1 | 0 | 0 |
| GWP | 3 | 8100 | 20 | 1300 |
| Kritična temperatura, °C | 96,7 | 111,97 | 134,7 | 101 |
| Kritični tlak, bar | 42,5 | 41,4 | 36,4 | 40,6 |
| Temperatura isparavanja (p _{atm}), °C | -42,5 | -29,8 | -11,6 | -26,1 |
| Gustoća kapljevine (pri 30°C), kg/m ³ | 484,4 | 1293 | 544,3 | 1187 |
| Gustoća pare, (pri -15°C), kg/m ³ | 6,5 | 10,89 | 2,49 | 8,29 |
| Toplina isparavanja (-15°C), kJ/kg | 394,4 | 159,9 | 369,8 | 209,5 |
| Volumetrički rashladni učinak, kJ/m ³ | 1897,4 | 1327,5 | 688 | 1285,3 |

Tablica 2. Usporedba svojstva radnih tvari [2]

Glavni nedostatak propana je zapaljivost. Propan pripada klasi A3 i temperatura zapaljenja iznosi 470°C. Norma HRN EN 378-1 ograničava punjenje propana na 150 g za prostorije bilo kojeg volumena. Najvažnija podjela u normi je prema smještaju opreme i kontroli pristupa grijanog ili hlađenog prostora.

Smještaj opreme u prostoru dijeli se na tri klase:

- I. ugradnja opreme unutar kondicioniranog prostora
- II. kompresor i spremnik radne tvari smješteni u strojarnici ili slobodnoj okolini
- III. sva rashladna oprema smještena u strojarnici ili slobodnoj okolini

Kategorije prostora s obzirom na kontrolu pristupa dijele se na sljedeće kategorije:

- A Opći prostori
- B Prostori pod nadzorom
- C Prostori s dopuštenim pristupom

U primjenama za komforno hlađenje dozvoljeno punjenje zapaljivih radnih tvari računa se prema sljedećem izrazu:

$$m_{\max} = 2,5 \cdot \text{LFL}^{\frac{5}{4}} \cdot h_0 \cdot \sqrt{A}$$

U primjenama za nekomforni prostor dozvoljeno punjenje zapaljivih radnih tvari računa se prema sljedećem izrazu:

$$m_{\max} = PL \cdot V$$

Zapaljenje ugljikovodične radne tvari može se dogoditi ako se pojave tri uvjeta: propuštanje RT, koncentracija smjese ugljikovodika i zraka unutar donje i gornje granice zapaljivosti te prisutnost aktivnog izvora plamena određene temperature. Da se zapaljenje ne dogodi provode se ove mjere : ugradnja detektora propuštanja R290, hermetička izvedba kućišta te izvedba ventilacijskog sustava u protueksplozijskoj izvedbi.

Ugljikovodici su kemijski kompatibilni skoro sa svim uljima koja se upotrebljavaju u rashladnim sustavima. Budući da imaju dobru topivost s mineralnim uljima, treba koristiti ulja s nižom topivosti ili većom viskoznošću da se nadoknadi moguće razrjeđivanje ulja. Povećana topivost dovodi do pjenjenja ulja i prekomjernog razrjeđivanja ulja, a to uzrokuje nedovoljnu podmazanost kliznih površina kompresora. Sprečavanje pjenjenja i habanja postiže se upotrebom dodataka u ulje. Ulja s silikonom i silikatom nisu kompatibilna s ugljikovodicima.

3. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline su vrsta toplinskog aparata koji služe za prenošenje topline između dva medija, tijekom čega se hladniji medij grije, a topliji hladi. Primjenjuju se u rashladnoj tehnici, klimatizaciji, procesnoj tehnici te u termoenergetskim postrojenjima.

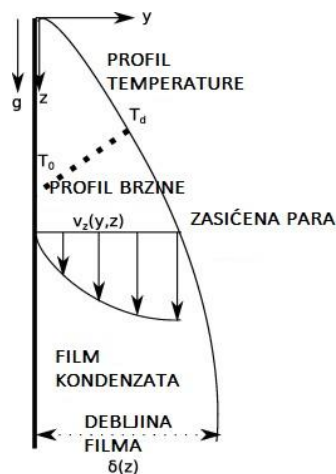
Vrste izmjenjivača topline su: rekuperativni izmjenjivači, regenerativni izmjenjivači i direktni izmjenjivači. Kod rekuperatora su struje fluida razdvojene čvrstom stijenkom pa se struje ne miješaju, što može biti bitna karakteristika u većini primjena. Regenerativni izmjenjivači imaju akumulacijsku masu koja rotira naizmjenice unutar topline i hladnije struje. Kod direktnog izmjenjivača struje dolaze u izravni dodir u mješalištu. U daljnjem izlaganju baviti ćemo se rekuperatorima.

3.1. Kondenzacija

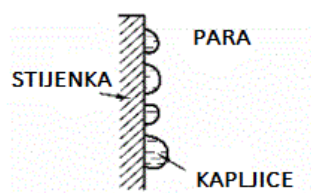
Kondenzacija je proces kod kojeg dolazi do prelaska iz parovitog u kapljevito stanje. Do kondenzacije će doći kada se para nađe u dodiru s stijenkom koja ima temperaturu nižu od temperature zasićenja koja je za pripadajući tlak određena krivuljom napetosti kapljevina-para.

Rošenje stijenske može biti na dva načina. Oblik kondenzacije kad kondenzat kontinuirano kvasi kondenzacijsku površinu i nastaje film koji se utjecajem gravitacije slijeva niz površinu naziva se filmska kondenzacija. Ako je površina prekrivena s tvari koja sprečava vlaženje, onda se može dogoditi kapljičasta kondenzacija. Kapljičasta kondenzacija ima diskontinuitet u kvašenju stijenske jer se kondenzat trenutačno nakuplja u sitne kapljice formirane u pukotinama i šupljinama. Kapljice utjecajem gravitacije struje niz stijenkku ili su odnesene parovitom strujom.

U stvarnosti se ova dva mehanizma događaju istovremeno i to se naziva mješovita kondenzacija.



Slika 3. Filmska kondenzacija [3]

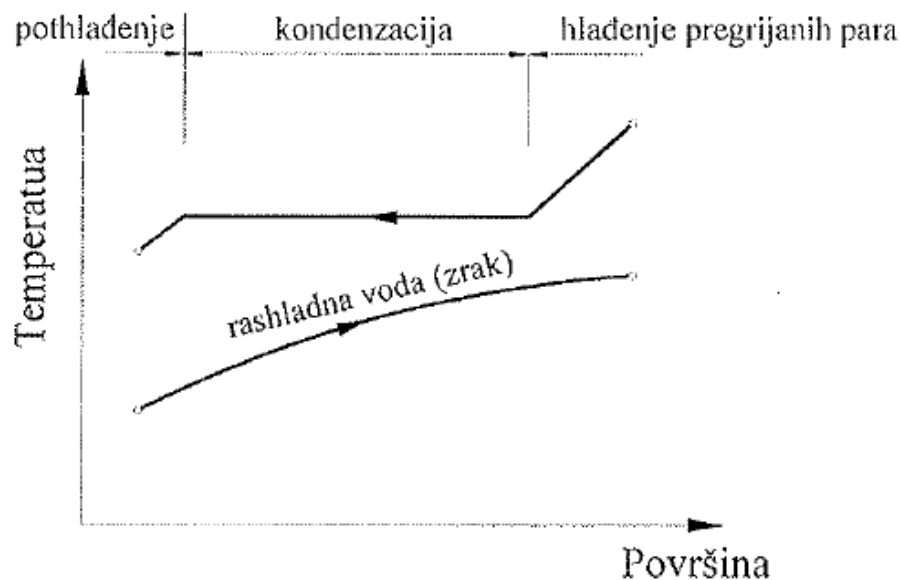


Slika 4. Kapljičasta kondenzacija [3]

4.KONDENZATORI

Kondenzatori su izmjenjivači topline koji predaju toplinski tok iz rashladnog kruga ponoru topline koji je uvijek niže temperature.

Radna tvar ulazi u kondenzator u pregrijanom stanju te se hladi do suhozasićene pare predavanjem toplinskog toka („desuperheating“). Kad radna tvar prelazi iz suhozasićene pare u vrelu kapljevину, ponoru topline se predaje toplinski tok kondenzacije. Kod kondenzacije se sadržaj pare u kondenzatoru smanjuje, a udio kapljevine raste. Hlađenjem radne tvari od stanja vrele kapljevine na temperaturu nižu za 3 do 5°C od temperature kondenzacije predaje se toplinski tok pothlađenja. Pothlađenje se uvodi da se poveća učinkovitost sustava. Najveći udio toplinskog toka u kondenzatoru predaje se upravo izmjenom latentne topline, a manji dio se predaje hlađenjem pregrijanih para i pothlađenjem. Idealna kondenzacija se odvija pri konstantnom tlaku.



Slika 5. Raspodjela temperatura u kondenzatoru [2]

Toplinski tok koji se izmijeni na izmjenjivaču topline iznosi:

$$\Phi_k = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \quad [\text{W}]$$

k = koeficijent prolaza topline [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] -kod kondenzatora je veći u odnosu na ostale izmjenjivače zbog velikog koeficijenta prijelaza topline kondenzacije

A = površina kondenzatora [m^2]

$\Delta\vartheta_m$ = srednja logaritamska razlika temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

Učinak kondenzatora može se izračunati kao zbroj učinka isparivača i snage kompresora:

$$\Phi_k = \Phi_i + P_k \quad [\text{W}]$$

Kondenzatori se prema načinu hlađenja dijele na kondenzatore hlađene zrakom, kondenzatore hlađene vodom i na kondenzatore hlađene kombinirano (i zrakom i vodom).

Kondenzatori se prema površini za prijenos topline dijele na glatkocijevne i na orebrene.

4.1. Zrakom hlađeni kondenzatori

Zrakom hlađeni kondenzatori se upotrebljavaju u rashladnim postrojenjima malih i srednjih kapaciteta i na lokacijama gdje nema dovoljno vode s obzirom da je zrak vrlo dostupan toplinski ponor. Također zrak ne zahtijeva veće ulaganje u samo održavanje kondenzatora. U manjim uređajima kondenzatori su često hlađeni zrakom i to bez prisilne cirkulacije zraka. Za veće i srednje kapacitete koristi se prisilna cirkulacija zraka da se poveća koeficijent prijelaza topline na strani zraka.

4.1.1. Kondenzator s orebrenim cijevnim sekcijama



Slika 6. Kondenzator s orebrenim cijevnim sekcijama [4]

Opis rada:

Ventilator se koristi tako da usisava uzduh preko orebrenih sekcija što povoljno utječe na ujednačenje strujanja preko lamelnih sekcija. Ulaz radne tvari mora biti obavezno s gornje strane, što olakšava otjecanje nastalog kondenzata. Treba postojati i odvod kondenzata za slučaj kada bi prekrenuli proces pa bi kondenzator radio kao isparivač. Najčešće se kao radna tvar koriste halogenirani ugljikovodici, čisti ugljikovodici, iznimno R717. Takvi kondenzatori primjenjuju se u svim postrojenjima. Mana ovakvog tipa kondenzatora je što ventilator proizvodi buku pa je pažljivo potrebno odabrati lokaciju smještanja kondenzatora.

Okvirni podaci:

$$k = 15 \div 30 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\Delta\theta_m = 8 \div 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_z = 2 \div 4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$w_z = 2 \div 5 \text{ m/s}$$

U odnosu na sustave s vodom, sustavi sa zrakom imaju višu temperaturu kondenzacije, ali je lakše održavanje. Prijelaz topline ostvaruje se filmskom kondenzacijom unutar cijevi te turbulentnim strujanjem na orebrenju oko cijevi.

Često se zajedno isporučuju kondenzator i kompresor (kondenzacijska jedinica):

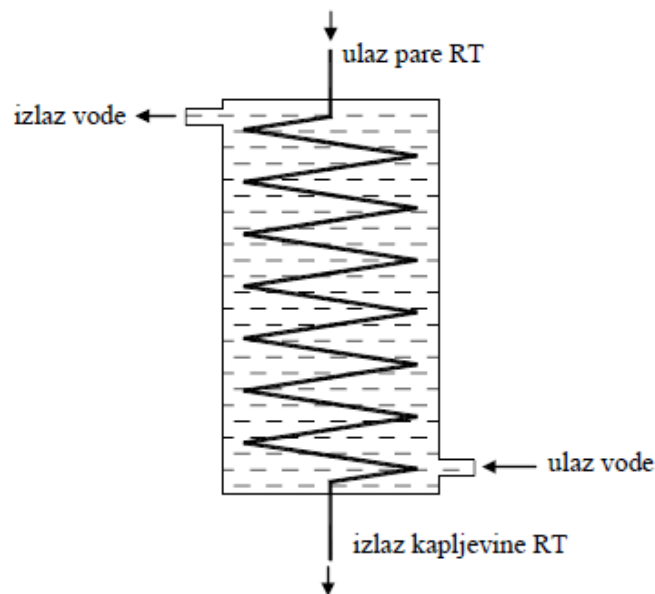


Slika 7. Kondenzacijska jedinica [4]

4.2. Vodom hlađeni kondenzatori

Voda ima znatno veći specifični toplinski kapacitet od zraka i obične je niže temperature od zraka pa se kod vodom hlađenih kondenzatora postižu niže temperature kondenzacije što znači da je potrebna i manja energija za pogon kompresora.

4.2.1. Kondenzator s cijevnom zavojnicom u bubnju („shell and coil“)



Slika 8. „Shell and coil“ kondenzator [2]

Opis rada:

Ovakvi kondenzatori koriste se u jedinicama malih toplinskih učinaka i u jednostavnim rashladnim uređajima. Toplinu vode koja se ugrije u bubnju moguće je iskoristiti kao potrošnu toplu vodu ili za neki proces u industriji. Nedostaci ovakvih izvedbi su velik pad tlaka na strani radne tvari i mali koeficijent prijelaza topline na strani vode. Koeficijent prolaza topline može se povećati dodavanjem miješalice koja kružno cirkulira vodu. Tim postupkom moguće je povećati k do $700 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Okvirni podaci:

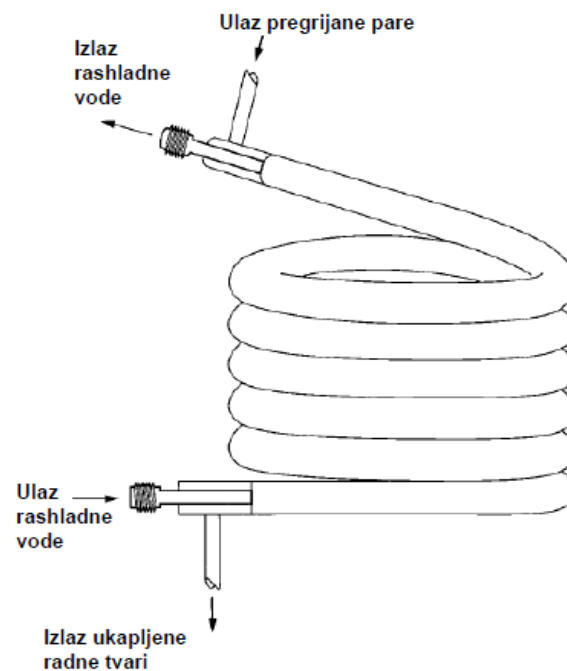
$$k = 150 \div 250 \text{ W/m}^2\text{K bez mješalice}$$

$$k = 400 \div 700 \text{ W/m}^2\text{K s mješalicom}$$

$$\Delta\theta_m = 10 \div 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_w = 5 \div 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.2.2. Kondenzator cijev u cijevi



Slika 9. Koaksijalni cijev u cijevi kondenzator [5]

Uobičajena izvedba je s glatkim cijevima, RT struji oko cijevi, voda u cijevima.

Koriste se za manje učine kondenzacije: $\Phi_k = 0,5 \div 50 \text{ kW}$

Kao radna 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. Prednost ovakvog tipa izmjenjivača je protusmjerno strujanje, koje omogućuje vrlo efektivnu izmjenu toplinskog toka.

Okvirni podaci:

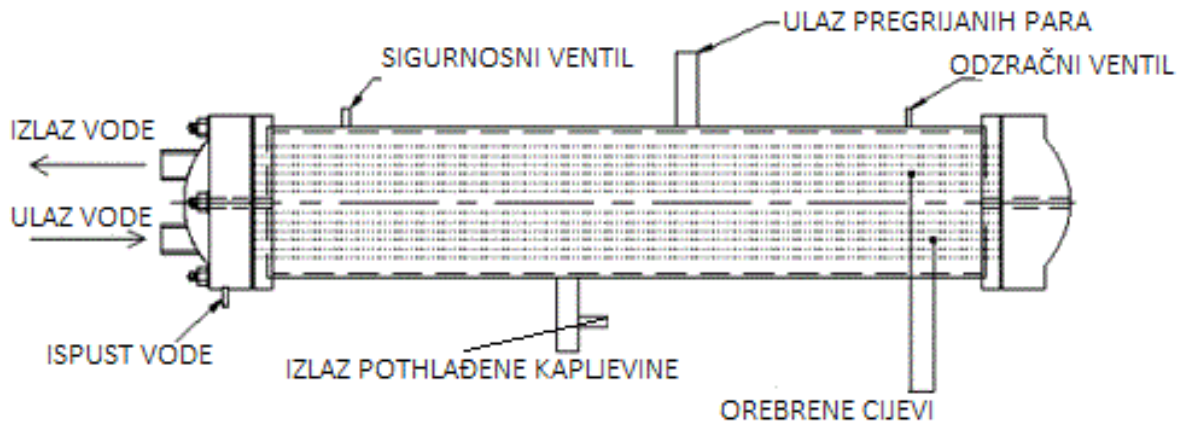
$$k = 300 \div 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\Delta\theta_m = 5 \div 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_w = 3 \div 6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$w_w = 0,3 \div 1,5 \text{ m/s}$$

4.2.3 Kondenzator s cijevima u plaštu („Shell and tube kondenzator“)



Slika 10. Kondenzator s cijevima u plaštu [6]

Opis rada:

„Shell and tube“ izmjenjivači su najčešće korišteni izmjenjivači u industriji. Izvedba je većinom glatkocijevna ali može biti i orebrana. Orebrana izvedba ima prednost jer ima veću površinu za izmjenu topline i razbija se granični sloj na kojem nastupa kondenzacija. Najčešće radna tvar struji oko cijevi, a voda struji u cijevima. Time se olakšava mehaničko i kemijsko čišćenje cijevi. Ulaz radne tvari je uvijek s gornje strane. Ulaz vode je s donje strane zato da hladna voda pothladi radnu tvar u donjem dijelu kondenzatora. Kondenzatori s cijevima u plaštu se primjenjuju u industrijskim postrojenjima s protočnom ili optočnom vodom, te u sustavima industrijske klimatizacije, za učine kondenzacije: $\Phi_k = 50 \div 2000 \text{ kW}$. Kao radna tvar koriste se halogenirani ugljikovodici, R717 i ugljikovodici. Prijelaz topline događa se filmskom kondenzacijom na vodoravnom snopu cijevi u kondenzatorskom dijelu, a slobodnom konvekcijom na potopljenom snopu cijevi u pothlađivačkom dijelu – sve na strani radne tvari, a na strani vode turbulentno strujanje u cijevima.

Okvirni podaci:

$$k = 700 \div 1500 \text{ W/m}^2\text{K za kondenzator}$$

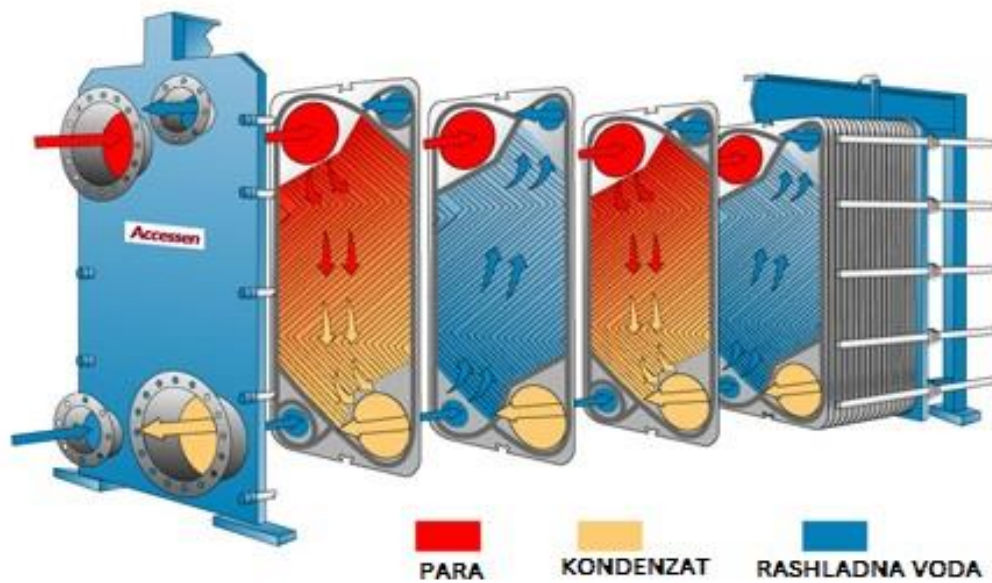
$$k = 150 \div 300 \text{ W/m}^2\text{K za pothlađivač}$$

$$\Delta\vartheta_m = 5 \div 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_w = 3 \div 6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$w_w = 0,3 \div 1,5 \text{ m/s}$$

4.2.4. Pločasti kondenzatori



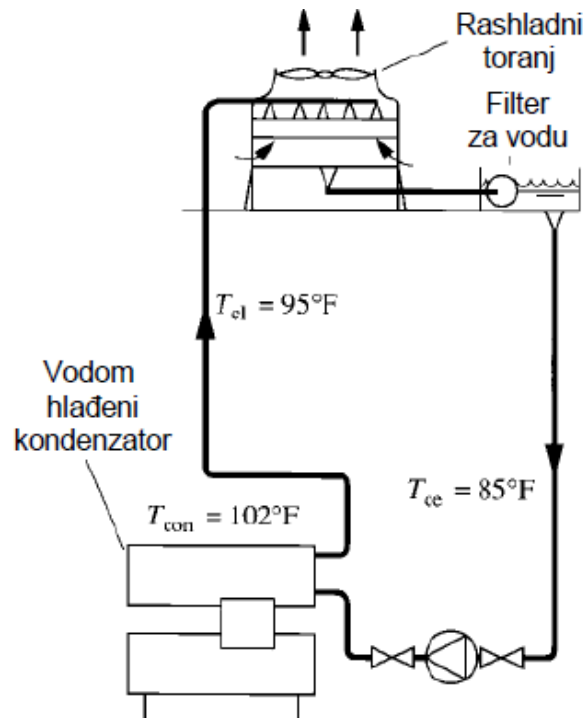
Slika 11. Pločasti kondenzator [6]

Ovakva vrsta izmjenjivača je vrlo kompaktna i ima veliku površinu za izmjenu topline. Sastoji se od mnogo tankih limenih ploča koje imaju veliku površinu. Ploče imaju udubine koje služe za usmjeravanje tvari. Između ploča su brtve, osim brtvljenja služe i za distribuciju tvari. Postoji polu-zavarena i rastavljiva izvedba. Najveći problem ovakvog tipa izmjenjivača predstavlja održavanje.

4.3 Kondenzatori hlađeni vodom i zrakom

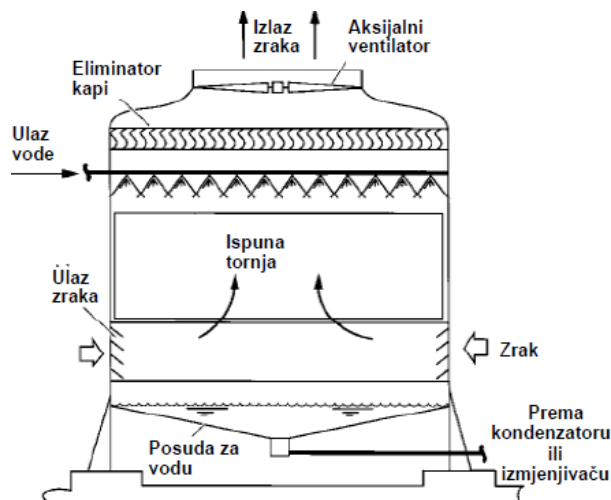
Kondenzatori hlađeni zrakom i vodom koriste se kod sustava gdje postoje veća toplinska opterećenja. Evaporativni kondenzatori najčešće se upotrebljavaju u rashladnoj industriji, a rashladni tornjevi se koriste u većim klimatizacijskim sustavima. Ovakvi kondenzatori traže pažljivu kemijsku pripremu vode i veća sredstva za održavanje sustava zbog gubitaka optočne vode.

4.3.1. Protočni kondenzator s regenerativnim hlađenjem vode



Slika 12. Protočni kondenzator s regenerativnim hlađenjem vode [5]

Voda koja se zagrijala u kondenzatoru odlazi u rashladni toranj i raspršuje se sapnicama preko punila s ciljem razbijanja u što finiju maglu što veće površine. Procesom ishlapljivanja voda se hladi na nižu temperaturu. Voda zatim prolazi kroz odvajač nečistoće i kemijski se obrađuje te se reciklacijskom pumpom tjera natrag u kondenzator.



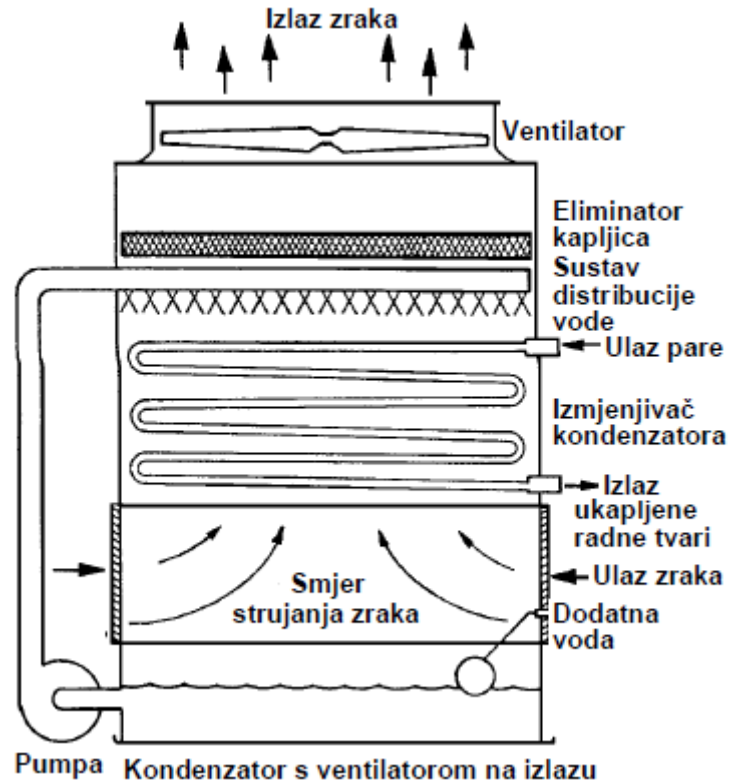
Slika 13. Rashladni toranj [5]

U ovakvim sustavima javljaju se gubici vode koji su zbroj mase vode koja je ishlapila, mase vode odnesene strujom zraka i masom vode potrebnom za odmuljivanje. Gubitke vode potrebno je nadoknaditi svježom vodom.

Tip kondenzatora u ovakvim sustavima je s glatkim cijevima u plaštu. Kao radna tvar koriste se i halogenirani ugljikovodici i R717. Primjenjuju se u industrijskoj klimatizaciji i u industrijskim postrojenjima. Vodu je potrebno kemijski obrađivati. Dodavanje svježje vode iznosi cca. 1 do 4%.

4.3.2. Evaporativni kondenzator

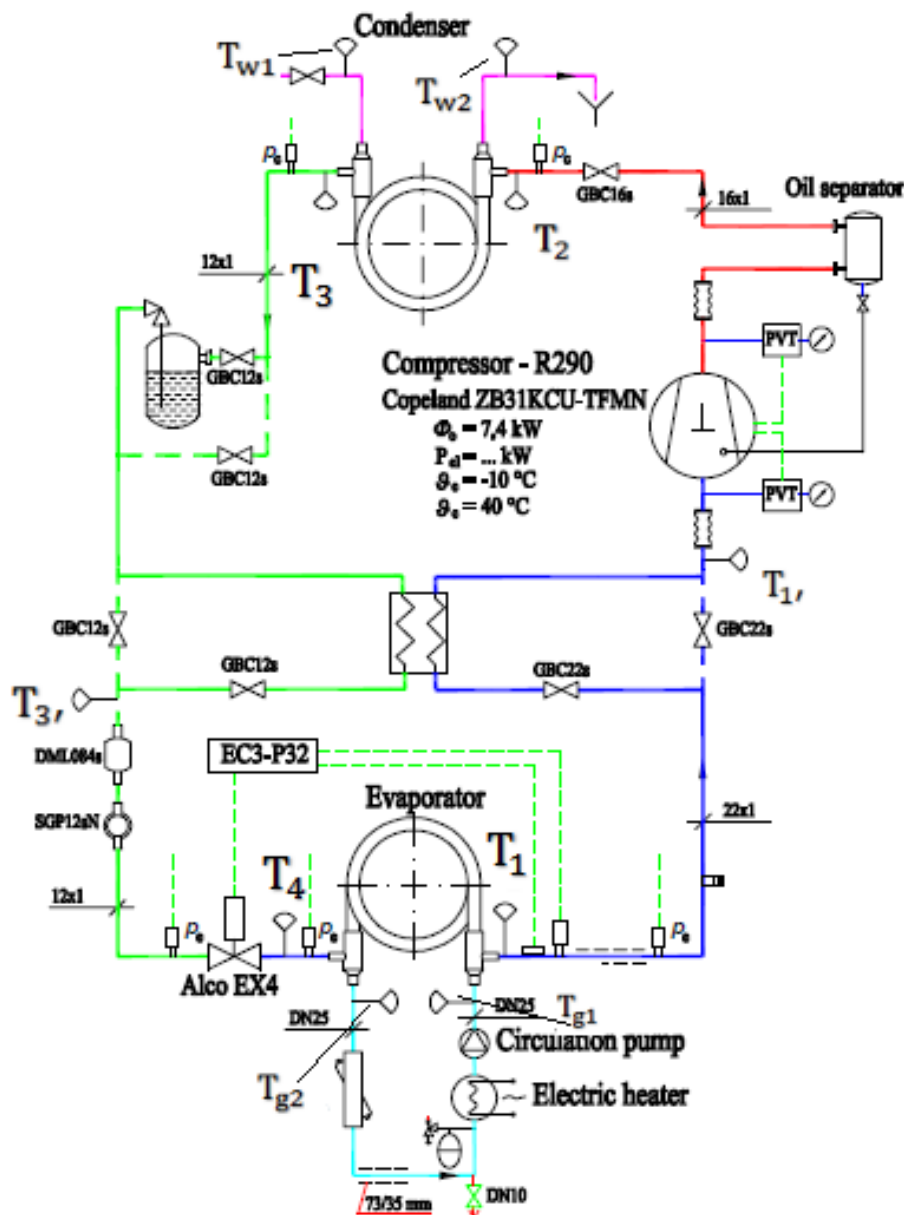
Ovakav sustav smanjuje potrebnu snagu pumpe za vodu uspoređujući ga s rashladnim tornjem u vezi s vodom hlađenim kondenzatorom. Potrebna je manja površina izmjenjivača i manji protok zraka da se odvede ista količina topline. Ovakvi sustavi su najkompaktnije izvedbe za neki rashladni kapacitet. Evaporativni kondenzator može raditi pri nižim temperaturama kondenzacije jer je ograničen temperaturom vlažnog termometra okoliša za razliku od zrakom hlađenog kondenzatora koji je ograničen temperaturom suhog termometra okoliša. Mogući tip kondenzatora je orebreni i glatkocijevni. Radna tvar (R717, iznimno halogenirani ugljikovodici) struji u cijevima, a voda i zrak oko cijevi. Koristi se u industrijskim postrojenjima. Prijelaz topline događa se filmskom kondenzacijom unutar cijevi i hlađenjem vode ishlapljivanjem.



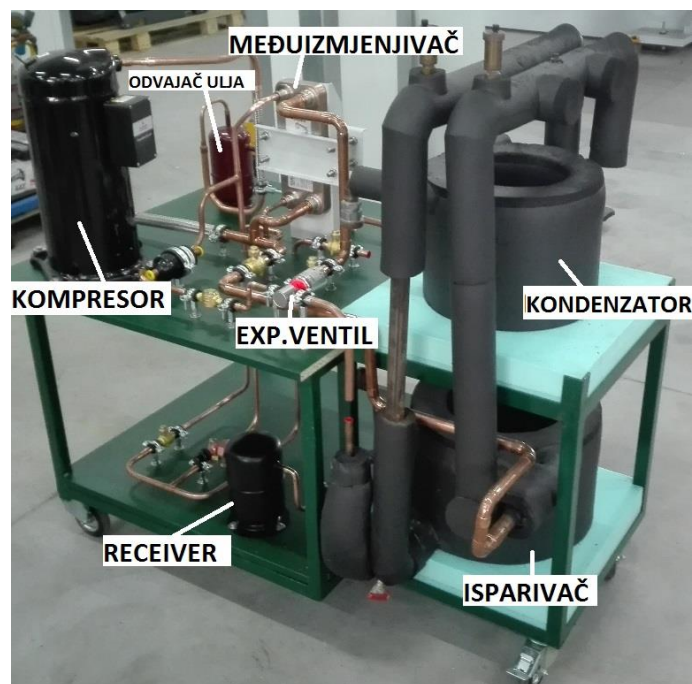
Slika 14. Evaporativni kondenzator [5]

5. EKSPERIMENTALNI RASHLADNI UREĐAJ

Ekperimentalni rashladni uređaj se sastoji od tipičnih komponenti koje čine rashladni sustav: kompresor, kondenzator, ekspanzijski ventil i isparivač. Kompresor usisava radnu tvar, komprimira ju na tlak kondenzacije, te ulazi u kondenzator gdje predaje toplinski tok vodi, zatim izlazi iz kondenzatora i dolazi u sakupljač radne tvari. Nakon toga se pomoću elektroničkog-ekspanzijskog ventila prigušuje na tlak isparivanja i ulazi u isparivač gdje preuzima toplinski tok od 30% smjese etilen-glikola. Zbog postizanja veće efikasnosti procesa dodan je i međuzmjenjivač gdje se radna tvar dodatno pregrijava/pothlađuje. Krug etilen-glikola opremljen je pumpom, električnim grijačem i ekspanzijskom posudom. Radna tvar u kondenzatoru predaje toplinski tok vodi koja dolazi iz vodovoda i nakon izmjene topline se slijeva cjevovodom u kanalizaciju. Međuzmjenjivač, odvajač ulja i sakupljač radne tvari moguće je zaobići obilaznim cjevovodom. Sve komponente sustave nalaze se na kolicima kojim ih je moguće transportirati.



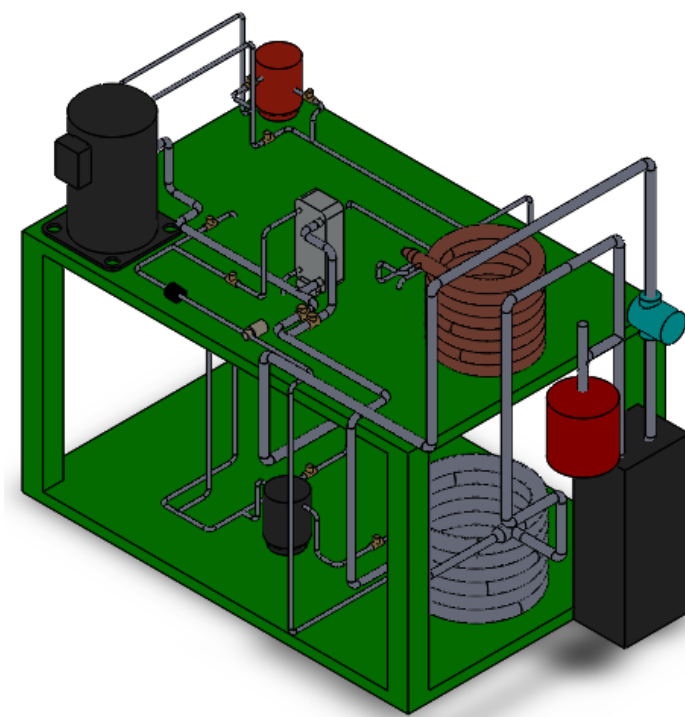
Slika 15. Shema eksperimentalnog sustava [7]



Slika 16. Eksperimentalni sustav

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

Tablica 3. Oprema eksperimentalnog postava [7]



Slika 17. 3D model eksperimentalnog rashladnog sustava

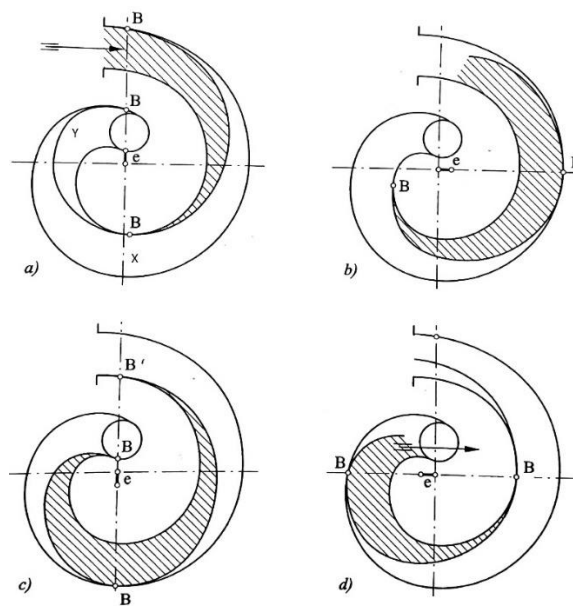
5.1. Komponente eksperimentalnog rashladnog sustava

5.1.1. Kompresor

Vrsta kompresora mjerene linije je hermetiski spiralni („scroll“) kompresor.

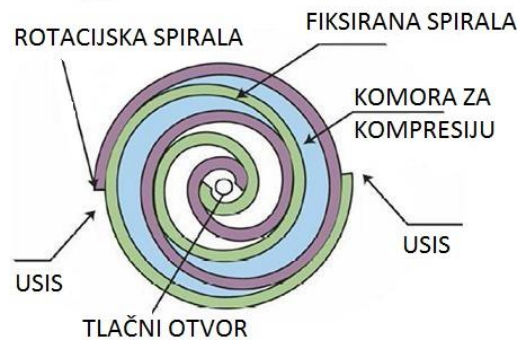
Princip rada:

Spirale stapa i cilindra su u neposrednom dodiru s najmanje 2 izvodnice B. Tako nastaju razdvojene komore među njima gdje se istodobno odvijaju pojedini stadiji rada. Na slici a) u šrafiranom području upravo traje usis plina kroz usisni otvor. U području X upravo je završilo usisavanje i počinje kompresija. U području Y se plin istiskuje kroz tlačni otvor. Proces transporta plina se istodobno odvija s obje strane spirala stapa pa se može reći da je spiralni kompresor dvoradni stroj. „Scroll“ kompresor nema samoradne ventile pa radi s prisilnim razvodom, koji ovisi o geometriji stapa i usisnog i tlačnog otvora na cilindru.



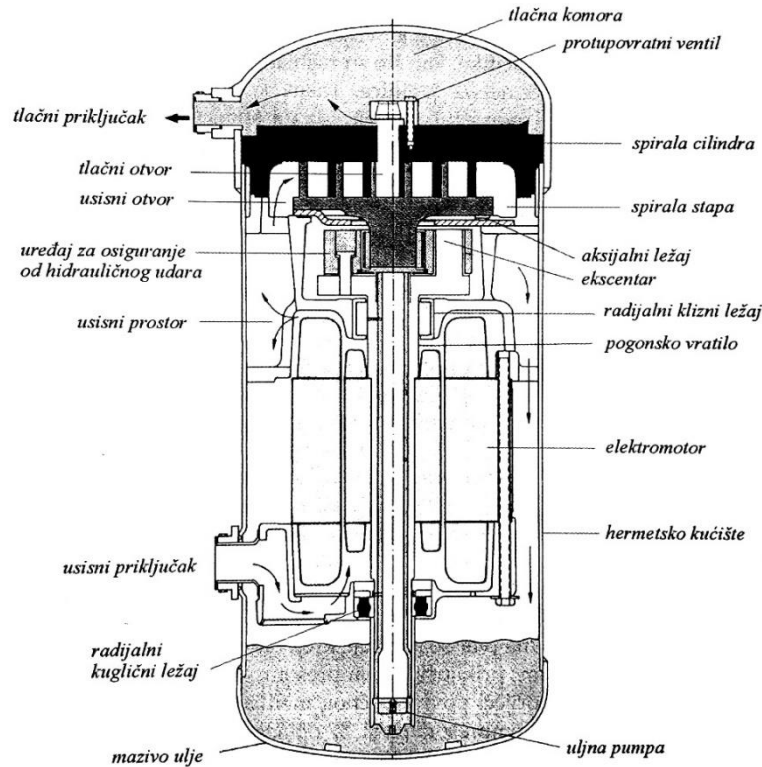
Slika 18. Faze rade „scroll“ kompresora [8]

Realne izvedbe spiralnih kompresora rade s mješovitom kompresijom.



Slika 19. Presjek „scroll“ kompresora [8]

Spiralni kompresori imaju minimalan broj pokretnih dijelova (stap i ekscentar). Prednosti su im miran rad zato jer se mogu balansirati te velika dobava zbog dvoradnog komprimiranja. Nedostaci su prilagođavanje uvjetima tlačnog voda i brtvljenje. Zbog toga se preporuča upotreba u uvjetima sličnim projektnim uvjetima. Takvi kompresori se koriste za uređaje manjeg učinka poput rashladnih i klimatizacijskih uređaja.



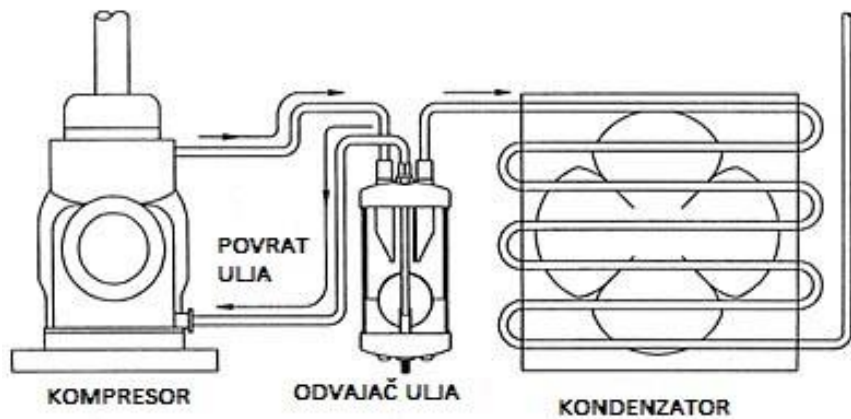
Slika 20. Bočni presjek „scroll“ kompresora [8]

U hermitskoj izvedbi kompresor i elektromotor smješteni su u hermitski zavareno kućište od lima. Radna tvar koja ulazi sadrži i kapljice mazivog ulja. Ulje se zbog smanjena brzine u usisnom prostoru kućišta taloži na dno, odakle ga uljna pumpa tjera u ležajeve.



Slika 21. „Scroll“ kompresor [9]

5.1.2. Odvajač ulja



Slika 22. Odvajač ulja [9]

S radnom tvari u sustavu struji i ulje za podmazivanje kompresora. Ulje koje je izbačeno u tlačni vod kompresora mora se vratiti natrag u kompresor. To se postiže odvajačima ulja.

5.1.3. Spremnik radne tvari („receiver“)



Slika 23. Sakupljač radne tvari [9]

Zadaci sakupljača su da prihvati ukapljene radne tvari iz kondenzatora ili cijelog sustava, te akumulacija ukapljene RT za trenutačne potrebe isparivača, održavanje kondenzatora praznim, a može poslužiti kao pothlađivač radne tvari.

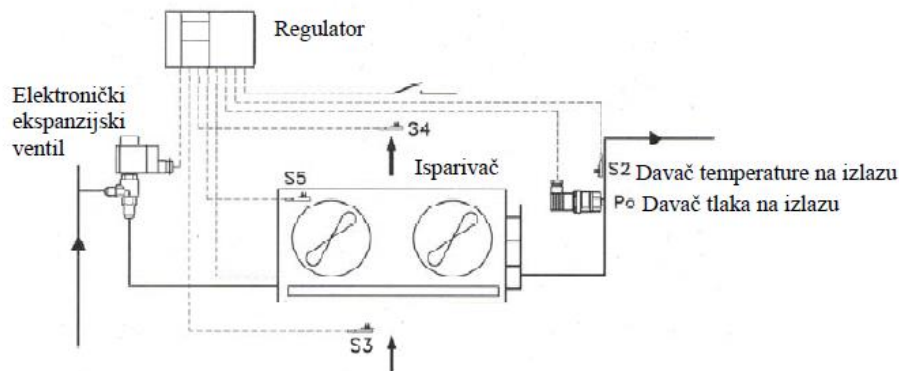
5.1.4. Međuzmjenjivač

Međuzmjenjivač na mjernoj liniji je pločaste kompaktne izvedbe. Služi zato da poboljša efikasnost sustava. Pothlađena radna tvar nakon izlaska iz kondenzatora dodatno pregrijava radnu tvar koja je izašla iz isparivača.



Slika 24. Međuzmjenjivač [4]

5.1.5 Elektronički ekspanzijski ventil (EEV)



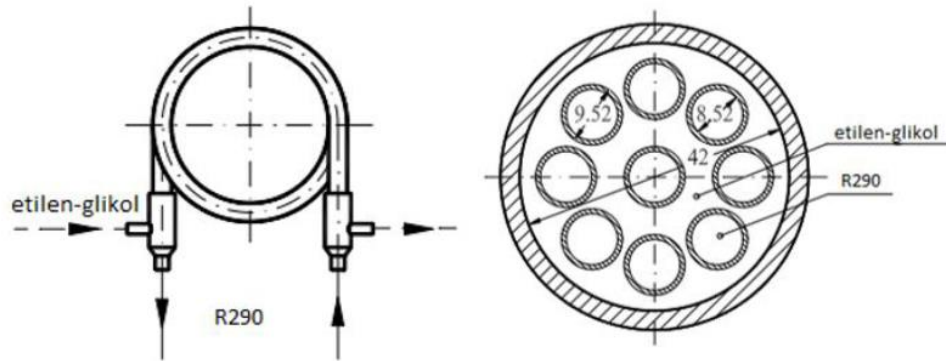
Slika 25. Elektronički ekspanzijski ventil [2]

Radna tvar se pregrijava u isparivaču. Ako je se radna tvar ne bi pregrijala riskirao bi se dolazak kapljica u kompresor i mogućnost hidrauličkog udara. Ako je pak pregrijanje preveliko, onda je prevelik dio isparivača zauzet pregrijanjem, a na tom dijelu se događa slabiji prijenos topline pa isparivač nije do kraja iskorišten. Pregrijanje nam omogućuje elektronski ekspanzijski ventil. EEV objedinjuje funkcije elektromagnetnog ventila i termoekspanzijskog ventila. Potreban mu je osjetnik pregrijanja radne tvari na izlaznoj cijevi isparivača, pretvarač tlaka koji je spojen na tlak radne tvari na izlazu iz isparivača te kontroler koji na temelju dobivenih informacija otvara ventil točno onoliko koliko je potrebno da se održi minimalno stabilno pregrijanje radne tvari. Elektronički ekspanzijski ventil koji se koristi na eksperimentalnom postavu ima kontinuiranu modulaciju protoka koja se postiže pomoću elektromotora.

EEV se može koristiti za sve radne tvari, nije potrebno podešavanje ventila, ima zamjenjive sapnice, ima široko regulacijsko područje 10-100% te sustav prigušenja hidrauličkih udara.

5.1.6 Koaksijalni isparivač

Radna tvar struji kroz unutarnju cijev, a medij koji se hladi struji kroz vanjsku cijev. Cijevi savijene u spiralu daju veću kompaktnost i veći koeficijent prolaza topline, ali i veći pad tlaka. Koristi se na manjim uređajima. Izvedba na mjernoj liniji ima 9 manjih cijevi kroz koje struji propan, a u većoj cijevi struji smjesa etilen-glikola. Na ulazu radne tvari u isparivač nalazi se razdjelnik koji osigurava paralelno napajanje svih cijevi isparivača.



Slika 26. Koaksijalni isparivač [10]

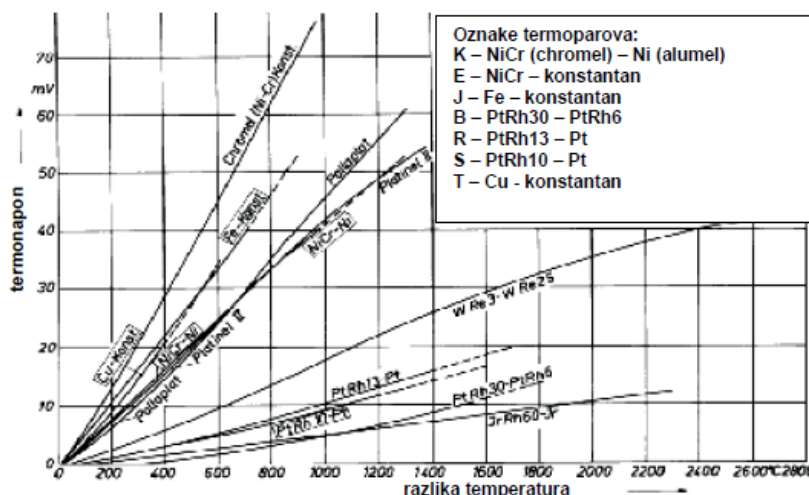
5.2 Mjerna oprema

5.2.1. Mjerenje temperature termoparovima



Slika 27. Princip rada termopara [1]

Termopar je kontakti uređaj za mjerenje temperature koji se sastoji od 2 različita vodiča koji su spojena na jednom kraju. Termopar funkcionira na principu termoelektičnog efekta (Seebeckov efekt). Termoelektični efekt je pojava razlike napona kad postoji gradijent temperature na spoju dva vodiča. Razlika napona je direktno proporcionalna razlici temperature.



Slika 28. Različite karakteristike termoparova [1]

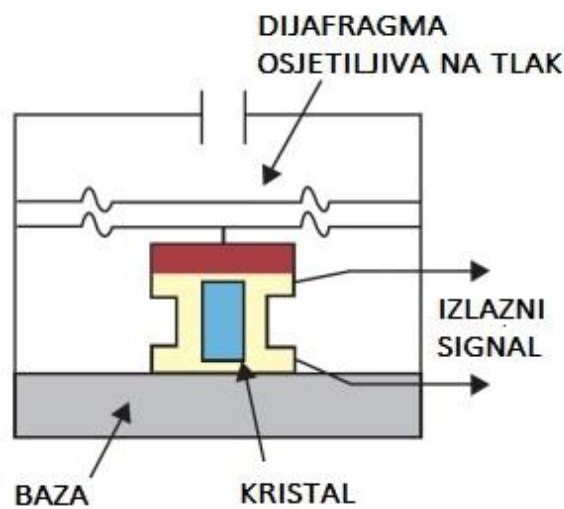
Općenito termoparovi nisu skupi, brzo reagiraju na promjenu temperature i mogu mjeriti veliki raspon temperatura. Tip K se najviše koristi za generalnu primjenu i relativno je jeftin. Problem može nastati ako se prijeđe Curie točka (185 °C za tip K), tada nikel gubi magnetičnost i dolazi do devijacije u točnosti. Tip K dobro funkcionira u oksidirajućim atmosferama, a u reducirajućim krom oksidira pa se smanji razlika napona i termopar očitava nižu temperaturu nego što u stvarnosti je.

U sklopu mjerenja na mjernom uređaju u laboratoriju sam pripremao termoparove. Termoparovi su Ni/CrNi (K-tip). Priprema termopara vrši se tako da se termoparska žica spoji na konektor koji se spaja na priključnu kutiju A/D konverter. Konverter se spaja na računalo na kojem možemo očitavati rezultate mjerenja. Drugi kraj žice potrebno je međusobno „isplesati“, staviti termalnu pastu da mjerenje bude preciznije i staviti u „puškicu“ na mjesto gdje želimo mjeriti temperaturu.

Da bi se dobilo točno očitavanje temperature, potrebno je poznavati temperaturu na spoju s A/D pretvaračem. Mjerenje temperature na spoju (referentne temperature) postiže se preciznim otpornim termometrom od platine (Pt100) koji je dobro izoliran i ugrađen u priključnu kutiju pretvarača. S obzirom na referentnu temperaturu vrše se korekcije temperature koju očitavamo.

5.2.2. Mjerenje tlaka pretvornicima tlaka

Pretvornici tlaka su instrumenti koji pretvaraju mjereni tlak u električni signal proporcionalan mjerenom tlaku. Izlazni signal može biti struja, napon ili frekvencija. Pretvornici tlaka na mjerne liniji su piezoelektrični pretvornici tlaka. Piezoelektrični pretvornik tlaka funkcionira tako da se na površini posebno odrezanog kristala koji je elastično deformiran vanjskom silom stvara električni naboj, a time i električni napon.



Slika 29. Piezoelektrični pretvornik tlaka [11]

5.2.3. Mjerenje električne snage kompresora

Električna snaga kompresora mjeri se digitalnim multimetrom.

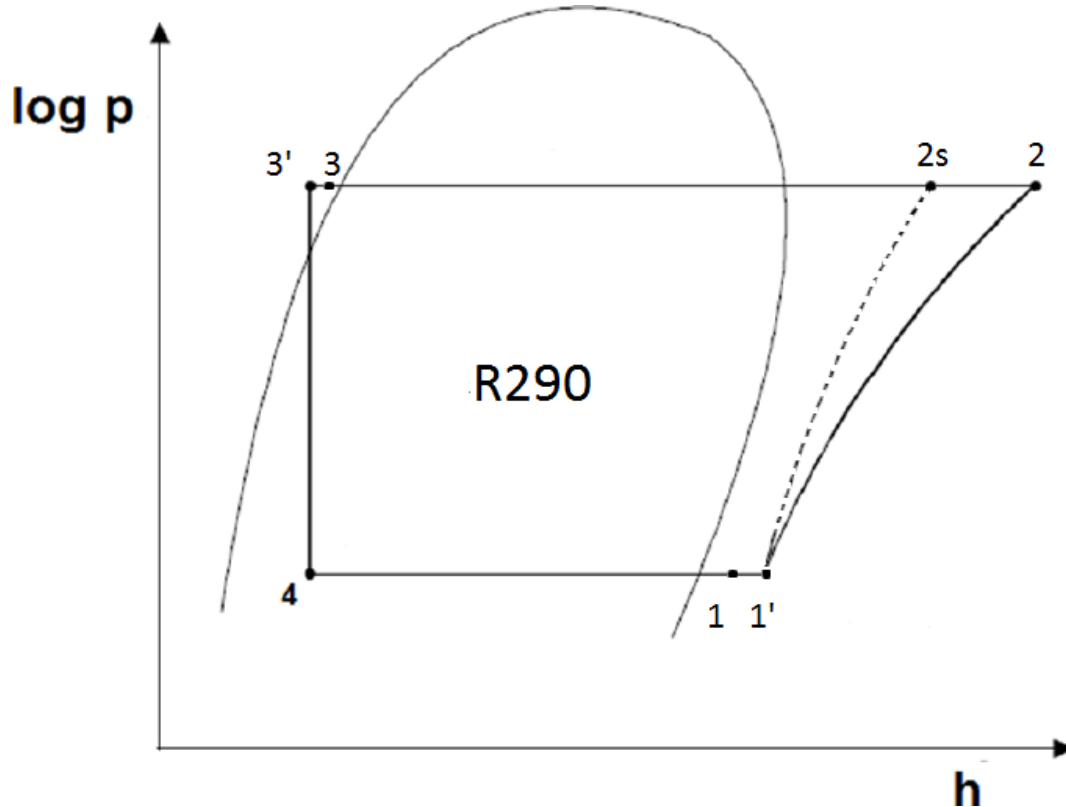


Slika 30. Sučelje za očitavanje električne snage kompresora [4]

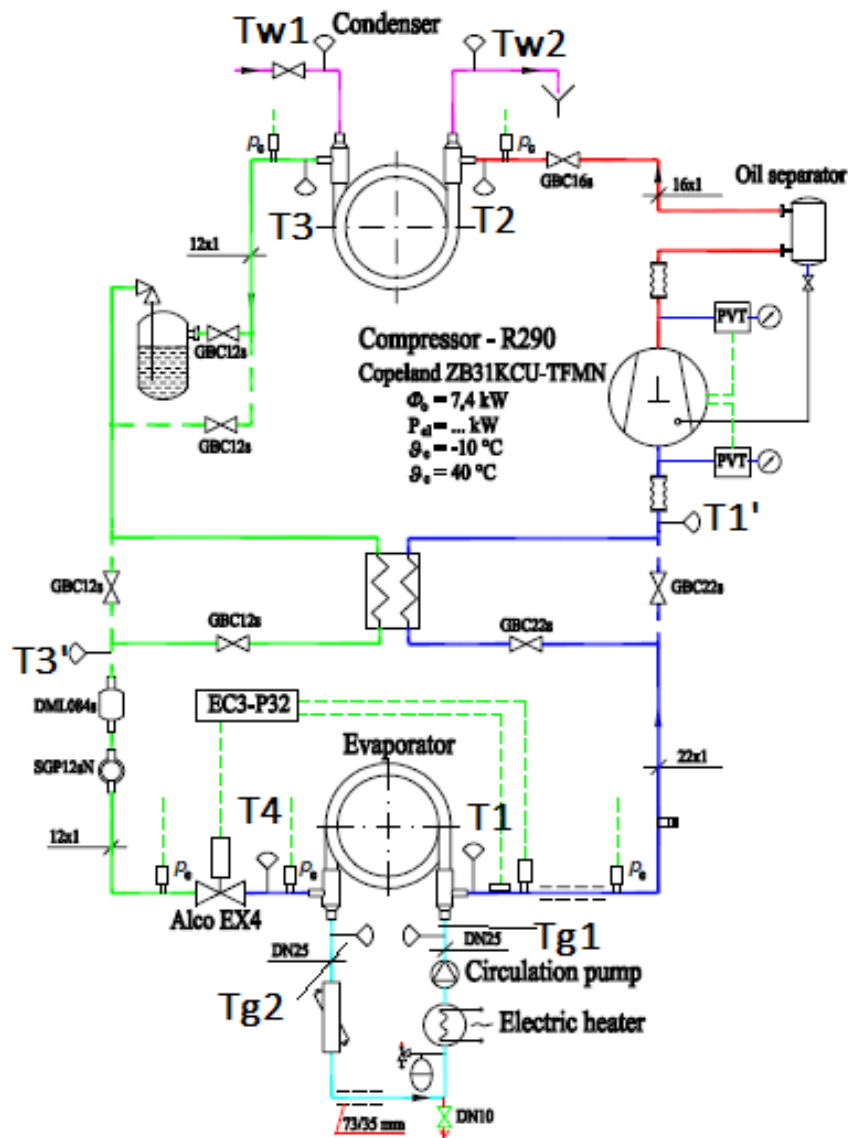
6. TEORIJSKI PRORAČUN RASHLADNOG PROCESA

6.1. Ulazni podaci

| | |
|--|---|
| • Radna tvar | R290 (propan) |
| • Temperatura isparavanja | $\vartheta_i = -10\text{ °C}$ |
| • Temperatura kondenzacije | $\vartheta_k = 40\text{ °C}$ |
| • Tlak isparavanja | $p_i = 3,5\text{ bar}$ |
| • Tlak kondenzacije | $p_k = 13,7\text{ bar}$ |
| • Rashladni učinak | $\Phi_i = 7,4\text{ kW}$ |
| • Temperatura vode na ulazu u kondenzator | $\vartheta_{w1} = 29\text{ °C}$ |
| • Temperatura vode na izlazu iz kondenzatora | $\vartheta_{w2} = 34\text{ °C}$ |
| • Izentropski stupanja djelovanja kompresora | $\eta_{iz} = 0,7$ |
| • Pregrijanje | $\Delta\vartheta_{preg} = 5\text{ °C}$ |
| • Pothlađenje | $\Delta\vartheta_{pothl} = 5\text{ °C}$ |
| • Pothlađenje na međuzmjenjivaču | $\Delta\vartheta_{3-3'} = 3\text{ °C}$ |



Slika 31. Proces u logp – h dijagramu



Slika 32. Shema rashladnog procesa [7]

6.2. Karakteristične točke procesa

- 1 – pregrijana para na izlazu iz isparivača
- 1' – pregrijana para na izlazu iz međuzmjenjivača
- 2s – pregrijana para nakon izentropske kompresije
- 2 – pregrijana para nakon realne kompresije
- 3 – pothlađena kapljevina na izlazu iz kondenzatora
- 3' – pothlađena kapljevina na izlazu iz međuzmjenjivača
- 4- mokra para na izlazu iz ekspanzijskog ventila (ulaz u isparivač)

Točka 1 definirana je tlakom isparavanja te temperaturom nakon pregrijanja:

$$p_1 = p_i$$

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

Točka 1' definirana je tlakom isparavanja te entalpijom točke 1 uvećanom za entalpiju izmijenjenu na međuizmjenjivaču (100% učinkovitost međuizmjenjivača):

$$p_{1'} = p_i$$

$$h_{1'} = (h_3 - h_{3'}) + h_1$$

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

$$p_{2s} = p_k$$

$$s_{2s} = s_{1'}$$

Točka 2 definirana je tlakom kondenzacije te entalpijom koja ovisi o izentropskom stupnju djelovanja kompresora i entalpiji točke 2s i 1':

$$p_2 = p_k$$

$$h_2 = h_{1'} + \frac{h_{2s} - h_{1'}}{\eta_{iz}}$$

Točka 3 definirana je tlakom kondenzacije te temperaturom nakon pothlađenja:

$$p_3 = p_k$$

$$\vartheta_3 = \vartheta_k - \Delta\vartheta_{pohl}$$

Točka 3' definirana je tlakom kondenzacije te temperaturom točke 3 umanjenom za iznos pothlađenja na međuizmjenjivaču:

$$p_{3'} = p_k$$

$$\vartheta_{3'} = \vartheta_3 - \Delta\vartheta_{3-3'}$$

Točka 4 definirana je tlakom isparavanja te entalpijom koja je jednaka entalpiji točke 3':

$$p_4 = p_i \quad h_4 = h_{3'}$$

| Točka | ϑ [°C] | p [bar] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] | v [dm ³ /kg] | x [-] |
|-------|------------------|-----------|-------------|--------------|---------------------------|----------|
| 1 | -5 | 3,5 | 571,666 | 2,41470 | 134,283 | - |
| 1' | 0,0281 | 3,5 | 580,1920 | 2,446174 | 137,6094 | - |
| 2s | 55,163 | 13,7 | 642,22059 | 2,446174 | 36,65125 | - |
| 2 | 64,6407 | 13,7 | 668,8043 | 2,50774 | 38,65431 | - |
| 3 | 35 | 13,7 | 293,557 | 1,31675 | 2,10075 | - |
| 3' | 32 | 13,7 | 285,031 | 1,2896 | 2,0785 | - |
| 4 | -10 | 3,5 | 285,031 | 1,325774 | 38,373 | 0,282993 |

Tablica 4. Rezultati proračuna procesa

| | h [kJ/kg] | ρ [kg/m ³] | c_p [kJ/kgK] | μ [Pa s] | λ [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 |

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

Proračun je izvršen programom MS Excell, a svojstva radne tvari su dobivena iz [12].

Maseni protok radne tvari:

$$q_m = \frac{\Phi_i}{(h_1 - h_4)} = \frac{7,4}{(571,666 - 285,031)} = 0,02581 \text{ kg/s}$$

Snaga kompresora:

$$P_k = q_m \cdot (h_2 - h_{1'}) = 0,02581 \cdot (668,8043 - 580,1920) = 2,28 \text{ kW}$$

Učink kondenzatora:

$$\Phi_k = q_m \cdot (h_2 - h_3) = 0,02581 \cdot (668,8043 - 293,557) = 9,68 \text{ kW}$$

Faktor hlađenja računa se prema izrazu:

$$\varepsilon_{hl} = \frac{\Phi_i}{P_k} = \frac{7,4}{2,287} = 3,23$$

Faktor grijanja računa se prema izrazu:

$$\varepsilon_{gr} = \frac{\Phi_k}{P_k} = \frac{9,687}{2,287} = 4,23$$

6.3. Dimenzioniranje cjevovoda

Kod dimenzioniranja cjevovoda potrebno je zadovoljiti uvjet da brzina strujanja radne tvari bude dovoljno mala da ne prekorači dozvoljene padove tlaka, a istovremeno da brzina bude dovoljno velika da se mazivo ulje transportira natrag u kompresor. Brzine se odabiru i računaju se dimenzije cjevovoda.

| Cjevovod | Odabrana brzina w [m/s] | Gustoća $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
|--------------|------------------------------|---|
| Usisni | 10 | 7,26 |
| Tlačni | 12 | 25,87 |
| Kapljevinski | 0,8 | 476,02 |

Tablica 6. Odabrane brzine strujanja

$$d_{us} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_m}{\rho_{us} \cdot w_{us} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,02581}{7,26 \cdot 10 \cdot \pi}} = 0,02126 \text{ m}$$

Odabrana cijev usisnog voda je Cu 22x1 mm.

$$d_{tl} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_m}{\rho_{tl} \cdot w_{tl} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,02581}{25,87 \cdot 12 \cdot \pi}} = 0,01028 \text{ m}$$

Odabrana cijev tlačnog voda je Cu 12x1 mm.

$$d_{kaplj} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_m}{\rho_{kaplj} \cdot w_{kaplj} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,02581}{476,02 \cdot 0,8 \cdot \pi}} = 0,00929 \text{ m}$$

Odabrana cijev kapljevinskog voda je Cu 12x1 mm.

7. TERMODINAMIČKI PRORAČUN KONDENZATORA

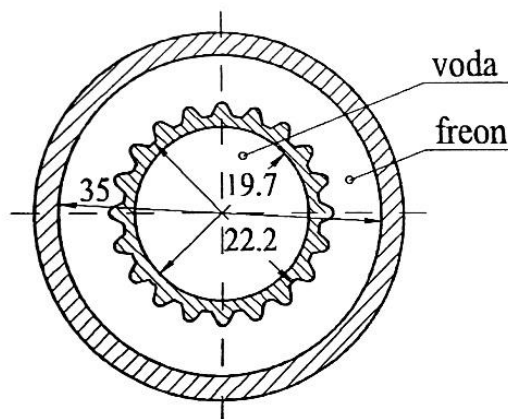
7.1 Specifičnosti prijelaza topline koaksijalnog kondenzatora

Uspoređujući koaksijalni izmjenjivač i ravni cijev u cijevi izmjenjivač, istraživači [13] su otkrili da je prosječni koeficijent prolaza topline u koaksijalnom izmjenjivaču veći za 33 – 55%. To je tako zbog toga što je dvofazno strujanje u zavojnici kompliciranije i drugačijeg oblika nego strujanje u ravnoj cijevi. Strujanjem u zavojnici nastaje centrifugalna sila koja djeluje na čestice fluida i uzrokuje sekundarno strujanje, nadodano na aksijalno strujanje. Kad nastane sekundarno strujanje, na paru bliže središtu cijevi koja struji velikom brzinom će djelovati jača centrifugalna sila nego na tekući film na stijenci cijevi. Pare su nošene prema vanjskoj stijenci cijevi, zatim opet prema središtu cijevi. Ovakav način strujanja uzrokuje mehanizam koji uzrokuje povećanje prijenosa topline.

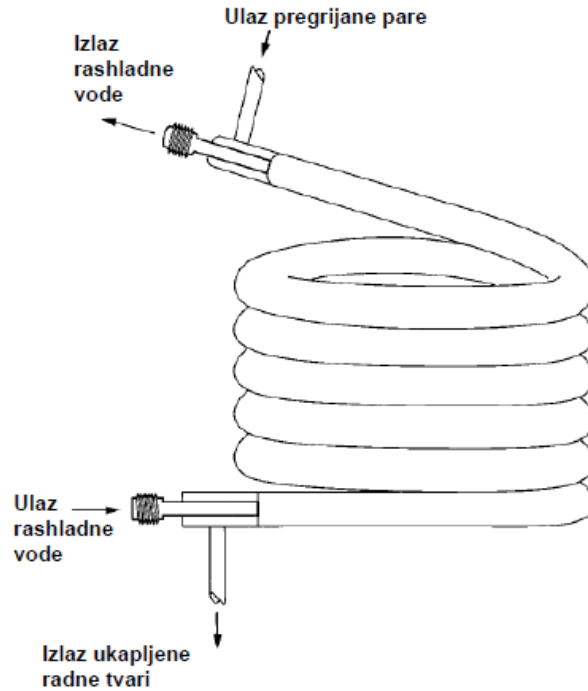
Proračun je podijeljen na 2 dijela: dio kondenzatora gdje radna tvar kondenzira i na dio gdje se radna tvar pothlađuje.

ULAZNI PODACI

| | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| •Tip kondenzatora | Alfa Laval CC17 |
| •Materijal | bakar |
| •Unutarnji promjer unutarnje cijevi | $d_u = 19,7 \text{ mm}$ |
| •Vanjski promjer unutarnje cijevi | $d_v = 22,2 \text{ mm}$ |
| •Unutarnji promjer vanjske cijevi | $D_u = 35 \text{ mm}$ |
| •Promjer spirale | $D_w = 265 \text{ mm}$ |
| •Visinska razlika zavoja | $h = 35 \text{ mm}$ |



Slika 33. Presjek cijevi kondenzatora [10]



Slika 34. Prikaz koaksijalnog kondenzatora [5]

7.2 Proračun koeficijenta prijelaza topline na strani vode

Svojstva vode su izračunata za srednju temperaturu vode u kondenzatoru:

$$\vartheta_{wSR} = \frac{\vartheta_{w1} + \vartheta_{w2}}{2} = \frac{29 + 34}{2} = 31,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_w(31,5 \text{ } ^\circ\text{C}) = 995,116 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_{Pw}(31,5 \text{ } ^\circ\text{C}) = 4,1799 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\mu_w(31,5 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,00077394 \text{ Pa s}$$

$$\lambda_w(31,5 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,617809 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$Pr_w(31,5 \text{ } ^\circ\text{C}) = 5,23789$$

Maseni protok vode:

$$q_{mw} = \frac{\Phi_k}{c_{Pw} \cdot (\vartheta_{w2} - \vartheta_{w1})} = \frac{9,687}{4,1799 \cdot (34 - 29)} = 0,463 \text{ kg/s}$$

Toplinski tok prenesen kondenzacijom:

$$\Phi_{kond} = q_m \cdot (h_2 - h') = 0,02581 \cdot (668,22 - 308,002) = 9,31 \text{ kW}$$

Toplinski tok prenesen pothlađenjem:

$$\Phi_{pothl} = q_m \cdot (h' - h_3) = 0,02581 \cdot (308,002 - 293,557) = 0,372 \text{ kW}$$

Temperatura vode na početku pothlađenja:

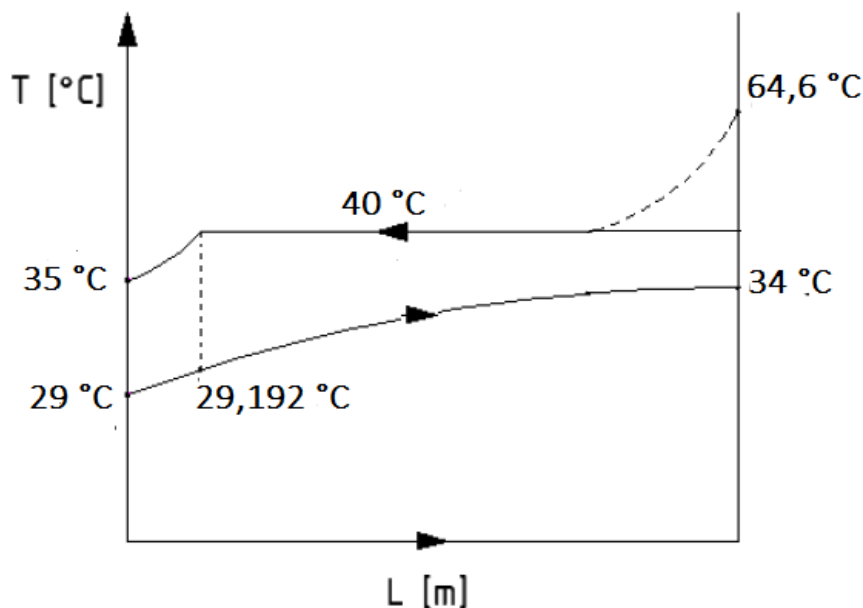
$$\vartheta_{wy} = \frac{\Phi_{pothl}}{q_{mw} c_{pw}} + \vartheta_{w1} = \frac{0,3729}{0,4635 \cdot 4,1799} + 29 = 29,192 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u području kondenzacije:

$$\Delta\vartheta_{mkond} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{wy}) - (\vartheta_k - \vartheta_{w2})}{\ln \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{wy})}{(\vartheta_k - \vartheta_{w2})}} = \frac{(40 - 29,192) - (40 - 34)}{\ln \frac{(40 - 29,192)}{(40 - 34)}} = 8,169 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika u području pothlađenja:

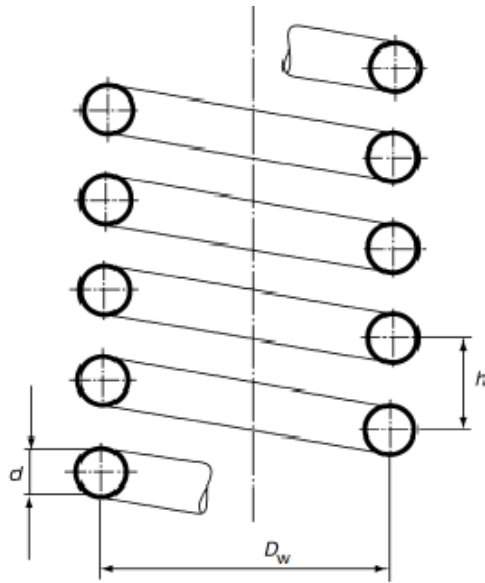
$$\Delta\vartheta_{mpothl} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{wy}) - (\vartheta_3 - \vartheta_{w1})}{\ln \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{wy})}{(\vartheta_3 - \vartheta_{w1})}} = \frac{(40 - 29,192) - (35 - 29)}{\ln \frac{(40 - 29,192)}{(35 - 29)}} = 8,169 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Slika 35. Raspored temperatura po duljini kondenzatora

Područje pregrijanih para prikazano je crtkano zbog toga što se kondenzacija događa odmah ako je temperatura stijenke na tom dijelu ispod temperature zasićenja za tlak kondenzacije.

Proračun koeficijenta prijelaza topline na strani vode se provodi prema [14].



Slika 36. Geometrija zavojnice [14]

Prosječni promjer zakrivljenosti:

$$D = D_w \left[1 + \left(\frac{h}{\pi \cdot D_w} \right)^2 \right] = 265 \left[1 + \left(\frac{35}{\pi \cdot 265} \right)^2 \right] = 265,5 \text{ mm}$$

Površina presjeka strujanja vode:

$$A_w = \frac{d_u^2 \pi}{4} = \frac{\left(\frac{19,7}{1000} \right)^2 \pi}{4} = 0,0003048 \text{ m}^2$$

Brzina strujanja vode:

$$w_w = \frac{q_{mw}}{\rho_w A_w} = \frac{0,4635}{995,116 \cdot 0,0003048} = 1,53 \text{ m/s}$$

Kritičan Reynoldsov broj:

$$Re_{krit_w} = 2300 \left[1 + 8,6 \left(\frac{d_u}{D} \right)^{0,45} \right] = 2300 \left[1 + 8,6 \left(\frac{19,7}{265,468} \right)^{0,45} \right] = 8437$$

Reynoldsov broj:

$$Re_w = \frac{\rho_w w_w d_u}{\mu_w} = \frac{995,116 \cdot 1,528 \cdot \frac{19,7}{1000}}{0,00077394} = 38709 > Re_{krit_w}$$

Izračun faktora ξ :

$$\xi = \left[\frac{0,3164}{Re_w^{0,25}} + 0,03 \left(\frac{d_u}{D} \right)^{0,5} \right] \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0,27}$$

$$\xi = \left[\frac{0,3164}{38709,235^{0,25}} + 0,03 \left(\frac{19,7}{265,468} \right)^{0,5} \right] \cdot \left(\frac{0,000747573}{0,00077394} \right)^{0,27} = 0,030443$$

Za proračun je potrebno znati svojstva vode na temperaturi unutrašnje stijenke pa se pretpostavlja temperatura stijenke od 33,18 °C :

$$\mu_s(33,18 \text{ °C}) = 0,000747573 \text{ Pa s}$$

$$Pr_s(33,18 \text{ °C}) = 5,03765$$

Strujanje je TURBULENTNO pa se primjenjuje sljedeća formula za Nusselt:

$$Nu_w = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) Re_w Pr_w}{1 + 12,7 \sqrt{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot \left(Pr_w^{\frac{2}{3}} - 1\right)}} \cdot \left(\frac{Pr_w}{Pr_s}\right)^{0,14}$$

$$Nu_w = \frac{(0,030729/8) \cdot 38709,235 \cdot 5,23789}{1 + 12,7 \sqrt{(0,030729/8) \cdot (5,23789^{\frac{2}{3}} - 1)}} \cdot \left(\frac{5,23789}{5,03765}\right)^{0,14} = 300,75$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode:

$$\alpha_w = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{d_u} = \frac{300,7568 \cdot 0,617809}{\frac{19,7}{1000}} = 9432 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Provjera pretpostavljene temperature unutrašnje stijenke se izvršava izjednačenjem gustoća toplinskih tokova svedenih na unutanju površinu na strani vode i na strani R290:

$$\alpha_w(\vartheta_{SU} - \vartheta_{wSR}) = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{SU})}{\frac{d_u}{d_v \cdot \alpha_{kond}} + \frac{d_u}{2 \cdot \lambda_{bakar}} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u}}$$

$$\vartheta_{SU} = \frac{\vartheta_k + \alpha_w \cdot \vartheta_{wSR} \cdot \left(\frac{d_u}{d_v \cdot \alpha_{kond}} + \frac{d_u}{2 \cdot \lambda_{bakar}} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u}\right)}{\frac{d_u \cdot \alpha_w}{d_v \cdot \alpha_{kond}} + \frac{d_u \cdot \alpha_w}{2 \cdot \lambda_{bakar}} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u} + 1}$$

$$\vartheta_{SU} = \frac{40 + 9431,995 \cdot 31,5 \cdot \left(\frac{19,7}{22,2 \cdot 2077} + \frac{19,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 375} \cdot \ln \frac{22,2}{19,7}\right)}{\frac{19,7 \cdot 9431,995}{22,2 \cdot 2077} + \frac{19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 9431,995}{2 \cdot 375} \cdot \ln \frac{22,2}{19,7} + 1}$$

$$\vartheta_{SU} = 33,18 \text{ °C}$$

Pretpostavljena temperatura stijenke zadovoljava.

7.3. Proračun koeficijenta prijelaza topline u području kondenzacije na strani R290

Ekvivalentni promjer za strujanje u annulusu:

$$D_{ekv} = D_u - d_v = 35 - 22,2 = 12,8 \text{ mm}$$

Napomena:

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

Površina presjeka strujanja R290:

$$A_{RT} = \frac{\pi \cdot (D_u)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d_v)^2}{4} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{35}{1000}\right)^2}{4} - \frac{\pi \cdot \left(\frac{22,2}{1000}\right)^2}{4} = 0,000575037 \text{ m}^2$$

Proračun koeficijenta prijelaza topline u području kondenzacije izvršen je prema [13]. Postupak je iterativan jer je potrebno pretpostaviti gustoću toplinskog toka.

Srednji sadržaj pare:

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

Reducirani tlak:

$$p_r = \frac{p_{zasićenja}}{p_{kritičan}} = \frac{13,7}{42,512} = 0,3222$$

Martinellijev parametar:

$$\chi = \left(\frac{1 - x_{sr}}{x_{sr}}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu'}{\mu''}\right)^{0,1} = \left(\frac{1 - 0,5}{0,5}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{30,208}{467,289}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{0,00008249}{0,00000942}\right)^{0,1}$$

$$\chi = 0,315869$$

Gustoća masenog toka

$$G = \frac{q_m}{A_{RT}} = \frac{0,02581}{0,000575037} = 44,89 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Reynoldsov broj kapljevine:

$$Re' = \frac{G(1 - x)D_{ekv}}{\mu'} = \frac{44,8958 \cdot (1 - 0,5) \cdot \frac{12,8}{1000}}{0,00008249} = 3483,25$$

Reynoldsov broj pare:

$$Re'' = \frac{G \cdot x \cdot D_{ekv}}{\mu''} = \frac{44,8958 \cdot 0,5 \cdot \frac{12,8}{1000}}{0,00000942} = 30502,51$$

Deanov broj računa se prema sljedećem izrazu:

$$De = \left[Re' + Re'' \cdot \left(\frac{\mu''}{\mu'} \right) \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,5} \right] \cdot \left[\frac{D_{ekv}}{D_w} \right]^{0,5}$$

$$De = \left[3483,255 + 30502,517 \cdot \left(\frac{0,00000942}{0,00008249} \right) \cdot \left(\frac{467,289}{30,208} \right)^{0,5} \right] \cdot \left[\frac{12,8}{265} \right]^{0,5}$$

$$De = 3776$$

Pretpostavljena gustoća toplinskog toka svedenog na vanjsku stijenku:

$$q_{kond} = 13519,3 \text{ W/m}^2$$

Boiling number Bo:

$$Bo = \frac{q_{kond}}{G \cdot (h'' - h')} = \frac{13519,3}{44,8958 \cdot (614,495 - 308,002) \cdot 1000} = 0,00098$$

Izračunavanje značajke Nusselt:

$$Nu_{kond} = 0,1352 \cdot De^{0,7654} \cdot Pr'^{0,8144} \cdot \chi^{0,0432} \cdot p_r^{-0,3356} \cdot (Bo \cdot 10^4)^{0,112}$$

$$Nu_{kond} = 0,1352 \cdot 3776,4237^{0,7654} \cdot 2,8297^{0,8144} \cdot 0,315869^{0,0432} \cdot 0,3222^{-0,3356} \cdot (0,00098 \cdot 10^4)^{0,112}$$

$$Nu_{kond} = 310$$

Koeficijent prijelaza topline R290 u području kondenzacije:

$$\alpha_{kond} = \frac{Nu_{kond} \cdot \lambda'}{D_{ekv}} = \frac{310 \cdot 0,0858}{\frac{12,8}{1000}} = 2077,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

7.3.1. Koeficijent prolaza topline u području kondenzacije

Koeficijent prolaza topline u području kondenzacije sveden na vanjsku stijenku:

$$k_{kond} = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_w} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{bakar}} \ln \left(\frac{d_v}{d_u} \right) + \frac{1}{\alpha_{kond}}}$$

$$k_{kond} = \frac{1}{\frac{22,2}{19,7 \cdot 9431,995} + \frac{22,2}{2 \cdot 375} \ln \left(\frac{22,2}{19,7} \right) + \frac{1}{2077,8}} = 1654,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Gustoća toplinskog toka svedenog na vanjsku stijenku:

$$q_{kond} = k_{kond} \cdot \Delta\theta_{mkond} = 1654,8 \cdot 8,169 = 13519,3 \text{ W/m}^2$$

Pretpostavljena gustoća toplinskog toka zadovoljava.

Površina za izmjenu topline u području kondenzacije:

$$A_{\text{kond}} = \frac{\Phi_{\text{kond}}}{q_{\text{kond}}} = \frac{9,31 \cdot 1000}{13519,3} = 0,6889 \text{ m}^2$$

Duljina kondenzatora u području kondenzacije:

$$L_{\text{kond}} = \frac{A_{\text{kond}}}{d_v \cdot \pi} = \frac{0,6889}{\frac{22,2}{1000} \cdot \pi} = 9,87 \text{ m}$$

7.4. Proračun koeficijenta prijelaza topline u području pothlađenja na strani R290

Proračun izvršen prema [14].

Srednja temperatura pothlađenja:

$$\vartheta_{SR\ pothl} = \frac{\vartheta_k + \vartheta_3}{2} = \frac{40 + 35}{2} = 37,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

| $\rho_{\text{pothl}} [\text{kg/m}^3]$ | $c_{p\ \text{pothl}} [\text{kJ/kgK}]$ | $\mu_{\text{pothl}} [\text{Pa s}]$ | $\lambda_{\text{pothl}} [\text{W/mK}]$ | $Pr_{\text{pothl}} [-]$ |
|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|
| 472,153 | 2,8715 | 0,0000853 | 0,08129 | 2,77923 |

Tablica 7. Svojstva propana za 37,5 °C i 13,7 bara

Brzina strujanja pothlađenog propana:

$$w_{\text{pothl}} = \frac{q_m}{\rho_{\text{pothl}} \cdot A_{RT}} = \frac{0,02581}{472,153 \cdot 0,000575037} = 0,09508 \text{ m/s}$$

Prosječni promjer zakrivljenosti:

$$D = D_w \left[1 + \left(\frac{h}{\pi \cdot D_w} \right)^2 \right] = 265 \left[1 + \left(\frac{35}{\pi \cdot 265} \right)^2 \right] = 265,5 \text{ mm}$$

Kritičan Reynoldsov broj:

$$Re_{\text{krit_pothl}} = 2300 \left[1 + 8,6 \left(\frac{D_{ekv}}{D} \right)^{0,45} \right] = 2300 \left[1 + 8,6 \left(\frac{12,8}{265,468} \right)^{0,45} \right] = 7354$$

Reynoldsov broj:

$$Re_{\text{pothl}} = \frac{\rho_{\text{pothl}} w_{\text{pothl}} D_{ekv}}{\mu_{\text{pothl}}} = \frac{472,153 \cdot 0,09508 \cdot \frac{12,8}{1000}}{0,0000853} = 6737 < Re_{\text{krit_pothl}}$$

Izračun faktora m:

$$m = 0,5 + 0,2903 \cdot \left(\frac{D_{ekv}}{D} \right)^{0,194} = 0,5 + 0,2903 \cdot \left(\frac{12,8}{265,468} \right)^{0,194} = 0,661208$$

Za proračun je potrebno znati svojstvo R290 na temperaturi vanjske stijenke pa se pretpostavlja temperatura stijenke od 29,37 °C :

$$Pr_{SV\text{pothl}} (29,37 \text{ °C}) = 2,8$$

Strujanje je LAMINARNO pa se primjenjuje sljedeća formula za Nusselt:

$$Nu_{\text{pothl}} = 3,66 + 0,08 \cdot \left[1 + 0,8 \cdot \left(\frac{D_{ekv}}{D} \right)^{0,9} \right] \cdot Re_{\text{pothl}}^m \cdot Pr_{\text{pothl}}^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{pothl}}}{Pr_{SV\text{pothl}}} \right)^{0,14}$$

$$Nu_{\text{pothl}} = 3,66 + 0,08 \cdot \left[1 + 0,8 \cdot \left(\frac{12,8}{265,468} \right)^{0,9} \right] \cdot 6737,0156^{0,661208} \cdot 2,77923^{1/3} \cdot \left(\frac{2,77923}{2,79915} \right)^{0,14}$$

$$Nu_{\text{pothl}} = 43,85$$

Koeficijent prijelaza topline R290 u području pothlađenja:

$$\alpha_{\text{pothl}} = \frac{Nu_{\text{pothl}} \cdot \lambda_{\text{pothl}}}{D_{ekv}} = \frac{43,85 \cdot 0,08129}{\frac{12,8}{1000}} = \mathbf{278,5 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Provjera temperature vanjske stijenke računa se izjednačavanjem gustoća toplinskih tokova na strani R290 i na strani vode.

Srednja temperatura vode na dijelu pothlađenja:

$$\vartheta_{w\text{ pothl}} = \frac{\vartheta_{w1} + \vartheta_{wy}}{2} = \frac{29 + 29,192}{2} = 29,096 \text{ °C}$$

Ravnoteža gustoće toplinskih tokova svedenih na vanjsku površinu:

$$\alpha_{\text{pothl}} (\vartheta_{SR\text{ pothl}} - \vartheta_{SV\text{ pothl}}) = \frac{(\vartheta_{SV\text{ pothl}} - \vartheta_{w\text{ pothl}})}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_w} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{bakar}} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u}}$$

$$\vartheta_{SV\text{ pothl}} = \frac{\vartheta_{w\text{ pothl}} + \alpha_{\text{pothl}} \cdot \vartheta_{SR\text{ pothl}} \cdot \left(\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_w} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{bakar}} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u} \right)}{1 + \alpha_{\text{pothl}} \left(\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_w} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{bakar}} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u} \right)}$$

$$\vartheta_{SV\text{ pothl}} = \frac{29,096 + 278,482 \cdot 37,5 \cdot \left(\frac{22,2}{19,7 \cdot 9431,995} + \frac{22,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 375} \cdot \ln \frac{22,2}{19,7} \right)}{1 + 278,482 \left(\frac{22,2}{19,7 \cdot 9431,995} + \frac{22,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 375} \cdot \ln \frac{22,2}{19,7} \right)} = 29,37 \text{ °C}$$

Pretpostavljena temperatura stijenke zadovoljava.

7.4.1. Koeficijent prolaza topline u području pothlađenja

Koeficijent prolaza topline u području pothlađenja sveden na vanjsku stijenu:

$$k_{\text{pohl}} = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_w} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{\text{bakar}}} \ln\left(\frac{d_v}{d_u}\right) + \frac{1}{\alpha_{\text{pohl}}}}$$

$$k_{\text{pohl}} = \frac{1}{\frac{22,2}{19,7 \cdot 9431,995} + \frac{22,2}{2 \cdot 375} \ln\left(\frac{22,2}{19,7}\right) + \frac{1}{278,482}} = 269,26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Gustoća toplinskog toka svedenog na vanjsku stijenu:

$$q_{\text{pohl}} = k_{\text{pohl}} \cdot \Delta\theta_{\text{mpohl}} = 269,258 \cdot 8,169 = 2199,66 \text{ W/m}^2$$

Površina za izmjenu topline u području pothlađenja:

$$A_{\text{pohl}} = \frac{\Phi_{\text{pohl}}}{q_{\text{pohl}}} = \frac{0,3729 \cdot 1000}{2199,66} = 0,1695 \text{ m}^2$$

Duljina kondenzatora u području pothlađenja:

$$L_{\text{pohl}} = \frac{A_{\text{pohl}}}{d_v \cdot \pi} = \frac{0,1695}{\frac{22,2}{1000} \cdot \pi} = 2,43 \text{ m}$$

7.5. Ukupna duljina kondenzatora

Ukupna duljina kondenzatora:

$$L_{\text{uk}} = L_{\text{kond}} + L_{\text{pohl}} = 9,87 + 2,43 = 12,3 \text{ m}$$

$$\mathbf{L_{uk} = 12,3 \text{ m}}$$

S obzirom da je kondenzator eksperimentalnog postava duljine 6 metara, rezultati teorijskog proračuna ne daju zadovoljavajuće rezultate. Mogući razlog su nedostaci modela prijelaza topline koji opisuje kondenzaciju u koaksijalnom kondenzatoru, jer on je ne računava orebrenje.

8. PAD TLAKA U KONDENZATORU

Kod kondenzacije postoje dvije faze: kapljevita i parovita. Zbog te specifičnosti pad tlaka se računa drugačije nego kod jednofaznog strujanja. Proračun pada tlaka u helikoidalnom kondenzatoru proveden je prema [13].

Napomena:

U proračun pada tlaka nije uključeno orebrenje koje se nalazi na vanjskoj stijenci unutarnje cijevi.

Ukupni gradijent tlaka zbroj je komponente trenja, komponente gravitacije i komponente akceleracije.

$$\left(\frac{dP}{dz}\right) = \left(\frac{P_F}{dz}\right)_{tp} + \left(\frac{P_G}{dz}\right)_{tp} + \left(\frac{P_A}{dz}\right)_{tp}$$

8.1 Komponenta trenja

Komponenta trenja dobiva se kao umnožak dvofaznog koeficijenta trenja i gradijenta tlaka jednofaznog strujanja:

$$\left(\frac{P_F}{dz}\right)_{tp} = \Phi_l^2 \cdot \left(\frac{P_F}{dz}\right)_l$$

Da bi izračunali dvofazni koeficijent trenja potreban nam je Martinellijev parametar:

$$\chi = \left(\frac{1 - x_{sr}}{x_{sr}}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu'}{\mu''}\right)^{0,1} = \left(\frac{1 - 0,5}{0,5}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{30,208}{467,289}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{0,00008249}{0,00000942}\right)^{0,1}$$

$$\chi = 0,315869$$

Dvofazni koeficijent trenja:

$$\Phi_l^2 = 1 + \frac{5,569}{\chi^{1,494}} + \frac{1}{\chi^2} = 1 + \frac{5,569}{0,315869^{1,494}} + \frac{1}{0,315869^2} = 42,176$$

Izraz za gradijent tlaka jednofaznog strujanja:

$$\left(\frac{P_F}{dz}\right)_l = \frac{2f_l \rho' w'^2}{D_{ekv}}$$

Faktor f_l :

$$f_l = \frac{0,00725 + 0,076 \cdot \left[Re' \cdot \left(\frac{D_w}{D_{ekv}}\right)^{-2} \right]^{-0,25}}{\left(\frac{D_w}{D_{ekv}}\right)^{0,5}}$$

$$f_l = \frac{0,00725 + 0,076 \cdot \left[3483,255 \cdot \left(\frac{265}{12,8}\right)^{-2} \right]^{-0,25}}{\left(\frac{265}{12,8}\right)^{0,5}} = 0,011486$$

Gradijent tlaka jednofaznog strujanja:

$$\left(\frac{P_F}{dz}\right)_l = \frac{2f_l \rho' w'^2}{D_{ekv}} = \frac{2f_l \rho' \left(\frac{q_m}{A_{str} \rho'}\right)^2}{D_{ekv}} = \frac{2 \cdot 0,011486 \cdot 467,289 \cdot \left(\frac{0,0258}{0,000575 \cdot 467,289}\right)^2}{12,8 \cdot 0,001}$$

$$\left(\frac{P_F}{dz}\right)_l = 7,741 \text{ Pa/m}$$

Komponenta trenja:

$$\left(\frac{P_F}{dz}\right)_{tp} = \phi_l^2 \cdot \left(\frac{P_F}{dz}\right)_l = 42,176 \cdot 7,741 = 326,5 \text{ Pa/m}$$

8.2 Komponenta gravitacije

Komponenta gravitacije računa se prema izrazu:

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

Void faktor α :

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

Faktor S:

$$S = \left[1 - x \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho''}\right)\right]^{0,5} = \left[1 - 0,5 \cdot \left(1 - \frac{467,289}{30,208}\right)\right]^{0,5} = 2,8695$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + 2,8695 \left(\frac{1-0,5}{0,5}\right) \frac{30,208}{467,289}} = 0,8435$$

Komponenta gravitacije:

$$\left(\frac{P_G}{dz}\right)_{tp} = [0,8435 \cdot 30,208 + 467,289 \cdot (1 - 0,8435)] \cdot 9,81 \cdot \sin 45^\circ = 683,98 \text{ Pa/m}$$

8.3 Komponenta akceleracije

Komponenta akceleracije računa se prema izrazu:

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

$$\left(\frac{P_A}{dz}\right)_{tp} = 44,8958^2 \cdot \frac{d}{dz} \left[\frac{0,5^2}{0,8435 \cdot 30,208} + \frac{(1 - 0,5)^2}{(1 - 0,5) \cdot 467,289} \right]$$

$$\left(\frac{P_A}{dz}\right)_{tp} = 26,6 \text{ Pa/m}$$

8.4 Ukupni pad tlaka

Ukupni gradijent tlaka:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right) = \left(\frac{P_F}{dz}\right)_{tp} + \left(\frac{P_G}{dz}\right)_{tp} + \left(\frac{P_A}{dz}\right)_{tp} = 326,5 + 683,98 + 26,6 = 1037,15 \text{ Pa/m}$$

Ukupni pad tlaka na duljini kondenzatora od 6 metara:

$$\Delta p = \left(\frac{dP}{dz}\right) \cdot 6 = 1037,15 \cdot 6 = 6222,921 \text{ Pa} = 6,22 \text{ kPa}$$

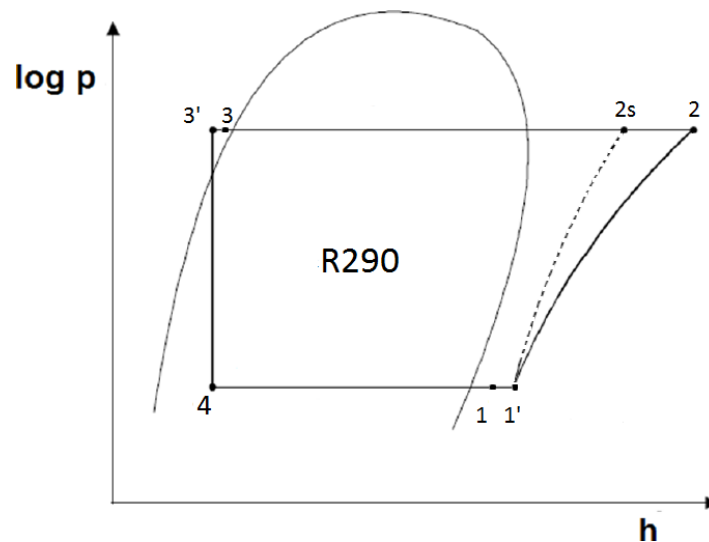
Ukupan pad tlaka u kondenzatoru dobiven teorijskim putem iznosi **6223 Pa**.

Nešto je veći pad tlaka mjeren na realnom procesu (oko 11000 Pa). Razlozi mogu biti u orebrenju realnog kondenzatora.

9. REZULTATI MJERENJA

U sljedećem poglavlju prikazani su rezultati mjerenja na mjernoj liniji s propanom. Mjerenja su obavljena u laboratoriju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Mjerenja su bazirana na mjerenju ulazne i izlazne temperature glikola i kondenzatorske vode, mjerenju temperatura radnih tvari na karakterističnim točkama procesa, mjerenju pada tlaka na isparivaču i kondenzatoru, te na mjerenju električne snage kompresora. Kod mjerenja su međuizmjenjivač i sakupljač kapljevine bili uključeni u cjevovod, a odvajač ulja je zaobiđen.



Slika 37. Prikaz procesa u logp-h dijagramu

| | | | |
|----------------------------------|---------------------|-------|-------|
| Temperatura ulaza glikola | ϑ_{g1} | 2,87 | [°C] |
| Temperatura izlaz glikola | ϑ_{g2} | -4,28 | [°C] |
| Temperatura ulaza vode | ϑ_{w1} | 12,80 | [°C] |
| Temperatura izlaza vode | ϑ_{w2} | 35,46 | [°C] |
| Temperatura isparavanja | ϑ_i | -8,40 | [°C] |
| Temperatura pregrijanja | ϑ_1 | -5,33 | [°C] |
| Temperatura dodatnog pregrijanja | $\vartheta_{1'}$ | 3,89 | [°C] |
| Temperatura na kraju kompresije | ϑ_2 | 75,22 | [°C] |
| Temperatura pothlađenja | ϑ_3 | 36,08 | [°C] |
| Temperatura dodatnog pothlađenja | $\vartheta_{3'}$ | 31,80 | [°C] |
| Tlak na ulazu u isparivač | p_{i1} | 2,94 | [bar] |
| Tlak na izlazu iz isparivača | p_{i2} | 2,79 | [bar] |
| Tlak na ulazu u kondenzator | p_{k1} | 14,14 | [bar] |
| Tlak na izlazu iz kondenzatora | p_{k2} | 14,03 | [bar] |
| Temperatura prostora | ϑ_{prost} | 21,83 | [°C] |
| Električna snaga kompresora | P_{el} | 3,02 | [kW] |
| Uččin isparivača | Φ_i | 7,5 | [kW] |

Tablica 8. Mjerna točka za učin isparivača 7,5 kW

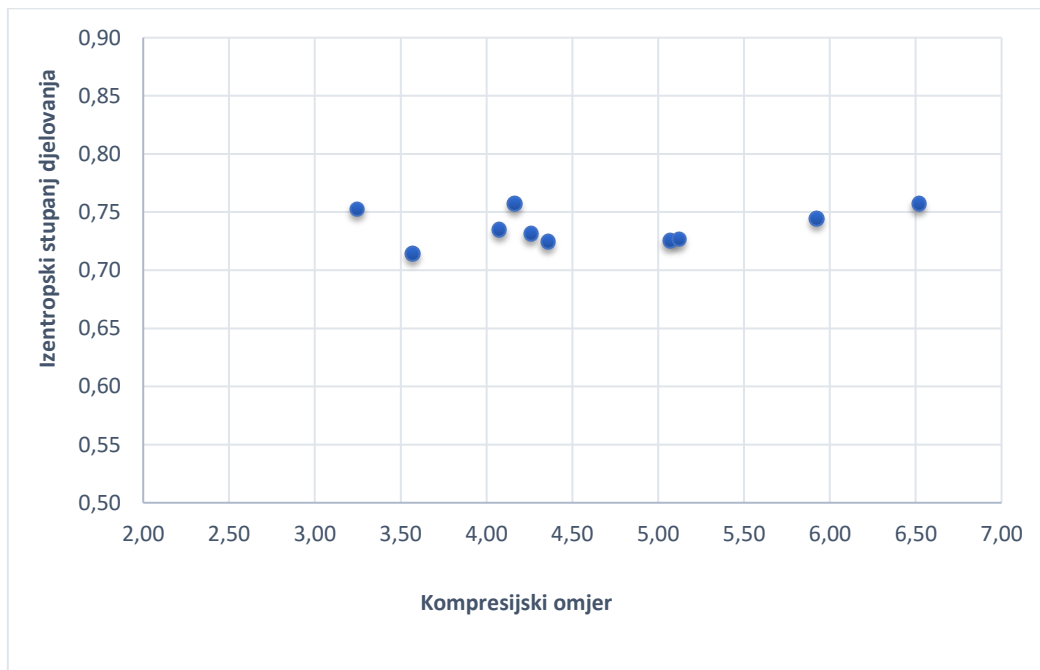
Dodatni podaci izračunati iz mjernih podataka:

| | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|--------|-------|
| Pad tlaka na isparivaču | Δp_i | 0,15 | [bar] |
| Pad tlaka na kondenzatoru | Δp_i | 0,11 | [bar] |
| Kompresijski omjer | p_k/p_i | 5,0681 | [-] |
| Učin kondenzatora | $\Phi_k = P_{el} + \Phi_i$ | 10,52 | [kW] |
| Faktor hlađenja | $\varepsilon_{hl} = \Phi_i/P_{el}$ | 2,48 | [-] |
| Faktor grijanja | $\varepsilon_{gr} = \Phi_k/P_{el}$ | 3,48 | [-] |
| Izentropski stupanj djelovanja | η_{iz} | 0,725 | [-] |

Tablica 9. Podaci izračunati iz mjerenih podataka

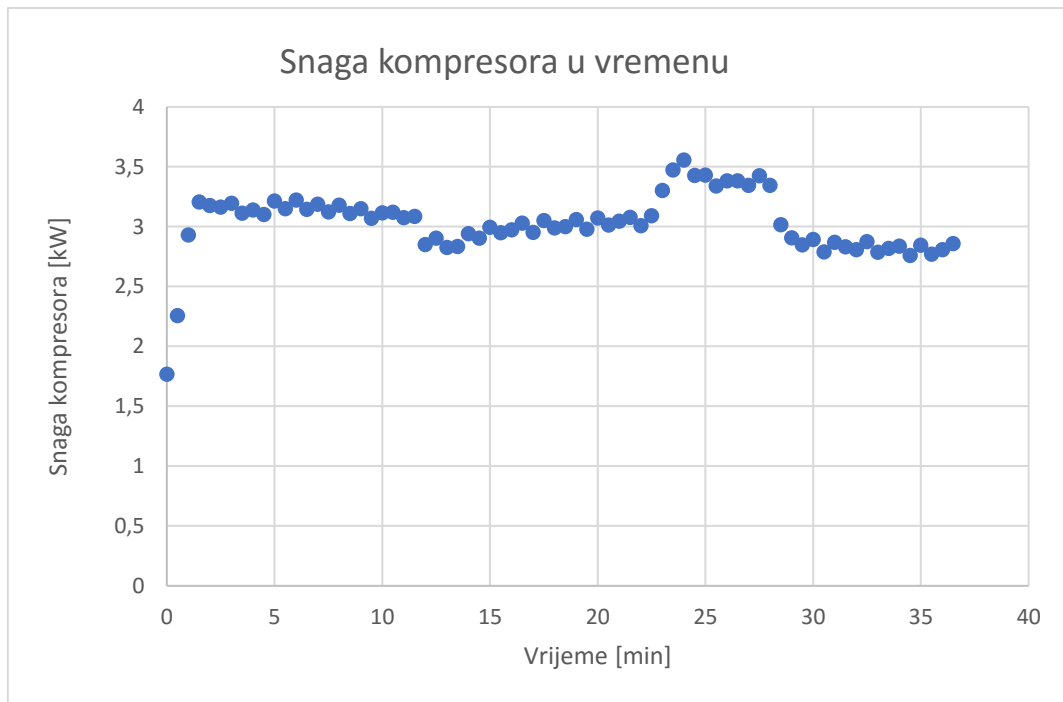
Izentropski stupanj djelovanja:

$$\eta_{iz} = \frac{h_{2s} - h_{1'}}{h_2 - h_{1'}}$$

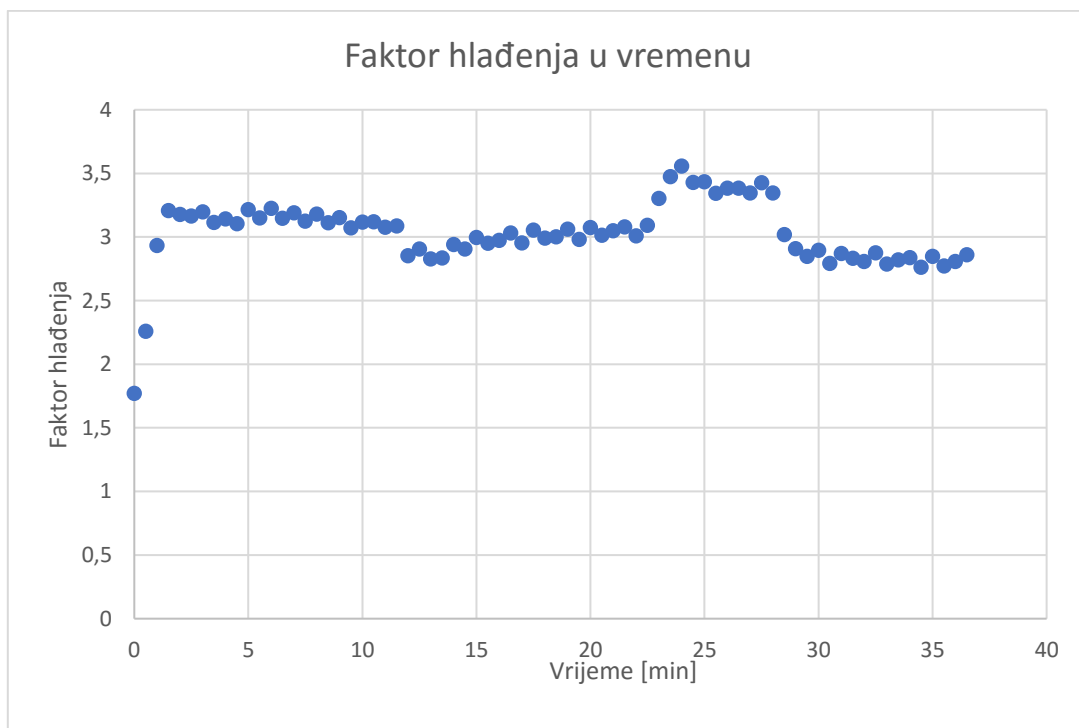


Slika 38. Ovisnost izentropskog stupnja djelovanja o kompresijskom omjeru

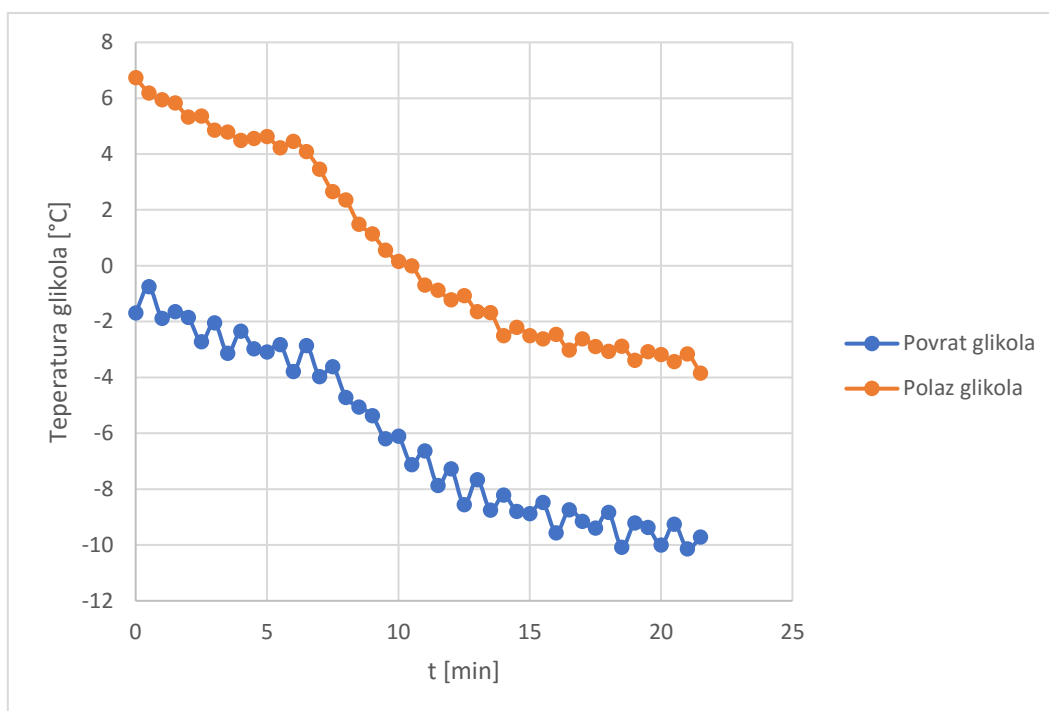
Uočava se kako s porastom kompresijskog omjera izentropski stupanj djelovanja blago raste.



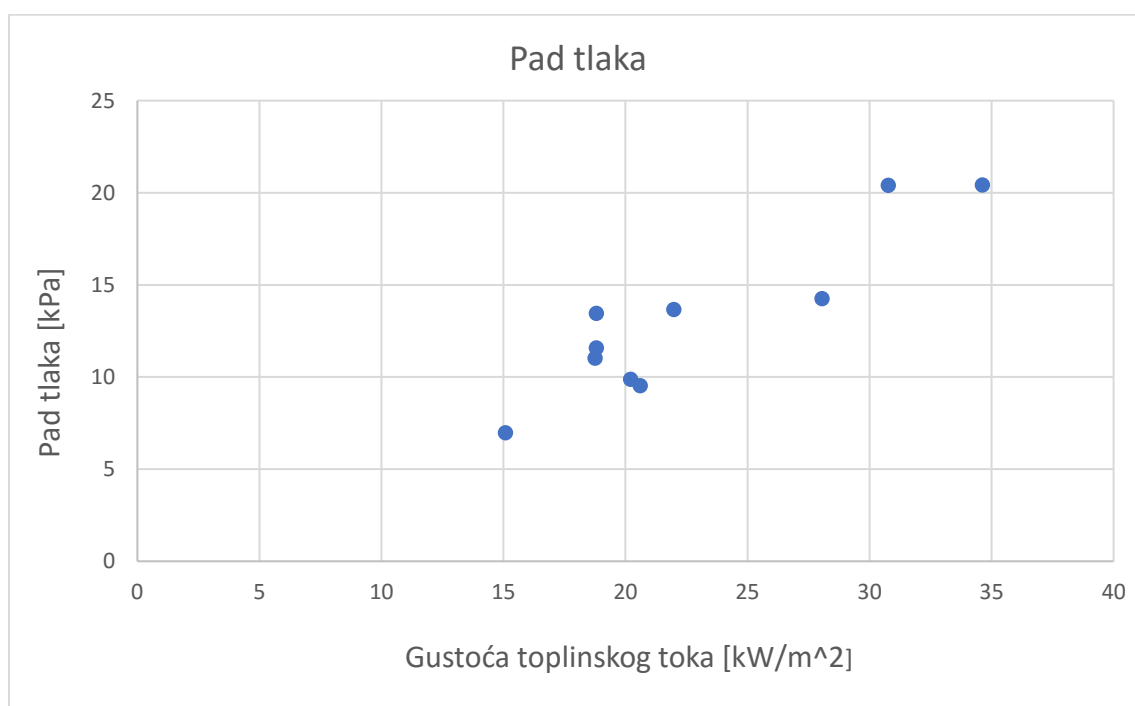
Slika 39. Promjena snage kompresora u vremenu



Slika 40. Promjena faktora hlađenja u vremenu



Slika 41. Hlađenje glikola u vremenu



Slika 42. Pad tlaka na kondenzatoru u ovisnosti gustoće toplinskog toka

Uočava se trend povećanja pada tlaka s povećanjem gustoće toplinskog toka.

10. ZAKLJUČAK

S obzirom na 'F-gas' regulativu istraživanja u području radnih tvari usmjeravaju se na prirodne radne tvari s niskom GWP brojem. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje provode se ispitivanja na eksperimentalnom rashladnom sustavu koji koristi propan kao radnu tvar. U sklopu ovog završnog rada provedena su mjerenja radnih parametara na eksperimentalnoj postavi. Prikazan je i termodinamički proračun koaksijalnog kondenzatora pripadajućeg uređaja. Korištenjem modela prijelaza topline za takav tip kondenzatora dobivena je duljina kondenzatora koja relativno odstupa od prave duljine kondenzatora. Izračun pada tlaka daje rezultate približne rezultatima dobivenim eksperimentom. Točniji rezultati dobili bi se uračunavanjem orebrenja na vanjskoj stijenci unutarnje cijevi kondenzatora. U prilogu je dana shema spajanja i automatske regulacije te dispozicijski crtež mjerne linije.

LITERATURA

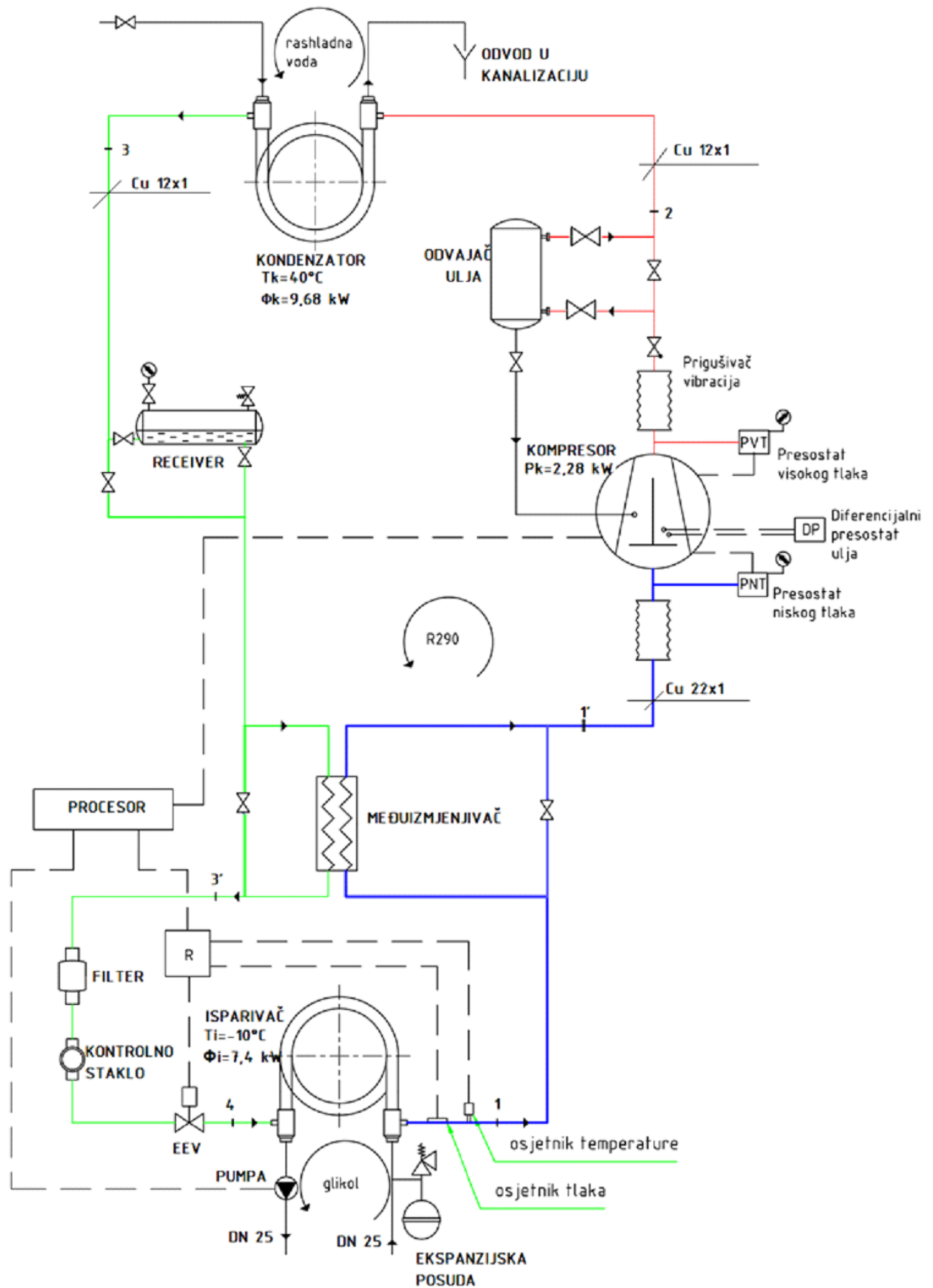
- [1] Priručnik za energetska certificiranje zgrada, Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost, Zagreb, 2010.
- [2] V. Soldo, Podloge za predavanja iz kolegija Hlađenje i dizalice topline
- [3] A. Galović, Termodinamika II, FSB, Zagreb, 2003.
- [4] <https://www.alfalaval.com/products/>
- [5] I. Balen, Podloge za predavanja iz kolegija Klimatizacija
- [6] <http://www.mesina.in/products.html>
- [7] V. Soldo, L. Boban, G. Lješić, Testing and application of low GWP refrigerants., FSB, 2018.
- [8] M. Andrassy, Stapni kompresori, FSB, Zagreb, 2004.
- [9] <https://climate.emerson.com/en-us/brands/copeland>
- [10] V. Soldo, Razvoj uređaja za ocjenu termodinamičke valjanosti procesa sa zeotropnim smjesama, Magistarski rad, 2000.
- [11] https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/
- [12] Thermophysical properties R290, International institute of refrigeration, 2001.
- [13] S. Wongwises, M. Polsongkram, Condensation heat transfer and pressure drop of HFC-134a in a helical coiled concentric tube-in-tube heat exchanger, 2006.
- [14] VDI Heat Atlas: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010

11.PRILOZI

I. CD-R disc

II. Shema spajanja i automatske regulacije

III. Dispozicijski crtež mjernog sustava



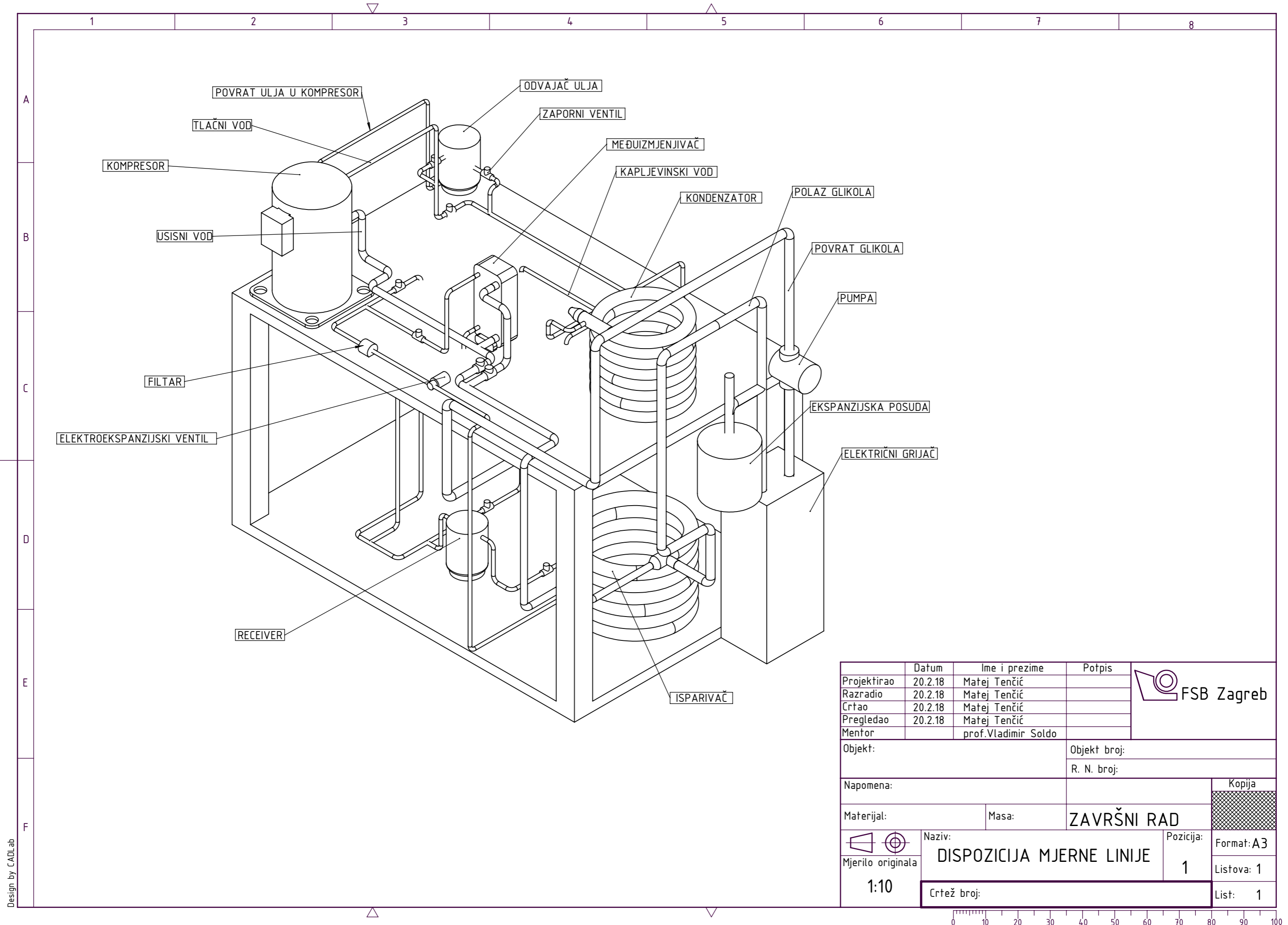
| | Datum | Ime i prezime | Potpis |
|-------------|-----------|----------------------|--------|
| Projektirao | 20.2.2018 | Matej Tenčić | |
| Razradio | 20.2.2018 | Matej Tenčić | |
| Crtao | 20.2.2018 | Matej Tenčić | |
| Pregledao | | prof. Vladimir Soldo | |



Objekt:
HEMA SPAJANJA I AUTOMATSKE REGULACIJE

Objekt broj:

R. N. broj:



| | | | | |
|-------------------|---------|---------------------------|-------------|------------|
| | Datum | Ime i prezime | Potpis | |
| Projektirao | 20.2.18 | Matej Tenčić | | |
| Razradio | 20.2.18 | Matej Tenčić | | |
| Crtao | 20.2.18 | Matej Tenčić | | |
| Pregledao | 20.2.18 | Matej Tenčić | | |
| Mentor | | prof.Vladimir Soldo | | |
| Objekt: | | Objekt broj: | | |
| | | R. N. broj: | | |
| Napomena: | | | | Kopija |
| Materijal: | | Masa: | ZAVRŠNI RAD | |
| | | Naziv: | | Pozicija: |
| Mjerilo originala | | DISPOZICIJA MJERNE LINIJE | | 1 |
| 1:10 | | Crtež broj: | | Listova: 1 |
| | | | | List: 1 |



Design by CADLab