



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje



Josip Brajković, Antonio Radenić

**EKSPERIMENTALNA ANALIZA UTJECAJA  
ODVAJAČA ULJA NA RADNE PARAMETRE  
PROPANSKOG RASHLADNOG UREĐAJA**

Zagreb, 2019.

*Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, na Zavodu za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje pod vodstvom prof. dr. sc. Vladimira Solde i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019..*

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	1
1 UVOD .....	2
1.1 Teoretske osnove rashladnog procesa .....	2
1.2 Komponente rashladnih uređaja .....	5
1.3 Ciljevi rada .....	11
2 PROPAN KAO RADNA TVAR .....	13
2.1 Radne tvari kroz povijest .....	13
2.2 Svojstva propana u rashladnom krugu .....	16
2.3 Pregled literature .....	20
3 OPIS MJERNE LINIJE I EKSPERIMENTA .....	22
4 ANALIZA REZULTATA MJERENJA .....	30
5 ZAKLJUČAK .....	36
SAŽETAK .....	38
ABSTRACT .....	39
LITERATURA .....	40

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1 Rashladni krug .....	2
Slika 1.2 T - s i log p - h dijagrami rashladnog procesa .....	3
Slika 1.3 Rashladni proces (A), ogrjevni proces (B), rashladno-ogrjevni proces (C) .....	4
Slika 1.4 Spiralni (scroll) kompresor mjerne linije proizvođača Copeland .....	6
Slika 1.5 Koaksijalni isparivač mjerne linije .....	7
Slika 1.6 Koaksijalni kondenzator mjerne linije .....	8
Slika 1.7 Elektronički ekspanzijski ventil mjerne linije Carel E2V14 [2] .....	9
Slika 1.8 Odvajач ulja mjerne linije Retax Inverter .....	10
Slika 1.9 Shematski prikaz ugradnje odvajачa ulja u tlačni vod [3] .....	11
Slika 2.1 Razvoj radnih tvari kroz povijest [9] .....	13
Slika 2.2 Ln(P) - h dijagram radne tvari s a) niskim i b) visokim specifičnim toplinskim kapacitetom [16] .....	18
Slika 3.1 Mjerna linija u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje FSB-a .....	22
Slika 3.2 Shema mjerne linije .....	23
Slika 3.3 Presjek kondenzatora .....	24
Slika 3.4 Presjek isparivača .....	24
Slika 3.5 Termopar .....	25
Slika 3.6 Shematski prikaz ugradnje termopara na mjerno mjesto (lijevo), prikaz ugradnje termopara na ulazu u isparivač na strani etilen-glikola (desno) [25] .....	26
Slika 3.7 Shematski prikaz kapacitivnog pretvarača tlaka (lijevo) [25], pretvarač tlaka na mjernoj liniji (desno) .....	26
Slika 3.8 Shematski prikaz rada elektromagnetskog protokomjera (lijevo) [26], elektromagnetski protokomjer smjese etilen-glikola i vode na mjernoj liniji (desno) .....	27
Slika 3.9 Akvizicijski sustav s A/D pretvaračem .....	27
Slika 3.10 Shema mjerne linije za ispitivanje: a) bez odvajачa b) s odvajачem .....	28
Slika 3.11 Variranje temperature kondenzacije a) s troputnim ventilom b) s prigušnim ventilom .....	29
Slika 4.1 Izentropska efikasnost kompresora .....	31
Slika 4.2 Ukupna efikasnost kompresora .....	31

Slika 4.3 Ovisnost srednje logaritamske razlike temperatura o temperaturi isparavanja .....	32
Slika 4.4 Ovisnost koeficijenta prolaza topline o temperaturi isparavanja.....	32
Slika 4.5 Ovisnost kapaciteta hlađenja o temperaturi isparavanja.....	33
Slika 4.6 Ovisnost snage kompresora o temperaturi isparavanja .....	34
Slika 4.7 Ovisnost faktora hlađenja o temperaturi isparavanja.....	34
Slika 4.8 Ovisnost temperature nakon kompresije o temperaturi isparavanja.....	35

## **POPIS TABLICA**

Tablica 2.1 Plan smanjenja potrošnje fluoriranih stakleničkih plinova [10] .....	14
Tablica 2.2 Zabrana stavljanja na tržište radnih tvari [10] .....	15
Tablica 2.3 Usporedba svojstva propana (R290) s ostalim radnim tvarima [12] .....	16

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A$	$[\text{m}^2]$	Površina prostora u koji se ugrađuje sustav direktnog hlađenja/grijanja
$A_i$	$[\text{m}^2]$	Izmjenjivačka površina isparivača
$h_1$	$[\text{kJ/kg}]$	Entalpija pare na usisu kompresora
$h_2$	$[\text{kJ/kg}]$	Stvarna entalpija pare na izlazu kompresora
$h_{2,is}$	$[\text{kJ/kg}]$	Izentropska entalpija pare na izlazu kompresora
$h_o$	$[\text{m}]$	Visina ugradnje unutarnje jedinice
$k$	$[\text{W/m}^2\text{K}]$	Koeficijent prolaza topline
$LFL$	$[\text{kg/m}^3]$	Donja granica zapaljenja radne tvari
$m_{max}$	$[\text{kg}]$	Maksimalno dozvoljeno punjenje
$P_{el}$	$[\text{kW}]$	Električna snaga kompresora
$PL$	$[\text{kg/m}^3]$	Praktična granica punjenja
$q_{m,RT}$	$[\text{kg/s}]$	Maseni protok radne tvari
$V$	$[\text{m}^3]$	Volumen kondicioniranog prostora
$\Delta T_m$	$[\text{°C}]$	Srednja logaritamska razlika temperatura
$\eta_{is}$	$[-]$	Izentropska efikasnost kompresora
$\eta_{tot}$	$[-]$	Ukupna efikasnost kompresora
$\Phi$	$[\text{W}]$	Učin izmjenjivača topline

## POPIS KRATICA

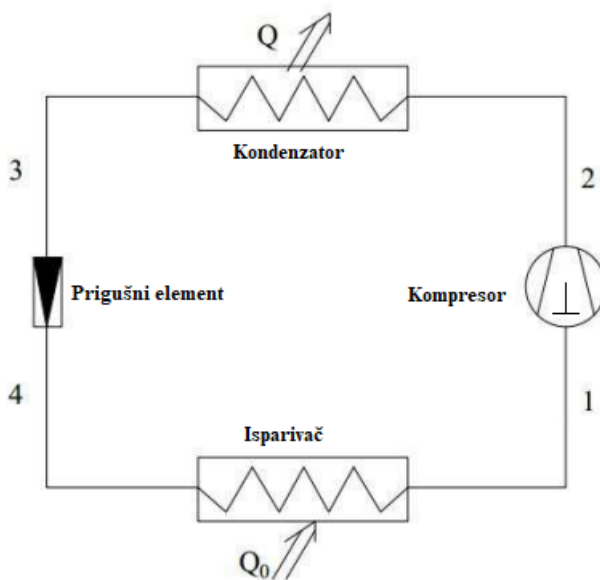
<b>Kartica</b>	<b>Objašnjenje</b>
<i>AB</i>	Alkil-benzensko ulje
<i>AEL</i>	Otrovnost radne tvari
<i>CFC</i>	Klorofluorouglicji
<i>COP</i>	Faktor grijanja
<i>EER</i>	Faktor hlađenja
<i>GWP</i>	Potencijal globalnog zagrijavanja
<i>HCFC</i>	Klorofluorouglikovodici
<i>HFC</i>	Fluorirani ugljikovodici
<i>HFO</i>	Hidrofluoroolefini
<i>LFL</i>	Donja granica zapaljenja radne tvari
<i>MO</i>	Mineralno ulje
<i>ODP</i>	Potencijal razaranja ozona
<i>ORC</i>	Udio ulja u optoku
<i>PAG</i>	Poli-alkilen-glikolno ulje
<i>POE</i>	Poliol-estersko ulje
<i>PVE</i>	Poli-vinil-etero ulje
<i>UFL</i>	gornja granica zapaljenja radne tvari



# 1 UVOD

## 1.1 Teoretske osnove rashladnog procesa

Rashladni uređaji koriste ljevokretne kružne procese da bi se toplina prenijela s toplinskog spremnika niže temperature na spremnik koji je na višoj temperaturi. Nakon što se postigne odgovarajuća temperatura hladnijeg toplinskog spremnika, rashladni uređaj mora biti u mogućnosti održavati tu željenu temperaturu konstantnom.



Slika 1.1 Rashladni krug

Osnovni princip rada rashladnog kruga se može opisati pomoću Slike 1.1. Radni medij se komprimira u kompresoru (*eng. compressor*), te struji prema kondenzatoru (*eng. condenser*), gdje predaje toplinu toplinskom ponoru, odnosno toplinskom spremniku na višoj temperaturi. Nakon što radna tvar kondenzira, u kapljevitom stanju struji prema ekspanzijskom ventilu (*eng. expansion valve*), gdje dolazi do ekspanzije na niži tlak, a poslije toga isparava u isparivaču (*eng. evaporator*) preuzimajući toplinu od toplinskog izvora, nakon čega para opet struji prema kompresoru te se proces ponavlja. U prethodnom opisu prikazana su četiri osnovna člana svakog kompresijskog rashladnog uređaja, ali također je bitno istaknuti da je stvar u praksi dosta kompleksnija te se rashladni uređaj sastoji od većeg broja dodatnih komponenata koje osiguravaju pravilan rad. Važan element za rad rashladnog uređaja je svakako i radna tvar koja služi kao prijenosnik energije

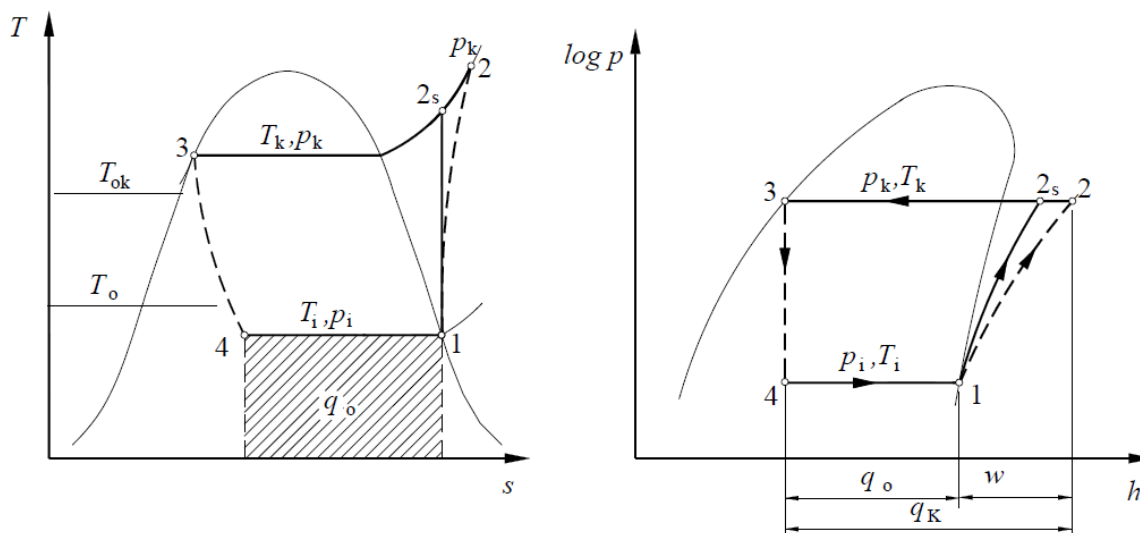
između toplinskih spremnika. Na Slici 1.2 su dani  $T - s$  i  $\log p - h$  dijagrami rashladnog ciklusa u kojem su opisane promjene stanja.

1-2 – kompresija

2-3 – kondenzacija

3-4 – prigušenje

4-1 - isparavanje



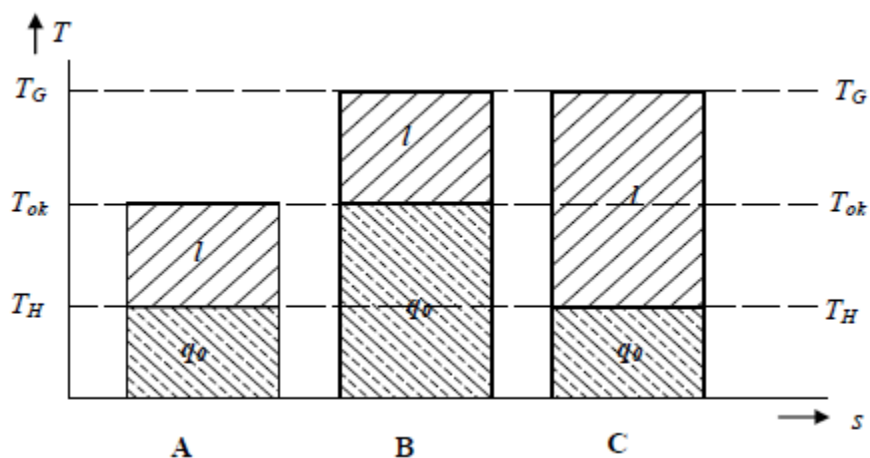
Slika 1.2  $T - s$  i  $\log p - h$  dijagrami rashladnog procesa

Jasno je vidljivo, prema prethodnom opisu, da je za rad rashladnog uređaja potrebno uložiti rad, odnosno potrebno je uložiti određenu kompenzacijsku energiju kako bi se toplina preuzeta na isparivaču na nižoj temperaturi, prenijela na viši energetski nivo te se onda predala preko kondenzatora toplinskom spremniku na višoj temperaturi. Upravo prema vrsti kompenzacijske energije radi se podjela rashladnih uređaja [1]:

- Kompresijski rashladni uređaji
- Sorpcijski rashladni uređaji
- Ejektorski rashladni uređaji
- Termoelektrični rashladni uređaji
- Magnetski rashladni uređaji

Najveći broj komercijalnih rashladnih i klima uređaja su kompresijski rashladni uređaji pogonjeni elektromotornim kompresorom, zatim slijede apsorpcijski pogonjeni toplinskom energijom.

Druga bitna podjela uređaja koji koriste ljevokretni ciklus se sagledava iz aspekta korisnog iskorištavanja topline što je prikazano na Slici . Ako radom uređaja želimo prenijeti toplinu s hladnijeg na topliji spremnik i time održavati konstantne toplinske uvjete u toplijem spremniku tada uređaj vrši ogrjevni proces, a uređaj se naziva „dizalica topline“. U slučaju da želimo održavati konstantne toplinske parametre u hladnijem toplinskom spremniku te višak topline prenijeti na topliji spremnik tada govorimo o klasičnom rashladnom uređaju koji se koristi u tehničkom hlađenju. Pritom moramo biti pažljivi sa izrazom „dizalica topline“ jer se danas u praksi taj izraz često veže uz uređaje koji obavljaju ogrjevni proces, ali u svojoj esenciji svaki je uređaj koji vrši ljevokretni kružni proces zapravo „dizalica topline“ jer „diže“ toplinu na energetski višu razinu.



Slika 1.3 Rashladni proces (A), ogrjevni proces (B), rashladno-ogrjevni proces (C)

Danas se u praksi često susrećemo i s uređajima koji korisno iskorištavaju i toplinu kondenzacije i toplinu isparavanja. U takvom slučaju radi se o uređajima koji obavljaju rashladno-ogrjevni proces, a kao ogledni primjer primjene takvih sustava su uređaji u ugostiteljstvu i hotelijerstvu gdje se toplina kondenzacije koristi za zagrijavanje potrošne tople vode, dok se toplina isparavanja koristi za hlađenje prostora.

Uređaji koji koriste ljevokretni ciklus (rashladni uređaji i dizalice topline) danas imaju široku primjenu u industriji i kućanstvu (danas gotovo pa da ne postoji kuća u kojoj nema kućnog hladnjaka). Nadalje se koriste u prehrambenoj industriji, domaćinstvu, trgovini, transportu, klimatizaciji, medicini, farmaceutskoj i procesnoj industriji itd. [1].

## 1.2 Komponente rashladnih uređaja

Prethodno je navedeno kako se svaki rashladni uređaj sastoji od četiri osnovne komponente te rashladne tvari. Bez ijedne od četiri osnovne komponente uređaj ne bi mogao funkcionirati, no također postoje i druge koje omogućuju pravilniji i efikasniji rad samog uređaja. U ovom odjeljku se daje prikaz najvažnijih komponenata rashladnog uređaja.

**Kompresor** je uređaj koji u rashladnom ciklusu vrši kompresiju radne tvari te se upravo u njemu dovodi kompenzacijska energija koja omogućuje prijenos topline s hladnijeg na topliji spremnik. Osnovna podjela je na volumetrijske i strujne (dinamičke) kompresore koji se dalje dijele u više vrsta. Danas se u tehnici hlađenja koriste razne vrste kompresora ovisno o namjeni samog uređaja, pa se tako npr. stapni kompresori često koriste za kućanske hladnjake (stapni se mogu koristiti i pri većim kapacitetima hlađenja), spiralni kompresori (Slika 1.4) se vrlo često koriste kod ogrjevnih procesa, tj. dizalica topline, kao i split rashladnih uređaja, a vijčani kompresori kod rashladnih uređaja velikih kapaciteta. U radu kompresora važno je osigurati da se usisava radna tvar u parnoj fazi, budući da usisavanjem kapljevite radne tvari, koja je praktički nestlačiva, može doći do havarije uređaja, tj. hidrauličkog udara.



Slika 1.4 Spiralni (scroll) kompresor mjerne linije proizvođača Copeland

**Isparivač** je izmjenjivač topline u kojem radna tvar isparava te preuzima toplinu, tj. rashladni učin, od hladnijeg toplinskog spremnika. Ovisno o namjeni samog uređaja mogu se koristiti za hlađenje zraka (npr. tuneli za zamrzavanje) te za hlađenje kapljevine (npr. u posrednom hlađenju). Prema načinu rada se mogu podijeliti na suhe isparivače te potopljene isparivače. Kod suhih isparivača radna tvar u izmjenjivaču u potpunosti ispari te se i pregrije na određenu temperaturu, što je potrebno zbog sigurnosnih razloga kako bi se spriječio hidraulički udar u kompresoru. Suhi isparivači se često koriste u slučaju freonskih radnih tvari, iako se mogu koristiti i druge radne tvari. Potopljeni isparivači su gotovo u potpunosti ispunjeni kapljevnom te su osim cijevnih sekcija opremljeni s odvajačem faza koji tako osigurava da parna faza struji prema kompresoru dok kapljevita struji prema cijevnim sekcijama. Protok se kroz isparivač može osiguravati cirkulacijskom pumpom ili termosifonski te je 3 do 5 puta veći od protoka radne tvari kroz rashladni krug. Iako nema striktnog pravila, potopljeni isparivači se koriste najčešće s amonijakom kao radnom tvari i to u velikim rashladnim postrojenjima. Postoji velik broj izvedbi samih isparivača, pa tako mogu biti klasični izmjenjivači sa cijevima u plaštu (*eng. shell&tube*), kompaktni pločasti isparivači, koaksijalni (Slika 1.5), cijevni s orebrenjima itd.



Slika 1.5 Koaksijalni isparivač mjerne linije

**Kondenzatori** su drugi osnovni izmjenjivač topline rashladnog kruga koji izmjenjuje toplinu s toplinskim spremnikom na višoj temperaturi. Prema namjeni ih dijelimo na zrakom hlađene i vodom hlađene, a kao posebnu grupa se može istaknuti evaporativni kondenzatori hlađeni optočnom vodom. Zrakom hlađeni kondenzatori se principijelno koriste kod freonskih sustava, najlakši su za održavanje, ali ipak zbog razlika u termofizikalnim svojstvima vode i zraka zahtijevaju najveću površinu izmjene topline. Kao svakodnevni primjer se može uzeti kondenzator kućnog hladnjaka koji se sastoji od bakrenih cijevi s aluminijskim orebrenjima. Vodom hlađeni kondenzatori se u pravilu uvijek koriste kod sustava s većim rashladnim kapacitetima. Najčešće se radi o standardnim izmjenjivačima topline sa cijevima u plaštu iako postoji velik broj varijanti, a tu ističemo kondenzator sa cijevnom zavojućom u bubnju, koaksijalni (Slika 1.6) i pločasti kondenzator. Važno je za istaknuti da su vodom hlađeni kondenzatori osjetljivi na kvalitetu vode, budući da povećana koncentracija minerala u vodi može dovesti do stvaranja naslaga kamenca na izmjenjivačkim površinama što narušava intenzitet izmjene topline.

Evaporativni, ili škropni, kondenzatori te kondenzatori hlađeni optočnom vodom s rashladnih tornjeva se ističu kao posebna skupina. Takvi se aparati koriste u industriji kod najvećih kapaciteta, ali danas nerijetko i u klimatizacijskoj tehnici. Kod ovakvih aparata koristi se istovremeno hlađenje zrakom i vodom, jer se voda raspršuje po ispuni rashladnog tornja te se efektom ishlapljivanja odvodi višak topline (u slučaju evaporativnog kondenzatora voda se raspršuje po cijevnim sekcijama u kojima struji radna tvar). Kako imamo stalne gubitke vode u radu vodu je potrebno brižljivo kemijski pripremati te su ovakvi sustavi su najzahtjevniji za održavanje u praksi.



Slika 1.6 Koaksijalni kondenzator mjerne linije

**Prigušni ventili**, osim prigušivanja s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja, imaju zadatak regulacije protoka radne tvari koja dopijeva u isparivač. Osim toga kod potopljenih isparivača prigušni ventili održavaju razinu radne tvari u isparivaču dok kod suhih isparivača održavaju tlak isparavanja i temperaturu pregrijanja. Izvode se kao ručni prigušni ventili, regulatori razine, regulatori tlaka, regulatori temperature pregrijanja te kapilare. Ventili s plovkom, kao regulatori razine, se često koriste kod amonijačnih postrojenja velikih kapaciteta s potopljenim isparivačima, dok se regulatori pregrijanja, tj. termoekspanzijski ventili, koriste kod suhih isparivača kako bi se

osiguralo pregrijanje radne tvari radi zaštite kompresora. Danas se u rashladnoj tehnici sve više koriste elektronički ekspanzijski ventili (Slika 1.7). Takvim ventilom upravlja mikroprocesor koji na temelju informacija koje dobiva od pretvarača tlaka i osjetnika temperature propušta točno onoliko radne tvari da bi se ostvarilo traženo pregrijanje. Rashladni uređaji s takvim regulacijskim elementima mogu ostvariti najpovoljnije radne parametre..



Slika 1.7 Elektronički ekspanzijski ventil mjerne linije Carel E2V14 [2]

**Spremnici ukapljene radne tvari (eng. receivers)** su posude pod tlakom koje se nalaze iza kondenzatora. Imaju više uloga u radu, prihvataju ukapljenu radnu tvar iza kondenzatora ili čitavog sustava, akumuliraju ukapljenu radnu tvar za trenutne potrebe te po potrebi drže kondenzator praznim. Ponekad može poslužiti kao i pothlađivač radne tvari, ali najčešće se pothlađivanje događa već u samom kondenzatoru. Aparat se može izvesti kao protočni tip, radna tvar struji kroz spremnik, ili kompenzacijski tip gdje se višak radne tvari koje isparivač ne može ispariti sprema u spremnik (analogno ekspanzijskoj posudi u tehnici grijanja).

**Filtar-sušać** se koristi za neutralizaciju vlage u sustavu te za filtriranje radne tvari, budući da se njihovim djelovanjem smanjuje radni vijek rashladnog uređaja. Vlaga, zaleđivanjem, može začepiti ekspanzijski ventil te korodirati metalne dijelove. Uz to može stvoriti kiseline s uljem koje onda nagriza namotaje elektromotora kompresora.



**Kontrolno staklo** nam koristi za vizualnu potvrdu kvalitete radne tvari u rashladnom sustavu. Postavlja se iza filtera, a na njemu se nalazi indikator na temelju čije boje možemo donijeti zaključak o prisustvu vlage ili nečistoća u radnoj tvari.

**Odvajači (separatori) ulja** odvajaju ulje koje se izbacuje iz kompresora u tlačni vod zajedno s radnom tvari nakon kompresije. Kod uređaja koji koriste ugljikovodike, bilo one „čiste“ (npr. R600A, R290) ili halogenirane (R134A, R410A itd.), dio ulja iz kompresora će uvijek biti u optoku s radnom tvari. Upravo se i sustav cjevovoda dimenzionira tako da se ulje što brže vrati u kompresor [3]. Ulje je u rashladnom sustavu od iznimne važnosti budući da služi za podmazivanje kompresora, ali osim te uloge važno je za brtvljenje zazora pri kompresiji te hlađenje kompresora. Nemoguće je u radu uređaja ostvariti da se ulje u potpunosti izdvoji iz radne tvari te se vrati u kompresor, a to znači da će dio ulja uvijek biti u optoku. Ipak, najveći dio (70~80%) ulja izbačenog iz kompresora se odvaja u odvajačima. Shematski prikaz ugradnje odvajača ulja dan je na Slici 1.9. Tipovi odvajača ulja na koje se nailazi u praksi su najčešće:

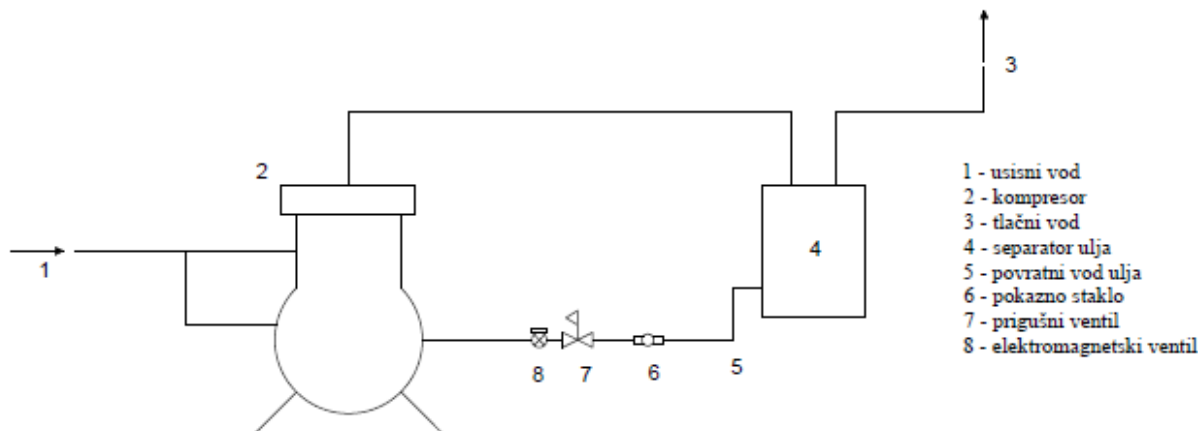
- Gravitacijski odvajač ulja s keramičkim prstenima freonskog sustava (slika 1.8)
- Gravitacijski odvajač ulja s deflektorima
- Odvajač ulja s ugrađenim hladnjakom smjese pare radne tvari i ulja



Slika 1.8 Odvajač ulja mjerne linije Retax Inverter

Količina ulja u optoku sustava ovisna je o vrsti i starosti kompresora, temperaturama u cilindru i kompresijskom prostoru, vrsti ulja, radnoj tvari te održavanju sustava. Sva ulja nisu

kompatibilna sa svim radnim tvarima. Tako u slučaju  $\text{NH}_3$  koriste se mineralna ulja (MO), ugljikovodici su kompatibilni s MO uljima, alkil-benzenskim (AB) te poliol-esterskim uljima (POE). Skupina tvari CFC i HCFC koriste se s MO i AB uljima, dok se HFC skupina koristi sa POE uljima, te poli-alkilen-glikolnim (PAG) i poli-vinil-eterim (PVE) uljima [4].



Slika 1.9 Shematski prikaz ugradnje odvajanja ulja u tlačni vod [3]

### 1.3 Ciljevi rada

Koliko god je važno za rad kompresora, ulje u ostatku rashladnog sustava nije poželjno, a to je posebice važno u freonskim sustavima budući da su freoni (ugljikovodici) otapala ulja. Prisutnost ulja smanjuje koeficijente prijelaza topline u izmjenjivačima s dvofaznim strujanjem (isparivači i kondenzatori). Također ulje utječe na promjene profila strujanja, povećava pad tlaka, mijenja termodinamičku ravnotežu i termofizikalna svojstva radne tvari [5]. Svi ti utjecaji se povećavaju s povećanjem udjela ulja u optoku (*eng. oil circulation rate, ORC*). Iz toga se zaključuje o ulozi odvajanja ulja, koja dobiva na važnosti s povećanjem kapaciteta uređaja. Može se pretpostaviti da će uređaj koji koristi odvajanje ulja imati dugovječniji kompresor, bolje performanse i tiši rad jer se smanjuju pulsacije rada ventila [6]. S druge strane prisutnost odvajanja ulja povećava pad tlaka sustava, što utječe na povećanje kompresijskog omjera rashladnog uređaja i povećanja pogonskih troškova.

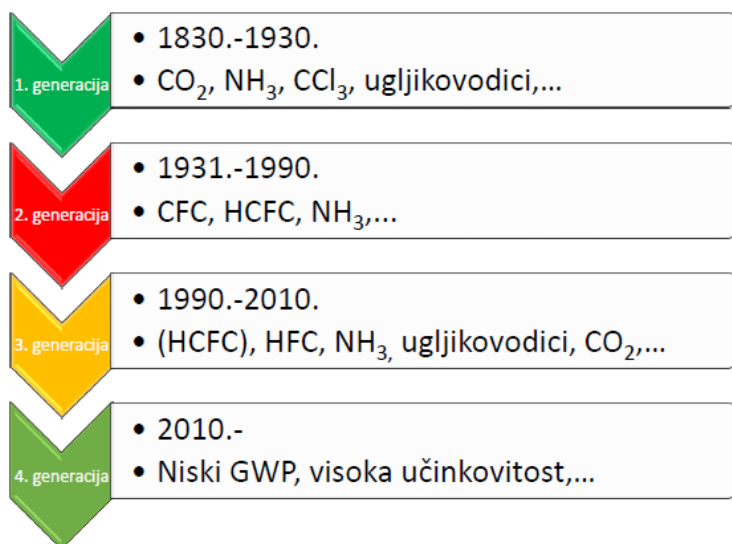
Zbog toga se dovodi u pitanje kakav je odnos utjecaja odvajanja ulja na rad samog sustava u slučaju uređaja manjih i srednjih kapaciteta kakvi se koriste u rashladnicima kapljevine. U sljedećim poglavljima će se tako dati eksperimentalna analiza rada uređaja s odvajanjem ulja i bez njega kako bi se donio zaključak o tome da li veća prisutnost ulja u rashladnom sustavu toliko značajno narušava radne parametre rashladnih uređaja da se poništi pozitivan utjecaj na smanjenje konačnog tlaka kompresije. Razmatrat će se utjecaj odvajanja ulja na karakteristike prijenosa topline u isparivaču, tj. promjene srednje logaritamske razlike temperatura na isparivaču. Uz to također će se ispitati utjecaj prisutnosti odvajanja na efikasnost rada kompresora te kako će varirati za različite kompresijske omjere pri korištenju odvajanja i bez njega. Na kraju će se provesti i analiza ukupne efikasnosti sustava, odnosno kako se mijenja faktor hlađenja (EER) uređaja za različite temperature u radu s i bez odvajanja.

## 2 PROPAN KAO RADNA TVAR

### 2.1 Radne tvari kroz povijest

Prva generacija radnih tvari, koje su također povezane s počecima rashladne tehnike, bile su prirodne radne tvari poput amonijaka, CO<sub>2</sub>, ugljikovodika i drugih. U to vrijeme najveća se pažnja posvećivala tome da sustav bude funkcionalan, a u drugi plan su padali sigurnost radnika, učinkovitost procesa i ostali parametri. Tek je dvadesetih godina prošloga stoljeća, na inicijativu američkog pionira klimatizacije Willis H. Carrier-a, napravljeno istraživanje većeg raspona radnih tvari s ciljem pronalaženja najbolje i razvijanjem komponenti za tu radnu tvar [7].

Drugu generaciju radnih tvari karakterizira prelazak na fluorirane kemijske spojeve iz sigurnosnih razloga kao i radi veće stabilnosti. Ovi spojevi se također često nazivaju *freonima*. Prvi od tih spojeva su CFC (*eng. chlorofluorocarbons*) spojevi, odnosno kloroflorougljici. Njihova proizvodnja kreće 1930-ih kada na tržište dolaze R-11 i R-12 radne tvari [8]. Kasnije, tijekom pedesetih godina prošlog stoljeća, počinje i primjena HCFC (*eng. hydrochlorofluorocarbons*) spojeva, odnosno kloroflorougljikovodika, u manjim uređajima. U ovome razdoblju, kao i u današnje vrijeme, amonijak je sveprisutan u industrijskim primjenama radi svojih superiornih termodinamičkih performansi, a gdje se njegova otrovnost po ljudski organizam može kompenzirati određenim zaštitnim mehanizmima.



Slika 2.1 Razvoj radnih tvari kroz povijest [9]

Povezivanje oštećenja ozonskog sloja s CFC i HCFC spojevima dovela je do donošenja Montrealskog protokola 1987. godine. Ovim protokolom zakonom se propisuje napuštanje spojeva koji osiromašuju ozonski sloj te dovodi do razvoja treće generacije radnih tvari, HFC (*eng. hydrofluorocarbons*) spojeva ili fluoriranih ugljikovodika. Oni su bili predviđeni kao trajna zamjena za CFC i HCFC spojeve, ali se također vratila ideja o korištenju prirodnih radnih tvari koje su se koristile u prvoj generaciji (amonijak, ugljikov dioksid, ugljikovodici,...) te se istraživala primjena apsorpcijskih rashladnih uređaja.

Fokusiranje na smanjenje globalnog zatopljenja dovelo je do razvoja četvrte generacije radnih tvari. Kyoto protokol, koji su izdali Ujedinjeni Narodi, daje ciljane vrijednosti emisija stakleničkih plinova preko ekvivalentnih vrijednosti CO<sub>2</sub> emisija. Za svaku radnu tvar se definira GWP (*eng. Global Warming Potential*) broj koji govori koliki je relativni utjecaj te tvari na stvaranje efekta staklenika u odnosu na utjecaj CO<sub>2</sub>. Uredba Europskog parlamenta 517/2014 (F-gas regulativa), koja mijenja postojeću Uredbu br. 842/2006 o fluoriranim stakleničkim plinovima, donosi brojne promjene, a najvažnije se odnose na postupno povlačenje i napuštanje primjene radnih tvari s visokom vrijednošću GWP broja, prema planu danom u Tablici 2.1. Od 2020. godine zabranjuje se primjena fluoriranih radnih tvari s GWP brojem većim od 2500, kako je prikazano u Tablici 2.2, u rashladnim i klimatizacijskim uređajima čiji punjenje prelazi 40 tona CO<sub>2</sub> ekvivalenta. Tradicionalne HFC radne tvari imaju visoke GWP brojeve u rasponu od 1430 za R134a sve do 3922 za R404A te se ova potonja prva našla na udaru. Tok razvoja radnih tvari kroz povijest je prikazan na Slici 2.1.

Tablica 2.1 Plan smanjenja potrošnje fluoriranih stakleničkih plinova [10]

Godina	Dopušena potrošnja
<b>2015.</b>	100%
<b>2016. – 2017.</b>	93%
<b>2018. – 2020.</b>	63%
<b>2021. – 2023.</b>	45%
<b>2024. – 2026.</b>	31%
<b>2027. – 2029.</b>	24%
<b>2030.</b>	21%

Tablica 2.2 Zabrana stavljanja na tržište radnih tvari [10]

Proizvodi i oprema		Datum zabrane
Spremnici za jednokratnu uporabu za fluorirane stakleničke plinove koji se koriste za servisiranje, održavanje ili punjenje rashladne i klimatizacijske opreme te za dizalice topline, protupožarnih sustava ili rasklopnih uređaja ili se koriste kao otapala		4. srpnja 2007.
Hladnjaci i zamrzivači za kućnu uporabu koji sadrže HFC s GWP-om od 150 ili više		1. siječnja 2015.
Hladnjaci i zamrzivači koji se koriste u komercijalne svrhe (hermetički zatvorena oprema)	Koji sadrže HFC s GWP-om 2500 ili više	1. siječnja 2020.
	Koji sadrže HFC s GWP-om 150 ili više	1. siječnja 2022.
Nepokretna rashladna oprema koja sadrži HFC ili čije funkcioniranje ovisi o HFC s GWP-om od 2500 ili više, osim opreme osmišljene za rashlađivanje proizvoda na temperaturama ispod $-50^{\circ}\text{C}$		1. siječnja 2020.
Višeskupni centralizirani rashladni sustavi koji se koriste u komercijalne svrhe s nazivnim kapacitetom od 40 kW ili više koji sadrže fluorirane stakleničke plinove ili čije funkcioniranje ovisi o fluoriranim stakleničkim plinovima s GWP-om 150 ili više, osim u primarnom krugu rashladnog sredstva kaskadnih sustava kada je moguće koristiti fluorirane stakleničke plinove s GWP-om manjim od 1500		1. siječnja 2022.
Pokretna sobna klimatizacijska oprema (hermetički zatvorena oprema koju krajnji korisnik može pomicati između soba) koji sadrže HFC s GWP-om 150 ili više		1. siječnja 2020.
Jednostruki razdvojeni klimatizacijski sustavi (split klimatizacijski uređaji) s manje od 3 kg fluoriranih stakleničkih plinova koji sadrže fluorirane stakleničke plinove ili čije funkcioniranje ovisi o fluoriranim stakleničkim plinovima s GWP-om od 750 ili više.		1. siječnja 2025.

Navedena Uredba indirektno promovira primjenu održivih tehnologija i održivih prirodnih radnih tvari rashladnih sustava među kojima su najistaknutiji amonijak, ugljikov dioksid te ugljikovodici (propan, izobutan). Amonijak je uvijek bio i ostao prvi izbor u industrijskom hlađenju dok ugljikov dioksid sve više zauzima svoje mjesto u komercijalnom hlađenju (npr. supermarketi). Ugljikovodik R600a, izobutan, već se duži niz godina primjenjuje u malim i najmanjim rashladnim uređajima. Punjenje u takvim uređajima je obično ispod 150 g, čime ne predstavljaju sigurnosni rizik [11]. Propan, R290 našao je svoju primjenu u rashladnicima kapljevine i dizalicama topline. HFO (*eng. hydrofluoroolefins*) skupina radnih tvari također se razvija zadnjih godina, s velikom primjenom u automobilskim rashladnim uređajima. HFO tvari također imaju nizak potencijal globalnog zagrijavanja (GWP broj od 4 do 6).

## 2.2 Svojstva propana u rashladnom krugu

Propan s ekološkog stajališta predstavlja odličnu alternativu trenutnim HFC radnim tvarima koje su najzastupljenije u primjeni u komercijalnoj rashladnoj tehnici i klimatizaciji. Nema štetan utjecaj na ozonski sloj (ODP broj je 0), a GWP broj mu iznosi 3, što je zanemarivo malo u usporedbi s HFC spojevima. Trendovi međunarodnih regulativa, koje postaju sve strože s obzirom na utjecaj radnih tvari na okoliš, pogoduju prirodnim radnim tvarima i nagovještavaju da bi propan trebao imati sve veću primjenu u rashladnoj i klimatizacijskoj tehnici.

Tablica 2.3 Usporedba svojstva propana (R290) s ostalim radnim tvarima [12]

Simbol			R290	R1270	R22	R404A	R410A	R134a
<b>M</b>	Molekularna masa	g/mol	44,1	42,1	86,5	97,6	72,6	102
<b>κ</b>	Izentropski koeficijent	$c_p/c_v^*$	1,12	1,15	1,18	1,1	1,17	1,1
<b>t<sub>n</sub></b>	Točka vrenja pri standardnim uvjetima	°C	-41,6	-47,6	-40,8	-46,2	-51,4	-26,1
<b>ρ</b>	Gustoća kapljevine	kg/dm <sup>3</sup> (40°C)	0,47	0,48	1,13	0,97	0,98	1,15
<b>p</b>	Tlak para	bar (-10°C / +40°C)	3,42 / 13,66	4,3 / 16,5	3,54 / 15,3	4,34 / 18,2	5,72 / 24,1	2,01 / 10,2
<b>t<sub>cr</sub></b>	Kritična temperatura	°C	96,8	91,1	96,1	72	71,3	101,1
<b>p<sub>cr</sub></b>	Kritični tlak	bar	42,6	45,5	49,9	37,3	49	40,7
<b>LFL</b>	Donja granica zapaljivosti	Vol. %	1,7	2	–	–	–	–
<b>UFL</b>	Gornja granica zapaljivosti	Vol. %	10,9	11,1	–	–	–	–
<b>AEL</b>	Otrovnost (AEL*)	ppm	1000	1000	1000	1000	1000	1000
<b>ODP</b>	Potencijal razaranja ozona		0	0	0,055	0	0	0
<b>GWP</b>	Potencijal globalnog zatopljenja		3	3	1810	3922	2088	1430

\* Pri 0°C i 101325 Pa

Najveća mana propana kao radne tvari, kao i ostalih ugljikovodika, je njegova zapaljivost u smjesi s zrakom. Sa stajališta zapaljivosti njegova klasifikacija je A3. U Tablici 2.3 vidimo da donja granica zapaljivosti za propan iznosi 1,7% volumnog udjela u zraku pri standardnim atmosferskim uvjetima (0 °C, 101325 Pa), što se brzo može postići u slučaju curenja propana u prostoriju manjeg volumena.

Upravo iz tih razloga u prošlosti se propan koristio gotovo isključivo u posebnim sustavima poput petrokemijske industrije, gdje su se primjenjivale posebne zaštitne mjere. Pri projektiranju propanskih uređaja potrebno je poštivati važeću sigurnosnu regulativu koja propisuje sigurnosne mjere pri izvođenju i radu uređaja. Ograničeno je i najveće dozvoljeno punjenje propana u uređaje, ovisno o kategoriji zgrade i prostorije u kojoj se nalazi. Međunarodni kriteriji regulirani su normama EN 378, ISO 5149 i IEC 60335-2-40 [13]. Tang je u svojem radu proveo eksperimentalnu analizu rizika nakon propuštanja propanske dizalice topline [14]. Najveću opasnost predstavlja električni ormar, iz kojeg propan teško difundira kada jednom uđe, a upravo u njemu je najveći potencijal za nastajanje iskre.

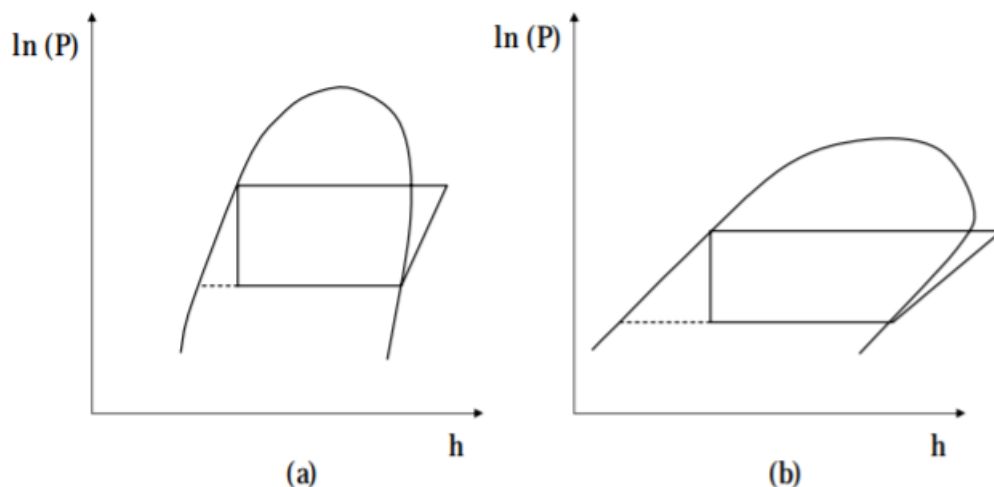
Propan posjeduje dobra termodinamička svojstva uspoređujući ih s HCFC i HFC radnim tvarima. Izentropski koeficijent mu je 1,12 što povežujemo s nižim temperaturama nakon kompresije. Tlakovi para su slični R22 radnoj tvari te nešto niži od R404A i R410A radne tvari. Visoka entalpija isparavanja propana znači da je potreban manji maseni tok (55% manji u odnosu na R22 te 40% manji u odnosu na R404A).

Veliki problem predstavlja visoka topivost propana u ulju. Veće količine otopljenog propana smanjuju viskoznost kompresorskog ulja, pogotovo pri nižim temperaturama i višim tlakovima usisa. Niža viskoznost ulja smanjuje performanse kompresora i povećava trošenje komponenti, a najčešće se ovaj problem rješava odabirom ulja s visokom baznom viskoznosti te korištenjem visokog pregrijanja suhozasićene radne tvari na usisu (bar 20°C). Propan je također dobro otapalo za razne nečistoće unutar cjevovoda te je potrebno osigurati dovoljnu razinu čistoće instalacije prema važećim standardima [15].

Još jedna specifičnost propana kao radne tvari jest relativno malo zagrijavanje prilikom kompresije u usporedbi s drugim radnim tvarima. Uzrok tome je visok specifični toplinski kapacitet propana. Prilikom kompresije plinova s visokim specifičnim toplinskim kapacitetom veći dio energije se pohranjuje u molekuli, a manji dio dovodi do porasta kinetičke energije,



odnosno temperature plina. S druge strane, prilikom ekspanzijskog procesa radnih tvari s visokim specifičnim kapacitetom, relativno velika količina radne tvari mora ispariti kako bi pothladila preostalu kapljevину na temperaturu isparavanja, čime se smanjuje količina kapljevine koja osigurava rashladni kapacitet.



Slika 2.2 Ln(P) - h dijagram radne tvari s a) niskim i b) visokim specifičnim toplinskim kapacitetom [16]

Situaciju se bolje razumije promatranjem Slike 2.2. Tvar s niskim specifičnim kapacitetom ima okomitije područje zasićenja u odnosu na radnu tvar s visokim specifičnim kapacitetom. Prilikom ekspanzije, koja se događa pri konstantnoj entalpiji, tvar s niskim specifičnim kapacitetom stvara veću količinu kapljevine. S druge strane, prilikom kompresije radne tvari s visokim specifičnim kapacitetom krivulja procesa ostaje blizu krivulje zasićenja, dok se kompresijom radne tvari s niskim specifičnim kapacitetom krivulja procesa više udaljava od područja zasićenja, što povezujemo s visokim temperaturama nakon kompresije. Propan je predstavnik tvari s visokim specifičnim kapacitetom zbog čega je poželjno raditi s visokim vrijednostima pregijanja nakon isparavanja radne tvari. Kao primjer radne tvari s niskim specifičnim kapacitetom s primjenom u rashladnoj tehnici se ističe amonijak (R717). Za njega su karakteristični sustavi s potopljenim isparivačima i rad bez pregijanja kako bi se izbjegle visoke temperature nakon kompresije.

Ograničenja u punjenju rashladnih uređaja i dizalica topline s radnom tvari R290 razlikuju se prema više kategorija. Dozvoljena masa punjenja prema normi HRN EN 378-1 iznosi 150 g za prostorije bilo kojeg volumena [17].

Najvažnija podjela je prema smještaju opreme (kategorije I, II i III) i kontroli pristupa hladnog/grijanog prostora (klasa A, B i C). Smještaj opreme može biti sljedeći:

- 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.

Za komforno hlađenje i grijanje maksimalno dozvoljeno punjenje računa se pomoću sljedećeg izraza:

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

Gdje je:

$LFL$  – donja granica zapaljenja radne tvari (za propan iznosi  $0,038 \text{ kg/m}^3$ ),

$h_0$  – visina ugradnje unutarnje jedinice, m,

$A$  – površina prostora u koji se ugrađuje sustav direktnog hlađenja/grijanja,  $\text{m}^2$ ,

Za komforni prostor kategorije I, klase A sa slobodnim pristupom, dimenzija  $6 \times 5 \text{ m}$  i zidnu ugradnju unutarnje jedinice split rashladnog uređaja maksimalno punjenje R290 prema prethodnom izrazu iznosi  $0,5 \text{ kg}$ .

Za sve ostale prostore (nekomforni prostor) dozvoljeno punjenje radne tvari računa se kao minimalna vrijednost punjenja određena prema praktičnoj granici punjenja radne tvari PL i smještaja opreme, odnosno sigurnosnog pristupa.

$$m_{max} = PL \cdot V, [kg]$$

Gdje je:

$PL$  – praktična granica punjenja,  $\text{kg/m}^3$  (za propan iznosi  $8 \text{ g/m}^3$ ),

$V$  - volumen kondicioniranog prostora,  $\text{m}^3$ .

Maksimalno dozvoljeno punjenje rashladnog uređaja za nekomforni prostor kategorije I, sa slobodnim pristupom (klasa A) iznosi  $1,5 \text{ kg}$ . Nema ograničenja u količini radne tvari u sustavu za prostore s ovlaštenim pristupom (klasa C) koji nisu dostupni javnosti, kategorije III (svi dijelovi koji sadrže radnu tvar nalaze se u strojarnici u kojoj ne borave ljudi ili su smješteni na otvorenom prostoru).

## 2.3 Pregled literature

Zadnjih godina intenzivnije se provode usporedbe radnih parametara propana s drugim radnim tvarima. Nasution [18] je usporedio radne parametre tvari R22 i propana na istom split rashladnom uređaju, a osim utjecaja zamjene radne tvari ispitan je i utjecaj međuzmjenjivača pothlađena kapljevina/usisna para, iako treba napomenuti da se međuzmjenjivač obično ne ugrađuje u uređaje sličnog tipa i kapaciteta kao ispitni. Za isti rashladni kapacitet uređaj je pri radu s propanom trošio 11,64% manje električne energije, a COP broj je porastao za 13,18% u odnosu na radnu tvar R22. Rad s međuzmjenjivačem se pokazao puno učinkovitiji, ali su se razlike između propana i R22 smanjile. U usporedbi sa standardnim sustavom s R22 sustav s međuzmjenjivačem je ostvario 37,66% veći COP broj, a sustav s propanom i međuzmjenjivačem 38,29% veći COP broj. Slične rezultate je zabilježio i Palm ispitujuću radne parametre prilikom rada s radnim tvarima R22 i R134a [19].

Longo [20] je uspoređivao koeficijente prijelaza topline prilikom kondenzacije HCFC radne tvari R404A u pločastim izmjenjivačima s propanom i propilenom (R1270). Temperaturu zasićenja je varirao od 25 do 40°C, a kako bi mogao usporediti rezultate varirao je maseni protok radnih tvari kako bi izjednačio snage kondenzacije, odnosno učine. Iz tog razloga maseni protok R404A je gotovo dvostruko veći kod njegovih ispitivanja, budući da je toliko manja njegova latentna topline kondenzacije. U istraživanju je pokazano da najveći utjecaj na prijelaz topline ima maseni tok i pregrijanje, dok je temperatura zasićenja tek neznatno utjecala na rezultate. Rezultati i u ovom ispitivanju idu u prilog propanu, koji je ostvario 25-45% veće koeficijente prijelaza topline, uz sličan pad tlaka kao kod R404A. Wen [21] je proveo numeričku i eksperimentalnu analizu kondenzacijskih svojstava propana, HFC radne tvari R134a i novije HFO radne tvari R1234ze. Analiza je provedena u glatkim horizontalnim cijevima hidrauličkog promjera 1mm, temperaturu kondenzacije 40°C te uz variranje specifičnog masenog toka. Propan je imao najveći koeficijent prijelaza topline. Uz specifični maseni tok od  $600 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  i sadržaj pare od 0,66 koeficijent prijelaza topline propana bio je veći za 18% od R1234ze te za 28% od R134a. Treba naglasiti da je koeficijent prijelaza topline propana puno više ovisio o specifičnom masenom toku u odnosu na druge dvije radne tvari zbog male gustoće parne faze.

Liu [22] je analizirao utjecaj punjenja sustava na radne parametre propanskog rashladnog uređaja s različitim prigušnim elementima. Najprimitivnija kapilara pokazala se veoma osjetljiva

na smanjenje punjenja, ali niže punjenje je moguće za naprednije elemente - termoelekspanzijski ventil (TEV) i elektronički elekspanzijski ventil (EEV). Liu preporuča nešto veće punjenje sustava od optimalnog, budući da ono neće ugroziti radne parametre uređaja, a u slučaju manjeg curenja dugotrajan rad ne bi bio ugrožen. Također numerički je analizirao utjecaj pregrijanja na performanse propanskog uređaja te je zaključio da COP i rashladni kapacitet sustava rastu s rastom pregrijanja, pojava suprotna od radne tvari R22. Razlog tome je taj što gustoća propana ne opada tako brzo kao kod radne tvari R22, što znači da volumetrički rashladni kapacitet propana raste s pregrijanjem pare na usisu kompresora.

Riva [23] je eksperimentalno potvrdio važnost pregrijanja na radne parametre propanskog kompresora. Pri punom kapacitetu učinkovitost kompresora varirala je od 0,69 do 0,71 za rad s međuiszmenjivačem koji je držao visoko pregrijanje. Kod rada bez međuiszmenjivača najveća učinkovitost iznosila je 0,67, a najniža tek 0,62. Ovakvu razliku pripisuje visokoj topivosti propana u kompresorskom ulju pri nižim temperaturama, teorija koja je i ranije navedena. Ulje s povišenim udjelom propana u sebi ima nižu viskoznost te kao takvo ne brtvi dobro te opada volumetrijski stupanj djelovanja kompresora. Utjecaj ubrizgavanja ulja za vrijeme kompresije istraživao je Bell te je zaključio kako je temperatura nakon kompresije niža zbog utjecaja hlađenja kompresora za vrijeme procesa ubrizgavanja [24].

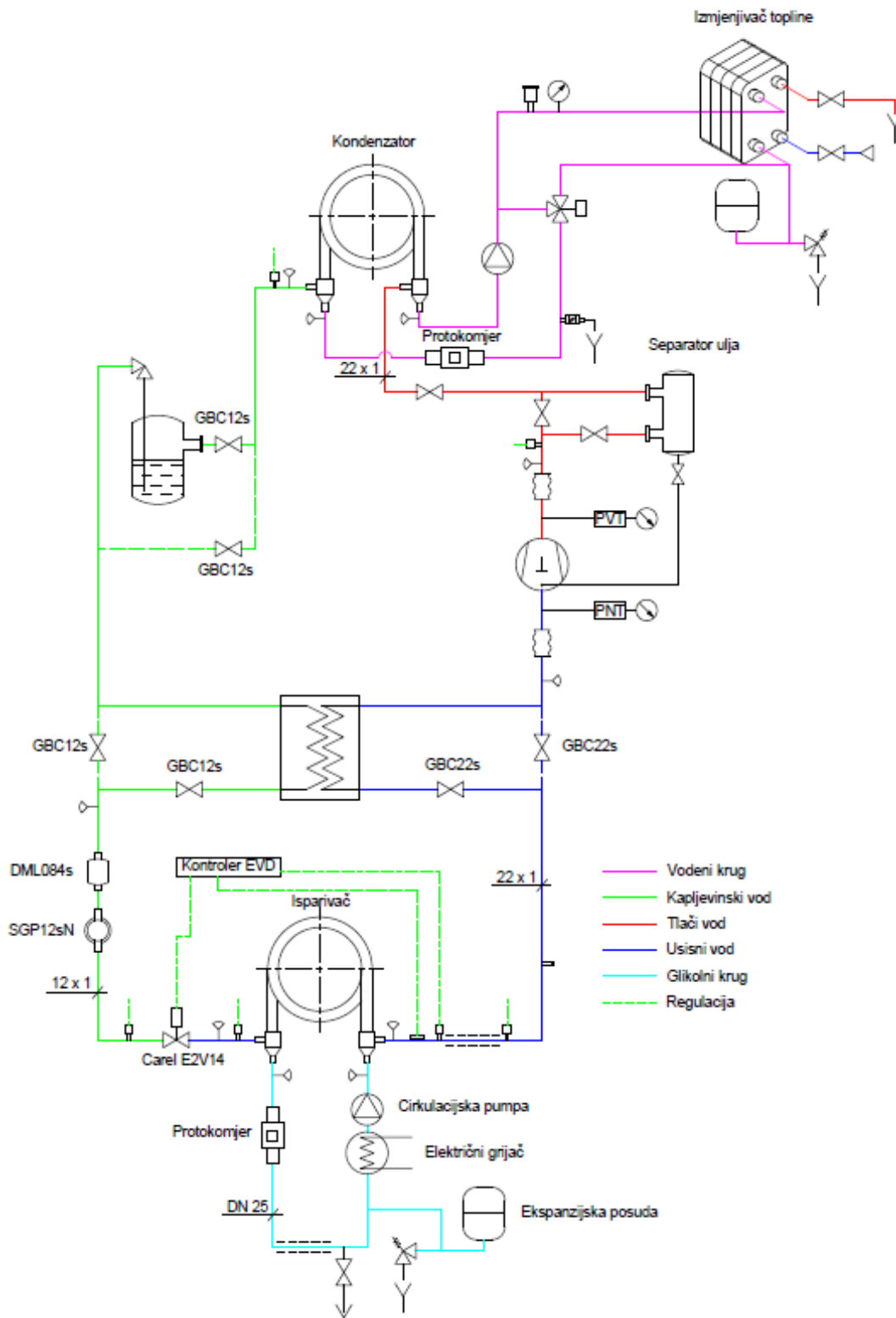
### 3 OPIS MJERNE LINIJE I EKSPERIMENTA

Mjerna linija (Slika 3.1) na kojoj se izvode ispitivanja se sastoji od rashladnog kruga s propanom kao radnom tvari, glikolnog kruga te kruga rashladne vode. Nalazi se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje Zavoda za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku. Shematski prikaz ispitnog sustava dan je na Slici 3.2.



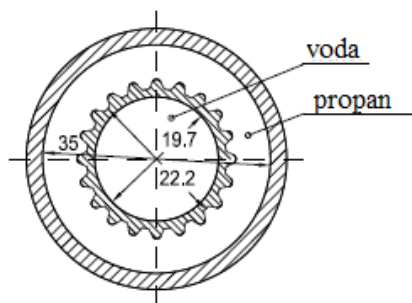
Slika 3.1 Mjerna linija u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje FSB-a

Osnovne komponente rashladnog kruga s propanom su spiralni hermetički kompresor, protustrujni koaksijalni (cijev u cijevi) kondenzator i isparivač te elektronički ekspanzijski ventil. Kompresor je podmazivan s poliol esterskim uljem (POE) koje je preporučeno za rad s R290, a volumen ulja u kompresoru je 1,89 litara. Regulacija kapaciteta kompresora nije moguća.



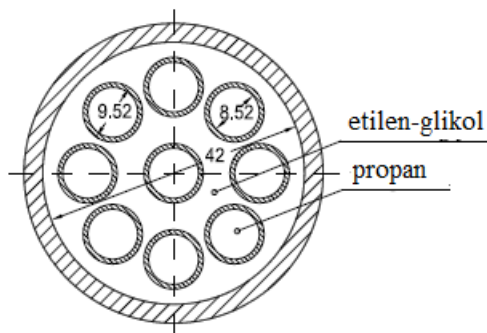
Slika 3.2 Shema mjerne linije

Kondenzator je koaksijalni protusmjerni, a unutarnja cijev je dodatno orebrena kako bi se poboljšala izmjena topline između rashladne vode i radne tvari (Slika 3.3). Na sljedećoj slici veličina se daje u milimetrima.



Slika 3.3 Presjek kondenzatora

Isparivač je također protustrujni koaksijalni, ali je ispunjen s 9 cijevi kroz koje struji radna tvar, dok kroz vanjsku cijev struji 30%-tna smjesa etilen-glikola i vode (Slika 3.4).

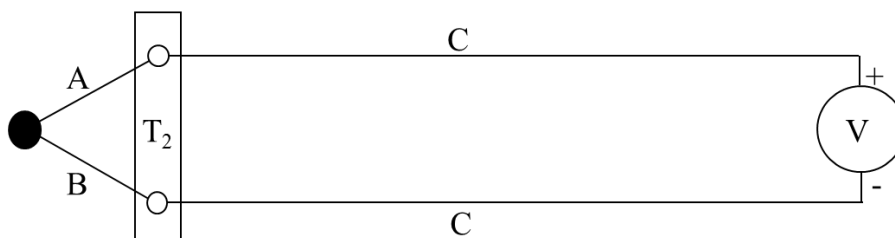


Slika 3.4 Presjek isparivača

Osim osnovnih komponenata sustav je opremljen s odvajačem ulja, oko kojeg je postavljen i obilazni vod kako bi se ispitivanje s i bez odvajača moglo provesti. Uz odvajač sustav je opremljen s međuizmjenjivačem koji služi za dodatno pregrijanje pare na usisu te pothlađenje kapljevine na izlazu iz kondenzatora. Korištenje međuizmjenjivača kod propanskih rashladnih uređaja je poželjno upravo zbog visoke topivosti propana u konvencionalnim uljima pa je potrebno, prema iskustvenim preporukama, ostvariti barem 20 K pregrijanja [23]. Sustav je također opremljen sa spremnikom radne tvari tzv. „receiver“, oglednim stakalcem za vizualni pregled radne tvari te filterom sušačem u kapljevinskom vodu. Električni grijač se koristi za zagrijavanje smjese etilen-glikola i vode te se pomoću njega postavlja rashladni učin isparivača

(4-12 kW). Kondenzator se hladi pomoću kruga rashladne vode, koji je opremljen s troputnim ventilom pomoću kojeg možemo regulirati temperaturu kondenzacije. Kondenzatorska voda se hladi na pločastom izmjenjivaču pomoću vodovodne vode. Krug rashladne vode te krug smjese glikola su opremljeni sa cirkulacijskim pumpama kako bi se omogućilo strujanje medija te odgovarajućim ekspanzijskim posudama. Usisna cijev, izmjenjivači topline, ekspanzijski ventil te krug glikola su izolirani sa 20 mm toplinske izolacije.

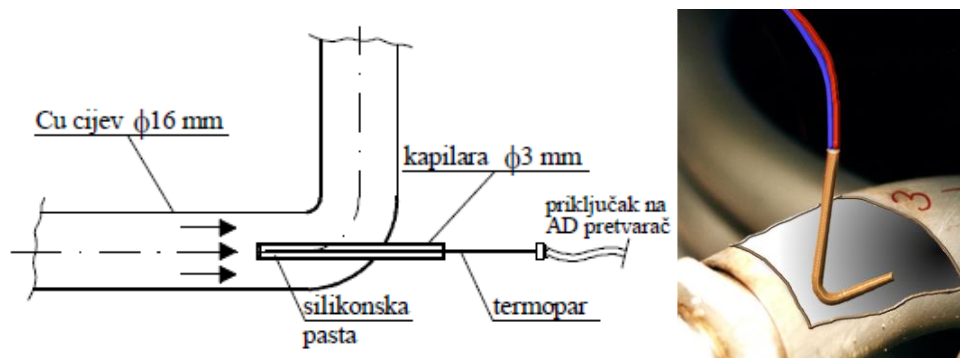
U svakom laboratorijskom i eksperimentalnom ispitivanju radnih parametara rashladnih uređaja od ključne su važnosti i mjerne komponente. U ovom slučaju mjere se tri najvažnije veličine, a to su temperatura, tlak i protok. Mjerenje temperature se provodi pomoću termoparova. Termoparovi se izvode spajanjem dvaju različitih metala (Slika 3.5), na čijim krajevima se inducira napon ako su mu spojno mjesto i slobodni kraj na različitoj temperaturi. Imaju brz odaziv na promjenu temperature, jeftini su, a točnost im se kreće u intervalu  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . Parovi metala od kojih se izrađuju su standardizirani, a pojedini tipovi su označeni kodnim slovima npr. tip J, K, T.



Slika 3.5 Termopar

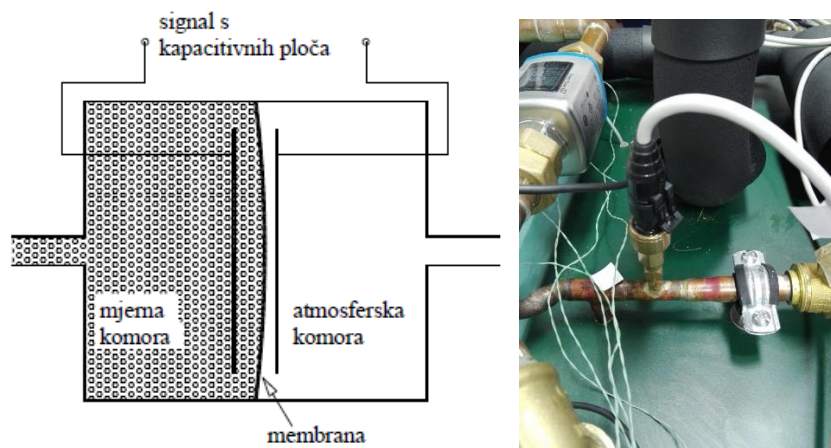
Na ispitivanom rashladnom uređaju temperatura se mjeri na sedam lokacija u krugu propana, te po dvije u krugu glikolne smjese i vode. Da bi uspješno mjerili temperaturu radne tvari u uređaju potrebno je ugraditi u cjevovod kapilaru unutarnjeg promjera 1,5 mm koja je s jedne strane otvorena te se u nju ulaže termopar. Cjevčica se ugrađuje na taj način da ne naruši bitno strujanje radne tvari (Slika 3.6), ali tako da je radni medij što bolje progrije kako bi nam umetnuti termopar dao što točnije očitavanje temperature. Korišteni termoparovi su tip K (Ni/CrNi) s točnošću  $0,1^{\circ}\text{C}$ , se stavljaju u cjevčicu zajedno sa silikonskom pastom kako bi očitavanje bilo što točnije. Na isti način se mjere i temperature glikolne smjese te kondenzatorske vode.





Slika 3.6 Shematski prikaz ugradnje termopara na mjerno mjesto (lijevo), prikaz ugradnje termopara na ulazu u isparivač na strani etilen-glikola (desno) [25]

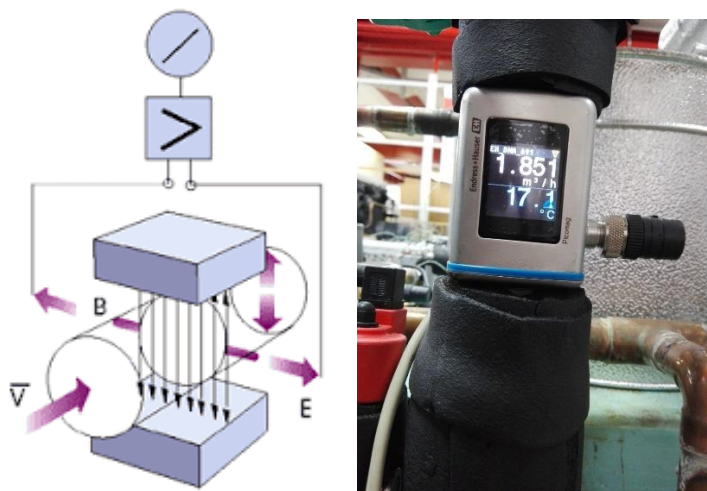
Tlak se u razmatranom sustavu mjeri pomoću pretvarača tlaka koji rade na kapacitivnom principu (Slika 3.7). Na temelju suptilnog pomaka odvajajuće membrane dolazi do promjene kapaciteta između kapacitivnih ploča (elektroda). Takve vrste osjetnika tlaka imaju visoku otpornost na dinamičko opterećenje te visoku pouzdanost mjerenja, a za mjerenja je potreban i izvor električne struje. Četiri pretvarača tlaka s mjernom nesigurnošću  $\pm 0,5\%$  su postavljena u sustavu i to na ulazu i izlazu izmjenjivača topline, odnosno isparivača i kondenzatora.



Slika 3.7 Shematski prikaz kapacitivnog pretvarača tlaka (lijevo) [25], pretvarač tlaka na mjernoj liniji (desno)

Mjerenje protoka kondenzatorske vode i glikolne smjese se mjeri pomoću elektromagnetskih protokomjera (Slika 3.8). Njihov rad se temelji na magnetskoj indukciji, gdje se radni fluid koristi kao električni vodič, a na stijenkama su postavljene dvije elektrode. Magnetski tok je okomit u odnosu na protok fluida te se javlja napon uslijed elektromotorne sile, a taj napon je u vezi s odgovarajućim protokom. Takvi protokomjeri su povoljni za električki

vodljive fluide, imaju visoku točnost te pružaju zanemariv pad tlaka. Točnost instrumenata postavljenih na ovu mjernu liniju je  $\pm 0,5\%$ .



Slika 3.8 Shematski prikaz rada elektromagnetskog protokomjera (lijevo) [26], elektromagnetski protokomjer smjese etilen-glikola i vode na mjernoj liniji (desno)

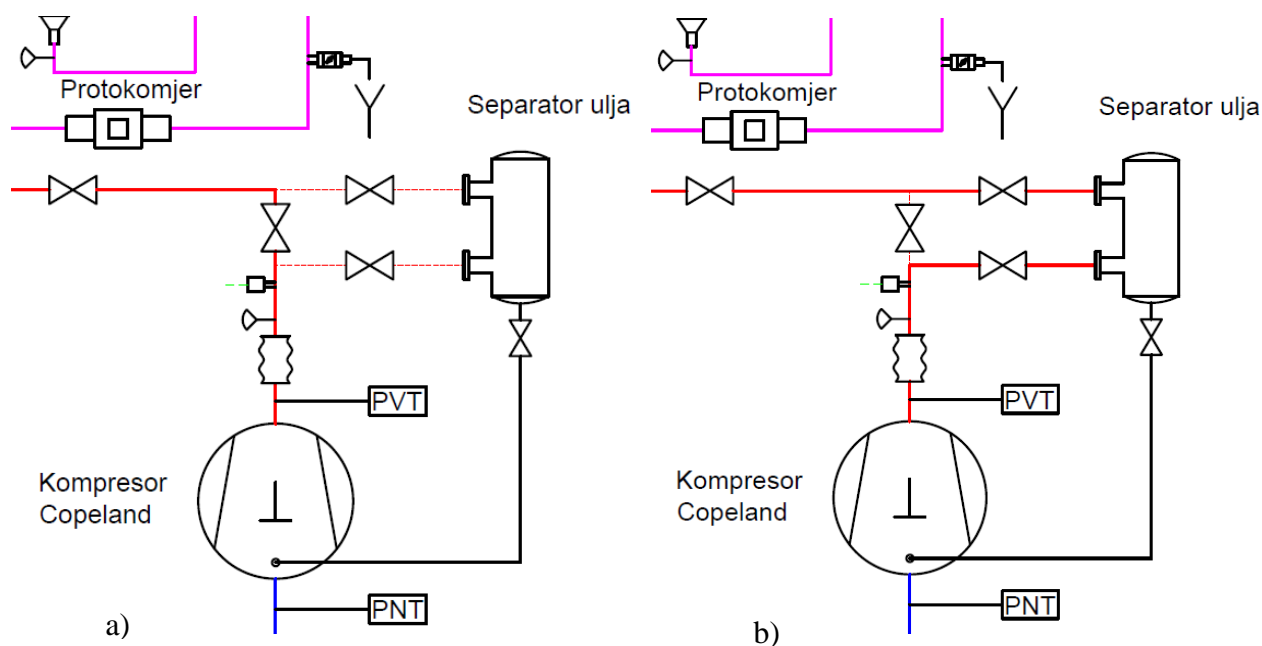
Električna snaga kompresora se mjeri pomoću digitalnog multimetra s točnošću  $\pm 0,5\%$ . Sve informacije koje daju osjetnici tlakova i temperatura su spojeni na sustav akvizicije podataka „Agilent“ s analogno-digitalnim pretvaračem koji je serijskom komunikacijom spojen na računalo, kako je prikazano na Slici 3.9. Informacije se očitavaju svakih 30 sekundi te se prikazuju i pohranjuju na računalu u obliku tabličnih vrijednosti.



Slika 3.9 Akvizicijski sustav s A/D pretvaračem

Kako bi se odredio utjecaj odvajača ulja na parametre rashladnog uređaja, mjerna linija je imala dvije osnovne postavke, prvu gdje se radna tvar provodila kroz obilazni vod te je ventil koji vodi prema odvajaču ulja bio zatvoren, te drugu postavku gdje je ventil u obilaznom vodu bio zatvoren, a ventil prema odvajaču ulja otvoren. Ostale komponente rashladnog kruga su bile identično postavljene, radna tvar se nakon kondenzatora vodila u sakupljač odakle je kapljevinu pothlađivala na međuizmjenjivaču. Pregrijane pare iz isparivača su također vođene na međuizmjenjivač kako bi se povećalo pregrijanje radne tvari na usisu u kompresor.

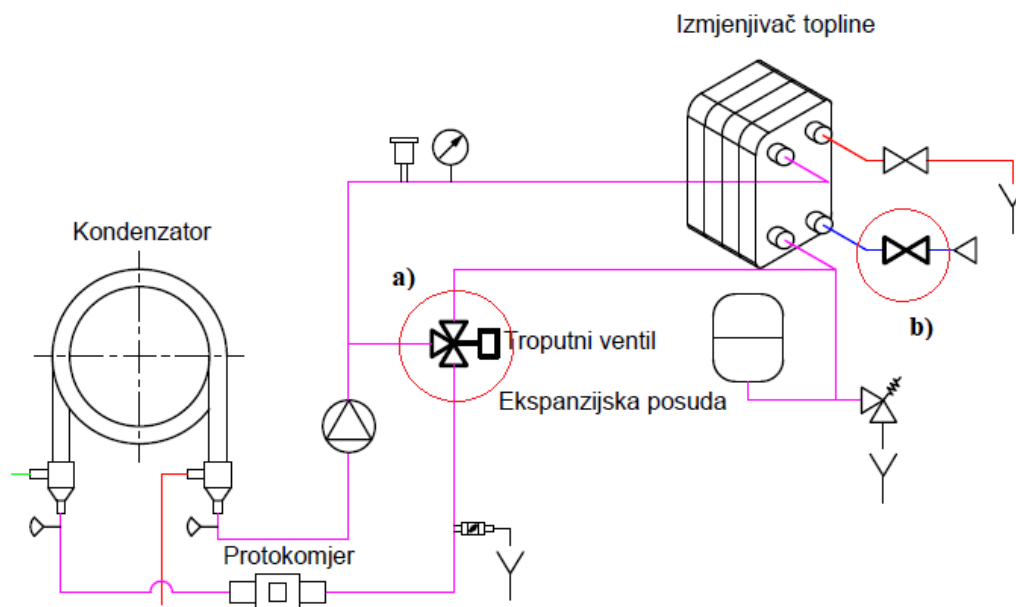
Na Slici 3.10 ispod prikazan je detalj spajanja odvajača ulja na krug radne tvari te korištenje obilaznog voda prilikom ispitivanja uređaja bez odvajača. Crtkanom tankom linijom su označeni vodovi kroz koje nema toka radne tvari prilikom ispitivanja.



Slika 3.10 Shema mjerne linije za ispitivanje: a) bez odvajača b) s odvajačem

Niz radnih točaka uređaja ispitan je variranjem opterećenja na isparivaču i kondenzatoru. Na isparivaču je držan konstantni protok glikolne smjese. Opterećenje se zadavalo preko snage električnog grijača u krugu, te su ispitivani nazivni režimi od 6, 8 i 10 kW, ali je potrebno naglasiti da prava snaga električnog grijača ipak odstupa od nazivne. Tijekom ispitivanja potrebno je ostaviti uređaj u radu u zadanoj radnoj točki kako bi iščezle tranzijente pojave u sustavu te se dobili podaci za stabilnu radnu točku.

Za zadanu snagu isparivača pokušalo se simulirati rad pravog rashladnog uređaja variranjem tlaka, odnosno temperature kondenzacije. Za rad uređaja s i bez odvajača ulja radilo se pri temperaturama kondenzacije od 35°C, 40°C i 45°C za sve snage isparivača te s 30°C pri snagama isparivača od 6kW i 8kW. Da bi se ostvario željeni tlak kondenzacije (koji je jednoznačno povezan s temperaturom za čistu radnu tvar) potrebno je prilagoditi uvjete izmjene topline varirajući postavke regulacijskih elemenata na vodenom krugu. U stacionarnom stanju, sva toplina koja se kondenzacijom predaje vodi u vodenom krugu, s vode se predaje vodovodnoj vodi, odnosno okolišu. Budući da su ispitivanja rađena pri konstantnoj brzini vrtnje vodene pumpe, odnosno pri konstantnom protoku vode na kondenzatoru, izmijenjenu toplinu moglo se varirati promjenom temperaturnog režima vode (Slika 3.11). Prvi način za to je uvođenjem recirkulacije vode, odnosno promjenom položaja troputnog miješajućeg ventila. Drugi način je smanjenjem protoka vodovodne vode na voda-voda izmjenjivaču pomoću prigušnog ventila čime se smanjuje predana toplina okolišu.



Slika 3.11 Variranje temperature kondenzacije a) s troputnim ventilom b) s prigušnim ventilom

Valjalo bi naglasiti da je odziv sustava bio puno veći prilikom promjene položaja troputnog ventila te se on koristio za veće promjene temperature kondenzacije. Za finiju regulaciju tlaka, odnosno temperature kondenzacije koristio se prigušni ventil na čije je promjene sustav bio manje osjetljiv.

## 4 ANALIZA REZULTATA MJERENJA

U ovom poglavlju daju se rezultati prethodno opisanog eksperimenta na promatranoj mjernejoj liniji. Prikupljeni podaci o tlaku i temperaturama u sustavu se obrađuju u programskom paketu „Microsoft Excel“ s dodatkom „CoolProp“ [27], koji je zapravo baza podataka u kojoj se nalaze veličine stanja radnih tvari za zadane termodinamičke veličine. Prilikom obrade podataka analizira se efikasnost rada kompresora i izmjene topline na isparivaču te ukupna efikasnost uređaja s obzirom na to radi li uređaj s odvajanjem ulja ili ne.

Efikasnost rada kompresora se razmatra kao izentropska i ukupna. Izentropska efikasnost se računa prema sljedećem izrazu:

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

Gdje je:

$h_1$  – entalpija pare na usisu kompresora, [kJ/kg]

$h_2$  – stvarna entalpija pare na izlazu kompresora, [kJ/kg]

$h_{2,is}$  – izentropska entalpija pare na izlazu kompresora, [kJ/kg]

Vidi se da se izentropska efikasnost kompresora definira samo kao promjena termodinamičkog stanja pare prije i poslije kompresije. Ukupna efikasnost, pak, uzima u obzir i mehaničke gubitke prijenosa snage sa elektromotora na vratilo i gubitke u namotajima elektromotora, a definirana je sljedećom jednadžbom:

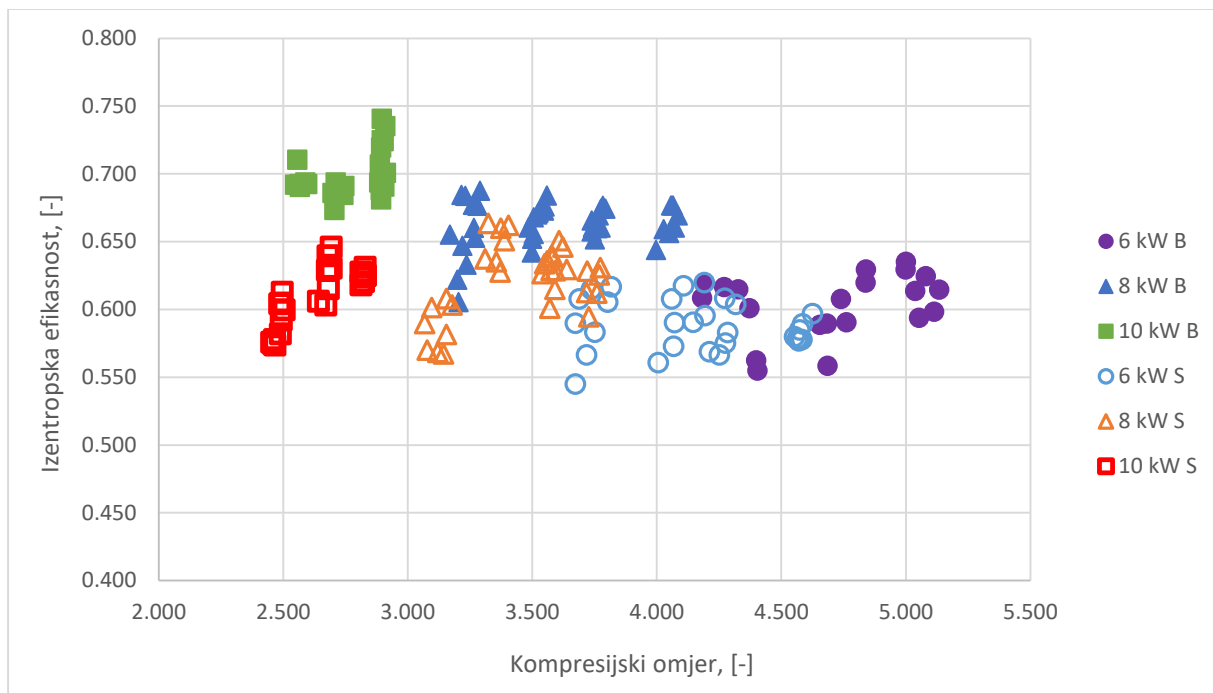
$$\eta_{tot} = \frac{q_{m,RT} \cdot (h_{2,is} - h_1)}{P_{EL}}$$

Gdje su:

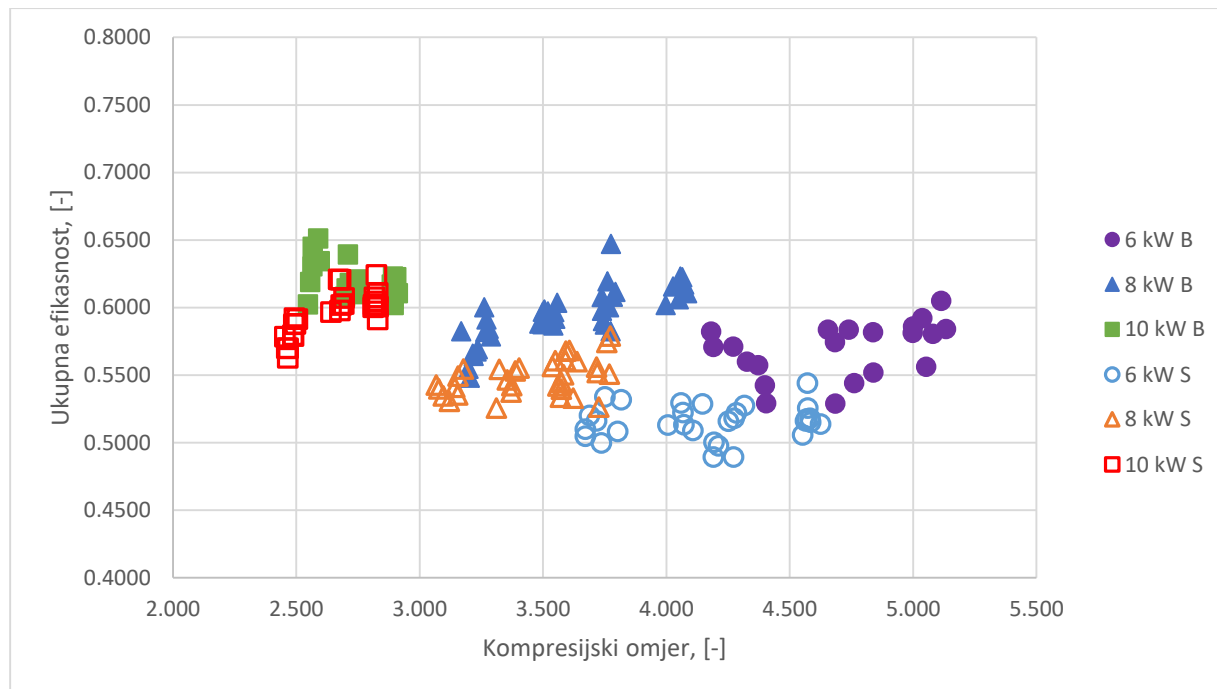
$q_{m,RT}$  – maseni protok radne tvari, [kg/s]

$P_{el}$  – električna snaga kompresora, [kW]

Na sljedećim dijagrama prikazane su izentropska i ukupna efikasnost rada kompresora u ovisnosti o kapacitetu hlađenja te omjeru tlakova prije i poslije kompresora.



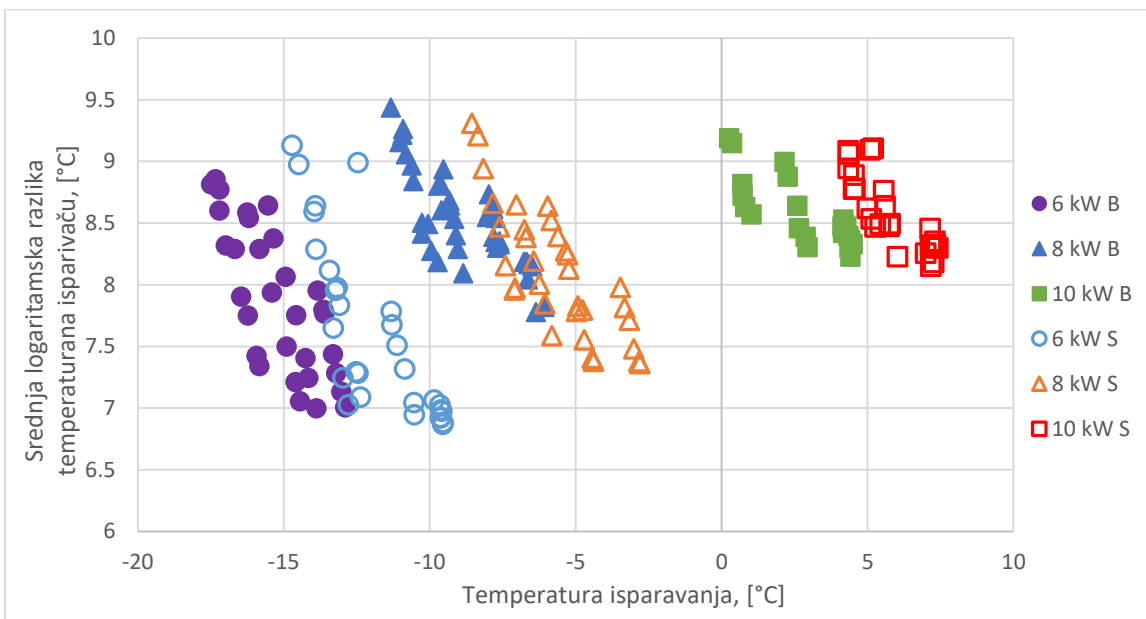
Slika 4.1 Izentropska efikasnost kompresora



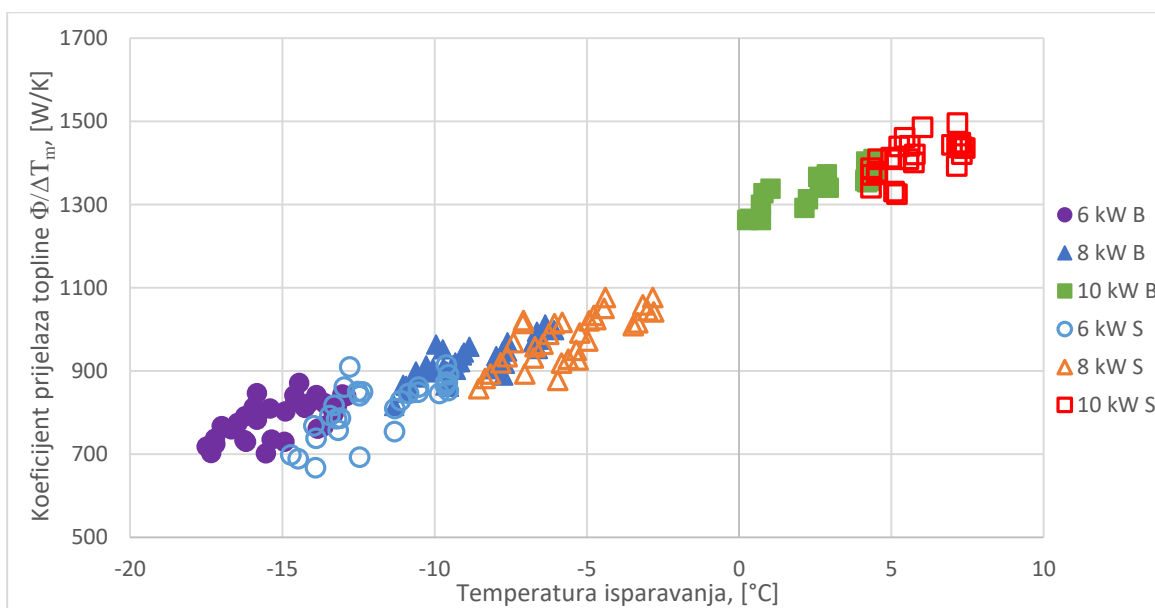
Slika 4.2 Ukupna efikasnost kompresora

Iz prikazanog (Slika 4.1 i Slika 4.2) se može zaključiti kako i izentropska i ukupna efikasnost kompresora opada sa smanjenjem kapaciteta hlađenja što je posljedica manjeg kompresijskog omjera. Izentropska efikasnost postiže vrijednosti od 0,57 do 0,72 za rad bez

odvajača te vrijednosti od 0,56 do 0,64 za rad s odvajačem. Također je interesantno za uočiti kako je kompresijski omjer uređaja kada radi s odvajačem ulja manji od onoga kada odvajač nije spojen, što je posljedica toga da je temperatura isparavanja veća pa je stoga i tlak na usisu veći. Veća temperatura isparavanja se postiže zbog toga što je bolja izmjena topline u isparivaču (Slika 4.4), zato što je manje ulja u optjecaju s radnom tvari te se ostvaruju bolji koeficijenti prijelaza topline.



Slika 4.3 Ovisnost srednje logaritamske razlike temperatura o temperaturi isparavanja



Slika 4.4 Ovisnost koeficijenta prolaza topline o temperaturi isparavanja

Porast koeficijenta prolaza topline u ovisnosti o povećanju kapaciteta je dominantno posljedica promjene, to jest, povećanja protoka radne tvari kroz isparivač. Uz to, vidljiva je potvrda prethodne stavke o porastu temperature isparavanja za isti rashladni kapacitet s korištenjem odvajanja ulja zbog boljih transportnih svojstava radne tvari. Da bi se objasnio pad srednje logaritamske razlike temperatura na izmjenjivaču koristi se slijedeći izraz:

$$\Phi = k \cdot A_i \cdot \Delta T_m$$

Gdje su:

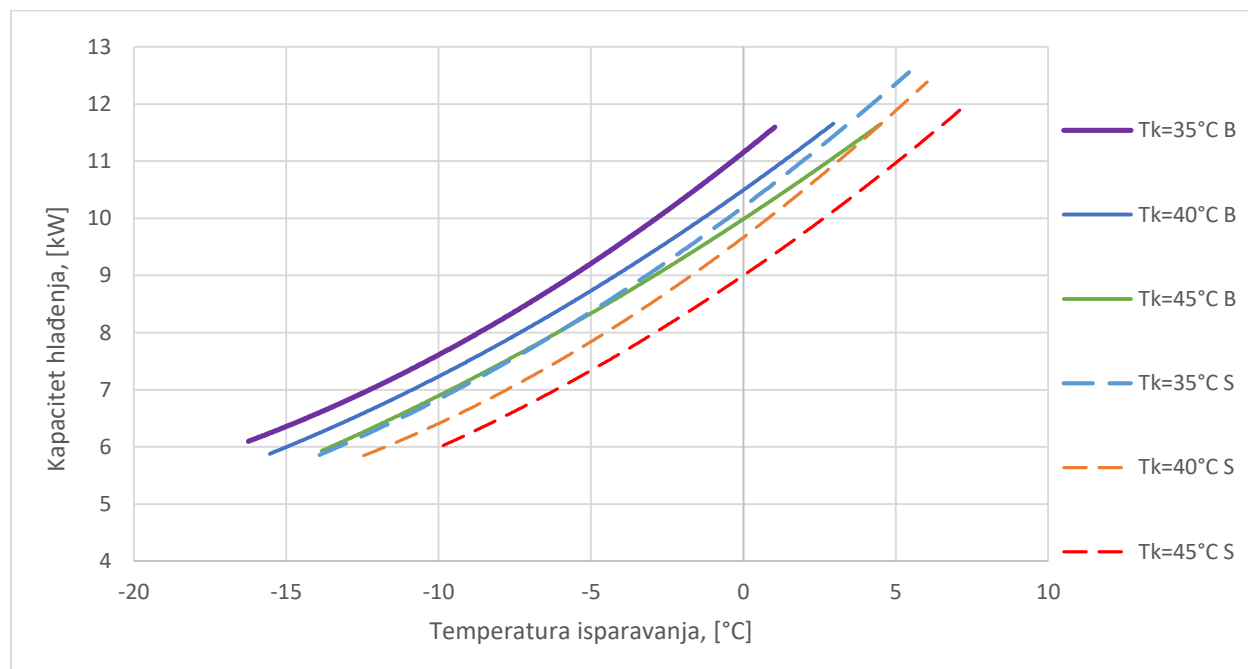
$\Phi$  – učin izmjenjivača topline, [W]

$k$  – koeficijent prolaza topline, [W/m<sup>2</sup>K]

$A_i$  – izmjenjivačka površina isparivača, [m<sup>2</sup>]

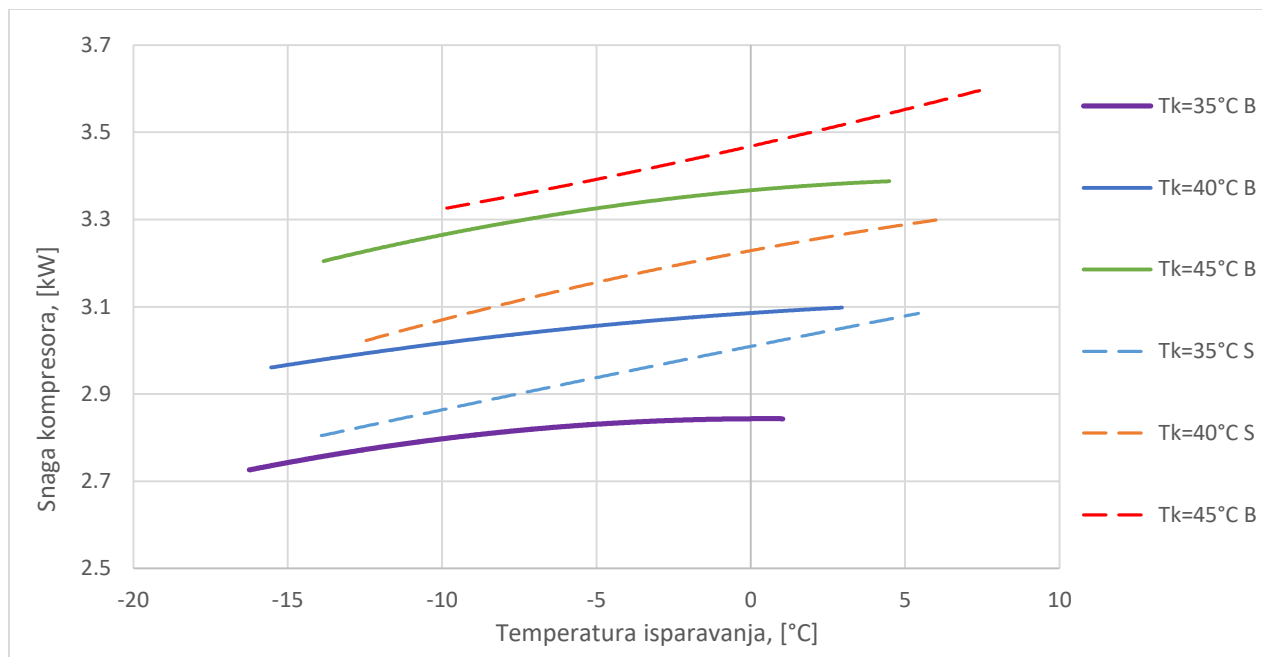
$\Delta T_m$  – srednja logaritamska razlika temperatura, [°C]

Budući da povećanjem učina dolazi do povećanja koeficijenta prolaza topline, uz istu površinu i učin izmjenjivača, srednja logaritamska razlika temperatura se mora smanjivati bez obzira radi li sustav s odvajanjem ulja ili bez njega (Slika 4.3).



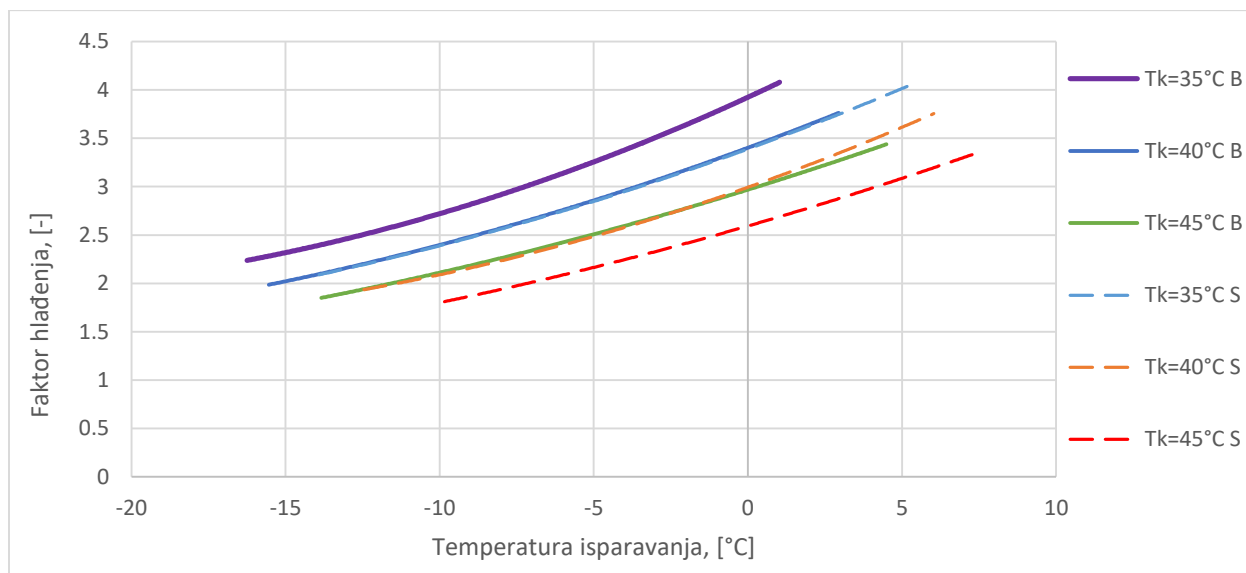
Slika 4.5 Ovisnost kapaciteta hlađenja o temperaturi isparavanja



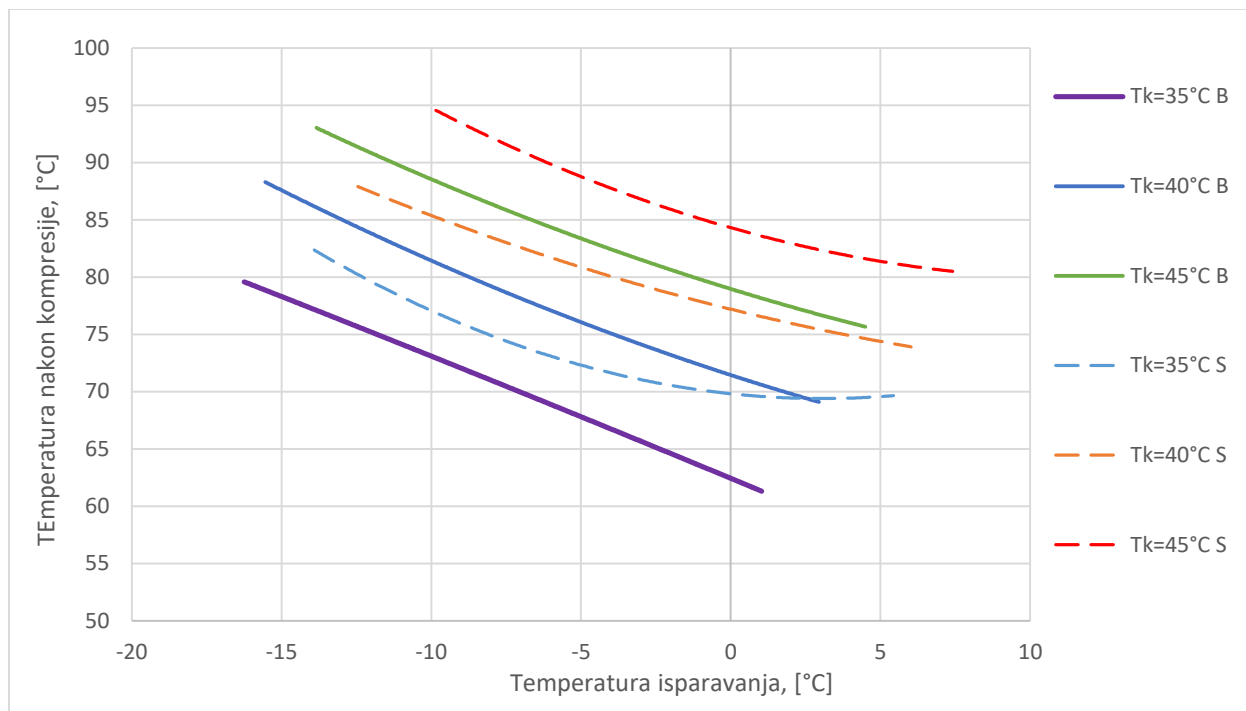


Slika 4.6 Ovisnost snage kompresora o temperaturi isparavanja

Iz Slike 4.6 se vidi da za konstantnu temperaturu kondenzacije s povećanjem temperature isparavanja snaga kompresora raste. U slučaju rada s odvajačem ulja trend porasta snage kompresora je veći što je posljedica pada tlaka na odvajaču ulja koji se povećava s porastom masenog protoka za porast kapaciteta hlađenja.



Slika 4.7 Ovisnost faktora hlađenja o temperaturi isparavanja



Slika 4.8 Ovisnost temperature nakon kompresije o temperaturi isparavanja

Prikazani rezultati su očekivani te se zaključuje da za konstantnu temperaturu kondenzacije faktor hlađenja raste (Slika 4.7), a temperatura nakon kompresije pada s povećanjem temperature isparavanja (Slika 4.8) što je, naravno, posljedica smanjenja kompresijskog omjera.

## 5 ZAKLJUČAK

Eksperimentalnim ispitivanjem rashladnog uređaja s propanom kao radnom tvari analiziran je utjecaj odvajača ulja na parametre rada sustava. Propan kao radna tvar je ispitivan radi svoje potencijalne šire primjene u rashladnicima kapljevine i dizalicama topline. Najveća prednost je ta što je on prirodna radna tvar koja ima manji utjecaj na okoliš u usporedbi s radnim tvarima trenutno prisutnima na tržištu (HFC spojevi). Utjecaj odvajača ulja na parametre rashladnih uređaja nije dovoljno istražen te je to temeljna motivacija ove eksperimentalne analize. Na temelju dobivenih rezultata mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- (1) Izentropska i ukupna efikasnost kompresora pri radu bez odvajača ulja je viša u usporedbi s radom s odvajačem. Glavni uzrok tome je visok pad tlaka na odvajaču ulja, čime su se poništile pogodnosti njegova korištenja.
- (2) Parametri izmjene topline su bolji pri radu sustava s odvajačem ulja. Ulje u sustavu narušava termodinamička svojstva radne tvari te je pri radu bez odvajača ulja koeficijent prolaza topline niži, a srednja logaritamska razlika temperatura je veća što je izraženije pri većim kapacitetima hlađenja.
- (3) Kapacitet hlađenja, snaga kompresora i faktor hlađenja su povoljniji u radu sustava bez odvajača ulja. Zaključuje se da je ispitni sustav premalog kapaciteta da bi povećana koncentracija ulja u optjecaju značajnije utjecala na narušavanje radnih parametara sustava.

Ispitivani odvajač ulja komponenta je koju renomirani hrvatski proizvođač rashladnih uređaja koristi u svom proizvodnom programu. Najveći dio proizvoda izvozi na zahtjevno inozemno tržište. Zainteresiran je za rezultate ispitivanja budući u svom proizvodnom procesu nema navedenu mjernu liniju. Mjerenja u ovome radu su jedna od prvih ispitivanja ponašanja odvajača ulja na stvarnom uređaju. Valja naglasiti da je ispitni sustav razvijen prema novijim teorijskim spoznajama te primjenjuje tehnička rješenja određenih dijelova koja su novost na tržištu. Dva su moguća uzroka lošijih rezultata rada uređaja s odvajačem ulja:

- I. Visok pad tlaka u odvajaču ulja daje naslutiti da je on možda podkapacitiran.
- II. Tehničko rješenje povrata ulja u kompresor izvedeno je preko kapilare kao prigušnog elementa. Kapilara je relativno jednostavan element koji ne nudi mogućnost regulacije te postoji mogućnost da se radna tvar kroz kapilaru vraća direktno na usis kompresora.

Predlaže se nastavak istraživanja utjecaja odvajača ulja na sustavima manjeg rashladnog kapaciteta. Daljnji nastavak istraživanja dao bi bolji uvid u ponašanje parametara sustava te bi možda potvrdio neke pretpostavke o uzrocima dobivenih rezultata. Osim na manjim sustavima, utjecaj odvajača ulja valjalo bi ispitati i na većim propanskim sustavima, gdje veće količine ulja u sustavu nagovješćuju bolju opravdanost njegove primjene.

## SAŽETAK

S porastom potražnje za korištenjem radnih tvari s niskim potencijalom globalnog zagrijavanja (GWP) zbog F-gas regulative, sustavi s prirodnim radnim tvarima, uključujući ugljikovodike, postaju sve popularniji. Ugljikovodici se trenutno uglavnom koriste kao radne tvari u manjim u rashladnim uređajima u domaćinstvima, onim većim u rashladnicima kapljevine te dizalicama topline. Zbog eksplozivnih svojstava smjese zrak-propan, znanstvena zajednica bila je uglavnom usmjerena na istraživanje i razvoj halogeniranih ugljikovodika. Međutim, u posljednjih nekoliko desetljeća fokus je preusmjeren na ugljikovodike. Ovaj rad će se usredotočiti na utjecaj odvajača ulja na radne parametre propanskog rashladnog sustava, zbog toga što su dosadašnja istraživanja uglavnom bila usmjerena na termodinamička i toplinska svojstva propana. Propan se koristi za hlađenje mješavine vode i glikola, a kondenzator sustava je hlađen vodom te se koristi i izmjenjivač topline koji povećava pothlađenje vrele kapljevine i pregrijavanje usisnih para radne tvari. Sustav je opremljen sofisticiranom mjernom opremom koja omogućuje bilanciranje tokova energije, vrednovanje učinkovitosti te mjerenje parametara rada rashladnog uređaja. Cilj ovog istraživanja je utvrditi koliki utjecaj ima odvajač ulja te koliko veća koncentracija ulja u cirkulaciji utječe na radne parametre sustava.

Ključne riječi: propan, hlađenje, odvajač ulja, učinkovitost kompresora, prijenos topline

## **ABSTRACT**

With the increasing demand for use of refrigerants with low Global Warming Potential (GWP) due to F-gas Regulation, systems with natural refrigerants, including hydrocarbons, have recently increased in popularity. Hydrocarbons are currently used mostly as refrigerants in domestic refrigeration devices, chillers and heat pumps. Due to explosive properties of air-propane mixture, scientific community was mostly focused on research and development of hydrofluorocarbons. However, in the past decades, focus has shifted towards hydrocarbons. This paper will focus on the impact of an oil separator on working parameters of propane refrigeration system because research so far has mostly focused on thermodynamic and heat transfer properties of propane. Propane is used to cool the water and glycol mixture, the system condenser is cooled by water and liquid/suction vapor heat exchanger is used to increase the system subcooling and superheat. The system is equipped with sophisticated measuring equipment that allows balancing energy flows, evaluating efficiency and measuring the parameters of the operation of the refrigeration unit. The goal of this research is to determine how much of an impact does the oil separator have on performance of refrigeration system, and how much does greater concentration of oil in circulation impact the performance of the system.

Key words: propane, refrigeration, oil separator, compressor efficiency, heat transfer

## LITERATURA

- [1] V. Soldo, Nastavna predavanja iz kolegija Projektiranje rashladnih sustava, Zagreb: FSB, 2018..
- [2] Carel, »Carel,« [Mrežno]. Available: <https://www.carel.com>. [Pokušaj pristupa Travanj 2019.].
- [3] B. Pavković, Nastavna predavanja iz kolegija Tehnika hlađenja, Rijeka: Tehnički fakultet, 2006.
- [4] ASHRAE, Handbook of Refrigeration, Atlanta: ASHRAE, 2016.
- [5] M. Youbi-Idrissi i J. Bonjour, »The effect of oil in refrigeration: Current research issues and critical review of thermodynamic aspects,« *International Journal of Refrigeration*, pp. 165-179, 2 Listopad 2007..
- [6] S. Wujek, C. Bowers, P. Okarma, R. Urrego i E. Hessel, »Effect of Lubricant-Refrigerant Mixture Properties on Compressor Efficiencies,« *Internal Compressor Engineering Conference*, 2014..
- [7] W. H. Carrier, Comparison of thermodynamic characteristics of various refrigerating fluids, Waterfill, 1924..
- [8] D. R.C., »Development of chlorofluoro-carbon refrigerants,« u *ASHRAE Transactions*, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 1984., pp. 481-491.
- [9] J. Calm, »The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook,« *International Journal of Refrigeration* 31, pp. 1123-1133, 2. Veljača 2008..
- [10] Uredba (EU) br. 517/2014 Europskog parlamenta i Vijeća, 2014..

- [11] R. Ciconkov, »Refrigerants: there is still no vision for sustainable solutions,« *International Journal of Refrigeration*, 13 Prosinac 2017..
- [12] Bitzer Kuhlmaschinenbau, »Technical information,« Sindelfingen, 2014..
- [13] J. Corberan, J. Segurado, D. Colbourne i J. Gonzalez, »Review of standards for the use of hydrocarbon refrigerants in A/C, heat pump and refrigeration equipment,« *International Journal of Refrigeration*, pp. 748-756, 23 Prosinac 2007..
- [14] W. Tang, G. He, S. Zhou, W. Sun, D. Cai i M. Kui, »The performance and risk assessment of R290 in a 13 kW air source heat pump,« *Applied Thermal Engineering*, pp. 392-402, 19 Kolovoz 2018..
- [15] D. Skrzyniowska, »Presence of Contaminants in Refrigerant and Their Effect on Refrigeration Cycle,« *Journal of Energy and Power Engineering*, pp. 226-231, 28 Veljača 2014..
- [16] R. Radermacher i Y. Hwang, Vapor Compression Heat Pumps with Refrigerant Mixtures, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005..
- [17] *HRN EN 378-1: Rashladni sustavi i dizalice topline - Zahtjevi s obzirom na okoliš i sigurnost*, 2016..
- [18] D. Nasution, M. Idris i N. Pambudi, »Room air conditioning performance using liquid-suction heat exchanger retrofitted with R290,« *Case Studies in Thermal Engineering*, 4 Studeni 2018..
- [19] B. Palm, »Hydrocarbons as Refrigerants in Small Heat Pump and Refrigeration Systems - A review,« *Internal Journal of Refrigeration*, pp. 552-563, 8 Prosinac 2007..
- [20] G. Longo, M. Simone, R. Giulia i Z. Claudio, »HFC404A condensation inside a small brazed plate heat exchanger: comparison with the low GWP substitutes propane and propylene,« *International Journal of Refrigeration*, 5 Svibanj 2017..



- [21] J. Wen, X. Gu, S. Wang, Y. Li i J. Tu, »The comparison of condensation heat transfer and frictional pressure drop of R1234ze(E), Propane and R134a in a horizontal mini-channel,« *International Journal of Refrigeration*, 12 Ožujak 2018..
- [22] C. Liu, D. Wang, Z. Sun, L. Chen, J. Shi i J. Chen, »Effects of charge on the performance of R290 air conditioner with different expansion devices,« *Applied Thermal Engineering*, 19 Svibanj 2018..
- [23] E. D. Riva, D. D. Col i A. Cavallini, »Experimental Performance of a Semi-Hermetic Reciprocating Compressor working with Propane,« *International Compressor Engineering Conference*, 2010..
- [24] I. Bell, E. Groll, J. Braun i T. Horton, »Experimental testing of an oil-flooded hermetic scroll compressor,« *International Journal of Refrigeration*, pp. 1-8, 24 Siječanj 2013..
- [25] V. Soldo, Razvoj uređaja za ocjenu termodinamičke valjanosti procesa sa zeotropskim smjesama - Magistarski rad, Zagreb: FSB, 2000..
- [26] D. Dović, »Nastavna predavanja iz kolegija Laboratorijski rad - Mjerni instrumenti,« Zagreb, 2018.
- [27] I. Bell, J. Wronski, S. Quoilin i V. Lemort, »Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,« *Industrial and Engineering Chemistry Research*, svez. 53, br. 6, pp. 2498-2508, 2014.