

Zamjena radne tvari R-404A s radnom tvari srednjeg utjecaja na globalno zatopljenje u rashladnom uređaju za potrebe hlađenja na temperature više od 0 °C

Rogulj, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:507020>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mislav Rogulj

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Marino Grozdek, dipl. ing.

Student:

Mislav Rogulj

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se Dr.sc. Marinu Grozdeku na ukazanom povjerenju prilikom prihvaćanja mentorstva za ovaj rad, usmjeravanju i pruženoj stručnoj pomoći tijekom izrade rada.

Mislav Rogulj



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: **Mislav Rogulj** Mat. br.: **0035195737**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zamjena radne tvari R-404A s radnom tvari srednjeg utjecaja na globalno zatopljenje u rashladnom uređaju za potrebe hlađenja na temperature više od 0°C**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Retrofitting of a R-404A condensing unit to a fluorinated medium GWP refrigerant for a medium temperature commercial application**

Opis zadatka:

Potrebno je provesti zamjenu radne tvari R-404A s jednom od radnih tvari iz skupine HFC srednjeg utjecaja na globalno zatopljenje te utvrditi utjecaj zamjene na radne karakteristike rashladnog uređaja za potrebe hlađenja robe na temperaturama višim od 0°C (+5°C) u postojećem HCFC-22 rashladnom uređaju smještenom u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

U radu je potrebno:

- o Istražiti komercijalno dostupne radne tvari iz skupine HFC, srednjeg utjecaja na globalno zatopljenje (engl. medium GWP) adekvatne za zamjenu u postojećem HCFC-22 rashladnom uređaju smještenom u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje za potrebe hlađenja robe na srednjim temperaturama (+5°C).
- o Provesti termodinamički proračun procesa u uređaju prije i nakon provedbe postupka zamjene.
- o Nacrtaati shemu postojećeg rashladnog uređaja s prikazom svih linijskih, elektroničkih i regulacijskih elemenata.
- o Nacrtaati shemu rashladnog uređaja nakon provedbe postupka zamjene radne tvari s naznakom svih elemenata (linijskih, elektroničkih i regulacijskih) koje je potrebno zamijeniti.
- o Izvršiti zamjenu radne tvari, provesti mjerenja te analizirati dobivene rezultate.

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

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

- 1. rok: 24. veljače 2017.
- 2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
- 3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
- 3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Marino Grozdek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
1.1. HFC Phase Down.....	4
1.2. Zabrana HFC-a u novoj opremi	5
1.3. Smanjenje propuštanja uređaja	6
2. ZAMJENE ZA R404A	7
3. ISPITNI SUSTAV	13
4. TERMODINAMIČKI PROCES POSTOJEĆEG SUSTAVA	21
5. PROVOĐENJE MJERENJA.....	23
6. TERMODINAMIČKI PROCES SA NOVOM RADNOM TVARI	28
7. TEORIJSKI TERMODINAMIČKI PRORAČUN S ZAMJENSKIM RADNIM TVARIMA.....	31
7.1. Radna tvar R-407F	32
7.2. Radna tvar R-448A	34
7.3. Radna tvar R-449A	36
8. POSTUPAK ZAMJENE RADNE TVARI	40
9. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA:.....	43
PRILOZI.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1.	Tendencija korištenja radnih tvari kroz povijest [1]	1
Slika 2.	Ključni elementi F-gas uredbe [3].....	3
Slika 3.	Prikaz smanjenja radnih tvari iz skupine HFC [3]	4
Slika 4.	Prikaz zabrane HFC u pojedinim područjima [3]	5
Slika 5.	Prikaz krivulje temperature rosišta ovisno o tlaku [8]	11
Slika 6.	Shematski prikaz rashladnog uređaja [18]	14
Slika 7.	Poprečni presjek kondenzatora.....	15
Slika 8.	Isparivač	16
Slika 9.	Shematski prikaz spoja TEVV s isparivačem	17
Slika 10.	Prikaz procesa hlađenja u T,s dijagramu [10]	21
Slika 11.	Prikaz realne kompresije 2-3 u T-s dijagramu [9].....	22
Slika 12.	Pojednostavljena shema sustava i realni dijagram log p – h	22
Slika 13.	Prikaz temperature klizanja kod zeotropskih radnih tvari [12]	28
Slika 14.	Graf T-eta [11].....	29
Slika 15.	Prikaz promjene temperatura u a) kondenzator b) isparivač [16]	30
Slika 16.	Pad koeficijenta prijelaza topline uslijed prijenosa mase[16]	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zamjene s niskim GWP [4]	7
Tablica 2. Testni rezultati R-449A u odnosu na R-404A [4]	8
Tablica 3. Preporučene brzine strujanja [17].....	8
Tablica 4. Sastav R-449A i R-448A.....	9
Tablica 5. Sastav R404A, R407A i R407F	9
Tablica 6. Usporedba svojstava.....	10
Tablica 7. Usporedbe radnih karakteristika R404A i R407F [7]	10
Tablica 8. Preporuka prilikom zamjene radne tvari sa R-404A na R-407F, R-448A i R-449A	12
Tablica 9. Temperature kondenzacije, vrenja i rošenja ovisno o tlaku	23
Tablica 10. Protok vode.....	24
Tablica 11. Izmjerene vrijednosti prije zamjene RT	24
Tablica 12. Entalpije točaka	25
Tablica 13. Izračunate radne karakteristike.....	26
Tablica 14. Prikaz srednje temperature isparivanja.....	27
Tablica 15. Temperature pregrijanja i pothlađenja	27
Tablica 16. Potrebni parametri procesa.....	31
Tablica 17. Izentropski stupanj djelovanja.....	31
Tablica 18. Tlak kondenzacije za određenu srednju temperaturu kondenzacije	32
Tablica 19. Srednja temperatura isparivanja	32
Tablica 20. Entalpije točki sustava.....	33
Tablica 21. Radne karakteristike sustava	33
Tablica 22. Tlak kondenzacije za određenu srednju temperaturu kondenzacije	34
Tablica 23. Srednja temperatura isparivanja	34
Tablica 24. Entalpije točki sustava.....	35
Tablica 25. Radne karakteristike sustava	35
Tablica 26. Tlak kondenzacije za određenu srednju temperaturu kondenzacije	36
Tablica 27. Srednja temperatura isparivanja	36
Tablica 28. Entalpije točki sustava.....	37
Tablica 29. Radne karakteristike sustava	37
Tablica 30. Usporedba radnih karakteristika.....	38
Tablica 31. Usporedba radnih karakteristika.....	38
Tablica 32. Usporedba radnih karakteristika.....	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ_k	°C	Srednja temperatura kondenzacije
$\vartheta_{vr,k}$	°C	Temperatura vrenja na tlaku kondenzacije
$\vartheta_{roš,k}$	°C	Temperatura rošenja na tlaku kondenzacije
ϑ_2	°C	Temperatura na izlazu RT iz isparivača
ϑ_3	°C	Temperatura na ulazu RT u kondenzator
ϑ_4	°C	Temperatura na izlazu RT iz kondenzatora
ϑ_6	°C	Temperatura ulaza rashladne vode
ϑ_7	°C	Temperatura izlaza rashladne vode
ϑ_{hl}	°C	Temperatura Hladnjače
p_2	bar	Tlak usisnog voda (isparivanja)
p_3	bar	Tlak tlačnog voda (kondenzacije)
$q_{M,w}$	kg/s	Maseni protok vode
Φ_k	W	Učin kondenzatora
h_2	kJ/kg	Specifična entalpija točke 2
h_3	kJ/kg	Specifična entalpija točke 3
h_4	kJ/kg	Specifična entalpija točke 4
$q_{M,RT}$	kg/s	Maseni protok radne tvari
Φ_i	W	Učin isparivača
ε	/	Učinkovitost
P_{kompr}	W	Snaga kompresora
ϑ_{SH}	°C	Temperatura pregrijanja
ϑ_{SC}	°C	Temperatura pothlađenja
ϑ_i	°C	Temperatura isparivanja
η	/	Izentropski stupanj djelovanja kompresora

SAŽETAK

Pod utjecajem F-gas uredbe, radne tvari s visokim GWP-om postaju zabranjene u uporabi. Zbog toga se traže alternativne radne tvari s nižim GWP brojem kako bi se provela zamjena .

U ovom radu istražene su komercijalno dostupne radne tvari HFC skupine sa srednjim GWP faktorom te je napravljen termodinamički proračun procesa s radnom tvari R-404A i zamjenskim radnim tvarima R-448A, R-449A i R-407F. Opisani su prednosti i nedostaci pri zamjeni radne tvari kao i postupak same zamjene. Navedene su komponente sustava s opisom i ulogom te dijelovi koji zahtijevaju zamjenu jer nisu kompatibilni s novom radnom tvari.

Ključne riječi: HFC, R-404A, R-407F, R-448A, R-449A, zamjena radne tvari

SUMMARY

Under the influence of F-gas regulation, refrigerants with high GWP factor are becoming banned to use. Therefore, alternative refrigerants with lower GWP factor are sought for retrofitting.

In this study it is looked into commercially available HFC refrigerants with medium GWP factor and thermodynamic calculation of process with refrigerant R-404A and its retrofits R-448A, R-449A and R-407F is presented. Advantages and disadvantages are described for each refrigerant as well as the procedure of retrofitting. Components of a system are listed with description and role as well as parts that require replacement because they are not compatible with a new refrigerant.

Key words: HFC, R-404A, R-407F, R-448A, R-449A, retrofitting

1. UVOD

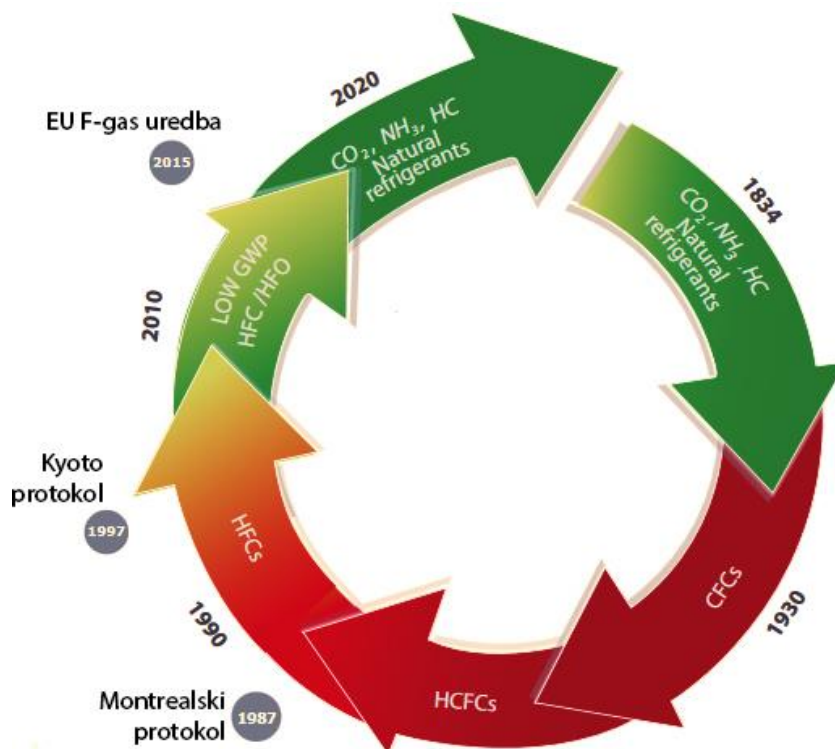
U počecima razvoja tehnologije rashladnih sustava koristile su se samo prirodne radne tvari.

Do 1930-ih se uočava da prirodne radne tvari nisu potpuno sigurne (bilo je slučajeva požara i trovanja uslijed curenja radnog medija). Zbog toga se istražuju sigurnije radne tvari koje su bile sintetičke tj. proizveo ih je čovjek. Tako počinje uporaba CFC i HCFC koji do sredine 20.stoljeća preuzimaju vodeću primjenu radnih tvari u rashladnoj tehnici zbog svojih pogodnijih svojstava.

U 1970-ima je prepoznato da te radne tvari imaju negativan utjecaj na ozonski omotač (ODP=Ozone Depleting Potential, $ODP \neq 0$).

Zbog toga je osnovan Montrealski protokol te se uvode HFC radne tvari kao zamjena koji imaju $ODP=0$ ali imaju srednji do visoki GWP (Global Warming Potential).

GWP je mjera kojom se opisuje utjecaj jedinične mase na globalno zatopljenje u odnosu na istu masu ugljikovog dioksida. GWP vrijednost je definirana za interval od 100 godina, ali s obzirom na to da se većina fluoriranih plinova (F-plinova) zadržava u atmosferi oko 20 godina, njihova stvarna vrijednost je zapravo mnogo veća.



Slika 1. Tendencija korištenja radnih tvari kroz povijest [1]

Kyoto protokolom 1997. Europska unija obvezala se smanjiti emisiju stakleničkih plinova za 80-95% do 2050. u odnosu na razinu iz 1990. Zbog toga je Europska komisija usvojila plan za prelazak na konkurentnu niskougljičnu ekonomiju do 2050. godine.

Plan se sastoji od troškovno učinkovitih smanjenja u pojedinim sektorima, posebice smanjenje emisije F-plinova koje bi trebalo smanjiti za više od 70%.

Da bi dosegli taj cilj Europska unija je 2006. godine usvojila 2 ključna zakonska akta:

- MAC direktivu koja se odnosi na mobilne sustave klimatizacije
- F-gas uredbu koja je upotpunjena 2015. godine.

MAC direktiva se sastoji od 3 faze kojima je konačni cilj izbaciti iz uporabe u nestacionarnim sustavima klimatizacije radne tvari koje imaju GWP veći od 150.

Prva faza

Od 21.6.2008. proizvođači automobila neće moći dobiti dozvolu za novu vrstu automobila ukoliko:

- sadrži radne tvari s GWP-om većim od 150
- propušta više od 40 grama radne tvari godišnje (sustav s jednim isparivačem)
- propušta više od 60 grama radne tvari godišnje (sustav s 2 isparivača)

Od 21.06.2009 ovo pravilo se primjenjuje na sva nova vozila na tržištu EU. [15]

Druga faza

Od 1.1.2011. sustav u novim vozilima mora sadržavati radnu tvar koja ima nizak utjecaj na globalno zatopljenje, tj. radna tvar s GWP-om većim od 150 ne može biti korištena.

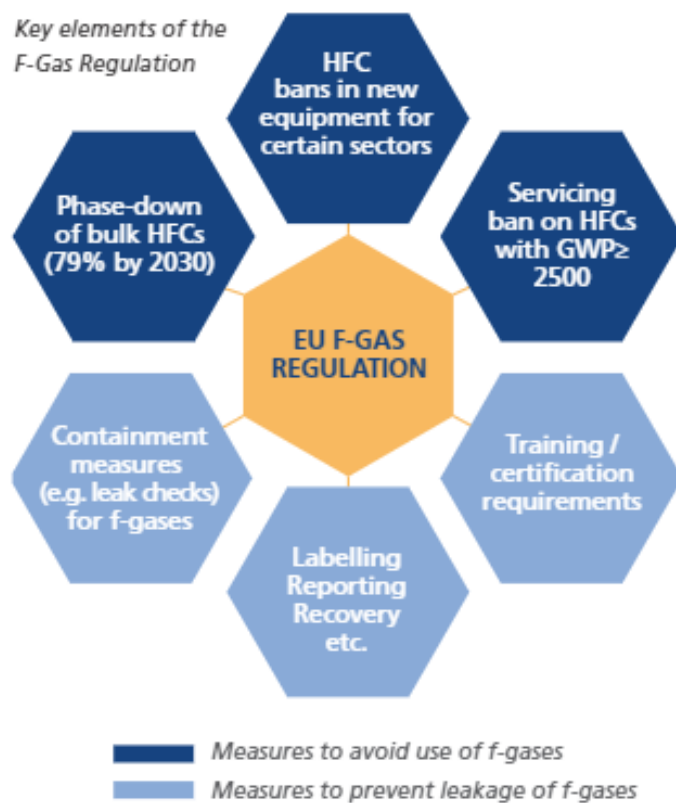
Treća faza

Od 1.1.2017. korištenje F-plinova s GWP-om većim od 150 u svim novim vozilima koji su plasirani na tržište EU je zabranjeno.

Vozila koja koriste radne tvari s GWP većim od 150 neće se moći registrirati niti prodavati. [15]

Cilj F-gas uredbe je smanjenje prosječnog GWP-a F-plinova koji je danas oko 2000 na ispod 400 do 2030. godine. Smanjenje se planira provesti kroz nekoliko ključnih elemenata koji se međusobno nadopunjuju.

Svaka akcija F-gas uredbe ima za posljedicu smanjenje propuštanja radnog medija unutar sustava ili smanjenje uporabe F-plinova[Slika 2].



Slika 2. Ključni elementi F-gas uredbe [3]

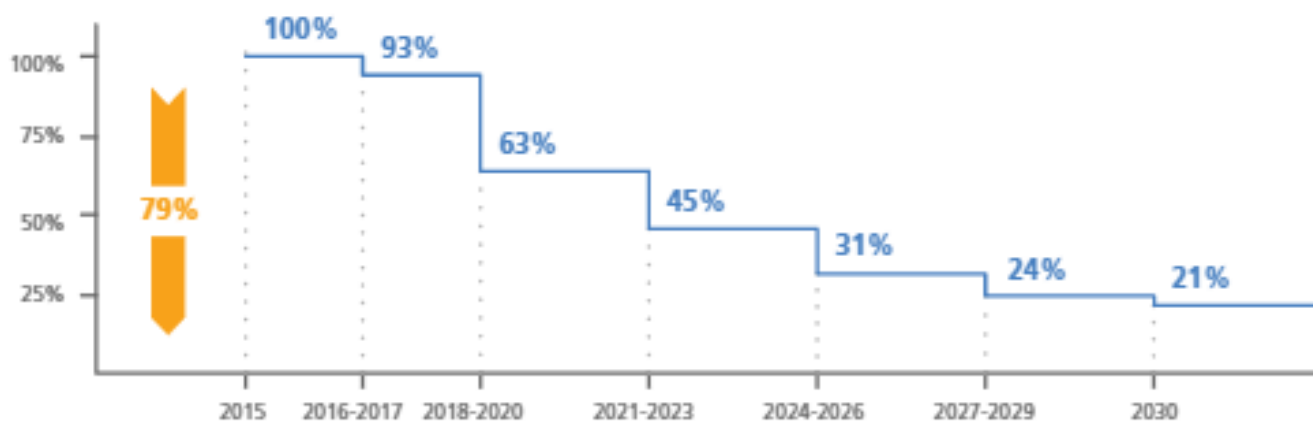
1.1 HFC Phase Down

Postupno smanjivanje korištenja HFC radnih tvari jedna je od ključnih elemenata uredbe. Plan je da se smanji uporaba HFC-a za 79% do 2030 u odnosu na prosječnu količinu u razdoblju između 2009. - 2012. godine.

Proizvođačima i uvoznicima fluoriranih stakleničkih plinova propisane su kvote HFC-a koje mogu biti plasirane na tržište, odnosno implementirane u sustave, zatim se te kvote postupno smanjuju sve do 2030. godine.

Efekti postupnog smanjenja korištenja neće biti vidljivi odmah za proizvođače i krajnje korisnike. Prvi značajni pad kvote HFC-a desit će se 2018. godine i to će utjecati na cijenu HFC-a, koji će postati manje rašireni i slabije dostupni.

Ovakva akcija bi trebala uzrokovati smanjenje prosječnog GWP-a HFC-a sa sadašnjih 2000 na otprilike 400, a prirodne tvari bi trebale igrati veliku ulogu u ostvarenju toga cilja pošto je njihov GWP vrlo nizak ili u slučaju amonijaka jednak nuli. [3]



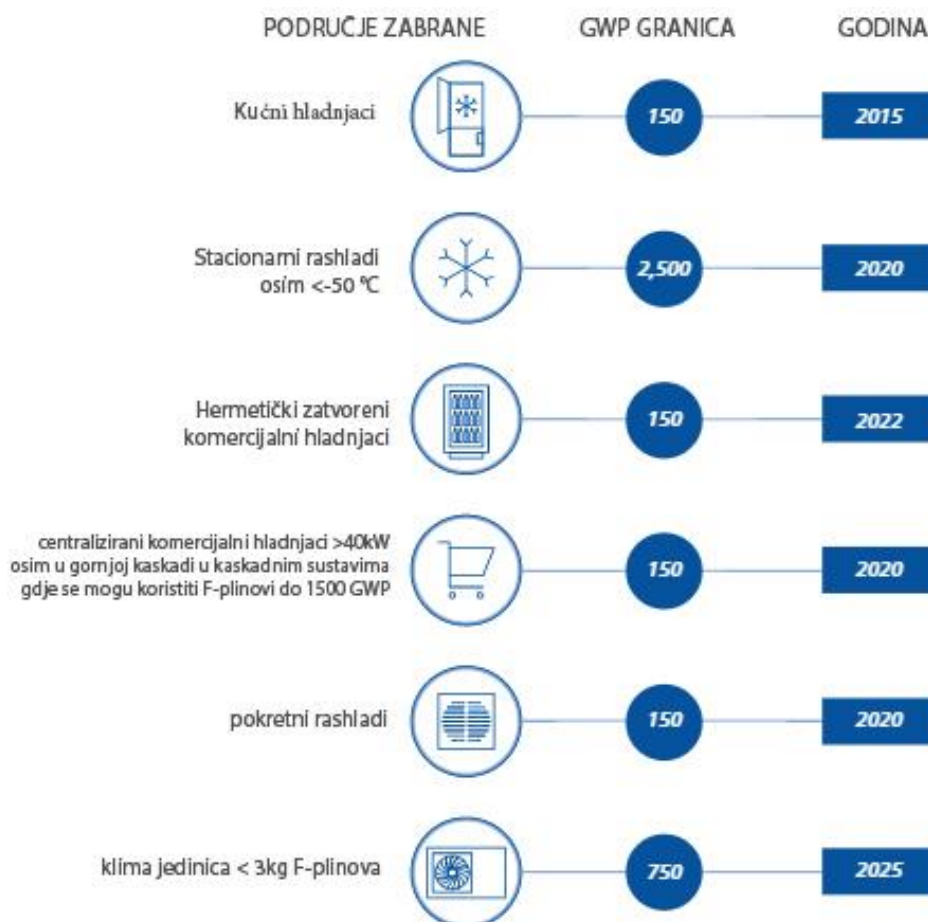
Slika 3. Prikaz smanjenja radnih tvari iz skupine HFC [3]

1.2 Zabrana HFC-a u novoj opremi

Drugi ključni element F-gas uredbe je postupna zabrana HFC radnih tvari s visokim stupnjem GWP-a u određenim područjima. Zabrana HFC-a se već provela u nekoliko područja gdje su postojale sigurne, energetske učinkovite i ekonomski opravdane radne tvari.

Tako se npr. od 2022. godine predviđa korištenje radnih tvari s $GWP < 150$ u komercijalnom sektoru. Osim zabrane u novoj opremi od 2020. uredba zabranjuje servisiranje postojećih sustava s HFC-om koji imaju GWP veći od 2500 a izuzetak čine:

- Punjenja s manje od 40 tona ekvivalentnog CO₂
- Temperature hlađenja ispod -50°C
- Vojna oprema.
- Reciklirane radne tvari. Dopušteno servisiranje do 2030. Godine nakon čega nije dopušteno.[3]



Slika 4. Prikaz zabrane HFC u pojedinim područjima [3]

1.3 Smanjenje propuštanja uređaja

Osim prethodnih ključnih elemenata uredbe kojima je cilj smanjenje uporabe HFC u novim i postojećim sustavima dio F-gas uredbe sadrži mjere za smanjenje i prevenciju curenja radnog medija.

Kontrola propuštanja je obvezna za određenu vrstu opreme, posebice za velike sustave. Učestalost takvih kontrola će ovisiti o CO₂ ekvivalentu korištenog radnog medija umjesto o masi radnog medija kako je do sada bio slučaj. To bi trebalo bolje reflektirati utjecaj medija na okoliš i potaknuti korištenje prirodnih radnih tvari. [3]

Kontrola propuštanja ovisi o veličini i vrsti sustava, a učestalost se smanjuje za pola ako je ugrađen sustav za detekciju propuštanja.

Uredbe još određuje obavezne zahtjeve za obuku tehničara i osoblja uključenih u rukovanju HFC-a. Ti zahtjevi se tiču stacionarnog hlađenja, klima uređaja, dizalica topline i hladnjaka kamiona i prikolica, a svi tehničari koji obavljaju djelatnost na opremi moraju imati certifikat za rukovanje HFC-om. Certifikati izdani u jednoj zemlji će vrijediti i u ostalim zemljama.

2. ZAMJENE ZA R404A

R404A je trokomponentna smjesa koja se sastoji 44% R-125, 4% R-134a i 52% R-143a. To je pseudo azeotropna smjesa jer je temperatura klizanja skoro zanemariva i iznosi nešto ispod 1 °C.

Koristi se za široku primjenu od -45 °C do +15 °C temperature isparavanja, naročito kao radni medij u hladionicima supermarketa.

Iako postoje radni mediji s boljim svojstvima (bolji volumetrički učinak i niži GWP) R-404A se zadržao u primjeni zbog toga što se pojavio u prijelaznom periodu 1990-ih i bio je dobro reklamiran. Krajnji korisnici i projektanti rashladnih sustava su postali upoznati s njim te su ga nastavili koristiti.[5]

Zamjene za R-404A s GWP-om između 200-500 su mješavine R-32 i R-1234yf ali je njihov problem što imaju višu klasu zapaljenja te takve radne tvari imaju dodatne zahtjeve na sigurnost i zahtijevaju dodatnu opremu u postrojenju. Ove radne tvari se neće moći koristiti u hermetički zatvorenim sustavima jer F-gas uredba od 2022.godine postavlja gornju granicu od GWP=150 za takvo područje primjene.

Radna tvar	R32 / R1234yf [maseni udio %]	Klasa zapaljenja	GWP
ARM-30a	(29 / 71)	A2L	199
D2Y65	(35 / 65)	A2L	235
DR-7	(36 / 67)	A2L	246

Tablica 1. Zamjene s niskim GWP [4]

Zbog tih se razloga tranzicija na zapaljive radne tvari neće dogoditi brzo te su potrebne druge opcije.

Potencijalnu zamjenu predstavljaju smjese s HFO i HFC radnim tvarima s nešto nižim vrijednostima GWP-a u rasponu od 1300 – 1600. Arkema, DuPont i Honeywell neke su od firmi koje su testirale različite udjele komponenti da bi dobili nezapaljivu radnu tvar kao alternativu za R-404A.

R-448A i R-449A su neke od tako dobivenih smjesa koji imaju GWP od oko 1400. [4]

R-449A je razvila firm DuPont i na tržištu plasira taj proizvod pod imenom Opten XP40. Sastoji se od skoro jednakih masenih udjela radnih tvari R-32, R-125, R-1234yf i R-134a (24.3 / 24.7 / 25.3 / 25.7). Temperatura klizanja iznosi oko 4 K. To je nezapaljivi radni medij koji je sličan R-404A i pogodan je za nove sustave i za retrofit postojećih.

	Srednje temperature isparivanja		Niske temperature isparivanja	
	28	35	28	35
Temperatura okoliša [°C]	28	35	28	35
Potrošnja energije	-8%	-12%	-3%	-4%
Relativni maseni protok	-16%	-17%	-19%	-21%
Tlak u usisnom vodu [kPa]	+0	+35	-8	-12
Tlak u tlačnom vodu [kPa]	-48	-35	-31	-37
Temperatura u tlačnom vodu [K]	+3	+2	+5	+5

Tablica 2. Testni rezultati R-449A u odnosu na R-404A [4]

Prema rezultatima istraživanja koje je predstavio DuPont R-449A pokazuje bolju učinkovitost sustava ali i nešto veću izlaznu temperaturu iz kompresora kao i smanjeni maseni protok, pritom je jedina zamjena na sustavu bio termoekspanzijski ventil. Vrijednosti su prikazane u odnosu na R-404A, a znak “+“ znači povećanje, a “-“ smanjenje.

Prilikom retrofita treba paziti na preporučene brzine strujanja [Tablica 3] i veličine cijevi jer se maseni protok smanjio. Brzina strujanja RT mora biti dovoljno velika da se mazivo ulje transportira natrag u kompresor i dovoljno mala da ne premaši preporučene padove tlaka. U slučaju premale brzine strujanja ulje bi se akumuliralo u najhladnijem mjestu tj. u isparivaču i tako bi se snižavao prolaz topline i učin isparivača.

Radna tvar	Usisni vod [m/s]	Tlačni vod [m/s]	Kapljevinski vod [m/s]
Halogenirani ugljikovodici	8-12	10 – 15	0.4 – 1.2

Tablica 3. Preporučene brzine strujanja [17]

R-448A je smjesa koju je razvio Honeywell, vrlo je slična R-449A a na tržištu se zove Solstice N40. Sadrži sličan udio komponenti kao i R-449A s tim da ima mali dodatak radne tvari R-1234ze(E).

	R-32	R-125	R-1234yf	R-134a	R-1234ze
R-449A	24.3 %	24.7 %	25.3 %	25.7 %	/
R-448A	26 %	26 %	20 %	21 %	7 %

Tablica 4. Sastav R-449A i R-448A

Rezultati istraživanja koje provodi Honeywell pokazuju oko 3% bolju učinkovitost pri niskim temperaturama isparivanja (-30°C) te oko 3-8% bolju učinkovitost pri srednjim temperaturama isparivanja (-11°C) nego isti sustav s radnom tvari R-404A.

Moguće zamjene koje se već koriste za retrofit postojećih sustava su R-407A i R-407F. Obje mješavine se sastoje od komponenti R-134a, R-125 i R-32 ali u drukčijim udjelima [Tablica 5].

Važno je napomenuti da ove alternative ne predstavljaju dugoročno rješenje zbog previsokih GWP vrijednosti.

	R-143a	R-32	R-125	R-134a
GWP	4470	675	3500	1430
Postotak od svake komponente (%)				
R-404A	52	0	44	4
R-407A	0	20	40	40
R-407F	0	30	30	40

Tablica 5. Sastav R404A, R407A i R407F

R-32 se primarno koristi kao komponenta za mješavine zbog malog GWP-a, ono što predstavlja problem u obliku zasebne radne tvari je veća klasa zapaljivosti koja zahtjeva dodatne sigurnosne mjere, pogotovo u instalacijama koja se nalaze u zgradama.

Radna tvar	R-404A	R-407A	R-407F
Klasa Zapaljivosti	A1	A1	A1
Temperatura isparavanja za tlak od 101325 Pa, [°C]	-46,5	-46	-46,1
Kritična temperatura, [°C]	72	82	82,6
Kritični tlak, [bar]	37,3	45	47,5
GWP	3922	2107	1824
GWP kao % od R404A	100%	54%	46%
Temperatura klizanja, °C	0.9	4	3-6
Vrsta ulja s kojim je kompatibilno	POE	POE	POE

Tablica 6. Usporedba svojstava

Kod usporedbe radnih karakteristika između radne tvari koja ima neznatnu temperaturu klizanja i druge radne tvari koja značajnu temperaturu klizanja treba se gledati srednja temperatura isparivanja tj. kondenzacije.

Za isti ciklus, srednja temperatura radne tvari R-407A / F ima oko 2°C višu temperaturu nego točka rosišta radne tvari R-404A. [Tablica 7].

Model	Radna tvar	Parametri sustava	Učin isparivača	Snaga kompresora	COP
MTZ80-4	Rosište R-404A	-10/45°C SH:10K / SC:0K	10466 W	5609 W	1.87
ne može se usporediti sa					
MTZ80-4	Rosište R-407F	-10/45°C SH:10K / SC:0K	10138 W	5038 W	2.01
ali se može usporediti sa					
MTZ80-4	Rosište R-407F	-8/47°C SH:10K / SC:0K	10851 W	5354 W	2.03

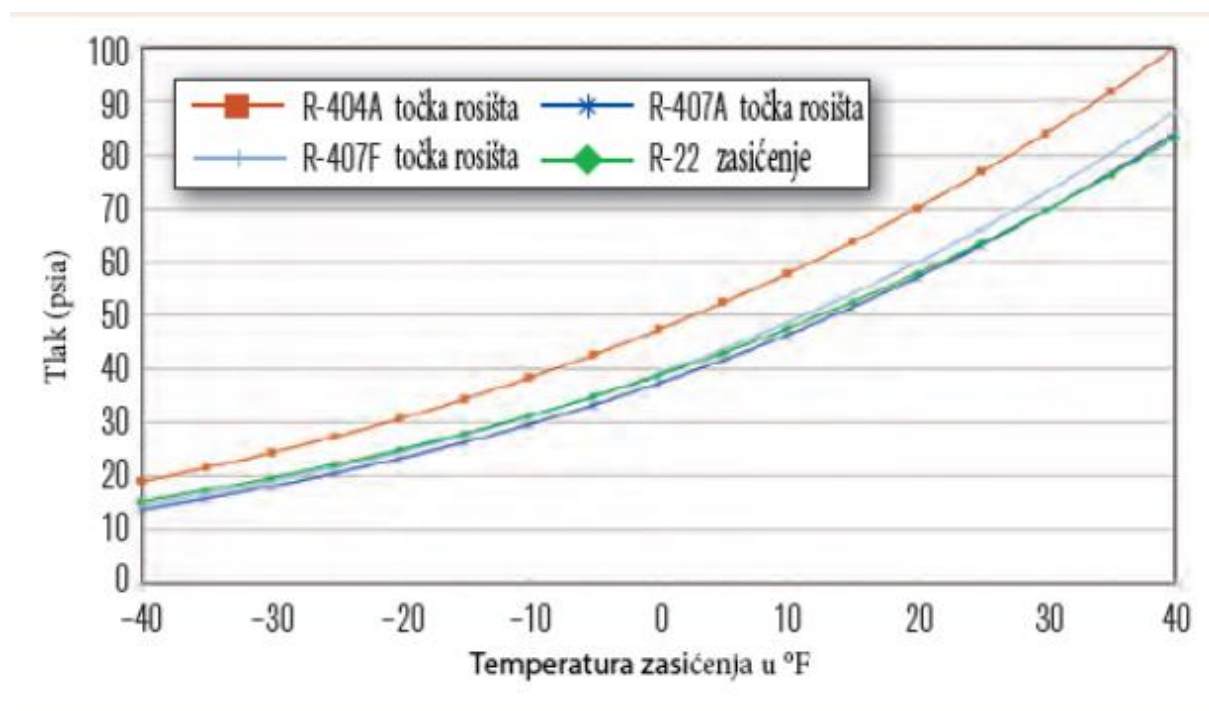
Tablica 7. Usporedbe radnih karakteristika R404A i R407F [7]

Pozornost prilikom zamjene radne tvari treba obratiti na:

- -nešto višu temperaturu na izlazu iz kompresora (pogotovo kod R-407F)
- -temperaturu klizanja
- -kompresor mora biti kompatibilan s novom radnom tvari
- -isparivač ne bi smio biti potopljenog tipa zbog zeotropskih karakteristika RT.
- -sapnice na termoekspanzijskom ventilu obično treba zamijeniti jer će za isti kompresor biti manji maseni protok (do 40% manji kod R-407F)
- -punjenje TEV osjetnika.

R-407F i R-407A su kompatibilni s istim uljima (POE) i elastomernim brtvama i kao i R-404A.

U slučaju upotrebe TEV ventila, trebaju se koristiti oni koji su dizajnirani za R-22 zbog toga što karakteristika dobro prati karakteristiku R-407A / F i R-448A, R-449A.[Slika 5]



Slika 5. Prikaz krivulje temperature rosišta ovisno o tlaku [8]

Konačni izbor prilikom retrofita ovisi o trenutnoj cijeni dostupnih radnih tvari i ekonomskoj isplativosti kao i o namjeni sustava.

Ispod je izvadak iz Ashrae Journal-a (siječanj 2017.) koji predstavlja dobru inženjersku praksu prilikom zamjene R-404A na R-407A / F, R-448A i R-449A.

(Za detaljnije opise komponenti i zeotropskih zamjena s visokom temperaturom klizanja pogledati kolumne u brojevima studeni i prosinac 2016. s naslovom „High-Glide Refrigerant Blends & System Retrofits“)

Komponenta	Postojeći je	Provjeriti veličinu?	Preporuka
Razdjelnik (napajač)	Vjerojatno ok	Obavezno	Zamijeniti ako veličina nalaže
TEV(velična sapnice)	Moguće prevelik	Obavezno	Zamijeniti TEV
TEV(punjenje)	Nije kompatibilno	/	Zamijeniti sa R-22 elementom
Magnetski ventil u kaplj. Vodu	Moguće prevelik	Obavezno	Zamijeniti ako veličina nalaže
Regulator tlaka isparivanja (vanjski)	Vjerojatno ok	Preporuča se	Zamijeniti ako veličina nalaže
Regulator tlaka isparivanja (unutarnji)	Vjerojatno ok	Obavezno	Zamijeniti ako veličina nalaže
Regulator tlaka isparivanja (električni)	Vjerojatno ok	Preporuča se	Zamijeniti ako veličina nalaže
Magnetski ventil u usisnom vodu	Vjerojatno ok	Preporuča se	Zamijeniti ako veličina nalaže
Filtar sušač	Vjerojatno dobra veličina ali kontaminiran	Preporuča se	Promijeniti filtari sušač
Filtar na usisu	Vjerojatno dobra veličina ali kontaminiran	Preporuča se	Promijeniti filtari na usisu
Ulje za podmazivanje	Kompatibilno	/	Promijeniti zbog dekontaminacije
Elastomerne brtve	Moguća propuštanja	/	Preporuča se promijeniti

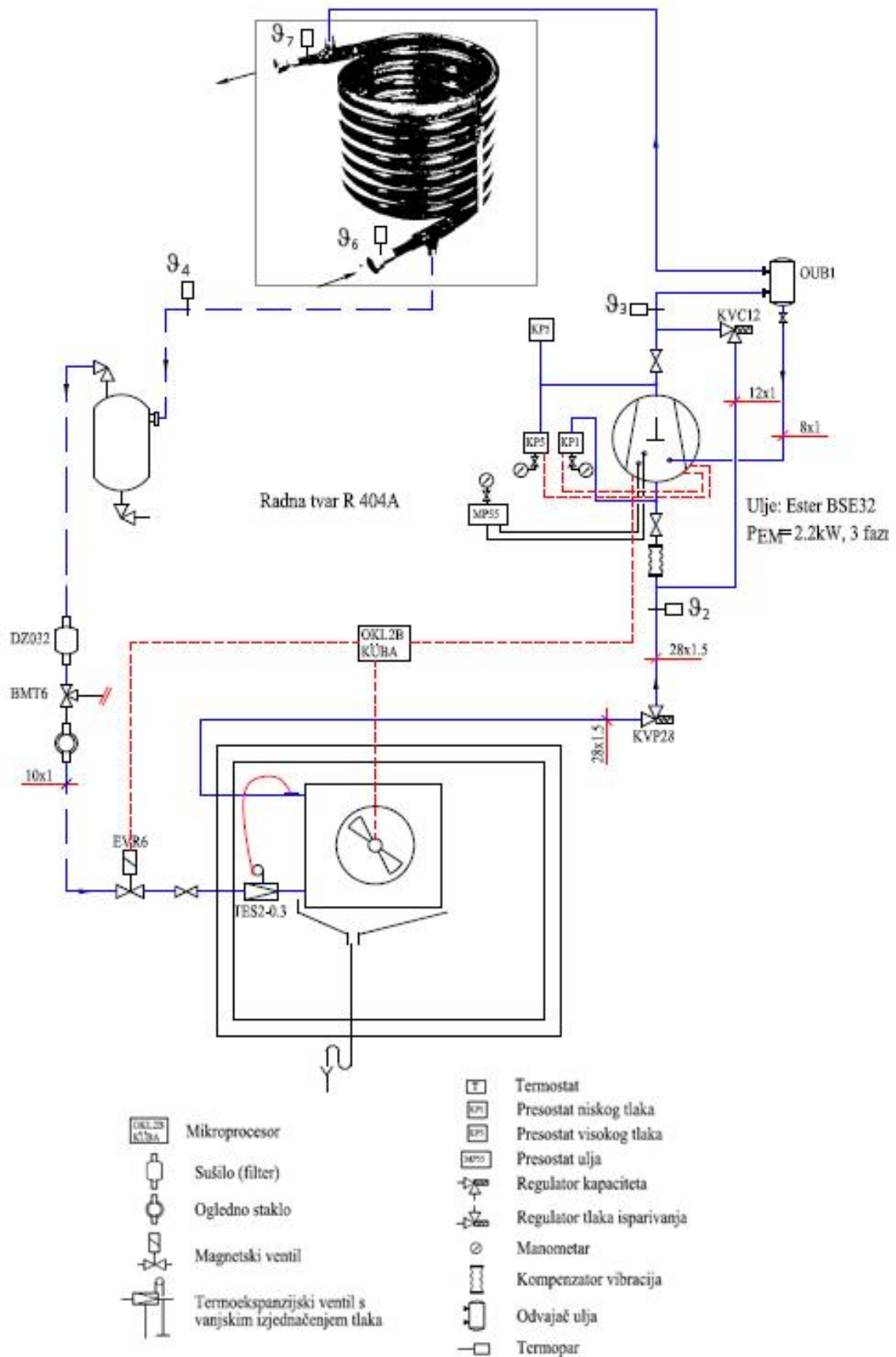
Tablica 8. Preporuka prilikom zamjene radne tvari sa R-404A na R-407F, R-448A i R-449A

3. ISPITNI SUSTAV

Osnovne komponente jednog rashladnog sustava su isparivač, kompresor, kondenzator i ekspanzijski ventil. Sustav koji mi promatramo osim osnovnih komponenti opremljen je i termoparovima za mjerenje temperature te mjerilima tlaka.

Uređaj se sastoji od sljedećih komponenata:

- *Kompresor*
- *Kondenzator*
- *Prigušni ventil*
- *Isparivač*
- *Spremnik ukapljene radne tvari (receiver)*
- *Odvajač ulja*
- *Sušilo (filter)*
- *Ogledno staklo*
- *Regulator tlaka isparivanja*
- *Regulator kapaciteta*
- *Sigurnosna automatika*
 - *presostat niskog tlaka*
 - *presostat visokog tlaka*
 - *presostat ulja*
 - *termostat zraka*
 - *magnetski ventil*



Slika 6. Shematski prikaz rashladnog uređaja [18]

Kompresor

Kompresor je standardni poluhermetički s dva cilindra. Elektromotor kompresora hladi se parom radne tvari, koja struji oko elektromotora prije ulaska u kompresor. [6]

Podmazivanje svih pokretnih dijelova kompresora izvodi se pomoću uljne crpke a za kontrolu razine ulje postoji i pokazno staklo na karteru kompresora.

Da bi se minimiziralo otapanje radne tvari u ulju a samim time i pogoršanje mazivih karakteristika ulja u sustav se implementiralo nekoliko postupaka:

- ugrađena je uljna klopka nakon isparivača
- minimizirana količina radne tvari u odnosu na količinu ulja
- separator ulja OUB1
- električni grijač ulja snage 70W koji u stanju mirovanja temperaturu ulja održava većom od ostatka sustava i tako smanjuje udio otopljene radne tvari
- ispušavanje isparivača prilikom zaustavljanja procesa (tzv. pump down)

Kondenzator

Vodom hlađeni koaksijalni cijev-u-cijev protustrujni izmjenjivač.

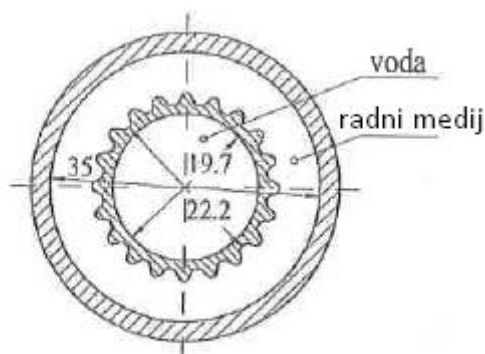
U kondenzatoru se vruće pare radne tvari iz kompresora prvo hlade, kondenziraju te pothlađuju prije napuštanja kondenzatora.

Unutar vanjskog plašta je jedna cijev kroz koju struji voda, a oko struji radna tvar.

Orebrenje na vanjskoj strani unutarnje cijevi [Slika 7] je izvedeno zbog povećanja površine izmjene topline između dvaju medija.

-unutarnji promjer vanjskog plašta = 35 mm

-dimenzije unutarnje cijevi – 22.2 x 1.25 x 6000 mm



Slika 7. Poprečni presjek kondenzatora

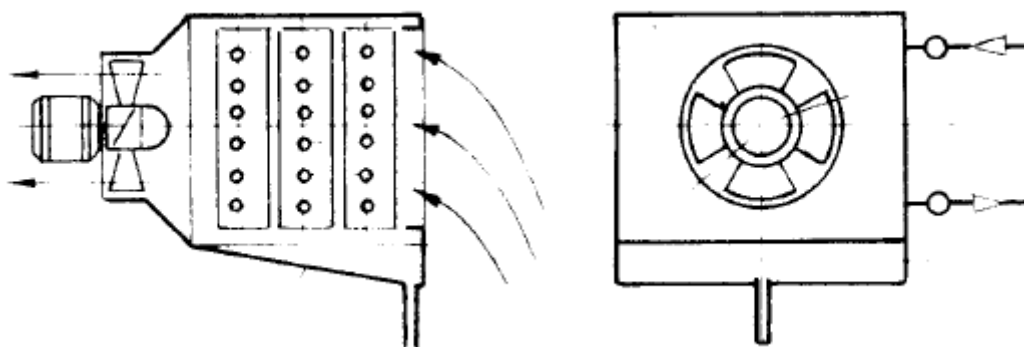
Sabirnik

Uloga sabirnika u sustavu je prihvat ukapljene radne tvari iz kondenzatora ili čitavog sustava, akumulacija radne tvari za trenutačne potrebe isparivača te održavanje kondenzatora praznim. Zapremnina sabirnika je 7.8 litara.

Isparivač

Izveden je od tipskih cijevnih bakrenih sekcija dok je orebrenje izvedeno aluminijskim lamelama na strani zraka čime se povećala površina izmjene topline. Aksijalni ventilator se koristi za ostvarivanje prinudnog strujanja zraka preko površine isparivača. Postavljen je tako da siše zrak kroz poprečno postavljene pakete orebrenih cijevi i ubacuje ga u hladni prostor. Odleđivanje isparivača se provodi pomoću električnih grijača štapne izvedbe ugrađenim u konstrukciju isparivača.

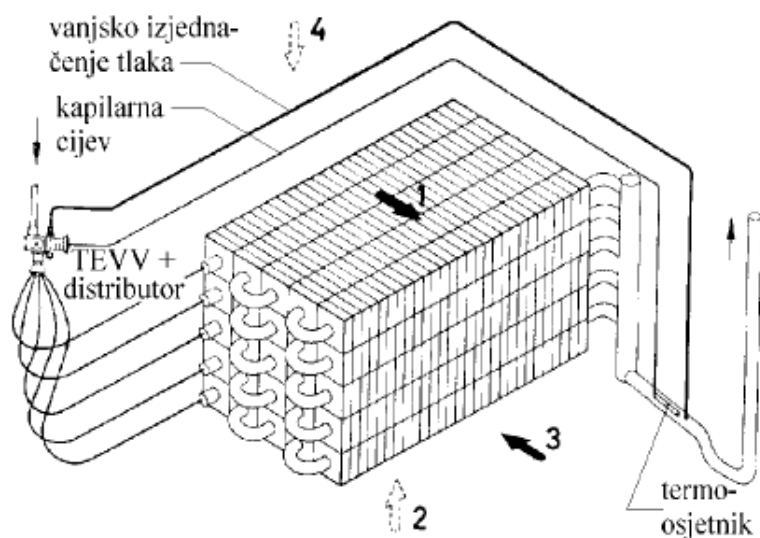
S donje strane isparivača postavljena je okapnica za sakupljanje vode pri odleđivanju isparivača a kondenzat se kroz priključak na okapnici odvodi izvan hladnog prostora.



Slika 8. Isparivač

Ekspanzijski ventil

Doziranje i prigušivanje radne tvari s tlaka kondenzacije na tlak isparivanja vrši se u termoekspanzijskom ventilu s vanjskim izjednačenjem tlaka (TEVV). Termoekspanzijski ventil ima zadatak doziranja točno onolike količine radnog medija, koliko može ispariti u isparivaču i pregrijati se za namješteno pregrijanje.



Slika 9. Shematski prikaz spoja TEVV s isparivačem

Odvajač ulja

Ima ulogu odvajanja ulja u tlačnom vodu i odvođenja nazad u karter kompresora zbog podmazivanja. Time se sprečava da ulje iz kompresora s radnom tvari dospije u rashladni optok te da se nakuplja u isparivaču. Produljuje se vijek trajanja kompresora i smanjuje se korozija. Kontrolno stakalce na karteru kompresora može dati informaciju o stanju unutar ulja sustava. Kada sustav miruje stakalce bi trebalo biti 2/3 ispunjeno uljem, dok je sustav u pogonu ta razina bi trebala pasti na 1/3. Ukoliko ulje potpuno prekriva ogledno staklo to znači da je dio RT otopljen u ulju a rješenje je ugradnja električnog grijača. Ako je razina ulja jedva vidljiva ili je nema to ukazuje na nedostatak ulja.

Sušilo (filter)

Filtar sušać u sustavu služi da održava radnu tvar bez vlage i mehaničkih nečistoća. Vlaga unutar rashladnog sustava može dovesti do niza problema:

- Blokiranja prigušnog ventila zbog stvaranja leda
- Korozije metalnih dijelova
- Kemijskog razaranja izolacije u hermetičkim ili polu - hermetičkim kompresorima
- Razgradnju ulja(stvaranje kiselina)

Vlaga može prodrijeti u sustav kroz nekoliko načina:

- Pri ugradnji rashladnog sustava
- Pri otvaranju rashladnog sustava za vrijeme servisa
- Kod propuštanja na usisnom cjevovodu, prilikom vakuumiranja
- Ako ulje ili rashladna tvar kojom se puni instalacija sadrži vlagu
- Kod propuštanja vodom hlađenih kondenzatora

Filtri za HFC radne tvari sadrže 100% molekularnog sita za razliku od filtra za CFC i HCFC koji se sastoje od 80% molekularnog sita i 20% aktivnog aluminij oksida.[17]

Ogledno staklo

Postavlja se u rashladnom sustavu ispred ili iza filtra sušača. Služi za pokazivanje stanja radne tvari u kapljevinskom vodu(mogući mjehuri pare zbog nedovoljnog pothlađenja). Opremljen je i indikatorom vlage, čija se boja mijenja ovisno o sadržaju vlage u rashladnom sustavu.

- Zelena boja - nema vlage u sustavu
- Žuta boja - vlaga u sustavu
- Smeđa boja - čestice prljavštine u sustavu
- Čista para - nedostatak radne tvari, zatvoren ventil na kapljevinskom vodu, začepljenje u sustavu, itd.
- Kapljevina i mjehuri pare - nedovoljno radne tvari u sustavu, ventil na kapljevinskom vodu djelomično zatvoren, itd.

Regulator tlaka isparivanja (KVP)

Ugrađen je u usisni vod iza isparivača i održava konstantni tlak isparivanja a time i temperaturu isparivanja. Prigušivanjem usisnog voda dozira protok radne tvari i prilagođava se opterećenju isparivača. Također osigurava od preniskog tlaka isparivanja jer se regulator zatvara ako tlak u isparivaču padne ispod dopuštene vrijednosti.

Regulator kapaciteta (KVC)

Ugrađen je u obilazni vod između usisne i tlačne strane. Služi za regulaciju rada kompresora kada nije potreban nazivni učin tako da se niskotlačnoj strani dovodi vrući plin s visokotlačne strane. Time se postiže dulji vijek trajanja kompresora jer se izbjegava često uključivanje i isključivanje.

Presostat niskog tlaka (KP1)

Dio je sigurnosne automatike, a osigurava kompresor od preniskog usisnog tlaka. To je tlačno upravljani električni prekidač na kojem je namještena veličina najnižeg dopuštenog tlaka u sustavu.

Presostat visokog tlaka (KP5)

Također tlačno upravljani električni prekidač koji gasi kompresor ukoliko dođe do previsokog tlaka kondenzacije. Presostat visokog tlaka je presostat s ponovnim ručnim upuštanjem, što znači da treba resetirati presostat nakon što se otklonila smetnja te se onda može upaliti kompresor.

Presostat ulja (MP55)

Koristi se na kompresorima s mehaničkim podmazivanjem a regulira razinu uljnog tlaka. Ovo je također presostat s ponovnim ručnim upuštanjem.

Izolacija

Izolacija se postavlja zbog:

- Svođenja dobitaka/gubitaka na minimum
- Onemogućavanja rošenja vodene pare na hladnim stijenkama uređaja za najnepovoljnije uvjete rada

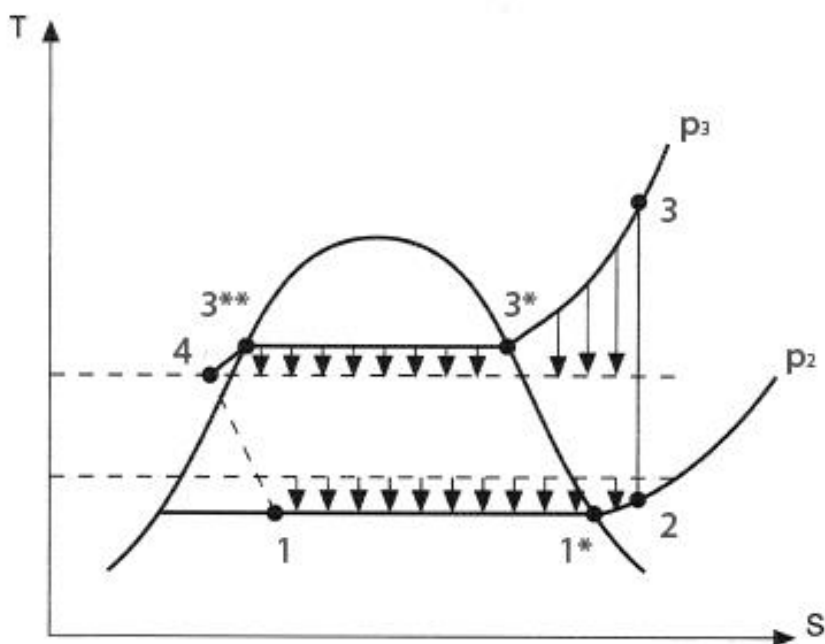
Potrebni dijelovi uređaja su izolirani AF/Armaflex izolacijom tvrtke Armstrong. To je fleksibilan izolacijski materijal zatvorenih ćelija na bazi sintetičkog kaučuka koji ujedno služi kao parna brana.

4. TERMODINAMIČKI PROCES POSTOJEĆEG SUSTAVA

Rashladni proces [Slika 10] se sastoji od isparivanja radne tvari u isparivaču(1*-1), pregrijavanja(1*-2) koje kontrolira termoekspanzijski ventil (okvirni raspon je 4-8 °C). Pregrijavanje (eng. superheating) je potrebno kako ne bi došlo do hidrauličkog udara unutar kompresora tj. da kompresor ne povuče kapljevitu fazu.

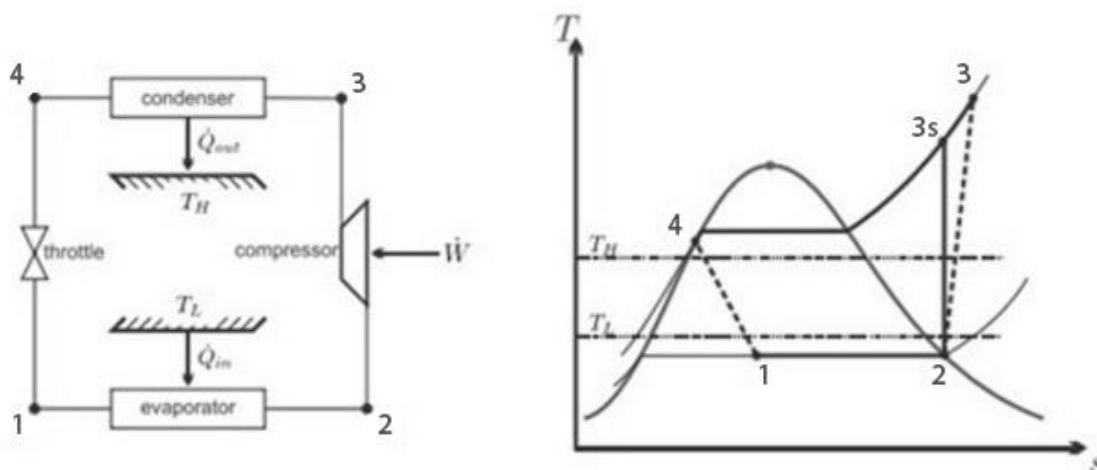
Nakon toga, kompresor usisava pregrijanu paru i tlači je na viši energetski nivo(2-3). Poslije kompresora pregrijane pare ulaze u kondenzator gdje se hlade(3-3*), kondenziraju(3*-3**) i pothlađuju(3**-4). Pothlađivanje (eng. subcooling) se provodi kako bi prigušni ventil dobio samo kapljevitu fazu, pošto ne može pravilno funkcionirati ako do njega dođe plin tj. para.

Prigušni ventil ili ekspanzijski ventil prigušuje radnu tvar(4-1) s tlaka kondenzacije p_3 na tlak isparivanja p_2 .



Slika 10. Prikaz procesa hlađenja u T,s dijagramu [10]

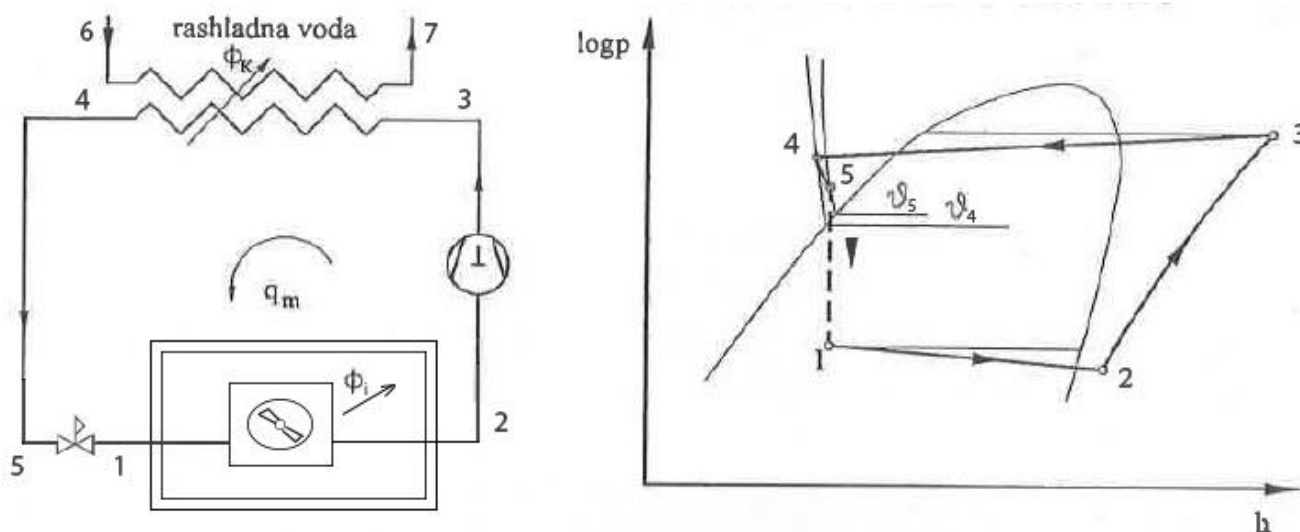
Kompresija unutar kompresora se u stvarnosti ne provodi izentropski nego politropski [Slika 11] pri čemu je izlazna temperatura iz kompresora veća nego ona koja bi se dobila izentropskim procesom.



Slika 11. Prikaz realne kompresije 2-3 u T-s dijagramu [9]

U grafovima se također ne vidi pad tlaka zbog linearnih i lokalnih gubitaka.

Kada bi se i to uzelo u obzir dobio bi se proces kao [Slika 12] na kojima se vidi pad tlaka unutar isparivača(1-2) i kondenzatora(3-4).



Slika 12. Pojednostavljena shema sustava i realni dijagram log p - h

Pozornost na pad tlaka je potrebno obratiti na kapljevinskom vodu(4-5) [Slika 12] jer se ne smije desiti da para dospije do ekspanzijskog ventila koji tada neće raditi pravilno.

Za određenu temperaturu pothlađenja postoji kritični pad tlaka te stvarni pad tlaka od izlaza iz kondenzatora do ekspanzijskog ventila ne smije biti veći od kritičnog.

5. PROVOĐENJE MJERENJA

Mjerenja je potrebno provesti pri sličnim uvjetima kako bi bilo moguće usporediti R404A(temperatura klizanja zanemariva) sa zamjenskom zeotropskom radnom tvari R407F.

Mjerenja su vršena pri tlaku kondenzacije od 18.2, 16 i 14.15 bara. Temperatura kondenzacije je definirana tlakom na kraju kompresije(tlak u tlačnom vodu). Tlak se regulira podešavanjem protoka rashladne vode u sekundarnom krugu na kondenzatoru(regulira se kuglastim ventilom).

Temperatura isparivanja ovisi o toplinskom opterećenju u hladionici. Opseg temperatura isparivanja je od -15°C do 0°C. Toplinsko opterećenje hladionice je regulirano kutem otvorenosti vrata hladionice, a vrijednosti su očitane nakon što je dobivena stacionarna točka.

Sustav za prikupljanje podataka je Agilent i pripadajući program Agilent Benchlink Data Logger 3.

Pri uspoređivanju performansi kod zeotropskih tvari se uvijek koristi srednja temperatura kondenzacije/isparivanja.

$$\vartheta_k = (\vartheta_{vr,k} + \vartheta_{roš,k}) / 2 \quad (5.0)$$

Tlak kondenzacije [bar]	Temperatura kondenzacije ϑ_k [°C]	Temperatura vrenja $\vartheta_{vr,k}$ [°C]	Temperatura rošenja $\vartheta_{roš,k}$ [°C]
18.2	39.95	39.785	40.122
16	34.7	34.51	34.872
14.15	29.8	29.633	30.017

Tablica 9. Temperature kondenzacije, vrenja i rošenja ovisno o tlaku

Pretpostavke kod mjerenja su da nema pada tlaka na kondenzatoru i isparivaču te da nema odstupanja u bilanciranju na strani freona u odnosu na toplinsku bilancu na strani hlađenog medija.

Maseni protok vode dobiven je mjerenjem mase protočne vode na izlazu iz kondenzatora prema spremniku nakon određenog vremenskog intervala (najčešće 1 minuta). Dijeljenjem mase vode s vremenom se dobije maseni protok vode. Odstupanja u masi vode tijekom mjerenja su bila manja od 1%. Kao prava vrijednost uzela se aritmetička sredina.

Podešavanjem protoka vode se regulirala temperatura kondenzacije.

	$\vartheta_k = 39.95 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 34.7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$
1.Mjerenje (kg/s)	0,1297	0,18	0,2455
2.Mjerenje	0,1288	0,1817	0,2457
3.Mjerenje	0,13	0,182	0,2447
4.Mjerenje	0,1297	0,1817	0,2455
5.Mjerenje	0,1292	0,1813	0,2448
Aritmetička sredina	0,1295	0,1813	0,2452

Tablica 10. Protok vode

Izmjerene vrijednosti:

Vrijednosti temperatura su prikazani u tablici kao aritmetička sredina više mjernih točaka.

Tlakovi su očitani s manometara na sustavu, u tablici su prikazani kao apsolutni tlak, tj. na vrijednost tlaka manometra je dodan vanjski tlak tj. 1 bar.

Mjerenja veličina	Oznaka	Jedinica	$\vartheta_k = 39.95 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 34.7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$
TEMPERATURE					
Izlaz RT iz isparivača	ϑ_2	$^\circ\text{C}$	0.44	-1.17	-3.14
Ulaz RT u kondenzator	ϑ_3	$^\circ\text{C}$	71.98	67.53	62.87
Izlaz RT iz kondenzatora	ϑ_4	$^\circ\text{C}$	36.07	29.9	24.8
Ulaz rashladne vode	ϑ_6	$^\circ\text{C}$	11.1	11.11	11.22
Izlaz rashladne vode	ϑ_7	$^\circ\text{C}$	37.32	31.67	27
Temperatura Hladnjače	ϑ_{hl}	$^\circ\text{C}$	4.69	3.56	1.91
TLAKOVI					
Usisni vod	p_2	bar	4.82	4.5	4.2
Tlačni vod	p_3	bar	18.2	16	14.15
PROTOCI					
Maseni protok vode	$q_{M,w}$	Kg/s	0,1295	0,1813	0,2452

Tablica 11. Izmjerene vrijednosti prije zamjene RT

Preko razlike temperature rashladne vode (ulaz-izlaz) i masenog protoka se dobije učin kondenzatora za koji se pretpostavlja da je isti na strani RT.

Učin kondenzatora na strani rashladne vode:

$$\Phi_k = q_{M,w} c_{pw} (\vartheta_7 - \vartheta_6) \quad (5.1)$$

Iz dijagrama za radnu tvar R404A potrebno je očitati entalpije u točkama 2,3 i 4 [Slika 12].

Pretpostavlja se da nema pada tlaka na kondenzatoru niti na isparivaču, tj. da je $p_1=p_2$ i $p_3=p_4$.

Zbog preciznijeg očitavanja entalpija korišten je program REFPROP te su dobiveni sljedeći rezultati:

	$\vartheta_k = 39.95 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 34.7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$
h_2 [KJ/kg]	369,21	368,45	367,34
h_3 [KJ/kg]	420,84	418,93	416,42
h_4 [KJ/kg]	253,56	243,76	235,92

Tablica 12. Entalpije točaka

Preko toga se dobije maseni protok RT:

$$q_{M,RT} = \Phi_k / (h_3 - h_4) \quad (5.2)$$

Pomoću masenog protoka RT se može dobiti snaga kompresora:

$$P_{\text{kompr}} = q_{M,RT} (h_3 - h_2) \quad (5.3)$$

Učin isparivača se dobije kao razlika učina kondenzatora i snage kompresora:

$$\Phi_i = \Phi_k - P_{\text{kompr}} \quad (5.4)$$

COP(coefficient of performance) predstavlja omjer korisnog hlađenja ili grijanja kroz dovedenu snagu.

$$\varepsilon = \Phi_i / P \quad (5.5)$$

Vrijednosti izračunate prema formulama 5.1 – 5.5 prikazane su u sljedećoj tablici:

Izračunata veličina	Oznaka	Jedinica	$\vartheta_k = 39.95 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 34.7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$
Učin kondenzatora	Φ_k	W	14200	15589	21083
Entalpija točke 2	h_2	KJ/kg	369,21	368,45	367,34
Entalpija točke 3	h_3	KJ/kg	420,84	418,93	416,42
Entalpija točke 4	h_4	KJ/kg	253,56	243,76	235,92
Maseni protok RT	$q_{M,RT}$	kg/s	0,085	0,089	0,117
Snaga kompresora	P_{kompr}	W	4383	4492	5733
Učin isparivača	Φ_i	W	9817	11096	15350
COP	ε	/	2,24	2,47	2,678

Tablica 13. Izračunate radne karakteristike

Iz priloženog se vidi da je COP rastao kako se snižavala temperatura kondenzacije.

Povećavao se i učin isparivača jer se snižavala temperatura hladnjače a vrata su ostala pri istom stupnju otvorenosti što je uzrokovalo povećavanjem toplinskog opterećenja tj. isti protok zraka je ušao i ohladio se na nižu temperaturu.

Temperatura pregrijanja(ϑ_{SH}) se dobije tako da se od temperature na izlazu iz isparivača(ϑ_2) oduzme pripadajuća temperatura rošenja za taj tlak(p_2):

$$\vartheta_{SH} = \vartheta_2 - \vartheta_{roš,i} \quad (5.6)$$

Temperatura pothlađenja(ϑ_{SC}) se dobije tako da se od temperature vrenja(ϑ_{vr}) za tlak kondenzacije(p_3) oduzme temperatura na izlazu iz kondenzatora(ϑ_4):

$$\vartheta_{SC} = \vartheta_{vr,k} - \vartheta_4 \quad (5.7)$$

Temperatura rošenja za tlak p_2 se dobije iz programa REFPROP , a temperatura isparivanja(ϑ_i) će nam poslije poslužiti za usporedbu procesa s drugom radnom tvari.

$$\vartheta_i = (\vartheta_{roš,i} + \vartheta_5) / 2 \quad (5.8)$$

Tlak isparivanja p_2 [bar]	Temperatura rošenja $\vartheta_{roš,i}$ [°C]	Temperatura nakon prigušenja ϑ_1 [°C]	Temperatura isparivanja ϑ_i [°C]
4.82	-6.705	-7.114	-6.91
4.5	-8.73	-9.166	8.95
4.2	-10.73	-11.188	-10.96

Tablica 14. Prikaz srednje temperature isparivanja

Temperature pregrijanja i pothlađenja prema 5.6 – 5.7:

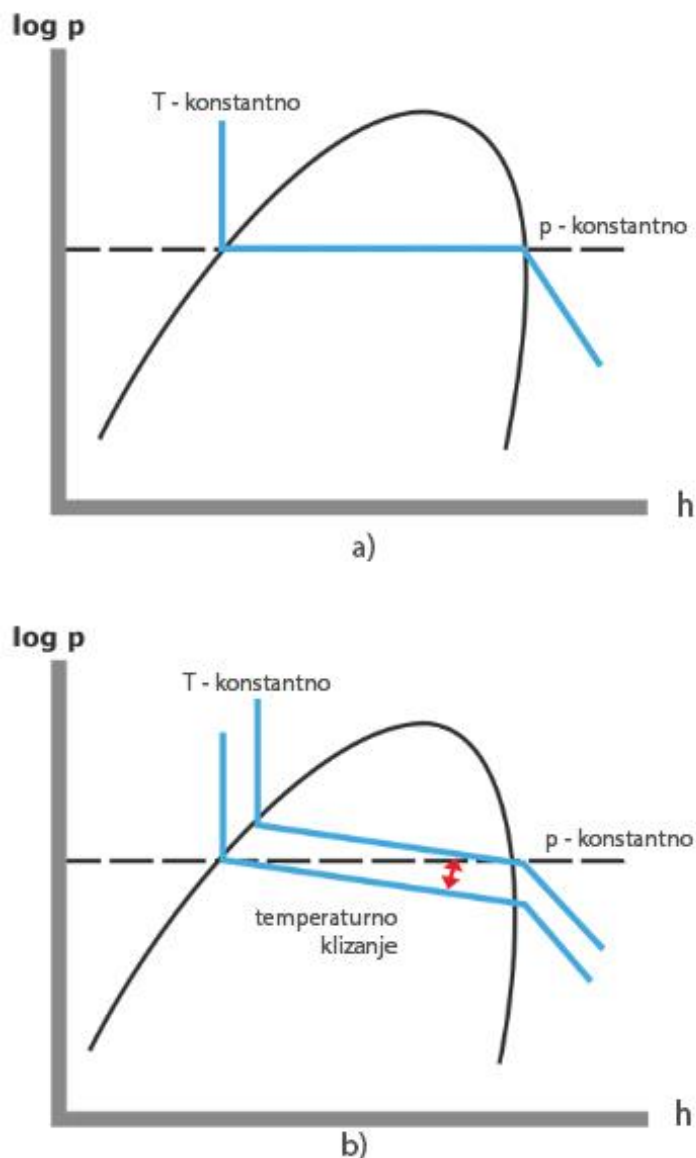
	$\vartheta_k = 39.95$ °C	$\vartheta_k = 34.7$ °C	$\vartheta_k = 29.8$ °C
ϑ_{SH} [°C]	7.145	7.56	7.59
ϑ_{SC} [°C]	3.715	4.61	4.833

Tablica 15. Temperature pregrijanja i pothlađenja

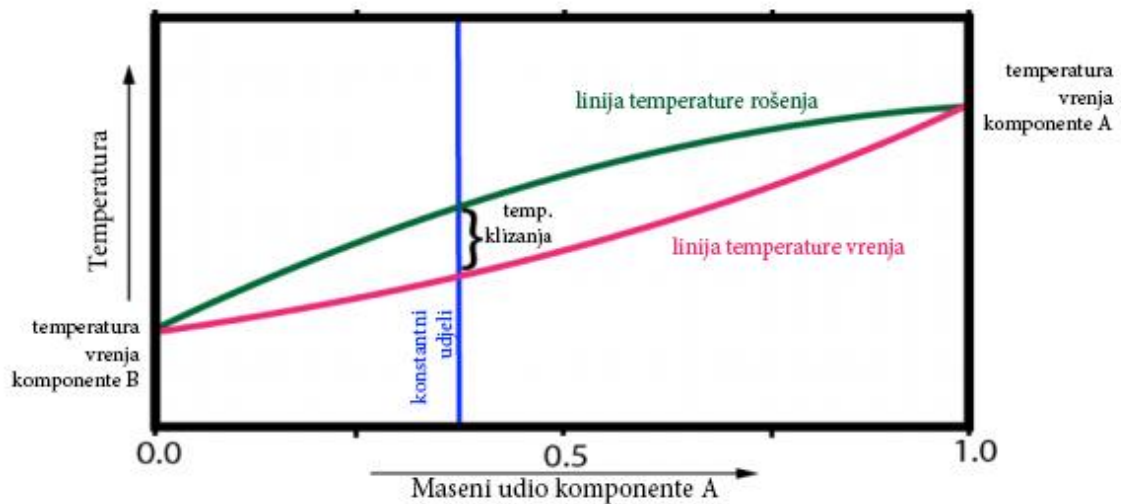
6. TERMODINAMIČKI PROCES SA NOVOM RADNOM TVARI

Dok se kod jednokomponentnih radnih tvari proces isparavanja i kondenzacije provodi pod konstantnim tlakom i konstantnom temperaturom, kod mješavina RT to nije slučaj.

Temperatura klizanja je temperaturna razlika suhozasićene pare i vrele kapljevine pri konstantom tlaku[Slika 13].



Slika 13. Prikaz temperature klizanja kod zeotropskih radnih tvari [12]



Slika 14. Graf T-eta [11]

[Slika 14] predstavlja ovisnost temperature klizanja o udjelu pojedine komponente u mješavini.

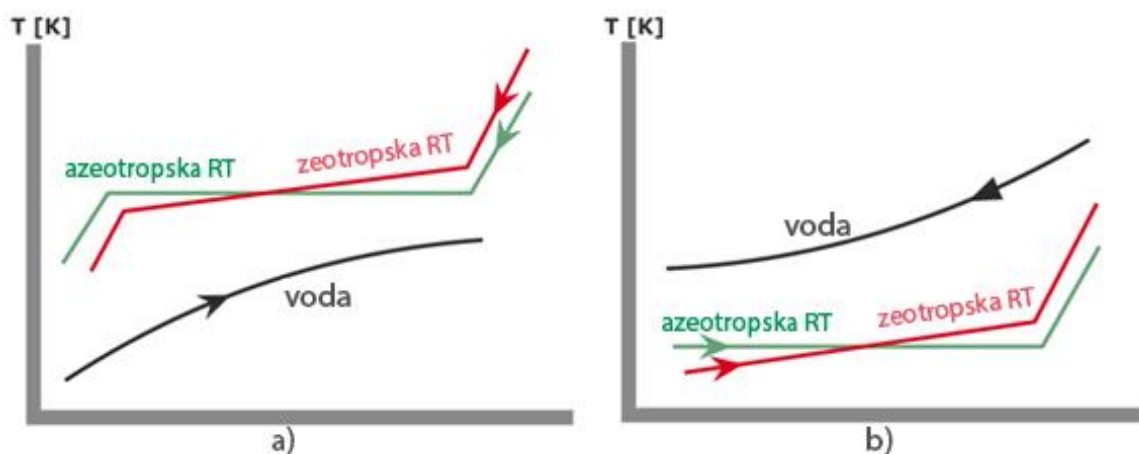
Zbog temperaturnog klizanja postoji i opasnost od frakcioniranja smjese, tj. da je u različitim dijelovima sustava smjesa s drukčijim udjelima komponenti.

Frakcioniranje smjese negativno djeluje na rad sustava te se preporučuje da sustav ima ujednačen protok kroz sve komponente sustava.

Zbog toga se kod zeotropskih radnih tvari ne koriste:

- potopljeni isparivači
- odvajači kapljica na usisnom vodu (između isparivača i kompresora)
- ne preporučuje se uporaba receivera (između kondenzatora i isparivača)

Promjena temperature prilikom promjene agregatnog stanja negativno utječe na srednju logaritamsku razliku temperature u izmjenjivaču [Slika 15].

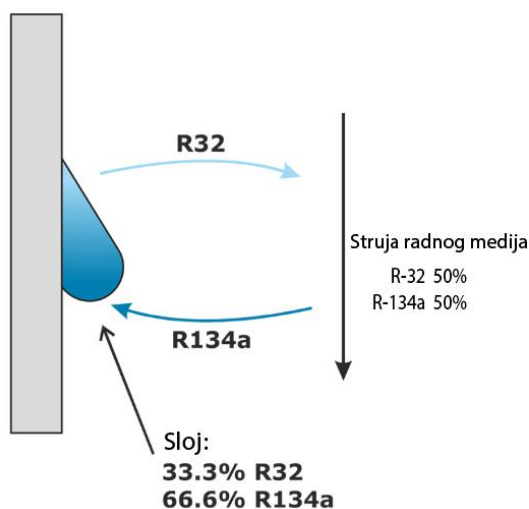


Slika 15. Prikaz promjene temperatura u a) kondenzator b) isparivač [16]

Koeficijent prijelaza topline u kondenzatoru je lošiji kod zeotropskih radnih tvari zbog prijenosa mase lakše kondenzirajuće komponente na stijenku [Slika 16]. Taj sloj predstavlja otpor prolazu topline a samim time se smanjuje učin izmjenjivača. Na slici 17. struja radnog medija se sastoji od jednakih masenih udjela R-32 i R-134a.

Slična se situacija dešava i na isparivaču samo što tada lakše ispariva komponenta se koncentrira uz grijanu stijenku.

Jedna od protumjera da se smanji utjecaj ovog efekta je osiguravanje dovoljnog turbulentnog strujanja kako bi se osigurala dobra izmiješanost radne tvari.



Slika 16. Pad koeficijenta prijelaza topline uslijed prijenosa mase [16]

7. TEORIJSKI TERMODINAMIČKI PRORAČUN SA ZAMJENSKIM RADNIM TVARIMA

Zbog kvara mjernog instrumenta-masenog protokomjera u sklopu ovog rada odlučilo se ne provesti zamjenu radne tvari nego teorijski usporediti radnu tvar R-404A sa zamjenskim radnim tvarima R-407F, R-448A i R-449A pri istim parametrima procesa tj. temperaturama isparivanja, kondenzacije, pregrijanja i pothlađenja.

Za očitavanje vrijednosti u proračunu koristio se program REFPROP.

Potrebni parametri:

	$\vartheta_k = 39.95 \text{ °C}$	$\vartheta_k = 34.7 \text{ °C}$	$\vartheta_k = 29.8 \text{ °C}$
Temperatura isparivanja $\vartheta_i \text{ [°C]}$	-6.91	-8.95	-10.96
$\vartheta_{SH} \text{ [°C]}$	7.145	7.56	7.59
$\vartheta_{SC} \text{ [°C]}$	3.715	4.61	4.833

Tablica 16. Potrebni parametri procesa

Jedna od pretpostavki je da kompresor ima isti izentropski stupanj djelovanja koji je definiran kao omjer izentropske promjene entalpije kroz stvarna promjena entalpije [Slika 11]. Proračunat ćemo izentropski stupanj djelovanja pomoću prije izmjerenih točki procesa i pretpostaviti da je konstantan i nakon zamjene radnih tvari.

$$\eta = (h_{3s} - h_2) / (h_3 - h_2) \quad (7.0)$$

	entalpija	entropija
2	369,21	1,636
3	420,84	1,708
3s	396,71	1,636
η	0.53	

Tablica 17. Izentropski stupanj djelovanja

7.1 Radna tvar R-407F

Tlak kondenzacije se pronade tako da srednja temperatura kondenzacije bude ista kao i kod radne tvari R-404A.

	Temperatura vrenja $\vartheta_{vr,k}$ [°C]	Temperatura rošenja $\vartheta_{roš,k}$ [°C]	Tlak kondenzacije p_3 [bar]	Srednja temperatura kondenzacije ϑ_k [°C]	Temperatura točke 4 ϑ_4
1	37.736	42.169	18.18	39.95	34.021
2	32.385	37.01	15.9	34.7	27.775
3	27.418	32.207	13.98	29.8	22.585

Tablica 18. Tlak kondenzacije za određenu srednju temperaturu kondenzacije

Srednja temperatura isparivanja se dobije iterativnim putem. Prvo se pretpostavlja tlak isparivanja nakon čega se dobiva temperatura nakon prigušenja i temperatura rošenja te se računa srednja temperatura isparivanja prema 5.8. Proces se ponavlja sve dok se ne dobije srednja temperatura isparivanja koja je jednaka onoj kod R-404A.

	Temperatura nakon prigušenja ϑ_1 [°C]	Temperatura rošenja $\vartheta_{roš,i}$ [°C]	Tlak isparivanja p_2 [bar]	Srednja temperatura isparivanja ϑ_i [°C]
1	-9.1204	-4.741	4.42	-6.91
2	-11.274	-6.68	4.12	-8.95
3	-13.332	-8.577	3.843	-10.96

Tablica 19. Srednja temperatura isparivanja

Temperature točaka se dobiju tako da se pretpostavi ista temperatura pregrijanja i pothlađenja.

$$\vartheta_2 = \vartheta_{\text{roš},i} + \vartheta_{\text{SH}} \quad (7.1)$$

$$\vartheta_4 = \vartheta_{\text{vr},k} - \vartheta_{\text{SC}} \quad (7.2)$$

	Temp. točke 2	Temp. točke 4	Entalpija točke 2	Entalpija točke 4	Entalpija točke 3s	Entalpija točke 3	Temp. Točke 3
1	2.404	34.021	418.7	251.83	456.33	489.7	95.2
2	0.88	27.775	418.09	241.82	454.04	485.92	89.2
3	-0.987	22.585	417.13	233.71	451.43	481.85	83.2

Tablica 20. Entalpije točki sustava

Učin kondenzatora se pretpostavlja da ostaje isti (pretpostavlja se isti protok vode i promjena temperature vode). Ostale vrijednosti su izračunate pomoću formula 5.2 – 5.5:

Izračunata veličina	Oznaka	Jedinica	$\vartheta_k = 39.95 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 34.7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$
Učin kondenzatora	Φ_k	W	14200	15589	21083
Maseni protok RT	$q_{\text{M,RT}}$	kg/s	0,06	0,064	0,085
Snaga kompresora	P_{kompr}	W	4238	4332	5499
Učin isparivača	Φ_i	W	9962	11257	15584
COP	ε	/	2,35	2,6	2,834

Tablica 21. Radne karakteristike sustava

Iz rezultata se vidi povećanje učinkovitosti sustava (COP se povećao) u prosjeku oko 5%. Maseni protok RT se smanjio za oko 30% te prilikom retrofita treba paziti na preporučene brzine strujanja da ulje ne bi zaostajalo u isparivaču.

Izlazna temperatura iz kompresora je znatno povišena (od 20 do 23°C viša nego kod R-404A) Nedostatak koji se ne vidi u proračunu je smanjenje logaritamske razlike temperature zbog temperature klizanja što uzrokuje slabiji učin izmjenjivača.

7.2 Radna tvar R-448A

Proračun s radnom tvari R-448A se provodi na isti način kao i s R-407F.

Prvo se nađe tlak kondenzacije:

	Temperatura vrenja $\vartheta_{vr,k}$ [°C]	Temperatura rošenja $\vartheta_{roš,k}$ [°C]	Tlak kondenzacije p_3 [bar]	Srednja temperatura kondenzacije ϑ_k [°C]	Temperatura točke 4 ϑ_4
1	37.478	42.438	16.2	39.95	33.763
2	32.117	37.245	14.8	34.7	27.28
3	27.159	32.424	13.02	29.8	22.55

Tablica 22. Tlak kondenzacije za određenu srednju temperaturu kondenzacije

Zatim tlak isparivanja:

	Temperatura nakon prigušenja ϑ_1 [°C]	Temperatura rošenja $\vartheta_{roš,i}$ [°C]	Tlak isparivanja p_2 [bar]	Srednja temperatura isparivanja ϑ_i [°C]
1	-9.0534	-4.764	4.135	-6.91
2	-11.205	-6.69	3.86	-8.95
3	-13.270	-8.6107	3.6	-10.96

Tablica 23. Srednja temperatura isparivanja

Entalpije karakterističnih točaka:

	Temp. točke 2	Temp. točke 4	Entalpija točke 2	Entalpija točke 4	Entalpija točke 3s	Entalpija točke 3	Temp. Točke 3
1	2.38	33.763	407.62	250.47	441.83	472.17	86.76
2	0.87	27.28	406.95	240.27	440.7	470.63	83.7
3	-1.02	22.55	405.91	233.03	438.14	466.7	77.85

Tablica 24. Entalpije točki sustava

Izračunate veličine prema 5.1 – 5.5:

Izračunata veličina	Oznaka	Jedinica	$\vartheta_k = 39.95 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 34.7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$
Učin kondenzatora	Φ_k	W	14200	15589	21083
Maseni protok RT	$q_{M,RT}$	kg/s	0,064	0,068	0,09
Snaga kompresora	P_{kompr}	W	4064	4309	5485
Učin isparivača	Φ_i	W	10136	11279	15598
COP	ε	/	2,494	2,617	2,844

Tablica 25. Radne karakteristike sustava

7.3 Radna tvar R-449A

Radna tvar R-449A je slična radnoj tvari R-448A u sastavu a samim time i u radnim karakteristikama. R-449A još ima dodatak R-1234ze koju R-448A nema.

Proračun se vrši kao i u prethodna 2 slučaja, prvo se nađe tlak kondenzacije.

	Temperatura vrenja $\vartheta_{vr,k}$ [°C]	Temperatura rošenja $\vartheta_{roš,k}$ [°C]	Tlak kondenzacije p_3 [bar]	Srednja temperatura kondenzacije ϑ_k [°C]	Temperatura točke 4 ϑ_4
1	37.487	42.408	16.43	39.95	33.77
2	32.15	37.229	14.375	34.7	27.54
3	27.186	32.395	12.64	29.8	22.35

Tablica 26. Tlak kondenzacije za određenu srednju temperaturu kondenzacije

Zatim tlak isparivanja:

	Temperatura nakon prigušenja ϑ_1 [°C]	Temperatura rošenja $\vartheta_{roš,i}$ [°C]	Tlak isparivanja p_2 [bar]	Srednja temperatura isparivanja ϑ_i [°C]
1	-8.974	-4.834	4	-6.91
2	-11.14	-6.78	3.73	-8.95
3	-13.221	-8.7	3.4786	-10.96

Tablica 27. Srednja temperatura isparivanja

Te entalpije karakterističnih točaka:

	Temp. točke 2	Temp. točke 4	Entalpija točke 2	Entalpija točke 4	Entalpija točke 3s	Entalpija točke 3	Temp. Točke 3
1	2.311	33.77	406.76	250.14	441.84	472.95	88.7
2	0.776	27.54	406.06	240.44	439.59	469.32	82.97
3	-1.11	22.35	405	232.54	437.02	465.42	77.18

Tablica 28. Entalpije točki sustava

Izračunate veličine prema 5.1 – 5.5:

Izračunata veličina	Oznaka	Jedinica	$\vartheta_k = 39.95 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 34.7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\vartheta_k = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$
Učin kondenzatora	Φ_k	W	14200	15589	21083
Maseni protok RT	$q_{M,RT}$	kg/s	0,064	0,068	0,091
Snaga kompresora	P_{kompr}	W	4218	4309	5470
Učin isparivača	Φ_i	W	9982	11280	15613
COP	ε	/	2,366	2,618	2,854

Tablica 29. Radne karakteristike sustava

7.4 Usporedba radnih karakteristika

Kako bismo ocijenili koja je radna tvar najoptimalnija za retrofit postojećeg sustava valja ih međusobno usporediti.

1) Usporedba pri: $\vartheta_k = 39.95 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_i = -6.91 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_{SH} = 7.145 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_{SC} = 3.715 \text{ }^\circ\text{C}$

	COP	Maseni protok RT [kg/s]	Temperatura na izlazu iz kompresora ϑ_3 [$^\circ\text{C}$]
R-404A	2,24	0,085	71.98
R-407F	2,35	0,06	95.2
R-448A	2,494	0,064	86.76
R-449A	2,366	0,064	88.7

Tablica 30. Usporedba radnih karakteristika

2) Usporedba pri: $\vartheta_k = 34.7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_i = -8.95 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_{SH} = 7.56 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_{SC} = 4.61 \text{ }^\circ\text{C}$

	COP	Maseni protok RT [kg/s]	Temperatura na izlazu iz kompresora ϑ_3 [$^\circ\text{C}$]
R-404A	2,47	0,089	67.53
R-407F	2,6	0,064	89.2
R-448A	2,617	0,068	83.7
R-449A	2,618	0,068	82.97

Tablica 31. Usporedba radnih karakteristika

3) Usporedba pri: $\vartheta_k = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_i = -10.96 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_{SH} = 7.59 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_{SC} = 4.833 \text{ }^\circ\text{C}$

	COP	Maseni protok RT [kg/s]	Temperatura na izlazu iz kompresora ϑ_3 [$^\circ\text{C}$]
R-404A	2,678	0,117	62.87
R-407F	2,834	0,085	83.2
R-448A	2,844	0,09	77.85
R-449A	2,854	0,091	77.18

Tablica 32. Usporedba radnih karakteristika

Svaka zamjenska radna tvar ima bolji COP od trenutne R-404A. Iz podataka se vidi da radna tvar R-407F ima najlošiji COP od zamjenskih radnih tvari za odabrane parametre, razlika u učinkovitosti (COP) se smanjuje sa padom temperature isparivanja i kondenzacije te je najmanja razlika pod 3).

Zamjenske radne tvari imaju bitno smanjeni maseni protok radne tvari s tim da R-448A i R-449A imaju nešto veći protok nego tvar R-407F.

Temperatura na izlazu iz kompresora je jedina karakteristika koja ide u prilog radnoj tvari R-404A jer ima najnižu temperaturu što znači veći spektar radnog područja odnosno teže se mogu postići visoke temperature koje bi naškodile sustavu uzrokovanjem gareži i zapaljivanjem ulja. Od zamjenskih radnih tvari R-448A i R-449A imaju niže temperature na izlazu iz kompresora (od 5 do 8 $^\circ\text{C}$ niže) nego R-407F.

Zaključak je da R-448A i R-449A imaju bolja svojstva nego R-407F, razlog leži u boljem COP i nižoj temperaturi u tlačnom vodu. Odabir između R-448A i R-449A ovisi o temperaturnom režimu sustava. Ukoliko je temperaturni režim sličan onom pod 3), tj. temperature isparivanja su nisko (-11 $^\circ\text{C}$ i niže) blagu prednost ima radna tvar R-449A zbog višeg COP, a ako je režim sličniji onom pod 1) prednost ima R-448A jer tada ima bolji COP nego R-449A.

8. POSTUPAK ZAMJENE RADNE TVARI

Pri postupku zamjene radnih tvari treba pripaziti na dijelove opreme koji nisu kompatibilni s novom radnom tvari i koji zahtijevaju zamjenu:

- Postojeći kondenzator i isparivač mogu raditi sa zeotropskim radnim tvarima koje imaju veliku temperaturu klizanja zbog protusmjernog strujanja fluida.
- Postojeći termoekspanzijski ventil TEVV ima preveliku veličinu sapnice jer je maseni protok smanjen oko 30%. Punjenje također treba zamijeniti treba zamijeniti [Slika 5] onim koje je dizajnirano za R-22.
- Postojeća radna tvar R-404A i navedene zamjene (R-448A, R-449A i R-407F) sve koriste ulje iste baze (POE ulje), ipak je zamjena ulja potrebna jer je u postojećem ulju otopljena radna tvar R404A.
- Elastomerne brtve se u pravilu zamjenjuju kako bi se smanjilo propuštanje radnog medija iz sustava.
- Zamjena filter sušača u kapljevinskom vodu predstavlja dobru praksu zbog toga što je filter kontaminiran prošlom radnom tvari.

Plan postupka zamjene radne tvari R-404A:

1. Prikupiti sve parametre uređaja prilikom ispitivanja s radnom tvari R404A.
2. Prikupiti radne tvar iz sustava (xy kg). Inicijalno punjenje iznosilo je 5 kg.
3. Zamijeniti filter sušač iz kapljevinskog voda s novim, predviđenim za novu radnu tvar.
4. Ispustiti ulje iz kompresora (masa xy litara). Inicijalno punjenje ulja je 1.8 litara.
5. Odabrati POE ulje i u količini od xy litara je napuniti u sustav. Radne tvari su kompatibilne s POE uljem, zamjena nije nužna ali predstavlja dobru inženjersku praksu zbog dekontaminacije sustava.
6. Promijeniti termoekspanzijski ventil s novim koji je dizajniran za radnu tvar R-22.
7. Evakuirati sustav do 0.3mbar. Vakuum test je potreban kako bi se utvrdilo da je sistem suh i da ne postoje propuštanja. Potreban je sustav za evakuiranje sustava.

8. Napuniti sustav sa 4.25kg zamjenske radne tvari , prvo punjenje treba biti oko 85% mase punjenja R404A.
9. Upaliti sustav.
10. Nakon što se sustav stabilizirao postupno dopunjavati novu radnu tvar.
11. Podesiti presostate tlakova i pregrijanje kako je potrebno.
12. Promijeniti oznake na uređaju i postaviti vidljive oznake novog radnog medija i ulja.
13. Sakupiti stari plin u čeličnu bocu i odložiti u suhu prostoriju gdje će biti zaštićen od prevrtanja i oštećenja.

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena su mjerenja na rashladnom uređaju s radnom tvari R-404A kako bi se dobile opće značajke i stupanj djelovanja sustava (COP). Provedena je teorijska analiza termodinamičke učinkovitosti lijevokretnog rashladnog procesa s radnim tvarima R-407F, R-448A i R-449A kako bi se mogla usporediti svojstva i stupanj djelovanja sustava te odlučiti koja je zamjenska radna tvar najoptimalnija.

Rezultati pokazuju bolju termodinamičku učinkovitost zamjenskih radnih tvari nad radnom tvari R-404A do nekih 5-7% i smanjenje masenog protoka za oko 30%.

Zbog značajnog smanjenja masenog protoka treba pripaziti na preporučene brzine strujanja radne tvari kako ulje ne bi zaostajalo u sustavu. Također treba provesti zamjenu veličine sapnice na TEVV ventilu te zamijeniti punjenje na ono koje je dizajnirano za novu radnu tvar. Zamjena elastomernih brtvi, ulja kompresora i filtra sušača predstavlja dobru tehničku praksu zbog dekontaminacije sustava i smanjenja propuštanja uređaja.

Kako bi se smanjio utjecaj temperature klizanja na izmijenjenu toplinu izmjenjivači trebaju biti protustrujnog tipa. Mogući nedostatak može biti smanjenje učina izmjenjivača ukoliko nije moguće postići jednaku temperaturnu promjenu vanjskog medija s temperaturom klizanja nove radne tvari.

Negativna strana zamjenskih radnih tvari je viša izlazna temperatura kompresora što može uzrokovati pojavu gareži i zapaljenja ulja. Da se izbjegnu visoke temperature kondenzacije dozvoljeno područje rada u sustavu nakon retrofita će biti manje što treba podesiti na sigurnosnoj armaturi, tj. presostatu niskog i visokog tlaka.

Potrebno je naglasiti da je GWP radne tvari R-407F 1824 a, GWP radne tvari R-404A 3922. Iako je GWP R-407F mnogo manji, on se polako prestaje koristiti kao retrofit zbog i dalje previsokog GWP-a jer će uslijed F-gas uredbe on u skoroj budućnosti biti zabranjen u pojedinim područjima primjene. Proizvođači stoga još uvijek eksperimentalno pokušavaju dobiti radnu tvar s dovoljno niskim GWP-om i sigurnosnom klasom zapaljenja, a za sad se preporučuje zamjena s radnim tvarima R-448A i R-449A.

LITERATURA:

Sve stranice su posjećene siječanj/veljača 2017.god.

- [1] http://www.ecacool.com/upload/files/r/refrigerant_options_now_future.pdf
- [2] https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas/legislation_en
- [3] <http://docplayer.net/27061121-F-gas-regulation-shaking-up-the-hvac-r-industry.html>
- [4] <https://www.kth.se/en/itm/inst/energiteknik/forskning/ett/projekt/koldmedier-med-lag-gwp/low-gwp-news/replacements-for-r404a-1.511715>
- [5] <http://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2013/03/rac-is-it-time-to-stop-using-r404a.pdf>
- [6] Soldo, Vladimir (2000) *Razvoj uređaja za ocjenu termodinamičke valjanosti sa zeotropnim smjesama.* = *Development of device for estimation thermodynamic efficiency of process with zeotropic mixtures.* Magistarski rad , Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Neodređeno. Mentor: Ćurko, Tonko.
- [7] Danfoss Commercial Compressors - FRCC.EN.139.A1.02 - September 2014
- [8] Ashrae Journal, January, 2017.
- [9] <http://machineryequipmentonline.com/hvac-machinery/basic-open-system-cyclesvapor-refrigerationheat-pump-cycle/>
- [10] <http://www.thermopedia.com/content/1086/>
- [11] https://www.rses.org/assets/rses_journal/0714_Refrigerant.pdf
- [12] <http://www.swep.net/refrigerant-handbook/5.-refrigerants/sd1/>
- [13] <http://www.learnthermo.com/T1-tutorial/ch10/lesson-B/pg04.php>
- [14] http://www.emersonclimate.com/europe/ProductDocuments/CopelandLiterature/CC072603_1012_0515_E_Refrigerant%20changeover%20R404A%20to%20HFC%20R407AF%20R448A%20R449A_0.pdf
- [15] https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/mobile-air-conditioning-systems_en
- [16] <http://www.swep.net/refrigerant-handbook/7.-condensers/asd2/>
- [17] V.Soldo, M.Grozdek – podloge za predavanja, kolegij hlađenje i dizalice topline, FSB
- [18] V.Soldo, L.Boban – Projektiranje rashladnih sustava

PRILOZI

I. CD-R disc