

Primjena rashladnih uređaja i dizalica topline s novim radnim tvarima za grijanje potrošne tople vode

Franolić, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:897378>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**PRIMJENA RASHLADNIH UREĐAJA I DIZALICA TOPLINE S
NOVIM RADNIM TVARIMA ZA GRIJANJE POTROŠNE
TOPLE VODE / APPLICATION OF REFRIGERATION UNITS
AND HEAT PUMPS WITH NEW REFRIGERANTS FOR
DOMESTIC HOT WATER HEATING**

Rijeka, rujan 2022

Marin Franolić

0069079773

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**PRIMJENA RASHLADNIH UREĐAJA I DIZALICA TOPLINE S
NOVIM RADNIM TVARIMA ZA GRIJANJE POTROŠNE
TOPLE VODE / APPLICATION OF REFRIGERATION UNITS
AND HEAT PUMPS WITH NEW REFRIGERANTS FOR
DOMESTIC HOT WATER HEATING**

Mentor: Doc. dr. sc. Boris Delač

Prof. dr. sc. Branimir Pavković (komentor)

Rijeka, rujan 2022

Marin Franolić

0069079773

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod nazivom „Primjena rashladnih uređaja i dizalica topline s novim radnim tvarima za grijanje potrošne tople vode“ izradio samostalno uz stručnu pomoć i pod nadzorom mentora doc. dr. sc. Borisa Delača i komentora prof. dr. sc. Branimira Pavkovića.

Sadržaj

| | |
|---|----|
| IZJAVA..... | 3 |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. RADNE TVARI U RASHLADNOJ TEHNICI..... | 2 |
| 2.1. Razvoj industrije..... | 2 |
| 2.2. Vrste radnih tvari | 2 |
| 2.2.1. CFC radne tvari | 2 |
| 2.2.2. HCFC radne tvari | 2 |
| 2.2.3. HFC radne tvari | 3 |
| 2.2.4. HFO radne tvari..... | 3 |
| 2.2.5. Prirodne radne tvari | 4 |
| 2.2.6. Plinovi za ispitivanje tlaka | 4 |
| 2.3. F – GAS REGULATIVA | 5 |
| 2.3.1. Tranzicija radnih tvari pod utjecajem F – gas regulative 517/2014..... | 6 |
| 2.3.2. Alternativne radne tvari..... | 9 |
| 2.3.3. Procjena radnih tvari | 10 |
| 2.3.3.1. Utjecaj na okoliš | 11 |
| 2.3.3.2. Sigurnost..... | 11 |
| 2.3.3.3. Projektiranje sustava..... | 11 |
| 2.3.3.4. Učinkovitost sustava..... | 11 |
| 2.3.3.5. Rad..... | 12 |
| 2.3.3.6. Nadogradnja..... | 12 |
| 2.3.3.7. Upute za zamjenu radnih tvari..... | 12 |
| 2.3.3.8. Izbor radne tvari prema tržišnom segmentu i primjeni..... | 13 |
| 3. EKOLOŠKI PRIHVATLJIVE RADNE TVARI | 15 |
| 3.1. R134a..... | 15 |
| 3.2. R717..... | 17 |
| 3.3. R744..... | 18 |
| 3.4. R32..... | 20 |
| 3.5. R290..... | 21 |
| 3.6. R410A..... | 23 |
| 3.7. R1234ZE..... | 24 |
| 3.8. R513a..... | 25 |
| 3.9. R450A..... | 26 |
| 3.10. R455A..... | 27 |
| 3.11. R452B | 28 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3.12. | R454A | 29 |
| 3.13. | R454B | 30 |
| 3.14. | R454C | 31 |
| 3.15. | USPOREDBA SVOJSTAVA RADNIH TVARI | 32 |
| 3.15.1. | Ovisnost kritičnog tlaka i temperature..... | 32 |
| 3.15.2. | Ovisnost toplinske vodljivosti i temperature | 33 |
| 3.15.3. | Ovisnost temperature i topline isparivanja | 34 |
| 4. | Priprema potrošne tople vode..... | 35 |
| 4.1. | Dizalice topline za pripremu PTV | 35 |
| 4.1.1. | Jednostupanjske dizalice topline | 38 |
| 4.1.1.1. | Osnovni podkritični proces s pregrijanjem radne tvari | 39 |
| 4.1.1.2. | Osnovni podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem radne tvari..... | 45 |
| 4.1.2. | Dvostupanjske dizalice topline..... | 52 |
| 4.1.2.1. | Dvostupanjski podkritični proces s pregrijanjem radne tvari..... | 53 |
| 4.1.2.2. | Dvostupanjski podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem radne tvari | 57 |
| 4.1.3. | Transkritični jednostupanjski proces s obilaznim vodom parne faze na srednjem tlaku 61 | |
| 4.1.4. | Kaskadna dizalica topline | 65 |
| 4.1.5. | Usporedba svih procesa s dizalicama topline..... | 71 |
| 4.1.6. | Usporedba sa stvarnim procesom (dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem)..... | 72 |
| 4.2. | Priprema potrošne tople vode primjenom kompresijskih rashladnih uređaja | 76 |
| 4.2.1. | Potpuna rekuperacija topline | 76 |
| 4.2.2. | Djelomična rekuperacija topline | 85 |
| 5. | ZAKLJUČAK | 95 |
| | POPIS TABLICA..... | 100 |
| | POPIS SLIKA | 101 |

1. UVOD

Uslijed porasta utjecaja globalnog zatopljenja na ljudske, biljne i životinjske vrste, kao i na okoliš postavljaju se novi zakoni i regulative, s zajedničkim ciljem da se taj utjecaj značajno smanji.

Jedna od najpoznatijih svjetskih regulativa koja se odnosi na navedene probleme je F – gas regulativa, pokrenuta od strane Europske unije.

Kao i sve druge ljudske aktivnosti, hlađenje i klimatizacija imaju značajan utjecaj na okoliš. Potrošači i zakonodavci zahtijevaju na smanjenju ovoga utjecaja.

Cilj ovog rada bio je istražiti primjenu rashladnih uređaja i dizalica topline s novim radnim tvarima za grijanje potrošne tople vode.

Prikazane su i klasificirane radne tvari primjenjive u skladu s F – gas regulativom Europske unije.

Razrađeni su sustavi za pripremu potrošne tople vode primjenom kompresijskih rashladnih uređaja, kao i dizalica topline. Pri čemu je kod primjene rashladnih uređaja napravljen osvrt na djelomičnu i potpunu rekuperaciju topline nastale kao posljedica hlađenja.

Kod primjene dizalica topline sa zrakom kao izvorom topline posebna je pažnja obraćena na prikaz i obrazloženje projektnih rješenja koja osiguravaju pouzdan rad u cijelom rasponu temperatura okoline.

Proračunati su i analizirani parametri etalonskih i realnih procesa za primjenjive radne tvari.

2. RADNE TVARI U RASHLADNOJ TEHNICI

2.1. Razvoj industrije

Značajan napredak postignut je u posljednja dva desetljeća. Montrealskim protokolom uspješno su zabranjene i izbačene iz upotrebe radne tvari koje imaju najznačajniji utjecaj na ozonski omotač (CFC), te se potaknuo napredak u proizvodnji drugih radnih tvari poput HCFC koje su namijenjene kao njihova zamjena.

Također od strane proizvođača radnih tvari svakodnevno se ulaže napor u razvoj novih, ekološki prihvatljivijih radnih tvari, kao i novih uređaja koji rade na te nove radne tvari.

Novo zakonodavstvo i rastući zahtjevi potrošača potiču razvoj industrije u smjeru smanjenja ugljičnog otiska rashladnih sustava.

Na tržištu se pojavljuju nove radne tvari, s nižim GWP-om poput hidrofluoro – olefina (HFO) i prirodnih radnih tvari.

Napredak je vidljiv i u razvoju tehnologije za detekciju propuštanja radne tvari, kao i u recikliranju i uništavanju korištenih radnih tvari.

2.2. Vrste radnih tvari

Radne tvari koje se primjenjuju u tehnici hlađenja stalno se razvijaju i mijenjaju, postroženjem zakona postojeće radne tvari bivaju izbačene iz upotrebe, te ih zamjenjuju nove, ekološki prihvatljivije radne tvari, s manjim utjecajem na okoliš.

U nastavku su navedene skupine radnih tvari koje su dosada bile u upotrebi, kao i one koje se trenutno razvijaju kao njihova zamjena.

2.2.1. CFC radne tvari

CFC (klorofluorouglijci) radne tvari, kao što su R11, R12, R113, R114 i R115, kategorizirani su kao radne tvari s visokim ODP - om (potencijal razgradnje ozona) i visokim GWP - om (potencijal globalnog zatopljenja).

Zato upotreba ovih radnih tvari podliježe zakonu. To uključuje zabranu prodaje u razvijenim zemljama od 1996. godine i zemljama u razvoju od 2010. godine, u skladu s Montrealskim protokolom.

2.2.2. HCFC radne tvari

HCFC (klorofluorouglikovodici) radne su tvari srednje visokog ODP – a i srednje visokog do visokog GWP – a, druga su generacija radnih tvari na bazi fluora, te su bili namijenjeni kao izvorna zamjena za CFC radne tvari.

Ove radne tvari, koje uključuju R22, R123, R401A, R401B, R402A, R402B, R408A i R409A, kategorizirane su kao radne tvari srednje visokog ODP – a (potencijal razgradnje ozona) i srednjeg do visokog GWP – a (potencijal globalnog zatopljenja).

Stoga su ove radne tvari nešto ekološki prihvatljivija alternativa CFC radnim tvarima. Također su često primjenjivi kao brza i jednostavna nadogradnja postojeće CFC opreme.

Kako HCFC radne tvari doprinose i uništavanju ozonskog sloja i globalnom zatopljenju, upotreba HCFC radnih tvari se postepeno ukida kao dio globalnog zakonodavstva, poput Montrealskog protokola. Neke zemlje i regije provode ubrzano postupno ukidanje.

U Europskoj uniji, na primjer, upotreba HCFC radnih tvari je ukinuta u siječnju 2010. godine. Obrađeni ili reciklirani HCFC radne tvari, međutim, mogu se koristiti do siječnja 2015. godine.

2.2.3. HFC radne tvari

HFC radne tvari se primjenjuju kao radne tvari u rashladnim uređajima, te kao pogonske tvari u uređajima, nemaju utjecaj na ozonski sloj i imaju srednji do visoki potencijal globalnog zatopljenja.

HFC radne tvari (fluorirani ugljikovodici) su treća generacija plinova na bazi fluora.

Neki od najkorištenijih HFC radnih tvari su R32, R134a, R404A, R407C, R410A.

Ovi proizvodi su kategorizirani kao radne tvari bez utjecaja na ozonski sloj (ODP = 0), i srednjim do visokim GWP (potencijal globalnog zatopljenja) i stoga predstavljaju ekološki prihvatljiviju alternativu CFC i HCFC radnim tvarima.

HFC radne tvari se koriste u širokom rasponu opreme za hlađenje i klimatizaciju posebno dizajniranim za njih, te kao „drop in“ plinovi za zamjenu CFC ili HCFC plinova u opremi na iste.

HFC radne tvari se također koriste u aplikacijama pogona i puhanja pjene.

Sve veći fokus na utjecaj radnih tvari na okoliš potiče potražnju za radnim tvarima koja mogu pružati zadovoljavajuću efikasnost uređaja uz smanjeni utjecaj na globalno zatopljenje, što rezultira razvojem ekološki prihvatljivijih rješenja za hlađenje.

Osim toga, lokalno zakonodavstvo sve više nastoji ukloniti radne tvari s visokim GWP – om.

2.2.4. HFO radne tvari

Radne tvari bez utjecaja na ozonski sloj i s vrlo niskim GWP – om.

HFO radne tvari (hidrofluoro – olefini) su četvrta generacija plinova na bazi fluora. HFC radne tvari sastoje se od atoma vodika, fluora i ugljika povezanih jednostrukim vezama između atoma.

HFO radne tvari sastoje se od vodika, fluora i atoma ugljika, ali sadrže barem jednu dvostruku vezu između atoma ugljika.

Prva HFO radna tvar, koju su zajednički razvili DuPont i Honeywell, je HFO 1234yf koji se prodaje pod markama Opteon YF i SOLSTICE yf.

Ovo je zamjena niskog GWP – a (potencijal globalnog zatopljenja) za R134a za korištenje u mobilnim klimatizacijskim (MAC) sustavima u automobilskom sektoru.

HFO radne tvari kategorizirane su kao radne tvari bez utjecaja na ozonski sloj (ODP = 0) i niskim GWP – om i stoga predstavljaju ekološki prihvatljiviju alternativu CFC, HCFC i HFC radnim tvarima.

2.2.5. Prirodne radne tvari

Radne tvari prirodnog podrijetla.

Neke od korištenijih prirodnih radnih tvari su R744 (CO₂, ugljikov dioksid), R717 (NH₃, amonijak) i R290 (C₃H₈, propan).

Prirodne radne tvari su kemijski spojevi koji se javljaju u prirodnim biokemijskim procesima. One ne oštećuju ozonski sloj i daju zanemariv ili u slučaju R717 (amonijak) nikakav utjecaj na globalno zatopljenje.

Ovi proizvodi su se koristili kao radne tvari prije 1950 – ih, prije nego što su fluorougljične radne tvari postale uobičajene.

U današnje vrijeme opet nalaze primjenu zbog niskog utjecaja na okoliš (GWP vrijednost).

2.2.6. Plinovi za ispitivanje tlaka

Zakonodavstvo i operativna praksa često zahtijevaju od operatera rashladnih i klimatizacijskih sustava da spriječe propuštanje fluoriranih plinova, da poprave svako otkriveno propuštanje što je prije moguće i da provjere popravak propuštanja u roku od mjesec dana kako bi se uvjerali da je djelotvoran.

Koriste se sljedeći plinovi za ispitivanje tlaka i za pomoć pri otkrivanju propuštanja:

- Dušik
- Dušik (bez kisika/OFN) je plin koji se najčešće koristi za tlačno ispitivanje sustava prije punjenja rashladnog sredstva ili kao dio servisiranja nakon povrata rashladnog sredstva
- Mješavina dušika/helija

Ove smjese se isporučuju u malim cilindrima koji se lako prenose i opremljeni su standardnim industrijskim ventilom. Mješavina dušika i helija pruža sljedeće prednosti:

- Poboljšana detekcija, može otkriti mnogo manja propuštanja zbog veličine molekula ispitnog plina. Molekule helija daleko su manje od molekula dušika i stoga su u stanju bolje pokupiti manja curenja u rashladnom sustavu
- Sigurna i jednostavna za korištenje, inertna i nezapaljiva. Mješavina za otkrivanje propuštanja kompatibilna je sa svom standardnom opremom za ispitivanje tlaka (uključujući regulatore dušika) i prikladna je za ispitivanje propuštanja bilo koje veličine rashladnog sustava
- Isplativa, smanjenjem količine radne tvari propuštene iz sustava, ovaj poboljšani plin za otkrivanje curenja će smanjiti broj, kao i cijenu pozivanja

2.3. F – GAS REGULATIVA

Od 1. siječnja 2020. Uredba EU o fluoriranim stakleničkim plinovima, poznata i kao F – gas regulativa zabranjuje upotrebu radnih tvari s potencijalom globalnog zagrijavanja (GWP) od 2500 ili više u određenim rashladnim jedinicama.

Osim toga zabranjuje se i servisiranje jedinica koje koriste takve radne tvari od strane servisera.

Uredbom će se također postupno smanjiti uporaba fluoriranih ugljikovodika (HFC) koji se mogu prodavati u EU za 79% do 2030.

Uredba se odnosi na:

- Male hermetički zatvorene sustave, npr. zamrzivače sladoleda, hladnjake za boce, samostojeće maloprodajne izloge koji obično sadrže između 0,1 i 0,5 kg rashladnog sredstva
- Kondenzacijske jedinice, koje se koriste u manjim trgovinama, trgovinama mješovitom robom i posluživanju hrane. (sustavi srednje veličine s jednom ili dvije rashladne vitrine hladene kondenzacijskom jedinicom koja obično sadrži između 2 i 10 kg radne tvari).
- Central pack sistemi, korišteni u supermarketima i drugim većim trgovinama. (obično sadrže više od 100 kg rashladnog sredstva).

Rashladne jedinice koje sadrže HFC u iznosu od preko 40 tona CO₂ ekvivalenta (npr. 10 kg R404a – koji je jedno od najčešćih radnih tvari) obuhvaćene su regulativom.

Postignuća F – gas regulative:

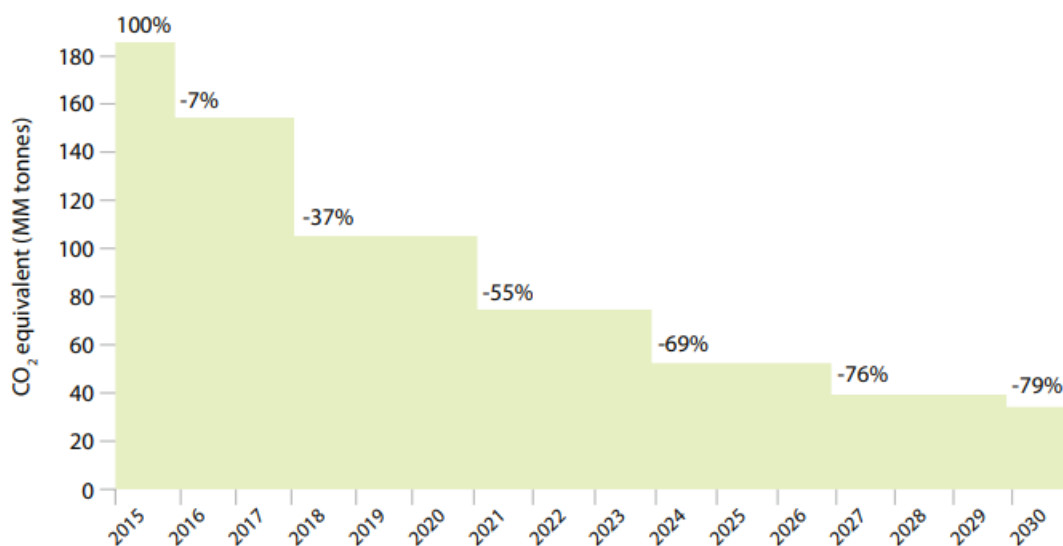
- Prihvaćanje novih rješenja
Povećana je upotreba radnih tvari niskog GWP – a poput HFC – a, HFO – a, HCFO – a u energetske učinkovitijoj opremi
- Smanjenje prosječnog GWP – a
Prosječni GWP HFC/HFO radnih tvari stavljenih na tržište nastavlja padati i smanjene su emisije HFC radnih tvari
- Osiguranje dostupnosti
Dostupnost i opskrba visokokvalitetnim HFC, HFC mješavinama i HFO radnim tvarima od legitimnih i razvijenih dobavljača, za ključne primjene poput dizalica topline
- Sigurnost
Održavanje visoke razine dostupnosti HFC/HFO/HCFO radnih tvari uz odgovarajuće sigurnosne prednosti
- Recikliranje
Povećani fokus na recikliranje i povrat HFC radnih tvari, pri čemu se obnovljene HFC radne tvari koriste u novoj opremi
- Usklađenost
Visoka razina usklađenosti nositelja kvota za HFC povezana je s EEA izvješćem o F – plinovima za 2019.

2.3.1. Tranzicija radnih tvari pod utjecajem F – gas regulative 517/2014

EU zakonodavstvo nepovratno pokreće razvoj tržišta prema višoj efikasnosti i nižim emisijama stakleničkih plinova.

F – gas regulativa 517/2014 formira način ostvarenja ovih ciljeva, te je stupila na snagu prvim praktičnim primjenama u siječnju 2015. godine.

S ciljem smanjenja HFC-a za gotovo 80% do 2030. godine, F – gas regulativa će značajno utjecati na razvoj industrije hlađenja.



Slika 2. 1 – Postupno smanjenje dozvoljene primjene HFC – a [1]

S ciljem postizanja postavljenih ciljeva, postavljene su specifične granice GWP indeksa za specifične primjene.

Ove granice zapravo predstavljaju zabranu korištenja određenih radnih tvari u određenim primjenama.

U tablici 2.1 navedene su definirane granice GWP – indeksa za određene primjene prema F – gas regulativi.

Tablica 2. 1 – Definirane granice GWP – indeksa za određene primjene prema F – gas regulative [2]

| Zabrana servisiranja i održavanja | GWP | Vrijeme zabrane |
|--|------|-----------------|
| HFC | 2500 | 1/2020 |
| Zabrana stavljanja na tržište (nove opreme) | GWP | Vrijeme zabrane |
| Frižideri i zamrzivači za komercijalnu upotrebu (hermetički zatvoreni sustavi) | 2500 | 1/2020 |
| Frižideri i zamrzivači za komercijalnu upotrebu (hermetički zatvoreni sustavi) | 150 | 1/2022 |
| Stacionarna rashladna oprema (osim opreme za temperature ispod 50 °C) | 2500 | 1/2020 |
| Višepaketni centralizirani rashladni sustavi za komercijalnu primjenu s kapacitetom ≥ 40 kW (osim u primarnom krugu kaskadnih sustava, gdje je dozvoljeno korištenje fluoriranih stakleničkih plinova s GWP indeksom nižim od 1500) | 150 | 1/2022 |
| Pomični sobni klimatizacijski uređaji (hermetički zatvorena oprema koja se može premještati od strane korisnika) | 150 | 1/2020 |
| Single split klimatizacijski sustavi koji sadrže < 3 kg radne tvari | 750 | 1/2025 |

Iz navedenog je očito da će najraširenija radna tvar u stacionarnom hlađenju danas, R404A, postupno biti istisnuta s tržišta.

Navedeno će se postići kroz ograničenje GWP indeksa stacionarne rashladne opreme na 2500 i zabranom servisa HFC-a što stupa na snagu od siječnja 2020.

I postupno smanjenje i zabrane uvesti će značajne promjene u industriju grijanja, ventilacije, klimatizacije i hlađenja, nadilazeći izbor rashladnog sredstva i uključujući promjene u projektiranju sustava i prakse na terenu.

Ambiciozni plan postupnog smanjenja postavljen od strane EU poziva na brzi prijelaz s današnjih radnih tvari na nove alternativne, s nižim potencijalom globalnog zatopljenja.

2.3.2. Alternativne radne tvari

Najsigurniji način za bilo koju organizaciju u bilo kojoj primjeni da reagira na ovu situaciju je da svoju poslovnu aktivnost preusmjere prema radnim tvarima s GWP – om znatno nižim od 10. Iz današnje perspektive, takve radne tvari se mogu smatrati otpornima na budućnost, tj. ostati će na tržištu dulje vrijeme.

U praksi, razmatranja životnog ciklusa, kao što su starost instalacije, raspoloživi investicijski budžet, kao i zahtjevi specifični za primjenu mogu ograničiti našu sposobnost brzog prijelaza na takva rashladna sredstva za budućnost.

Računajući na to, tržište također zahtijeva posredna sredstva, tj. rashladna sredstva koja možda neće biti otporna na budućnost, ali ipak omogućuju značajno smanjenje GWP-a.

U nekim aplikacijama, praktički nema dostupnih upotrebljivih alternativa tako da se postojeće radne tvari moraju koristiti u doglednoj budućnosti.

U nekim segmentima tržišta vezanim uz grijanje i hlađenje, upitno je hoće li radne tvari za budućnost s GWP – om < 10 ikada doći na tržište.

U tim segmentima posredne radne tvari mogu se pretvoriti u dugotrajna rješenja.

Iz tog razloga modeliranje ukupne „potrošnje“ GWP – a postaje važno. Segmenti industrije gdje postoje radne tvari otporne na budućnost trebaju kompenzirati za one koji nemaju dostupne alternative kako bi se postigao opći cilj smanjenja.

Praktično je razmotriti izbor radnih tvari u kategorijama i uzeti u obzir samo one koje imaju velike šanse da ostanu na tržištu dugoročno, tj. radne tvari za budućnost.

Navedene kategorije su sažete u tablici 2.2.

Tablica 2. 2 - Podjela radnih tvari po kategorijama i njihova održivost na tržištu [3]

| Kategorija radne tvari | Oznaka | Primjeri | Raspon GWP-a | Spremna za upotrebu | Prirodna |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------|----------|
| HFC alternative niskog GWP | HFC A1 | R407A/F, R134a | 1400 do 2500 | Danas | Ne |
| Posredne radne tvari | HFO A1 mješavine | R449A, R450A | 400 do 1500 | Danas | Ne |
| | HFO A2L mješavine, R32 | R447A, R454B, R32 | 150 do 700 | Od 2016. | Ne |
| Radne tvari budućnosti | HFO | R1234yf, R1234ze | 4 do 6 | Od 2016. | Ne |
| | A3 | R290 (Propan) | 3 | Danas | DA |
| | A1 | R744 (CO ₂) | 1 | Danas | DA |

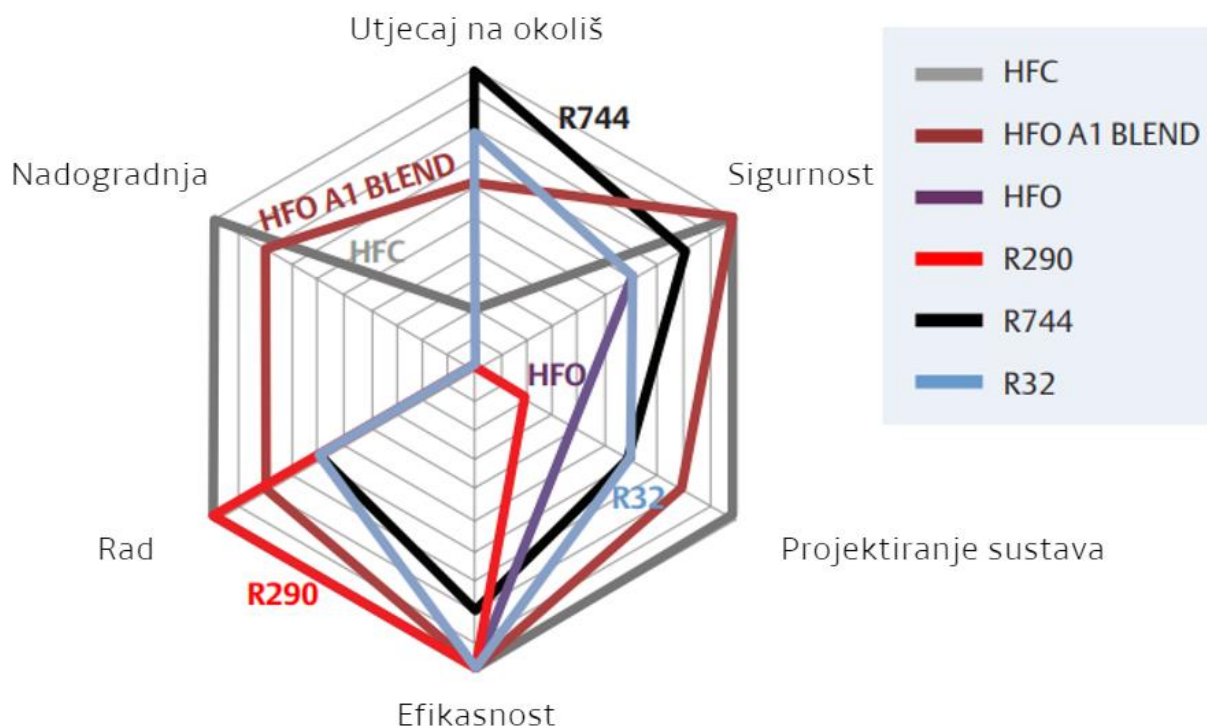
2.3.3. Procjena radnih tvari

Niže prikazani dijagram ocjenjuje radne tvari i kategorije prema kriterijima koji su relevantni za projektante sustava i servisere kod donošenja odluka bilo u dizajnu novog sustava ili situacijama zamjene kod postojećih sustava.

Nijedan od ovih kriterija i ocjena ne bi trebao voditi do kategoričkog isključivanja određenog izbora. Dijagram bi se trebao koristiti za identifikaciju posebnih područja pozornosti u odnosu na današnji dizajn sustava ili operativnu praksu.

Bilo koji od danih izbora može se pokazati održivim. Konačni izbor je uvijek individualna odluka.

Na slici 2.2 prikazan je dijagram ocjenjivanja radnih tvari.



Slika 2. 2 - Dijagram ocjenjivanja radnih tvari prema relevantnim kriterijima odabira [4]

Sljedeći odjeljak daje kratak sažetak razmatranja koja dovode do procjene predstavljene gornjim dijagramom.

2.3.3.1. Utjecaj na okoliš

Svi razmatrani izbori radnih tvari nemaju potencijal razgradnje ozona. Stoga je ekološka procjena radnih tvari temeljena na potencijalu globalnog zagrijavanja (GWP).

Specifične vrijednosti GWP – a navedene su niže.

2.3.3.2. Sigurnost

Sigurnosni aspekti u dijagramu uzimaju u obzir ASHRAE sigurnosne grupe A1 (neotrovno, nezapaljivo), A2L (neotrovno, blago zapaljivo) i A3 (neotrovno, zapaljivo).

2.3.3.3. Projektiranje sustava

Ovaj kriterij razmatra utjecaj izbora radne tvari na ulaganja vezana uz projektiranje sustava.

Npr. R744 sustav uzrokuje veće troškove sustava zbog višeg potrebnog tlaka i drugih svojstava CO₂. Slično, sustav koji koristi zapaljive ili blago zapaljive radne tvari ima određene osobitosti koje uzrokuju povećanje troškova.

2.3.3.4. Učinkovitost sustava

To objašnjava činjenicu da je projektiranje sustava R744 izazovno zbog cilja postizanja visoke učinkovitosti sustava, osobito u toplijim klimama.

R744 se smatra sličnim ili nešto lošijim u smislu učinkovitosti sustava u usporedbi s najsvremenijim HFC sustavima.

2.3.3.5. Rad

R744 zahtijeva posebnu pozornost zbog porasta tlaka u dijelovima sustava s temperaturom okoline, npr u slučaju nestanka struje ili stagnacije.

2.3.3.6. Nadogradnja

Kako bi se kvalificirala za nadogradnju, radna tvar mora proizvesti što je moguće identičniji volumenski kapacitet od rashladnog sredstva koje zamjenjuje.

Nadalje, razine radnog tlaka moraju biti slične, a sigurnosna klasa mora biti identična.

Mnoge mješavine HFO A1 su bliske tim zahtjevima.

2.3.3.7. Upute za zamjenu radnih tvari

Od 2016. godine tržište radnih tvari je već u tranziciji. Proizvođači radnih tvari pokrenuli su zamjenske mogućnosti za neke od češće korištenih radnih tvari, dok još uvijek razvijaju rješenja za druge.

Tablica 2.3 sažima često korištene radne tvari i dostupne alternative s niskim GWP – om koje su danas u potpunosti dostupne na tržištu (spremne za korištenje) ili o kojima se raspravlja kao o potencijalnim zamjenskim kandidatima.

Kandidati koji nisu označeni kao „spremna za upotrebu“ mogu biti dostupni za testiranje na terenu, ali se ne mogu smatrati uobičajenim zamjenama danas iz raznoraznih razloga.

Ti razlozi mogu biti nedostupnost konačnih radnih tvari i podataka o svojstvima, nedostupnost komponente proizvodne serije za ove radne tvari i druge razloge.

Također se mora naznačiti da popis nije konačan. Različiti proizvođači radnih tvari dizajniraju mješavine vrlo slične navedenima u sljedećoj tablici.

Tablica 2. 3 - Svojstva često korištenih radnih tvari i dostupne alternativne radne tvari niskog GWP – a [5]

| ASHRAE OZNAKA | Uobičajeni naziv | GWP | Sigurnosna klasa | Zamjena za | Spremna za upotrebu |
|------------------|---------------------|-----------|---------------------|------------|------------------------|
| R404A | R404A | 3922 | A1 | - | Danas |
| R407A/F | R407A/F | 2107/1825 | A1 | - | Danas |
| R134a | R134a | 1430 | A1 | - | Danas |
| R448A | N40 | 1387 | A1 | R404A | Danas |
| R449A | XP40 | 1397 | A1 | R404A | Danas |
| R450A | N13 | 604 | A1 | R134a | Danas |
| R513A | XP10 | 631 | A1 | R134a | Danas |
| R744 | CO ₂ | 1 | A1 | - | Danas |
| R32 | R32 | 675 | A2 (A2L) | R410A | Od 2016. |
| R447A/DR5x | L41/DR5x | 450...700 | A2 (A2L) | R410A | Od 2016. |
| R444B/DR3 | L20/DR3 | 150...300 | A2 (A2L) | R407C | Od 2016. |
| R454A/R455A | XL40/HDR110 | 148/246 | A2 (A2L) | R404A | Od 2016. |
| R1234yf | 1234yf | 4 | A2 (A2L) | R134a | Od 2016. |
| R1234ze | 1234ze | 6 | A2 (A2L) | R134a | Od 2016. |
| R290 | Propan | 3 | A3 | - | Danas |

2.3.3.8. Izbor radne tvari prema tržišnom segmentu i primjeni

Konkretnije upute mogu se dati kada se razmatra izbor radne tvari u kontekstu specifičnog dizajna sustava ili vrste opreme za primjenu.

Međutim, preporuke mogu biti samo općenite prirode. Procjene se provode od slučaja do slučaja kako bi se uzeli u obzir specifični parametri vezani uz primjenu, kao što su temperatura okoline, punjenje sustava, instalacija u unutarnjim prostorima ili područja s ograničenim pristupom i mnoge druge.

U tablici 2.4 pojam „posredni“ mora se tumačiti s određenom fleksibilnošću ovisno o tome segmentu primjene i dostupnosti prikladnih alternativnih radnih tvari budućnosti.

Općenito se pretpostavlja da opisuje razdoblje od 5 do 10 godina.

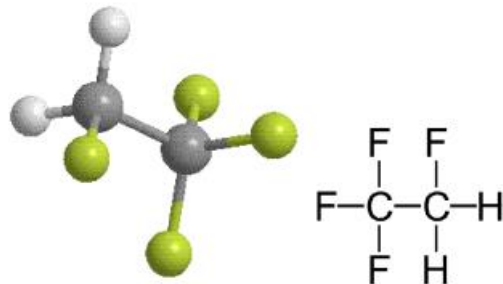
Tablica 2. 4 - Posredne i zamjenske radne tvari za najčešće korištene radne tvari po segmentima primjene [6]

| Projektiranje sustava | Danas | Posredni | Radna tvar budućnosti |
|---|-------|--------------|--------------------------|
| Kondenzacijske jedinice i mala pakiranja < 40 kW | R404A | R448A, R449A | R744, R290 |
| | R134a | R450A, 4513A | |
| | R407C | R407C | |
| Paketi s više kompresora na izravnu ekspanziju i sekundarno | R404A | R448A, R449A | R744, R290 |
| | R134a | R450A, R513A | |
| Hibridni srednjetermperturni sustavi Niskotemperturni pretpostavljen CO ₂ | R404A | R448A, R449A | R290 |
| | R134a | R450A, R513A | |
| CO ₂ booster sustavi | R744 | R744 | R744 |
| Samostalni sustavi | R404A | R448A, R449A | R290 |
| | R134a | R450A, R513A | |
| Stambeno i komercijalno grijanje | R407C | R407C | R290 |
| | R410A | R410A | |
| Komercijalni rashladni uređaji – mali | R410A | R410A | R290 |
| Komercijalni rashladni uređaji – veliki R290 | R410A | R410A | |
| | R134a | R134a | |

3. EKOLOŠKI PRIHVATLJIVE RADNE TVARI

Atmosferski efekt staklenika i oštećenje ozona uzrokovano emisijama radnih tvari doveli su do velikih promjena u industriji klimatizacije i hlađenja, kao i do razvoja novih radnih tvari s niskim potencijalom globalnog zatopljenja.

3.1. R134a



Slika 3. 1 - R134a - 1,1,1,2 – tetrafluoretan [7]

Svojstva radne tvari:

- Kemijska formula: CH_2FCF_3
- Molna masa: $M = 102,03 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 101,06^\circ\text{C}$ i tlak $p = 40,593 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -26,074^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 1300$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A1

R134a (1,1,1,2 – tetrafluoretan) je radna tvar koja pripada skupini HFC radnih tvari (fluorirani ugljikovodici) svojstava sličnih R12, ali neznajnog ODP – a i značajno nižeg GWP – a.

Postupno izbacivanje iz upotrebe i prijelaz na HFO – 1234yf i druge radne tvari s GWP – om sličnim CO_2 , započelo je 2012. na tržištu automobila [8].

R134a je nezapaljivi plin koji se primarno koristi kao visoko - temperaturna radna tvar za kućno hlađenje i automobilske klima uređaje.

R134a je u navedenim uređajima početkom 1990 – ih zamijenio za okoliš štetniji R12. Dostupni su kompleti za preinaku jedinica koje su izvorno bile opremljene R12.

Od drugih uobičajenih primjena vrijedno je spomenuti da se R134a koristi i za puhanje plastične pjene, kao otapalo za potrebe čišćenja, kao pogonsko gorivo za isporuku lijekova (bronhodilatatori), uklanjanje vinskih čepova, konzerviranog zraka, i u sušaćima zraka za uklanjanje vlage iz komprimiranog zraka. Također se koristi za hlađenje računala u nekim primjenama, kao rashladno sredstvo u kompletima za zamrzavanje vodovodnih cijevi i pogonsko gorivo za airsoft zračne puške. Radna tvar se često miješa s mazivom na bazi silikona.

Mješavine R134a sa zrakom nisu zapaljive pri atmosferskom tlaku i temperaturama do 100 °C. Međutim, mješavine s visokim koncentracijama zraka pri povišenom tlaku ili temperaturi mogu se zapaliti.

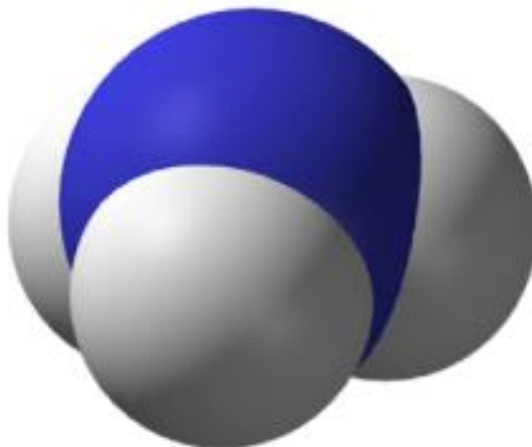
Kontakt R134a s plamenom ili vrućim površinama iznad 250 °C može uzrokovati razgradnju pare i emisiju otrovnih plinova.

Relativno je netoksičan i većina smrti od zlorabotrebje prouzročena je direktnim udisanjem većih količina zato što zbog veće gustoće od zraka istiskuje zrak iz pluća.



Slika 3. 2 - Cilindar s R134a [9]

3.2. R717



Slika 3. 3 - R717 - amonijak [10]

Svojstva radne tvari:

- Kemijska formula: NH_3
- Molna masa: $M = 17,03 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 132,25^\circ\text{C}$ i tlak $p = 113,33 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -33,33^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 0$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: B2

R717 (NH_3) je radna tvar koja pripada skupini prirodnih radnih tvari. R717 (amonijak) je spoj dušika i vodika, izrazito otrovan plin bez boje s izraženim oštrim mirisom i gustoće manje od zraka. Nema utjecaja na ozon, kao ni na globalno zatopljenje.

Amonijak ne gori lako, niti održava izgaranje, osim u uskim rasponima smjese amonijaka i zraka od 12 – 25% zraka. Kada se pomiješa s kisikom, gori blijedožučkasto – zelenim plamenom.

Iako je uobičajen u prirodi, i u širokoj primjeni, amonijak je vrlo opasan u koncentriranom obliku. U mnogim zemljama klasificira se kao iznimno opasna tvar i podliježe strogim zahtjevima za prijavu od strane objekata koji ga proizvode, skladište ili koriste u značajnim količinama.

Amonijak se primjenjuje za nisko i srednje – temperaturno hlađenje.

Zbog visoke isparljivosti amonijak je korisna radna tvar. Često se koristio prije popularizacije klorofluorouglijika (CFC). Bezvodni amonijak ima široku primjenu u industrijskim rashladnim uređajima i na hokejaškim terenima zbog svoje visoke energetske učinkovitosti i niske cijene.

Nedostatak mu je toksičnost i to što zahtjeva komponente otporne na koroziju, što ograničava njegovu primjenu u domaćinstvu i hlađenjima manjih razmjera.

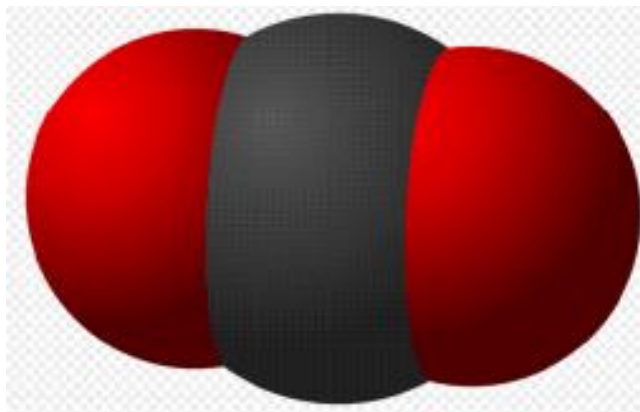
Uz primjenu u suvremenom parno – kompresijskom hlađenju koristi se i u smjesi s vodikom i vodom u apsorpcijskim hladnjacima.

Od ostalih primjena vrijedno je spomenuti da se koristi i kao sredstvo za čišćenje, u procesima vrenja, kao antimikrobno sredstvo u prehrambenim proizvodima, i za proizvodnju gnojiva.

Mješavine R717 sa zrakom teško su zapaljive u odsutnosti katalizatora, zbog relativno niske topline izgaranja, visoke temperature samozapaljenja, visoke topline isparivanja i uskog raspona zapaljivosti.

Mješavina sa zrakom je zapaljiva u uskim rasponima smjese amonijaka i zraka od 12 – 25% zraka.

3.3. R744



Slika 3. 4 - R744 - ugljikov dioksid [11]

Svojstva radne tvari:

- Kemijska formula: CO_2
- Molna masa: $M = 44,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 30,978^\circ\text{C}$ i tlak $p = 73,773 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -78,4^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$

- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $GWP_{100} = 1$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A1

R744 (CO₂) je radna tvar koja pripada skupini prirodnih radnih tvari. R744 (CO₂) je neotrovan plin bez boje i mirisa.

Postaje sve popularniji zbog svojih izvrsnih svojstava, nema utjecaja na ozonski sloj (ODP = 0) i potencijal globalnog zatopljenja GWP jednak 1.

R744 (CO₂) primjenjuje se kao zamjena za R134a i R404A u ultra niskom, niskom i srednje temperaturnom hlađenju.

Tekući ugljični dioksid (R744) korišten je kao radna tvar prije upotrebe R12, ali se u posljednje vrijeme sve više koristi kao zamjena za R134a, jer R134a kao jedna od glavnih zamjena za R12 više doprinosi klimatskim promjenama nego CO₂.

Zbog potrebe za radom pri visokim tlakovima (do 130 bara) CO₂ sustavi zahtijevaju vrlo mehanički otporne rezervoare i komponente koje su već razvijene za masovnu proizvodnju u mnogim sektorima.

U automobilskim klima uređajima, u više od 90% svih uvjeta vožnje za geografske širine veće od 50°, CO₂ (R744) radi učinkovitije od sustava koji koriste HFC radne tvari (npr. R134a)

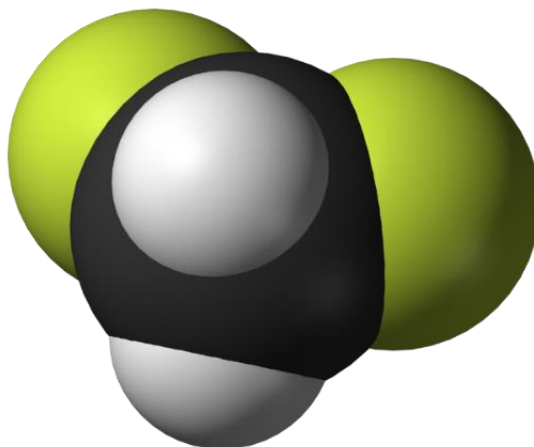
Njegove ekološke prednosti (GWP od 1, ne oštećuje ozonski omotač, netoksičan, nezapaljiv) mogle bi ga učiniti radnom tvari budućnosti koja će zamijeniti sadašnje HFC – ove u automobilima, supermarketima i dizalicama topline za grijanje vode.

Coca – Cola je pokrenula hladnjake za piće na bazi CO₂, a američka vojska je zainteresirana za tehnologiju grijanja i hlađenja s CO₂.

Od ostalih primjena valja napomenuti da se CO₂ koristi u medicini, kao otapalo, u eksploataciji fosilnih goriva, u vatrogasnim aparatima itd.

Iako je neotrovan, i nezapaljiv, ekstremno visoki radni tlakovi R744 i opasnosti povezane s potencijalno visokim koncentracijama CO₂ u kabinama vozila ili radnim okruženjima znače da se ova radna tvar mora pažljivo koristiti.

3.4. R32



Slika 3. 5 - R32 - difluorometan [12]

Svojstva radne tvari:

- Kemijska formula: CH_2F_2
- Molna masa: $M = 52,02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 78,105^\circ\text{C}$ i tlak $p = 57,82 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -51,651^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 675$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A2

R32 je radna tvar koja pripada skupini HFC radnih tvari (fluorirani ugljikovodici). R32 je bezbojni, blago zapaljivi, neotrovni plin bez mirisa.

Srednje je visokog GWP – a, bez utjecaja na ozonski omotač ($\text{ODP} = 0$).

R32 koristi se kao zamjena za R410A u nisko – temperaturnim rashladnim uređajima i klima uređajima. Ova radna tvar je poželjna zamjena za R410A u novoj opremi, ne smije se koristiti za naknadnu ugradnju. [13]

Difluorometan je molekula koja se koristi kao radna tvar jer ima istaknuta svojstva prijenosa topline i pada tlaka, kako kod kondenzacije tako i kod isparivanja. Da bi se smanjio rizik povezan s njezinom blagom zapaljivošću, ovu molekulu treba primijeniti u opremi za prijenos topline s malim punjenjem poput lemljenih pločastih izmjenjivača topline (BPHE) ili shell and tube izmjenjivačima topline, i cijevnim i pločastim izmjenjivačima topline s cijevima malog promjera.

R32 pokazuje koeficijente prijenosa topline veće od onih za R410A pod istim radnim uvjetima, ali i veće padove tlaka zbog trenja.

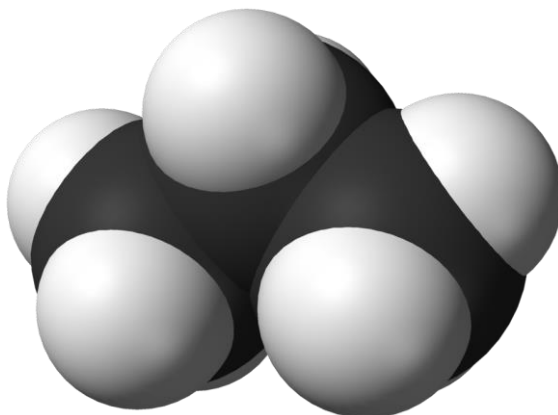
Često se koristi kao sredstvo za gašenje požara, kao pogonsko sredstvo za aerosole i otapalo.

R32 je neotrovna radna tvar, koja se zbog blage zapaljivosti primjenjuje u manjim rashladnim uređajima s manjim punjenjem.



Slika 3. 6 - Cilindar s R32 [14]

3.5. R290



Slika 3. 7 - R290 - Propan [15]

Svojstva radne tvari:

- Kemijska formula: C_3H_8 ($CH_3CH_2CH_3$)
- Molna masa: $M = 44,10 \frac{kg}{kmol}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 96,74^\circ C$ i tlak $p = 42,512$ bar
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -42,114^\circ C$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: ODP = 0
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $GWP_{100} = 3$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A3

R290 (propan) je radna tvar koja pripada skupini prirodnih radnih tvari. R290 je neotrovan plin bez boje i mirisa.

Propan je ugljikovodik, i iako je vrlo zapaljiv, učinkovita je radna tvar koja ima nizak potencijal globalnog zagrijavanja i nema utjecaj na ozonski omotač.

R290 se primjenjuje kao alternativa za R22 i R502 u aplikacijama za hlađenje i klimatizaciju na niskim, srednje niskim i visokim temperaturama [16].

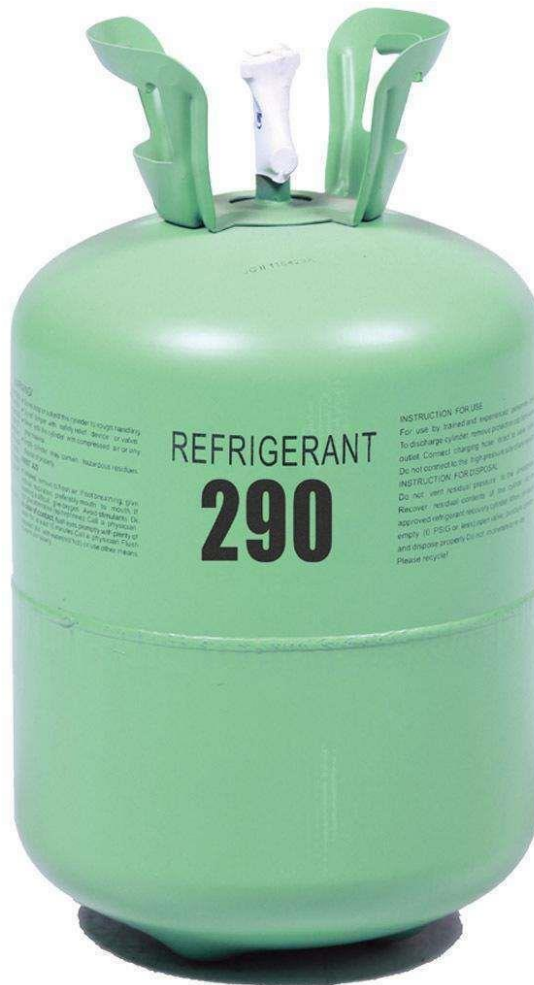
U usporedbi s fluorougljicima, propan ima zanemariv potencijal oštećenja ozona i vrlo nizak potencijal globalnog zatopljenja, te može poslužiti kao funkcionalna zamjena za R12, R22, R134a i druge klorofluorougljike i fluorirane ugljikovodike u konvencionalnim stacionarnim rashladnim i klimatizacijskim sustavima.

Budući da je njegov učinak globalnog zatopljenja daleko manji od onoga trenutno upotrebljivanih radnih tvari, propan je odabran kao jedan od pet zamjenskih radnih tvari odobrenih od strane EPA – e 2015. godine, za upotrebu u sustavima posebno dizajniranim za rukovanje njegovom zapaljivošću.

Ostale značajnije primjene su uporaba propana kao goriva, kao izvora energije za apsorpcijske hladnjake i uporaba za vozila za kampiranje i rekreacijska vozila.

Zbog svoje zapaljive prirode R290 (propan) zahtijeva drugačije postupke punjenja i obnavljanja.

Zabranjena je uporaba R290 u klimatizacijskim sustavima motornih vozila, jer postoji značajan rizik od požara ili eksplozije.



Slika 3. 8 - Cilindar s R290 [17]

3.6. R410A

Svojstva radne tvari:

- Sastav: zeotropna mješavina plinova R32, Difluormetan (50%) i R125, Pentafluoretan (50%)
- Kemijska formula: R32, Difluormetan: CH_2F_2 ; R125, Pentafluoretan: CHF_2CF_3
- Molna masa: $M = 72,585 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 71,358^\circ\text{C}$ i tlak $p = 49,026 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -51,44^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 2000$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A1

R410A je zeotropna, ali gotovo azeotropna HFC mješavina difluorometana R32 i pentafluoroetana R125.

R410A je neotrovan, nezapaljiv i bez mirisa.

Nema utjecaja na ozonski sloj (ODP = 0) i srednje visoki GWP.

R410A se uglavnom koristi u klimatizacijskim sustavima, ali se također može koristiti i kao alternativa R13B1 u nisko temperaturnom hlađenju [18].

R410A je zamijenio R22 kao preferiranu radnu tvar za upotrebu u stambenim i komercijalnim klimatizacijskim uređajima u Japanu, Europi i Sjedinjenim Američkim Državama[19].

Moraju se koristiti dijelovi posebno dizajnirani za R410A, budući da R410A radi pri višim tlakovima od ostalih radnih tvari te stoga nije prikladan kao zamjenska radna tvar bez nadogradnje. Sustavi R410A stoga zahtijevaju od servisera korištenje različitih alata, opreme, sigurnosnih standarda i tehnika. Proizvođači opreme svjesni su ovih promjena i zahtijevaju certificiranje stručnjaka koji instaliraju sustave R410A.

Pri punjenju mora se puniti iz tekuće faze kako bi se osigurao točan sastav.

3.7. R1234ZE

Svojstva radne tvari:

- Kemijska formula: $C_3H_2F_4$
- Molna masa: $M = 114,0 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 150,12^\circ\text{C}$ i tlak $p = 35,306 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -19,0^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: ODP = 0
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 6$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A2L

Radna tvar niskog GWP – a, bez utjecaja na ozonski sloj, bazirana na HFO (hidrofluoroolefinima) koja ima primjenu u novijim uređajima poput hladnjaka vode, dizalicama topline i sustavima klimatizacije [20].

Poput R134a, R1234ze je radna tvar koja se koristi pri srednje visokim tlakovima, koja pripada hidrofluoroolefinima niskog GWP indeksa.

R1234ZE ima gotovo istu kritičnu temperaturu i temperaturu vrenja, kao i niži kritičan tlak u odnosu na R134a, čime je kompatibilan za najkorištenije materijale.

Energetski je učinkovita alternativa za R134a u rashladnim uređajima na vodu i zrak, kao i za primjenu u srednje temperaturnim aplikacijama poput dizalica topline i CO2 kaskadnim uređajima za komercijalno hlađenje.

Radne tvari na bazi hidrofluoroolefina, uključujući R1234ze koje se mogu primijeniti u stacionarnim rashladnim uređajima, nemaju utjecaj na ozonski sloj (ODP = 0), čime predstavljaju ekološki prihvatljiviju alternativu za HFC radne tvari.

Radni uvjeti i efikasnost R1234ze su jednake onima od R134a, te stoga može adekvatno zamijeniti R134a u rashladnoj opremi, rashladnim uređajima za vodu i dizalicama topline.

Kapaciteti rashladnih uređaja na R1234ze su niži od onih ostvarenih pri korištenju R134a, ali sustavi na R1234ze imaju manju potrošnju energije, te konačno nešto višu energetska učinkovitost.

Istovremeno, zbog nešto manjih kapaciteta, nije moguće koristiti R1234ze kao zamjensku radnu tvar za uređaje na R134a bez potrebnih preinaka.

Radne tvari na bazi hidrofluoroolefina HFO su klasificirane kao blago zapaljive u ne radnim uvjetima. Što se tiče sigurnosti pri radu, prema ASHRAE, R1234ze je svrstan u sigurnosnu skupinu A2L što znači da je blago zapaljiv i niske toksičnosti.

3.8. R513a

Svojstva radne tvari:

- Sastav: azeotropna mješavina plinova R134a, Tetrafluoretan (44%) i R1234yf, Tetrafluoropropen (56%)
- Kemijska formula: R134a, 1,1,1,2 - Tetrafluoretan: CH_2FCF_3 ; R1234yf, 2,3,3,3 - Tetrafluoropropen: $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$
- Molna masa: $M = 108,43 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 94,913^\circ\text{C}$ i tlak $p = 36,478 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -29,2^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: ODP = 0
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 573$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A1

R513a predstavlja tzv. Drop in zamjenu za R134a, što znači da je s R513a moguće zamijeniti R134a bez izvođenja preinaka na uređajima [21].

R513a radna tvar ima nekoliko prednosti, predstavlja manje štetnu alternativu za okoliš time što ne utječe na ozonski sloj, te ima 56% niži GWP indeks u usporedbi za R134a.

Nema značajnih sekundarnih štetnih utjecaja na okoliš, ima nisku toksičnost i nije zapaljiv.

R513a je azeotropna mješavina niskog GWP – a, bazirana na hidrofluoroolefinima HFO, bez utjecaja na stratosferski ozonski sloj.

Razvijena je s ciljem zamjene R134a u novim i nadograđenim srednje temperaturnim rashladnim sustavima.

Energetska učinkovitost i kapacitet odgovaraju onima R134a, što dozvoljava pretvorbu postojećih sustava na R134a na rad s R513a čime se značajno smanjuje štetni utjecaj na okoliš.

GWP za R513a iznosi 573 (u usporedbi sa 1300 kod R134a), dok je ODP jednak nuli. R513a je nezapaljiv u zraku pod normalnim uvjetima.

R513a primjenjuje se u srednje temperaturnim komercijalnim i industrijskim rashladnim sustavima, srednje temperaturnim kaskadnim sustavima, u rashladnim uređajima za vodu, sustavima klimatizacije i dizalicama topline.

Što se tiče efikasnosti u odnosu na R134A, pruža 4% veći kapacitet u usporedbi s R134a, koeficijent učinkovitosti (COP) jednak onome R134a, 20% veći maseni protok te niži ispusni tlak kompresora. Azeotropna je mješavina bez razlike temperature kapljevitosti i parne faze.

Pružila i niz prednosti za okoliš, relativno nizak GWP od 573, čak 56% niži u odnosu na R134a, nema utjecaja na stratosferski ozonski sloj, te nije otrovan i zapaljiv (ASHRAE A1).

3.9. R450A

Svojstva radne tvari:

- Sastav: zeotropna mješavina plinova R134a, Tetrafluoretan (42%) i R1234ze, Tetrafluoropropen (58%)
- Kemijska formula: R134a, 1,1,1,2 - Tetrafluoretan: CH_2FCF_3 ; R1234ze, 1,3,3,3 - Tetrafluoropropen: $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$
- Molna masa: $M = 108,67 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 104,47^\circ\text{C}$ i tlak $p = 38,224 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -23,1^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 547$

- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A1

R450a je odlična srednjetlačna, visokoeffikasna, nezapaljiva i energetski učinkovita radna tvar niskog GWP indeksa koja predstavlja alternativu za R134a u različitim srednje temperaturnim primjenama. [22]

R450a je zeotropna mješavina radnih tvari R134a i R1234ze razvijena s ciljem da zamijeni R134a pružajući sličnu radnu efikasnost sa smanjenjem potencijala globalnog zatopljenja za gotovo 60%.

R450a je kompatibilan s najčešće korištenim materijalima, punjenje radne tvari moguće je u tekućoj ili parnoj fazi i ima niže temperature pražnjenja u odnosu na R134a.

R450a predstavlja adekvatnu zamjenu u širokom rasponu novih i nadograđenih starih primjena uključujući: transportu rashlađenih tvari, hladnjacima za vodu, hladnjačama, industrijskim rashladnim procesima, klipnim, centrifugalnim, vijčanim i spiralnim rashladnim uređajima i industrijskim klimatizacijskim sustavima.

R450A primjenjuje se u rashladnim uređajima na vodu i zrak, dizalicama topline, u višim fazama kaskadnih dizalica topline na CO₂ i srednje temperaturnom hlađenju temeljenom na izravnoj ekspanziji.

Pružava 87% kapaciteta u usporedbi s R134a, te 100% učinkovitosti u usporedbi s R134a.

Odlikuje ga skoro 60% smanjenja GWP – a u usporedbi s R134a. Sigurna je, neotrova i nezapaljiva radna tvar (ASHRAE A1).

3.10. R455A

Svojstva radne tvari:

- Sastav: zeotropna mješavina plinova R1234yf, Tetrafluoropropen (75,5%), R32, Difluormetan (21,5%) i R744, Ugljikov dioksid (3%)
- Kemijska formula: R1234yf, 2,3,3,3 - Tetrafluoropropen: C₃H₂F₄; R32, Difluormetan: CH₂F₂; R744, Ugljikov dioksid, CO₂
- Molna masa: $M = 87,453 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 85,6^{\circ}\text{C}$ i tlak $p = 46,54 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = 52,1^{\circ}\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: ODP = 0
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: GWP₁₀₀ = 145
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A2L

R455A je neotrovna zeotropna mješavina 75,5% R1234yf, 21,5% R32 i 3% R744 (CO₂) niske zapaljivosti, s GWP – om od 145 i bez utjecaja na ozonski sloj. Osim toga odgovara kapacitetu R404a i ima 5-6% bolju učinkovitost od R404a, te nudi produženi radni opseg u usporedbi s tradicionalnim radnim tvarima za klimatizaciju i propanom [23].

Njegove termodinamička svojstva dopuštaju mu da bude zamjena za R22 i R404a u nisko i srednje i visoko temperaturnom hlađenju, u primjenama poput rashladnih vitrina, kondenzacijskih jedinica, hladnjaka za hranu i sustava s vodenom petljom.

R455A ima visoku kritičnu temperaturu i nizak kritični tlak, što ga čini potencijalno odgovarajućim za primjene poput supermarketa, rashladnih uređaja (chillera), dizalica topline, nisko temperaturne strane kaskadnih sustava i transportnog hlađenja.

Glavne prednosti R455A su vrlo niski GWP od 145, blisko podudaranje kapaciteta s R404A, prošireni radni opseg u usporedbi s radnim tvarima za klimatizaciju, visoka kritična temperatura, nizak kritični tlak, niska temperatura pražnjenja i 30% manji maseni protok u usporedbi s R404a.

3.11. R452B

Svojstva radne tvari:

- Sastav: zeotropna mješavina plinova R32, Difluormetan (67%), R125, Pentafluoretan (7%), i R1234yf, Tetrafluoropropen (26%)
- Kemijska formula: R32, Difluormetan: CH₂F₂; R1234yf, 2,3,3,3 - Tetrafluoropropen: C₃H₂F₄; R125, Pentafluoretan, CHF₂CF₃
- Molna masa: $M = 63,525 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 76^{\circ}\text{C}$ i tlak $p = 52,2 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -51,0^{\circ}\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: ODP = 0
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 675$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A2L

R452B je neotrovna radna tvar na bazi HFO radnih tvari, niske zapaljivosti, koja ne oštećuje ozonski omotač, s niskim GWP – om čija je namjena da zamijeni R410a u klima uređajima, rashladnim uređajima hlađenim vodom i zrakom i dizalicama topline [24].

R452B je radna tvar na bazi HFO radnih tvari, koja ne oštećuje ozonski omotač, s niskim potencijalom globalnog zatopljenja i zamjenjuje R410A u klimatizacijskim uređajima s ekspanzijom, dizalicama topline i rashladnim uređajima.

R452B je namijenjen samo za novi dizajn opreme i preferirana je zamjena za R410A s niskim GWP – om, budući da nudi optimalnu ravnotežu svojstava s dodatnom pogodnošću od približno 5% povećanja energetske učinkovitosti dok se R410A sustavi mogu lako prilagoditi za izvedbu na R452B.

R452B pruža optimalnu ravnotežu efikasnosti, sigurnosti i kompatibilnosti dizajna za zamjenu R410A: do 5 % poboljšanu energetska efikasnost u odnosu na R410A, izvrsnu efikasnost u različitim uvjetima okoline, blagu zapaljivost (vrlo niska svojstva zapaljivosti ASHRAE klase 2L), prilagodljivost opreme (blisko odgovara R410A uz minimalne potrebne izmjene) te nizak GWP, čak 67% smanjenje u odnosu na R410A.

3.12. R454A

Svojstva radne tvari:

- Sastav: zeotropna mješavina plinova R32, Difluormetan (35%) i R1234yf, Tetrafluoropropen (65%)
- Kemijska formula: R32, Difluormetan: CH_2F_2 ; R1234yf, 2,3,3,3 - Tetrafluoropropen: $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$
- Molna masa: $M = 80,468 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 78,9^\circ\text{C}$ i tlak $p = 46,27 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -48,3^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 239$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A2L

R454A je radna tvar razvijena za primjene na niskim temperaturama koje su prethodno bile obuhvaćene R404A i R507A [25].

R454A je neotrova, blago zapaljiva radna tvar koja ne oštećuje ozonski omotač, s vrlo niskim potencijalom globalnog zatopljenja (94% smanjenja u odnosu na R404A), i optimalnom ravnotežom svojstava za zamjenu R404A u novim dizajnima opreme, uključujući nisko i srednje temperaturne komercijalne i industrijske rashladne sustave s ekspanzijom.

Klasificiran kao blago zapaljiv, R454A omogućuje mnogo veće količine punjenja od ostalih zapaljivih radnih tvari i nudi poboljšanu energetska učinkovitost i veće kapacitete hlađenja.

R454A primjenjuje se u nisko temperaturnim komercijalnim, industrijskim i transportnim rashladnim sustavima, distribuiranim sustavima za supermarkete, hladnjače i zamrzivače, u kondenzacijskim jedinicama za srednje i niske temperature i hladnjačama.

Prednosti za okoliš su nulti potencijal oštećenja ozona te nizak potencijal globalnog zatopljenja od 239, čak 83% niži u odnosu na R134a.

Neotrovna je i nezapaljiva radna tvar (ASHRAE A1 klasa).

3.13. R454B

Svojstva radne tvari:

- Sastav: zeotropna mješavina plinova R32, Difluormetan (68,9%) i R1234yf, Tetrafluoropropen (31,1%)
- Kemijska formula: R32, Difluormetan: CH_2F_2 ; R1234yf, 2,3,3,3 - Tetrafluoropropen: $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$
- Molna masa: $M = 62,614 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 77^\circ\text{C}$ i tlak $p = 52,67 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -50,9^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 467$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A2L

R454B je radna tvar vrlo niskog GWP – a, razvijena kao zamjena za R410A koja pruža sličan kapacitet i učinkovitost [26].

R454B je neotrovna, blago zapaljiva radna tvar, bez utjecaja na ozonski omotač i s niskim potencijalom globalnog zatopljenja na bazi hidrofluoroolefina koja zamjenjuje R410A u novijoj opremi.

Nudi optimalnu ravnotežu svojstava za zamjenu R410A u klimatizacijskim uređajima s izravnom ekspanzijom, rashladnim uređajima i dizalicama topline.

R454B nudi slična svojstva kao R410A što ga čini jednostavnom i ekonomičnom za primjenu u novoj opremi bez većih modifikacija.

R454B primjenjuje se u komercijalnim rashladnim uređajima i dizalicama topline, te predstavlja izravnu zamjenu za sve vrste opreme dizajnirane za R410A.

U pogledu efikasnosti, u usporedbi s R410A pruža 3% niži kapacitet, poboljšanje učinkovitosti od 2% u odnosu na radnu tvar R410A te 20% manji maseni protok u odnosu na R410A.

Primjenom R410A značajno se umanjuje negativan utjecaj na okoliš, R410A ima 78% niži GWP indeks u odnosu na R410A te nulti potencijal oštećenja ozona.

3.14. R454C

Svojstva radne tvari:

- Sastav: zeotropna mješavina plinova R32, Difluormetan (21,5%) i R1234yf, Tetrafluoropropen (78,5%)
- Kemijska formula: R32, Difluormetan: CH_2F_2 ; R1234yf, 2,3,3,3 - Tetrafluoropropen: $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$
- Molna masa: $M = 90,776 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
- Kritična točka: temperatura $\vartheta = 82,4^\circ\text{C}$ i tlak $p = 43,19 \text{ bar}$
- Vrelište (1 atm): temperatura $\vartheta = -45,9^\circ\text{C}$
- Potencijal razgradnje ozona ODP: $\text{ODP} = 0$
- Potencijal globalnog zagrijavanja GWP: $\text{GWP}_{100} = 146$
- ANSI/ASHRAE 34 klasifikacija sigurnosti: A2L

R454C je radna tvar vrlo niskog GWP – a, razvijena kao zamjena za R404A i R22 u novim komercijalnim i industrijskim rashladnim sustavima [27].

R454C je neotrovna, blago zapaljiva radna tvar na bazi hidrofluoroolefina s niskim GWP – om i bez utjecaja na ozonski omotač, s optimalnom ravnotežom svojstava za zamjenu radnih tvari R404A i R22 u primjenama s izravnom ekspanzijom pri srednjim i niskim temperaturama.

Nudi efikasnost bliske radnim sredstvima za koja je dizajniran da ih zamijeni, što čini R454C lakim i isplativim za primjenu na novoj opremi uz manje izmjene.

S GWP – om od 146, R454C spada ispod vrijednosti praga od 150 u Uredbi o F – plinu 517/2014 i zahtjevima za ekološki dizajn, stoga je posebno prikladan za komercijalne i industrijske rashladne sustave.

R454C primjenjuje se u nisko i srednje temperaturnim komercijalnim i industrijskim sustavima prethodno dizajniranim za R404A ili R22, u kondenzacijskim jedinicama, hladnjačama, ulaznim hladnjacima i zamrzivačima. Idealno je pogodan za hermetički zatvorene rashladne sustave te se lako može primijeniti na sustave na R404A i R22 uz minimalne promjene.

U usporedbi s R404A pruža 10% manji kapacitet, 7,5% veći COP (koeficijent učinkovitosti), 25% smanjenje masenog protoka te niži usisni i ispusni tlak kompresora.

Primjenom R404 ostvaruje se i značajno smanjen utjecaj na okoliš, s GWP indeksom nižim od 150 ostvaruje se čak 96% smanjenje u odnosu na R404A. Zadovoljava F – gas i Ecodesign GWP zahtjeve, nema utjecaja na ozonski sloj te je neotrovna i blago zapaljiva radna tvar.

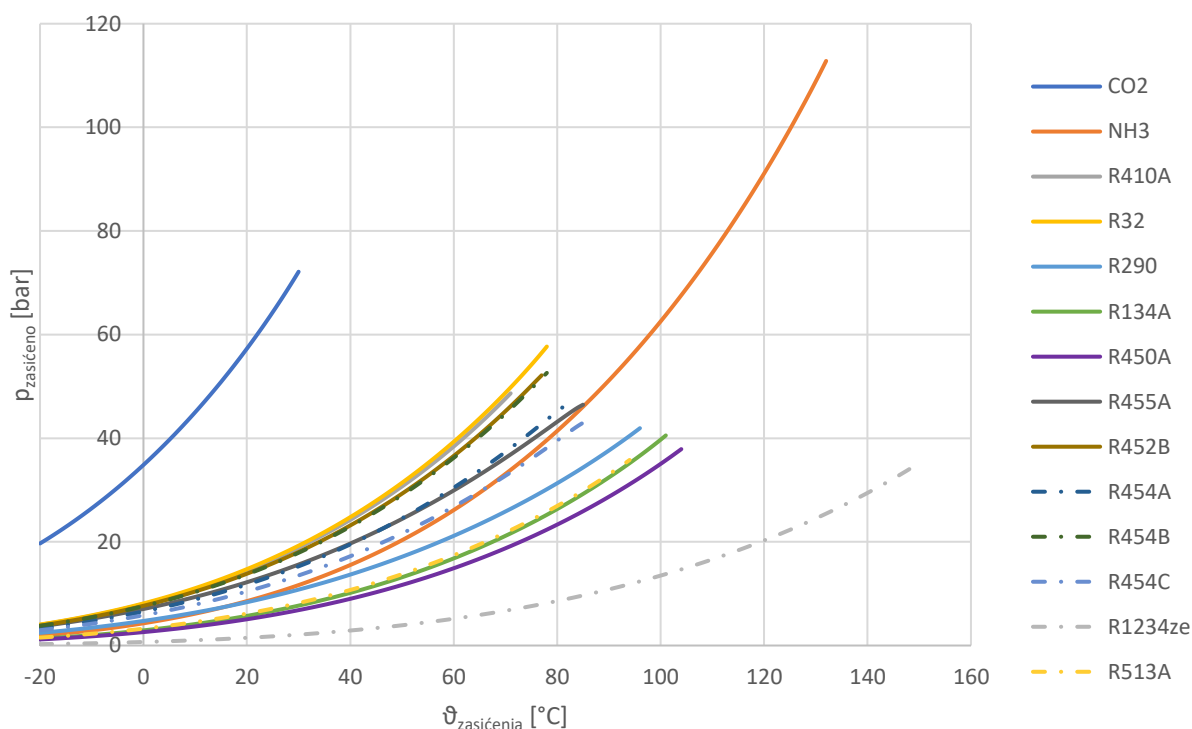
3.15. USPOREDBA SVOJSTAVA RADNIH TVARI

3.15.1. Ovisnost kritičnog tlaka i temperature

Krivulja zasićenja nam služi za evaluaciju radnih tvari, tj. njome procjenjujemo koliko je koja radna tvar primjenjiva i u koje svrhe.

Iz krivulje zasićenja saznajemo korisne informacije poput radnih tlakova pri određenim temperaturama isparivanja/kondenzacije, ponašanje radne tvari (tlaka) pri porastu temperature, kompresijske omjere kod određenih temperatura isparivanja i kondenzacije itd [28].

Na sljedećem dijagramu prikazana je ovisnost kritičnog tlaka i temperature.



Slika 3. 9 - Krivulje zasićenja radnih tvari

Iz krivulja zasićenja je vidljivo da R744 (CO₂) ima izrazito nepovoljnu krivulju, porast tlaka s porastom temperature je izrazito strm, te je područje primjene vrlo ograničeno (niska kritična temperatura od 30,978 °C)

Najpovoljniju, tj. najblaže rastuću krivulju ima radna tvar R1234ze, ali zbog vrlo niskih tlakova pri uobičajenim temperaturama isparivanja, imamo najviše kompresijske omjere.

Najpovoljniju krivulju iz pogleda kompresijskih omjera ima radna tvar R290, tj. za ovu radnu tvar imamo najmanje gubitke.

Najniže radne tlakove postizemo uporabom radne tvari R1234ze.

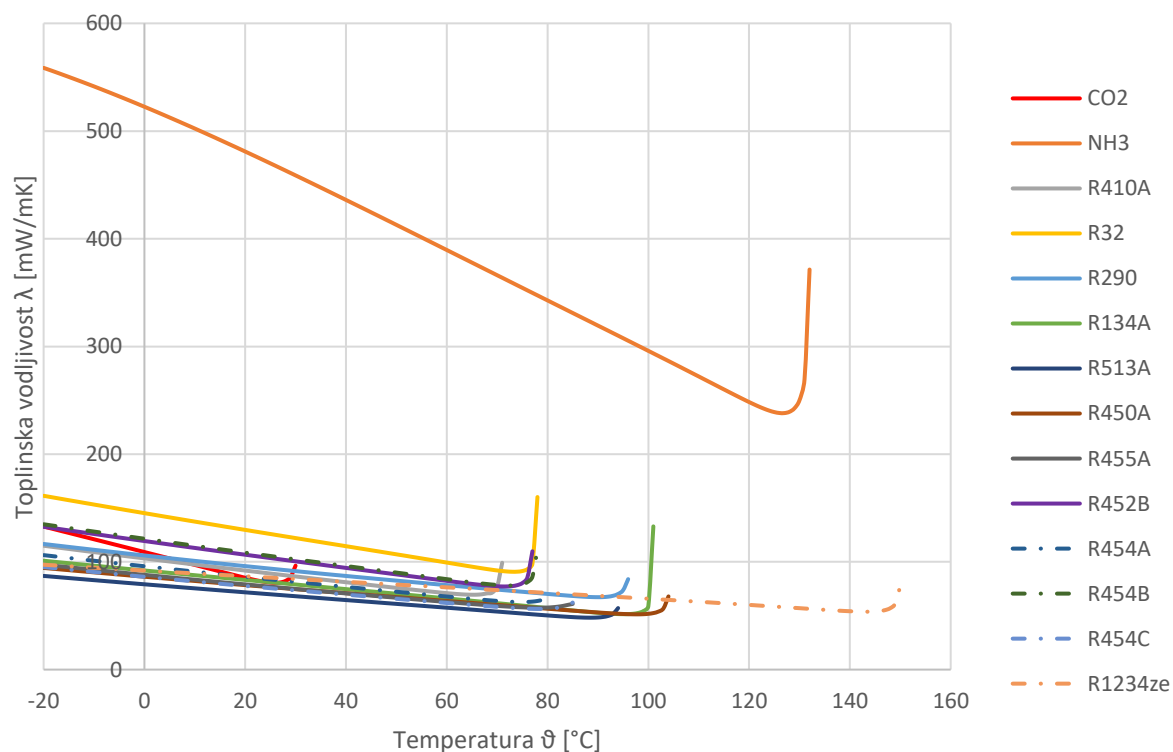
Najšire područje primjene imaju R717 (NH₃) i R1234ze zbog vrlo visokih kritičnih temperatura.

3.15.2. Ovisnost toplinske vodljivosti i temperature

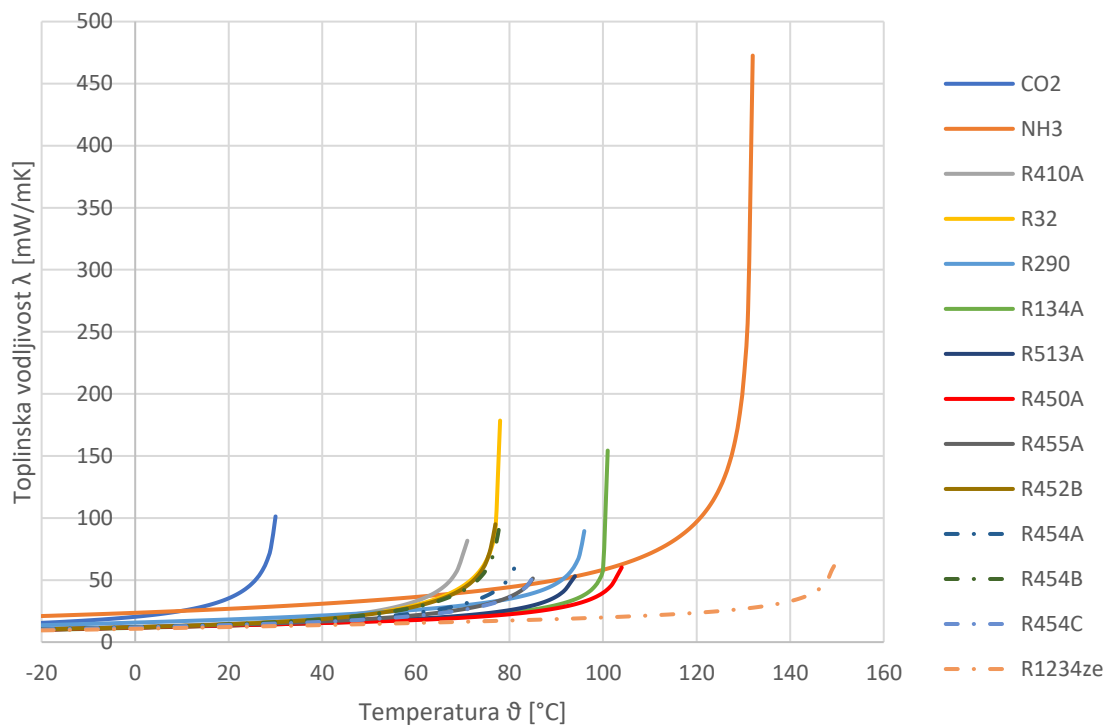
Toplinska vodljivost radne tvari uvelike ovisi o fazi procesa, tj. o fazi (agregatnom stanju) u kojem se nalazi radna tvar. Vrijednosti toplinskih vodljivosti veće su u kapljevitom nego u parnom stanju za odgovarajuću temperaturu/tlak zasićenja.

Povećanjem toplinske vodljivosti povećava se i učinkovitost izmjenjivača topline, a smanjuju dimenzije i cijena izmjenjivača topline.

Iz dijagrama je vidljivo da je toplinska vodljivost kapljevine R717 (NH₃) najveća, čime zaključujemo da je R717 najprikladnija radna tvar za upotrebu u pogledu prijelaza topline. Isto zaključujemo i za parnu fazu.

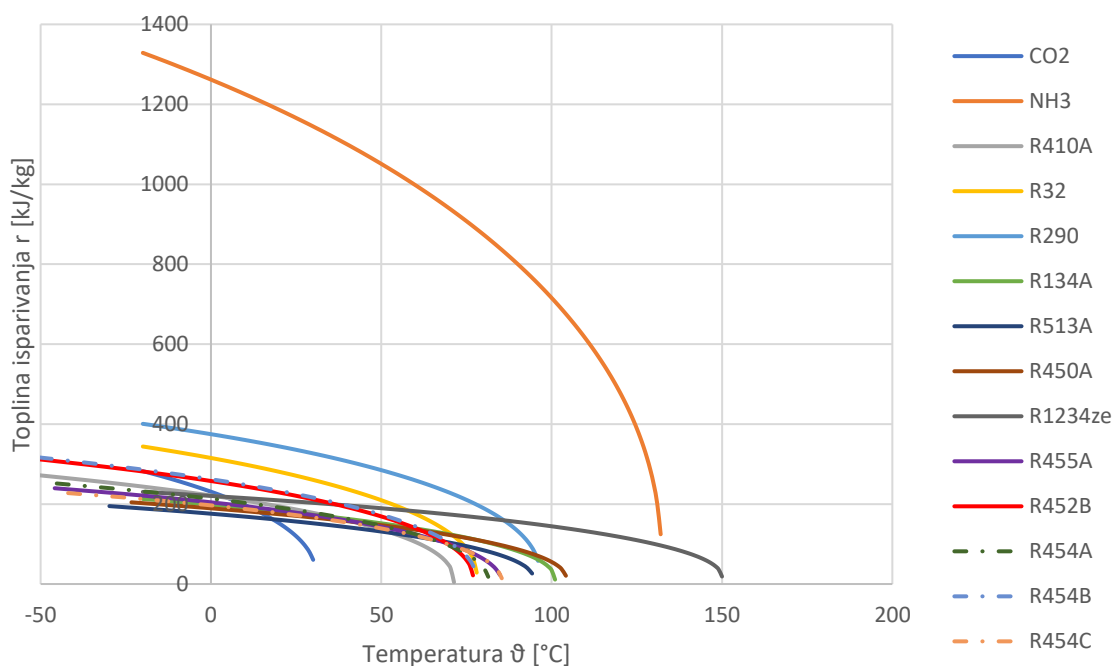


Slika 3. 10 - Ovisnost toplinske vodljivosti kapljevine faze i temperature



Slika 3. 11 - Ovisnost toplinske vodljivosti parne faze i temperature

3.15.3. Ovisnost temperature i topline isparivanja



Slika 3. 12 - Ovisnost temperature i topline isparivanja

Iz dijagrama je vidljivo da se najveće topline isparivanja postižu kod uporabe radne tvari R717 (NH₃), tj. uređaji na R717 imati će najviši toplinski kapacitet.

4. Priprema potrošne tople vode

Za razmatranja i proračune provedene u ovom radu usvojene su sljedeće pretpostavke:

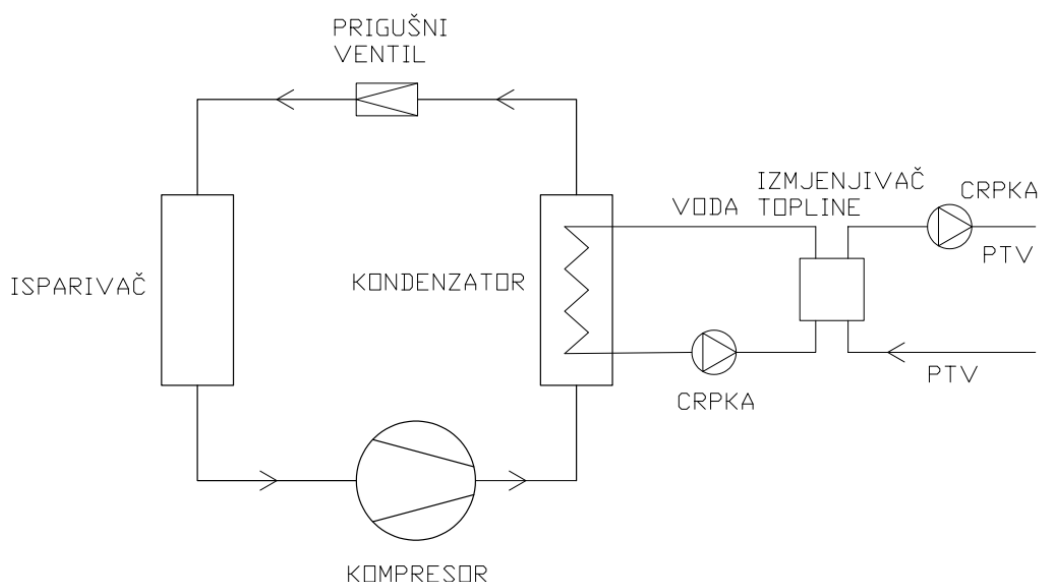
- Razmatran je kapacitet uređaja od 10 kW, koji svojim učinkom može biti namijenjen za pripremu PTV – a u većem broju kućanstava koji ima centralni sustav pripreme PTV – a (stambena zgrada) ili manjem hotelu s ugostiteljskim objektom
- PTV se zagrijava od ulazne temperature 10 °C na konačnu temperaturu od 40 °C
- Za zagrijavanje PTV – a promatrani su slučajevi korištenja dizalica topline i kompresijskih rashladnih uređaja
- Kod korištenja zraka kao izvora za dizalice topline usvojena je vanjska projektna temperatura za zimski period -6 °C koja odgovara lokaciji Rijeke i bliže okolice, dok je ljetna projektna temperatura 35 °C
- Svi sustavi koriste vodu kao medij za prijenos topline između radne tvari u dizalici topline ili rashladnom uređaju i PTV

4.1. Dizalice topline za pripremu PTV

S obzirom na izvor topline iz okoline razmotrene su dvije izvedbe dizalica topline:

- Dizalice topline zrak/voda
- Dizalice topline voda/voda

U oba slučaja ponor topline je voda koja putem vanjskog izmjenjivača topline zagrijava PTV.



Slika 4. 1 - Shema jednostupanjske dizalice topline za pripremu PTV

Temperaturni režimi rada za dizalicu topline zrak – voda:

- Zimski režim rada:

Temperatura izvora topline (vanjski zrak):

$$\vartheta_1 = -6 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

$$\vartheta_0 = -20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.2)$$

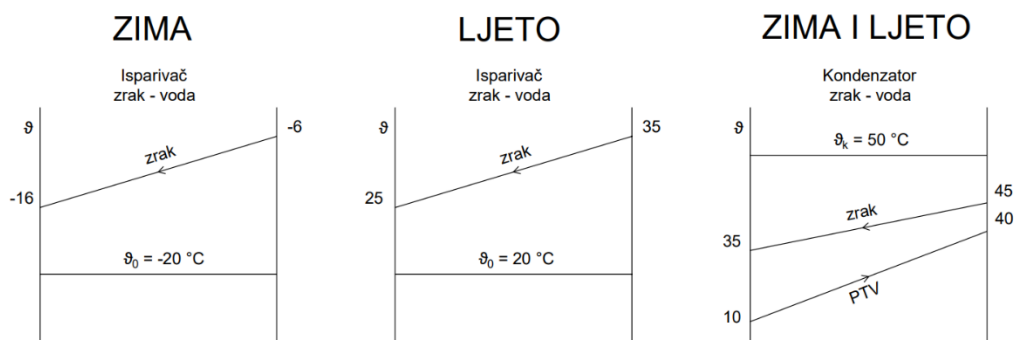
$$\vartheta_k = \vartheta_{PTV} + 10 = 40 + 10 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.3)$$

- Ljetni režim rada:

$$\vartheta_1 = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.4)$$

$$\vartheta_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.5)$$

$$\vartheta_k = \vartheta_{PTV} + 10 = 40 + 10 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.6)$$



Slika 4. 2 - Promjena temperatura u isparivaču i kondenzatoru dizalice topline zrak - voda za zimski/ljetni režim rada

Temperaturni režimi rada za dizalicu topline voda – voda:

- Zimski režim rada:

Temperatura izvora topline (podzemna ili morska voda):

$$\vartheta_1 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.7)$$

$$\vartheta_0 = -2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.8)$$

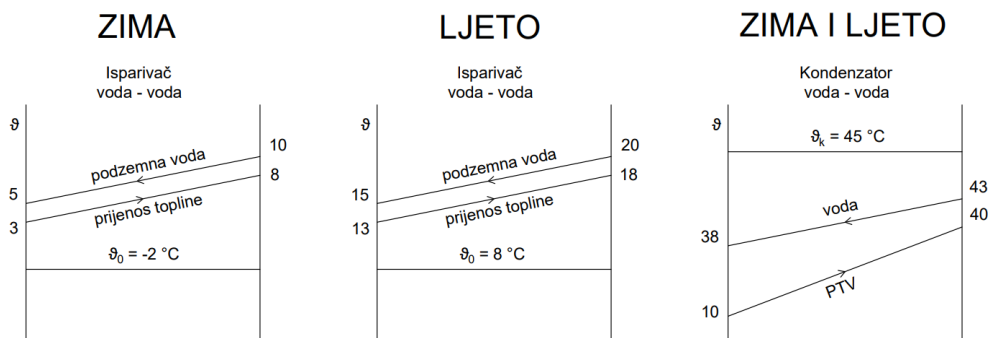
$$\vartheta_k = 45 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.9)$$

- Ljetni režim rada:

$$\vartheta_I = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.10)$$

$$\vartheta_0 = 8 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.11)$$

$$\vartheta_k = 45 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.12)$$



Slika 4. 3 - Promjena temperatura u isparivaču i kondenzatoru dizalice topline voda - voda za zimski/ljetni režim rada

Razmotrene su sljedeće tehničke izvedbe dizalica topline i radni procesi:

- Jednostupanjske dizalice topline
 - Osnovni podkritični proces s pregrijanjem radne tvari
 - Osnovni podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem radne tvari
 - Podkritični proces s unutarnjim izmjenjivačem
 - Transkritični proces
- Dvostupanjske dizalice topline
- Kaskadne dizalice topline

Sve izvedbe dizalica topline proračunate su za zimski i za ljetni period rada, pri čemu je presudan zimski period rada, jer dizalica topline mora biti sposobna zagrijavati PTV na traženu temperaturu i u tehnički najnepovoljnijem slučaju, tj. kada je najveća temperaturna razlika između toplinskog izvora i ponora [29].

Za sve razmatrane procese tlakovi pri zadanim temperaturama isparivanja i kondenzacije, kao i entalpije i entropije u određenim točkama procesa za različite radne tvari dobiveni su pomoću programskog paketa Refprop [30].

4.1.1. Jednostupanjske dizalice topline

Iz dobivenih tlakova isparivanja i kondenzacije dobivaju se kompresijski omjeri prema sljedećem izrazu:

$$\frac{p}{p_0} - \text{kompresijski omjer} \quad (4.13)$$

Pri čemu je:

p – tlak kondenzacije [Pa]

p_0 – tlak isparivanja [Pa]

Izvedba jednostupanjskih dizalica topline razmatrana je za radne tvari kod kojih se postižu kompresijski omjeri za zadane temperature isparivanja i kondenzacije:

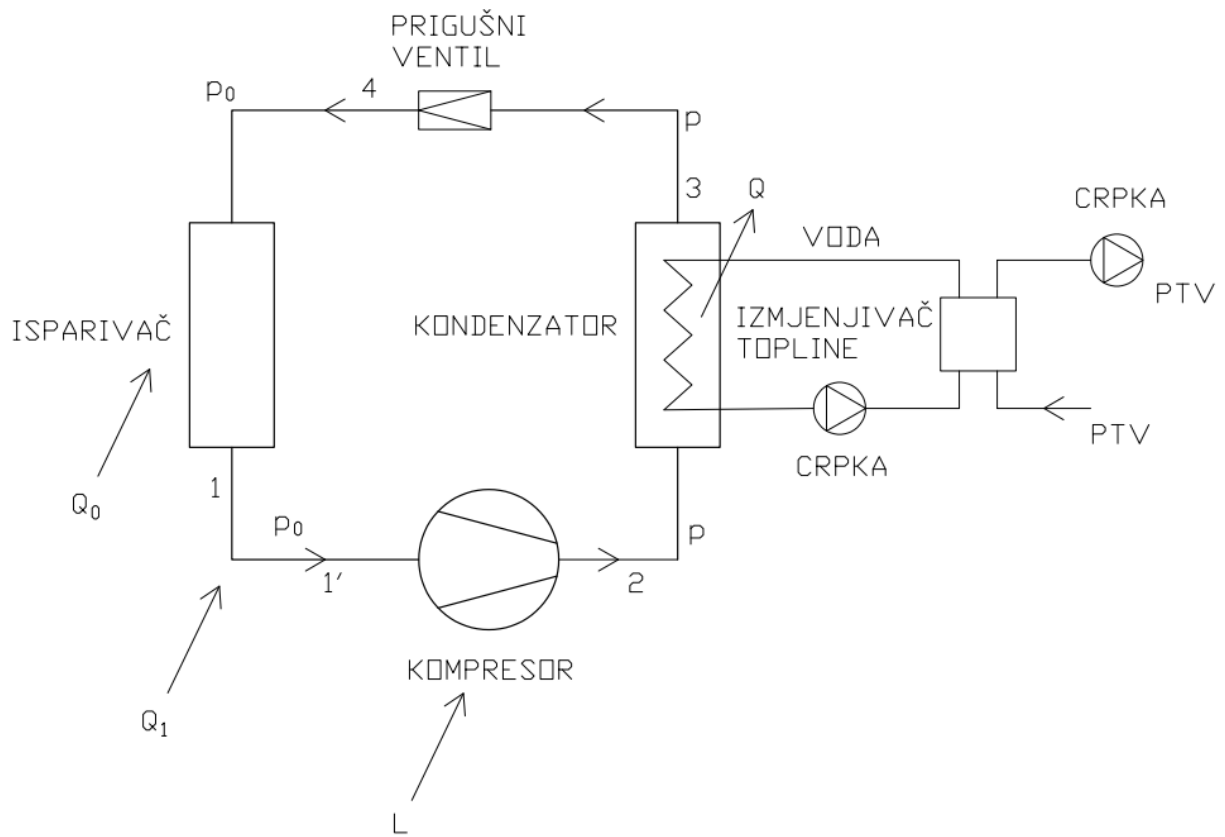
$$\frac{p_2}{p_1} < 8 \quad (4.14)$$

Zato što današnji kompresori mogu postizati kompresijske omjere koji odgovaraju navedenima, a da temperatura radne tvari na kraju kompresije ne bi premašila sigurnosne granice (granica promjene svojstava ulja i zapaljenja ili gubitka svojstva ulja za podmazivanje kompresora) od 130 do 140 °C.

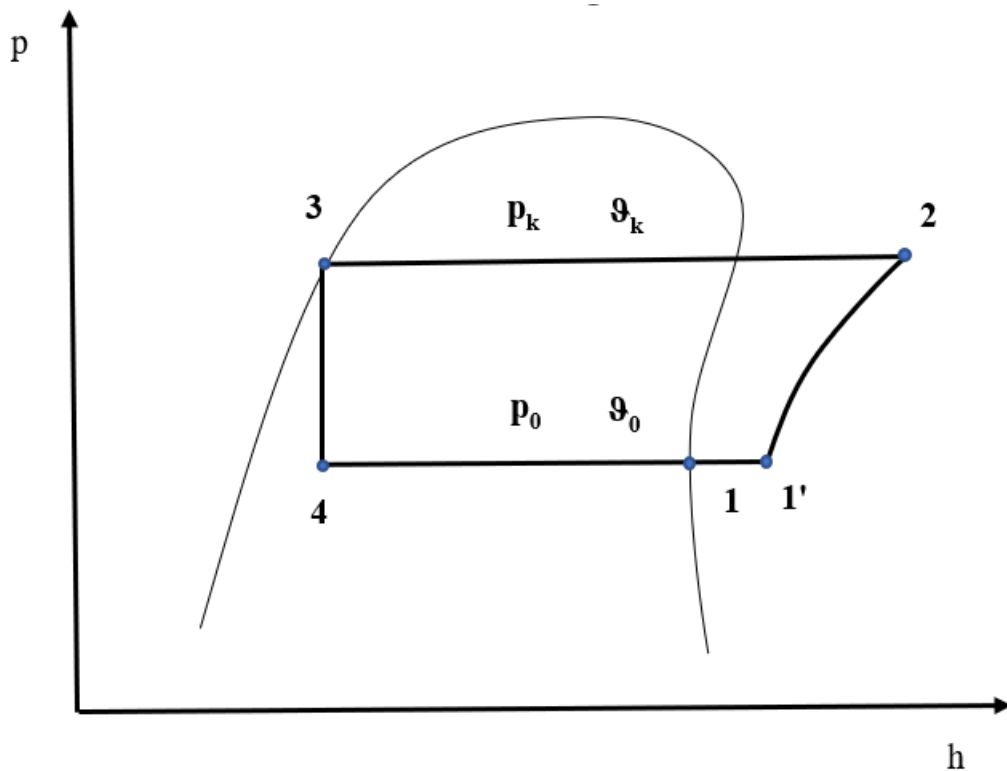
Iznimno se dopuštaju kompresijski omjeri između 8 i 10,5, ali uz uvjet da je temperatura na izlazu iz kompresora $\vartheta_2 < 130$ °C [31].

A to su u ovome slučaju: R410A, R32, R290, R513A, R450A, R455A, R452B, R454A, R454B, R454C.

4.1.1.1. Osnovni podkritični proces s pregrijanjem radne tvari



Slika 4. 4 - Shema osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem



Slika 4. 5 - p,h - dijagram osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem

Kod podkritičnih procesa većina procesa odvija se u zasićenom području.

U ovome slučaju u zasićenom području odvija se cijeli proces izuzev pregrijanja suhozasićene pare na izlasku iz isparivača prije usisa u kompresor, i dijela kondenzacije.

Funkcija pregrijanja pare na izlazu iz isparivača je osiguranje od hidrauličkog udara u kompresoru.

Proračun osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem (teoretski proces):

Specifična toplina predana u isparivaču:

$$q_0 = h_1 - h_4 \quad (4.15)$$

Pregrijanje radne tvari na izlasku iz isparivača prije ulaska u kompresor usvojeno je:

$$\Delta T_{\text{preg}} = 5 \text{ K} \quad (4.16)$$

Specifični rad za izentropsku kompresiju (rad za pogon kompresora):

$$l = h_2 - h_{1'} \quad (4.17)$$

Tijekom proračuna kontrolirana je temperatura radne tvari na kraju kompresije, kako bi se osiguralo da temperatura radne tvari na izlasku iz kompresora ne prelazi sigurnosne granice (granica promjene svojstava ulja i zapaljenja ili gubitka svojstva ulja za podmazivanje kompresora) od 130 - 140 °C.

Toplina odvedena u kondenzatoru koristi se za zagrijavanje PTV – a.

Pregrijana para radne tvari na izlasku iz kompresora odvodi se direktno u kondenzator te nije predviđen odvojeni hladnjak pregrijane pare.

Specifični ogrjevni učin pregrijane pare iznosi:

$$q_{\text{ds}} = h_2 - h_{2'} \quad (4.18)$$

Specifični ogrjevni učin kondenzatora:

$$q_{\text{k}} = h_{2'} - h_3 \quad (4.19)$$

Ogrjevni učin za zagrijavanje PTV – a iznosi:

$$\dot{Q}_{\text{PTV}} = 10 \text{ kW} \quad (4.20)$$

Maseni protok radne tvari potreban za ostvarenje zadanog ogrjevnog učina:

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}_{\text{PTV}}}{q_{\text{ds}} + q_{\text{k}}} \quad (4.21)$$

Volumni protok na usisu kompresora:

$$\dot{V} = \frac{\dot{M}}{\rho_{1'}} \quad (4.22)$$

Pri čemu je:

$$\rho_{1'} - \text{gustoća pregrijane radne tvari na usisu u kompresor} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Pomoću masenog protoka i specifičnih ogrjevnih učina dobivamo:

Ogrjevni učin pregrijane pare:

$$Q_{ds} = \dot{M} \cdot q_{ds} \quad (4.23)$$

Ogrjevni učin kondenzatora:

$$Q_k = \dot{M} \cdot q_k \quad (4.24)$$

Snaga potrebna za izentropsku kompresiju iznosi:

$$\dot{P} = \dot{M} \cdot l \quad (4.25)$$

Konačno, ogrjevni faktor iznosi:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{P}} = \frac{q_{ds} + q_k}{l} \quad (4.26)$$

Uz usvojeni ogrjevni učin, moguće je zagrijati sljedeću količinu PTV:

$$\begin{aligned} \dot{M}_w &= \frac{\dot{Q}_{PTV}}{c_w \cdot \Delta T_w} = \frac{\dot{Q}_{PTV}}{c_w \cdot (\vartheta_{w''} - \vartheta_{w'})} = \frac{10}{4,187 \cdot (40 - 10)} \cdot 3600 \\ &= 286,601 \text{ kg/h} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Pri čemu su:

$$\dot{Q}_{PTV} = 10 \text{ kW} - \text{toplinski učin za zagrijavanje PTV} - a$$

$$\vartheta_{w'} = 10 \text{ °C} - \text{ulazna temperatura hladne vode}$$

$$\vartheta_{w''} = \vartheta_{PTV} = 40 \text{ °C} - \text{temperatura potrošne tople vode}$$

$$c_w = 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - \text{specifični toplinski kapacitet vode}$$

Za razmatrane radne tvari dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4.1.

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline zrak – voda

Tablica 4. 1 - Rezultati - Osnovni s pregrijanjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline zrak - voda

| Radna tvar | REŽIM | g_0/g | p_0 [bar] | p [bar] | p/p_0 | g_2 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP |
|------------|-------|---------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|-------|
| R410A | ZIMA | -20/50 | 3,99 | 30,71 | 7,697 | 87,24 | 0,05165 | 0,00345 | 3,197 |
| | LJETO | 20/50 | 14,43 | 30,71 | 2,128 | 67,45 | 0,05993 | 0,0011 | 8,163 |
| R32 | ZIMA | -20/50 | 4,06 | 31,41 | 7,736 | 115,52 | 0,0323 | 0,00298 | 3,369 |
| | LJETO | 20/50 | 14,75 | 31,41 | 2,129 | 75,95 | 0,03896 | 0,00099 | 8,545 |
| R717 | ZIMA | -20/50 | 1,9 | 20,33 | <u>10,7</u> | <u>167,82</u> | 0,0072 | 0,00459 | 3,657 |
| | LJETO | 20/50 | 8,57 | 20,33 | 2,372 | 89,53 | 0,00848 | 0,0013 | 9,463 |
| R290 | ZIMA | -20/50 | 2,45 | 17,13 | 6,992 | 63,61 | 0,0315 | 0,00586 | 3,370 |
| | LJETO | 20/50 | 8,36 | 17,13 | 2,049 | 57,48 | 0,033 | 0,00188 | 8,869 |
| R1234ze | ZIMA | -20/50 | 0,27 | 3,91 | <u>14,482</u> | 61,73 | 0,04969 | 0,03403 | 3,688 |
| | LJETO | 20/50 | 1,49 | 3,91 | 2,624 | 54,92 | 0,05141 | 0,00704 | 9,672 |
| R513A | ZIMA | -20/50 | 1,52 | 13,78 | 9,066 | 56,62 | 0,07165 | 0,00881 | 3,25 |
| | LJETO | 20/50 | 6,17 | 13,78 | 2,233 | 54,86 | 0,07279 | 0,00231 | 8,824 |
| R450A | ZIMA | -20/50 | 1,14 | 11,69 | 10,254 | 58,38 | 0,06418 | 0,01064 | 3,344 |
| | LJETO | 20/50 | 4,97 | 11,69 | 2,352 | 55,57 | 0,06553 | 0,00265 | 8,898 |
| R455A | ZIMA | -20/50 | 2,33 | 24,43 | 10,485 | 78,71 | 0,06075 | 0,00598 | 2,853 |
| | LJETO | 20/50 | 9,04 | 24,43 | 2,702 | 68,19 | 0,06564 | 0,00172 | 6,753 |
| R452B | ZIMA | -20/50 | 3,7 | 29,31 | 7,922 | 96,09 | 0,04229 | 0,00351 | 3,265 |
| | LJETO | 20/50 | 13,42 | 29,31 | 2,184 | 71,23 | 0,04933 | 0,00113 | 8,142 |
| R454A | ZIMA | -20/50 | 2,66 | 24,56 | 9,233 | 80,72 | 0,05557 | 0,00515 | 3,026 |
| | LJETO | 20/50 | 10,12 | 24,56 | 2,427 | 68,48 | 0,06119 | 0,00153 | 7,260 |
| R454B | ZIMA | -20/50 | 3,64 | 29,02 | 7,973 | 97,07 | 0,04136 | 0,00354 | 3,268 |
| | LJETO | 20/50 | 13,23 | 29,02 | 2,194 | 71,68 | 0,04824 | 0,00115 | 8,132 |
| R454C | ZIMA | -20/50 | 2,18 | 21,64 | 9,927 | 73,37 | 0,06314 | 0,0064 | 2,945 |
| | LJETO | 20/50 | 8,47 | 21,64 | 2,555 | 66,38 | 0,06711 | 0,00181 | 7,008 |

Vidljivo je u tablici da se za zadane tlakove isparivanja i kondenzacije za radne tvari R717 i R1234ze dobivaju kompresijski omjeri koji su previsoki ($p/p_0 > 10,5$), dok se za radnu tvar R717 dodatno dobiva i previsoka temperatura radne tvari na kraju kompresije, te je stoga za navedene

radne tvari potrebno primijeniti dvostupanjsku kompresiju. Može se zaključiti da za traženi učinak R717 ima najmanji maseni protok radne tvari, tj. da radna tvar R717 ima najveći kapacitet.

Slijede rezultati za dizalicu topline voda – voda u tablici 4.2.

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline voda – voda

Tablica 4. 2 - Rezultati - Osnovni s pregrijanjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda

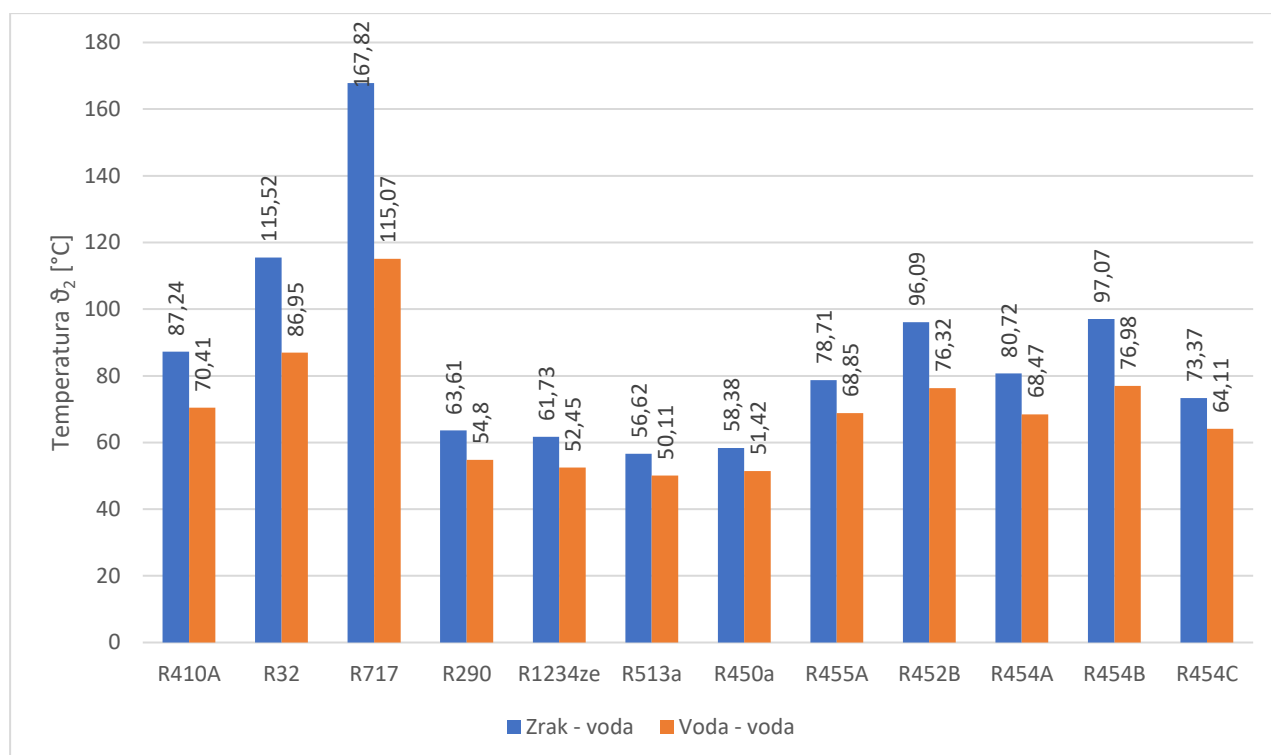
| Radna tvar | REŽIM | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p/p_0 | ϑ_2 [°C] | M [kg/s] | V [m³/s] | COP |
|-------------------|--------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------|
| R410A | ZIMA | -2/45 | 7,48 | 27,34 | 3,655 | 70,41 | 0,0534 | 0,00193 | 5,065 |
| | LJETO | 8/45 | 10,22 | 27,34 | 2,675 | 65,67 | 0,05526 | 0,00146 | 6,599 |
| R32 | ZIMA | -2/45 | 7,62 | 27,95 | 3,668 | 86,95 | 0,03453 | 0,00172 | 5,263 |
| | LJETO | 8/45 | 10,43 | 27,95 | 2,680 | 77,54 | 0,03609 | 0,00346 | 6,847 |
| R717 | ZIMA | -2/45 | 3,98 | 17,82 | 4,477 | 115,07 | 0,0078 | 0,00248 | 5,691 |
| | LJETO | 8/45 | 5,73 | 17,82 | 3,110 | 97,12 | 0,0081 | 0,00182 | 7,425 |
| R290 | ZIMA | -2/45 | 4,46 | 15,34 | 3,439 | 54,8 | 0,03135 | 0,0033 | 5,361 |
| | LJETO | 8/45 | 6,01 | 15,34 | 2,552 | 53,4 | 0,03166 | 0,0025 | 7,024 |
| R1234ze | ZIMA | -2/45 | 0,63 | 3,38 | 5,365 | 52,45 | 0,0499 | 0,0154 | 5,808 |
| | LJETO | 8/45 | 0,95 | 3,38 | 3,558 | 51,08 | 0,05024 | 0,01053 | 7,589 |
| R513A | ZIMA | -2/45 | 3,03 | 12,18 | 4,020 | 50,11 | 0,0699 | 0,00445 | 5,279 |
| | LJETO | 8/45 | 4,25 | 12,18 | 2,866 | 49,84 | 0,07006 | 0,00322 | 6,966 |
| R450A | ZIMA | -2/45 | 2,35 | 10,29 | 4,379 | 51,42 | 0,06308 | 0,00527 | 5,347 |
| | LJETO | 8/45 | 3,36 | 10,29 | 3,063 | 50,86 | 0,06333 | 0,00375 | 7,018 |
| R455A | ZIMA | -2/45 | 4,53 | 21,97 | 4,850 | 68,85 | 0,06069 | 0,00316 | 4,307 |
| | LJETO | 8/45 | 6,29 | 21,97 | 3,493 | 66,94 | 0,06164 | 0,00233 | 5,397 |
| R452B | ZIMA | -2/45 | 6,94 | 26,11 | 3,762 | 76,32 | 0,0442 | 0,00199 | 5,092 |
| | LJETO | 8/45 | 9,49 | 26,11 | 2,751 | 70,4 | 0,0458 | 0,00151 | 6,580 |
| R454A | ZIMA | -2/45 | 5,11 | 21,93 | 4,292 | 68,47 | 0,05625 | 0,00278 | 4,657 |
| | LJETO | 8/45 | 7,07 | 21,93 | 3,102 | 65,55 | 0,05749 | 0,00206 | 5,938 |
| R454B | ZIMA | -2/45 | 6,84 | 25,86 | 3,781 | 76,98 | 0,04327 | 0,00201 | 5,089 |
| | LJETO | 8/45 | 9,35 | 25,86 | 2,766 | 70,96 | 0,04586 | 0,00156 | 6,425 |
| R454C | ZIMA | -2/45 | 4,24 | 19,35 | 4,564 | 64,11 | 0,06278 | 0,00336 | 4,530 |
| | LJETO | 8/45 | 5,89 | 19,35 | 3,285 | 62,53 | 0,0638 | 0,00247 | 5,731 |

Kod dizalica topline voda – voda, gdje je izvor topline morska voda, uslijed viših temperatura isparivanja, veći su i tlakovi isparivanja, a samim time i manji kompresijski omjeri.

Temperatura kondenzacije je nešto niža nego kod dizalica topline zrak – voda.

U slučaju dizalica topline voda – voda, sve radne tvari zadovoljavaju te nije potrebna dvostupanjska kompresija.

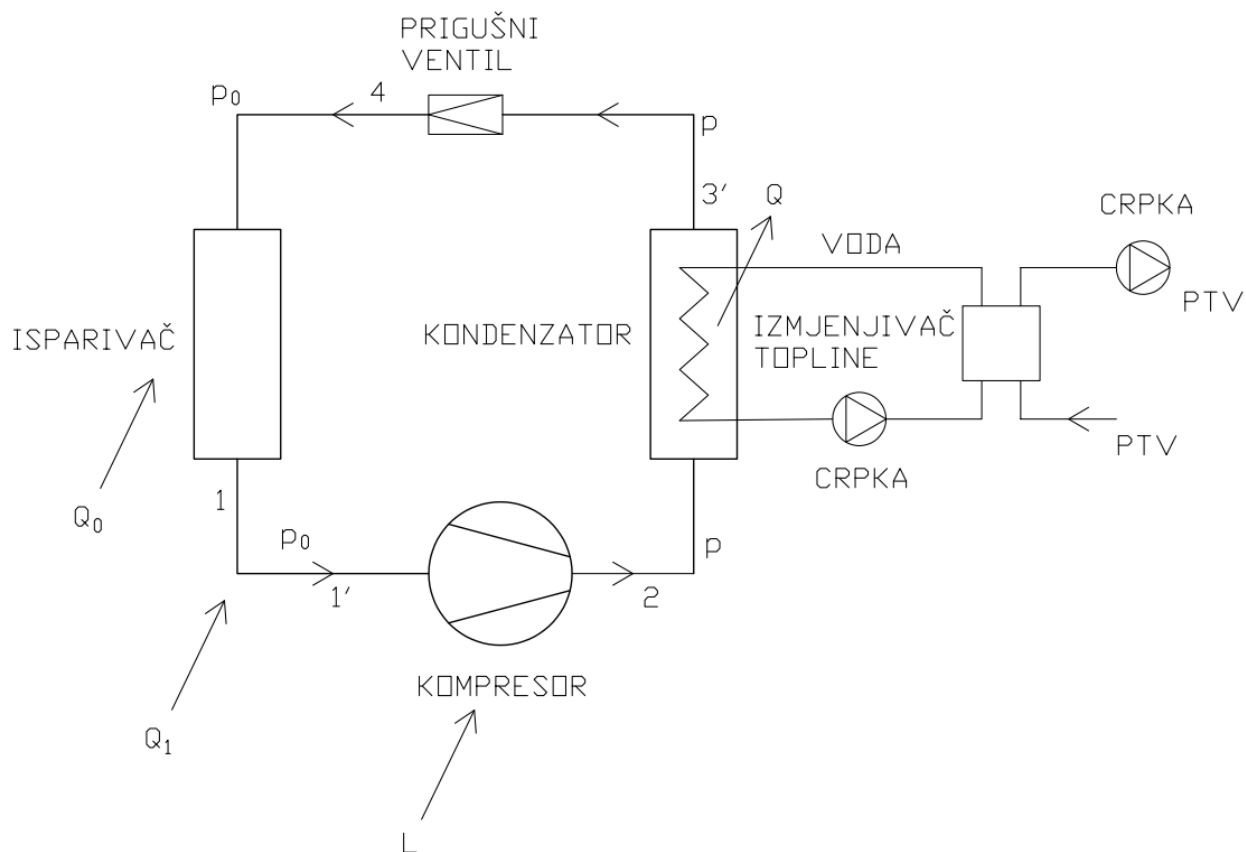
Izlazna temperatura pregrijane pare radne tvari na kraju kompresije prikazane su na sljedećoj slici:



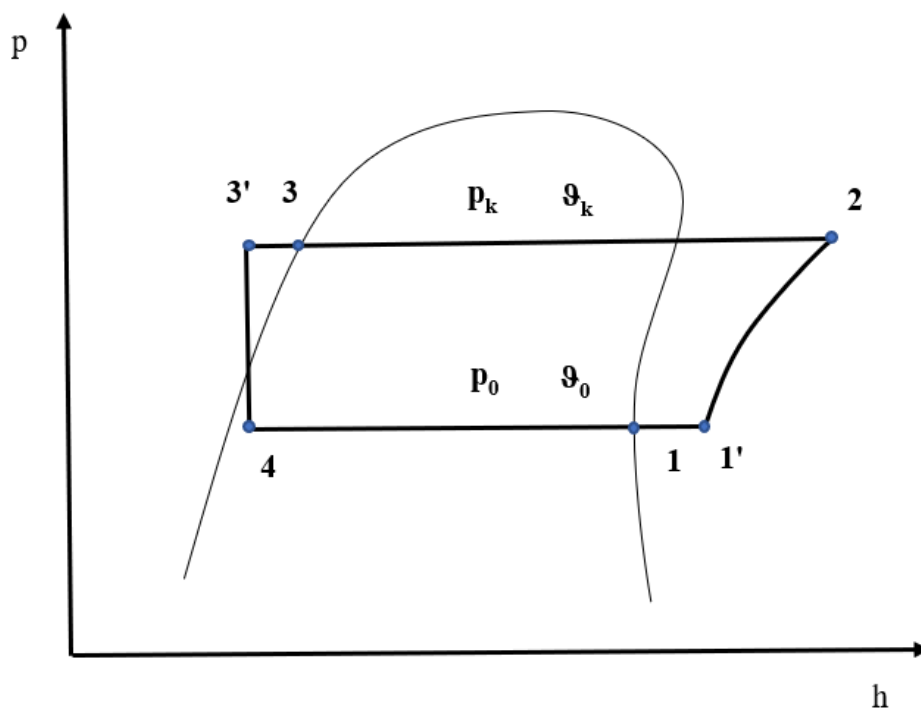
Slika 4. 6 - Temperatura radne tvari na kraju kompresije - osnovni podkritični proces s pregrijanjem - zimski režim rada (teoretski proces)

Može se zaključiti da sa sigurnosnog aspekta, sve radne tvari zadovoljavaju osim R717 u slučaju dizalice topline zrak – voda, zimski period rada, te je za navedenu radnu tvar potrebna dvostupanjska kompresija.

4.1.1.2. Osnovni podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem radne tvari



Slika 4. 7 - Shema osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem



Slika 4. 8 - p,h - dijagram osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem

Kao i u prethodnom procesu i ovome slučaju u zasićenom području odvija se cijeli proces izuzev pregrijanja suhozasićene pare na izlasku iz isparivača prije usisa u kompresor, i dijela kondenzacije.

Proces je jednak osnovnom procesu s pregrijanjem, samo što u ovom slučaju još imamo i dodatno pothlađenje radne tvari u kondenzatoru.

Funkcija dodatnog pothlađenja radne tvari u kondenzatoru je povećanje topline koja se odvodi u kondenzatoru, a koja se u ovom slučaju koristi za potrebe grijanja potrošne tople vode.

Navedenim se dodatno povećava faktor grijanja dizalice topline i smanjuje potrebna dobava radne tvari za ostvarenje istog učinka.

Proračun osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem (teoretski proces):

Temperature isparivanja i kondenzacije usvojene su kao i u prethodnom procesu.

Specifična toplina predana u isparivaču:

$$q_0 = h_1 - h_4 \quad (4.28)$$

Pothlađenje radne tvari u kondenzatoru usvojeno je:

$$\Delta T_{\text{poth}} = 5 \text{ K} \quad (4.29)$$

Specifični rad za izentropsku kompresiju (rad za pogon kompresora):

$$l = h_2 - h_{1'} \quad (4.30)$$

Specifični ogrjevni učin pregrijane pare i specifični ogrjevni učin kondenzatora izračunavaju se kao ranije, a specifični ogrjevni učin pothlađivanja radne tvari:

$$q_p = h_3 - h_{3'} \quad (4.31)$$

Maseni protok radne tvari potreban za ostvarenje zadanog ogrjevnog učina:

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}_{\text{PTV}}}{q_{\text{ds}} + q_{\text{k}} + q_{\text{p}}} \quad (4.32)$$

Ogrjevni faktor iznosi:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{P}} = \frac{q_{\text{ds}} + q_{\text{k}} + q_{\text{p}}}{l} \quad (4.33)$$

Za razmatrane radne tvari dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4.3.

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline zrak – voda

Tablica 4. 3 - Rezultati - Osnovni s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/Ljetni režim rada - dizalica topline zrak - voda

| Radna tvar | REŽIM | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p/p_0 | ϑ_2 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP |
|------------|-------|-------------------------|----------------|--------------|---------------|--------------------|---------------|----------------------------|--------|
| R410A | ZIMA | -20/50 | 3,99 | 30,71 | 7,697 | 87,24 | 0,04896 | 0,00328 | 3,372 |
| | LJETO | 20/50 | 14,43 | 30,71 | 2,128 | 67,45 | 0,05635 | 0,00104 | 8,682 |
| R32 | ZIMA | -20/50 | 4,06 | 31,41 | 7,736 | 115,52 | 0,03112 | 0,00287 | 3,496 |
| | LJETO | 20/50 | 14,75 | 31,41 | 2,129 | 75,95 | 0,03726 | 0,00095 | 8,934 |
| R717 | ZIMA | -20/50 | 1,9 | 20,33 | <u>10,7</u> | <u>167,82</u> | 0,00707 | 0,0045 | 3,723 |
| | LJETO | 20/50 | 8,57 | 20,33 | 2,372 | 89,53 | 0,0083 | 0,00127 | 9,665 |
| R290 | ZIMA | -20/50 | 2,45 | 17,13 | 6,992 | 63,61 | 0,03007 | 0,00559 | 3,531 |
| | LJETO | 20/50 | 8,36 | 17,13 | 2,049 | 57,48 | 0,03142 | 0,00179 | 9,313 |
| R1234ze | ZIMA | -20/50 | 0,27 | 3,91 | <u>14,482</u> | 61,73 | 0,04808 | 0,03293 | 3,811 |
| | LJETO | 20/50 | 1,49 | 3,91 | 2,624 | 54,92 | 0,0497 | 0,00681 | 10,006 |
| R513A | ZIMA | -20/50 | 1,52 | 13,78 | 9,066 | 56,62 | 0,06789 | 0,00835 | 3,430 |
| | LJETO | 20/50 | 6,17 | 13,78 | 2,233 | 54,86 | 0,0689 | 0,00219 | 9,321 |
| R450A | ZIMA | -20/50 | 1,14 | 11,69 | 10,254 | 58,38 | 0,06121 | 0,01015 | 3,506 |
| | LJETO | 20/50 | 4,97 | 11,69 | 2,352 | 55,57 | 0,06244 | 0,00253 | 9,338 |
| R455A | ZIMA | -20/50 | 2,33 | 24,43 | 10,485 | 78,71 | 0,05761 | 0,00567 | 3,008 |
| | LJETO | 20/50 | 9,04 | 24,43 | 2,702 | 68,19 | 0,06199 | 0,00163 | 7,151 |
| R452B | ZIMA | -20/50 | 3,7 | 29,31 | 7,922 | 96,09 | 0,04045 | 0,00336 | 3,414 |
| | LJETO | 20/50 | 13,42 | 29,31 | 2,184 | 71,23 | 0,04684 | 0,00108 | 8,574 |
| R454A | ZIMA | -20/50 | 2,66 | 24,56 | 9,233 | 80,72 | 0,0528 | 0,0049 | 3,184 |
| | LJETO | 20/50 | 10,12 | 24,56 | 2,427 | 68,48 | 0,05785 | 0,00144 | 7,679 |
| R454B | ZIMA | -20/50 | 3,64 | 29,02 | 7,973 | 97,07 | 0,03884 | 0,00333 | 3,481 |
| | LJETO | 20/50 | 13,23 | 29,02 | 2,194 | 71,68 | 0,04484 | 0,00107 | 8,749 |
| R454C | ZIMA | -20/50 | 2,18 | 21,64 | 9,927 | 73,37 | 0,05983 | 0,00606 | 3,108 |
| | LJETO | 20/50 | 8,47 | 21,64 | 2,555 | 66,38 | 0,06338 | 0,00171 | 7,421 |

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline voda – voda

Tablica 4. 4 - Rezultati - Osnovni s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda

| Radna tvar | REŽIM | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p/p_0 | ϑ_2 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP |
|------------|-------|-------------------------|----------------|--------------|---------|--------------------|---------------|----------------------------|-------|
| R410A | ZIMA | -2/45 | 7,48 | 27,34 | 3,655 | 70,41 | 0,05072 | 0,00183 | 5,333 |
| | LJETO | 8/45 | 10,22 | 27,34 | 2,675 | 65,67 | 0,05239 | 0,00138 | 6,961 |
| R32 | ZIMA | -2/45 | 7,62 | 27,95 | 3,668 | 86,95 | 0,03326 | 0,00166 | 5,463 |
| | LJETO | 8/45 | 10,43 | 27,95 | 2,680 | 77,54 | 0,03471 | 0,00333 | 7,120 |
| R717 | ZIMA | -2/45 | 3,98 | 17,82 | 4,477 | 115,07 | 0,00765 | 0,00244 | 5,801 |
| | LJETO | 8/45 | 5,73 | 17,82 | 3,110 | 97,12 | 0,00794 | 0,00179 | 7,575 |
| R290 | ZIMA | -2/45 | 4,46 | 15,34 | 3,439 | 54,8 | 0,02996 | 0,00315 | 5,609 |
| | LJETO | 8/45 | 6,01 | 15,34 | 2,552 | 53,4 | 0,03025 | 0,00239 | 7,352 |
| R1234ze | ZIMA | -2/45 | 0,63 | 3,38 | 5,365 | 52,45 | 0,0483 | 0,01491 | 6,001 |
| | LJETO | 8/45 | 0,95 | 3,38 | 3,558 | 51,08 | 0,04861 | 0,01019 | 7,843 |
| R513A | ZIMA | -2/45 | 3,03 | 12,18 | 4,020 | 50,11 | 0,0664 | 0,00423 | 5,558 |
| | LJETO | 8/45 | 4,25 | 12,18 | 2,866 | 49,84 | 0,06654 | 0,00305 | 7,335 |
| R450A | ZIMA | -2/45 | 2,35 | 10,29 | 4,379 | 51,42 | 0,06026 | 0,00503 | 5,597 |
| | LJETO | 8/45 | 3,36 | 10,29 | 3,063 | 50,86 | 0,06049 | 0,00359 | 7,348 |
| R455A | ZIMA | -2/45 | 4,53 | 21,97 | 4,850 | 68,85 | 0,05768 | 0,003 | 4,533 |
| | LJETO | 8/45 | 6,29 | 21,97 | 3,493 | 66,94 | 0,05853 | 0,00221 | 5,684 |
| R452B | ZIMA | -2/45 | 6,94 | 26,11 | 3,762 | 76,32 | 0,0423 | 0,0019 | 5,321 |
| | LJETO | 8/45 | 9,49 | 26,11 | 2,751 | 70,4 | 0,04376 | 0,00144 | 6,887 |
| R454A | ZIMA | -2/45 | 5,11 | 21,93 | 4,292 | 68,47 | 0,05354 | 0,00265 | 4,894 |
| | LJETO | 8/45 | 7,07 | 21,93 | 3,102 | 65,55 | 0,05466 | 0,00196 | 6,246 |
| R454B | ZIMA | -2/45 | 6,84 | 25,86 | 3,781 | 76,98 | 0,04061 | 0,00188 | 5,422 |
| | LJETO | 8/45 | 9,35 | 25,86 | 2,766 | 70,96 | 0,04288 | 0,00146 | 6,871 |
| R454C | ZIMA | -2/45 | 4,24 | 19,35 | 4,564 | 64,11 | 0,05945 | 0,00318 | 4,784 |
| | LJETO | 8/45 | 5,89 | 19,35 | 3,285 | 62,53 | 0,06036 | 0,00234 | 6,057 |

Prikazani proces sličan je prethodnom, pa su slični i rezultati proračuna.

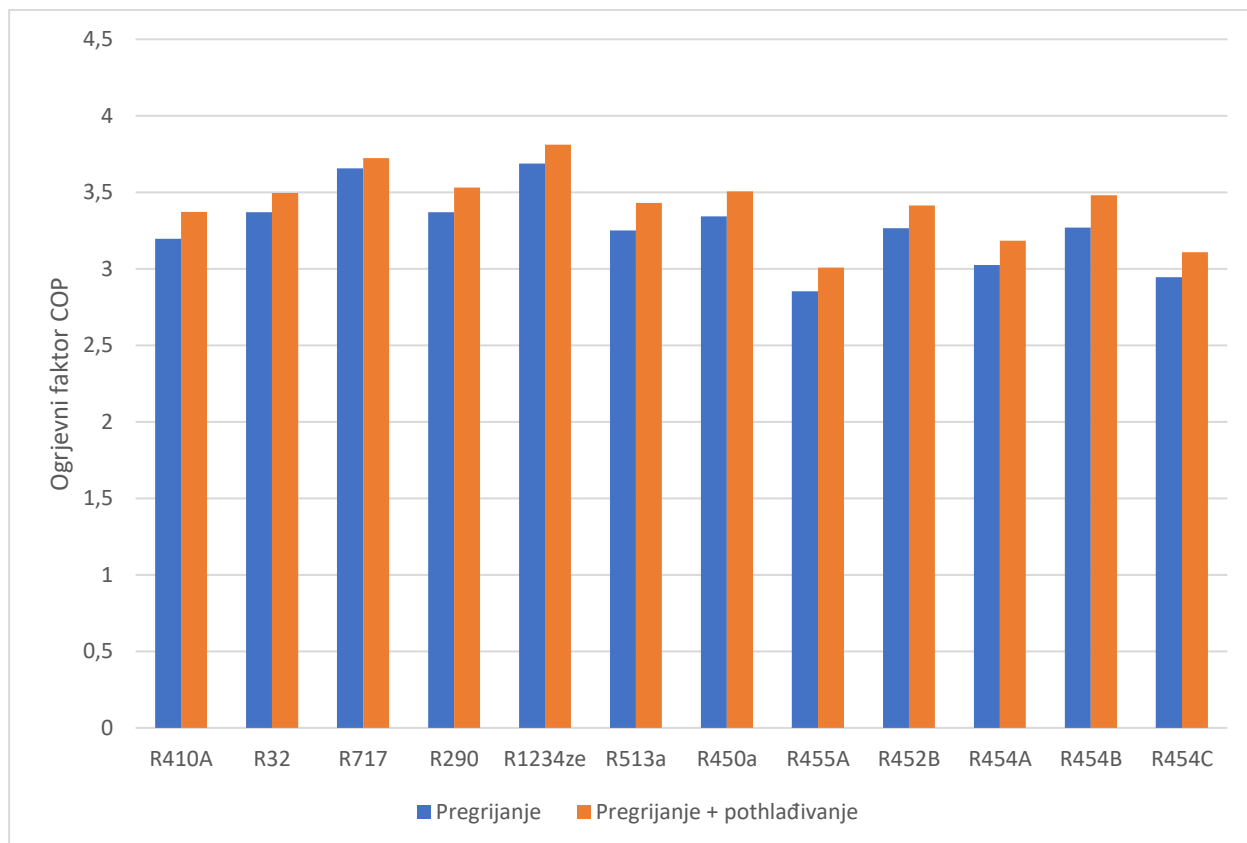
Treba napomenuti da je vidljiv porast faktora grijanja dizalice topline, što je posljedica dodatnog odvođenja topline od pothlađene radne tvari, koja se koristi za grijanje PTV – a.

Maseni protoci radne tvari potrebni za ostvarenje ogrjevnog učina nešto su manji nego u prethodnom slučaju, jer se iskorištava toplina pothlađivanja radne tvari.

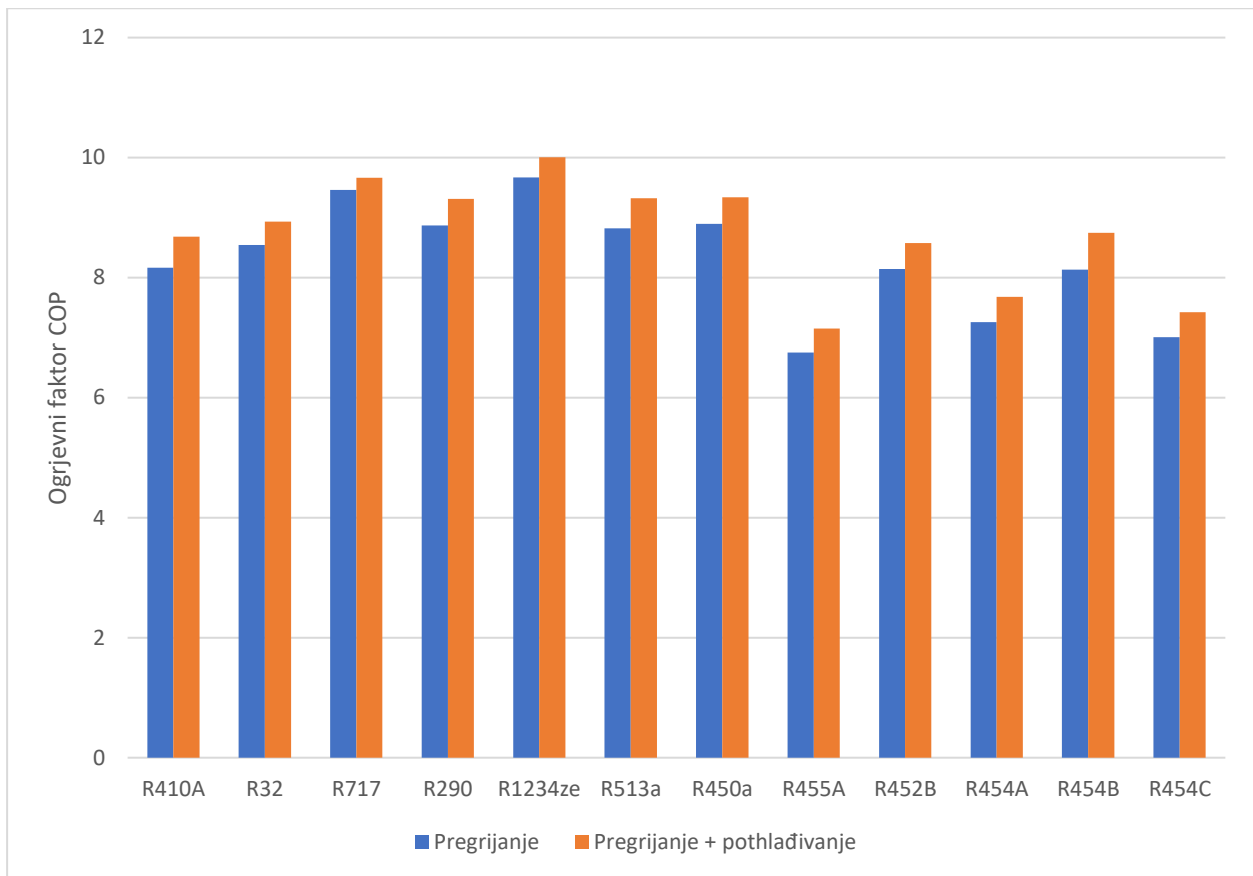
Temperature radnih tvari na kraju kompresije iste su kao i u prethodnom slučaju.

Ogrjevni faktori jednostupanjskih dizalica topline:

Na slici 4.9 prikazani su faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline za različite radne tvari pri različitim procesima.



Slika 4. 9 - Faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline zrak - voda - Zimski režim rada



Slika 4. 10 - Faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline zrak - voda - Ljetni režim rada

Iz prikazanih dijagrama da se zaključiti da se najviši faktori grijanja postižu za slučaj osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem radne tvari.

Razlog tome je što se kod navedenog procesa iskorištava dodatna toplina pothlađene radne tvari za grijanje potrošne tople vode, što se ne događa kod osnovnog procesa s pregrijanjem.

Dizalice topline zrak – voda:

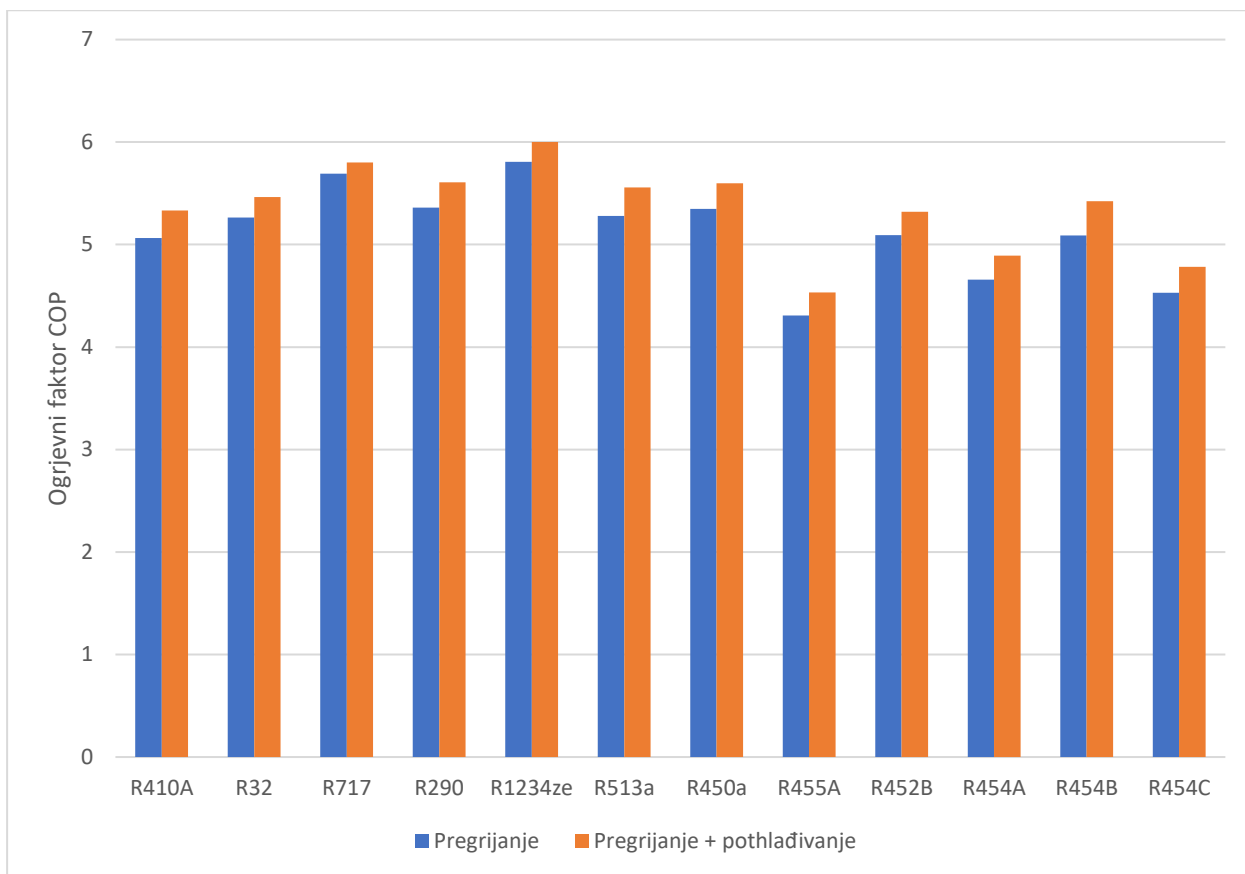
Najviši ogrjevni faktori zimi za osnovni podkritični proces s pregrijanjem postižu se redom za radne tvari R290, R32, R450A i R454B.

Najviši ogrjevni faktori ljeti za osnovni podkritični proces s pregrijanjem postižu se redom za radne tvari R450A, R290, R513A i R32.

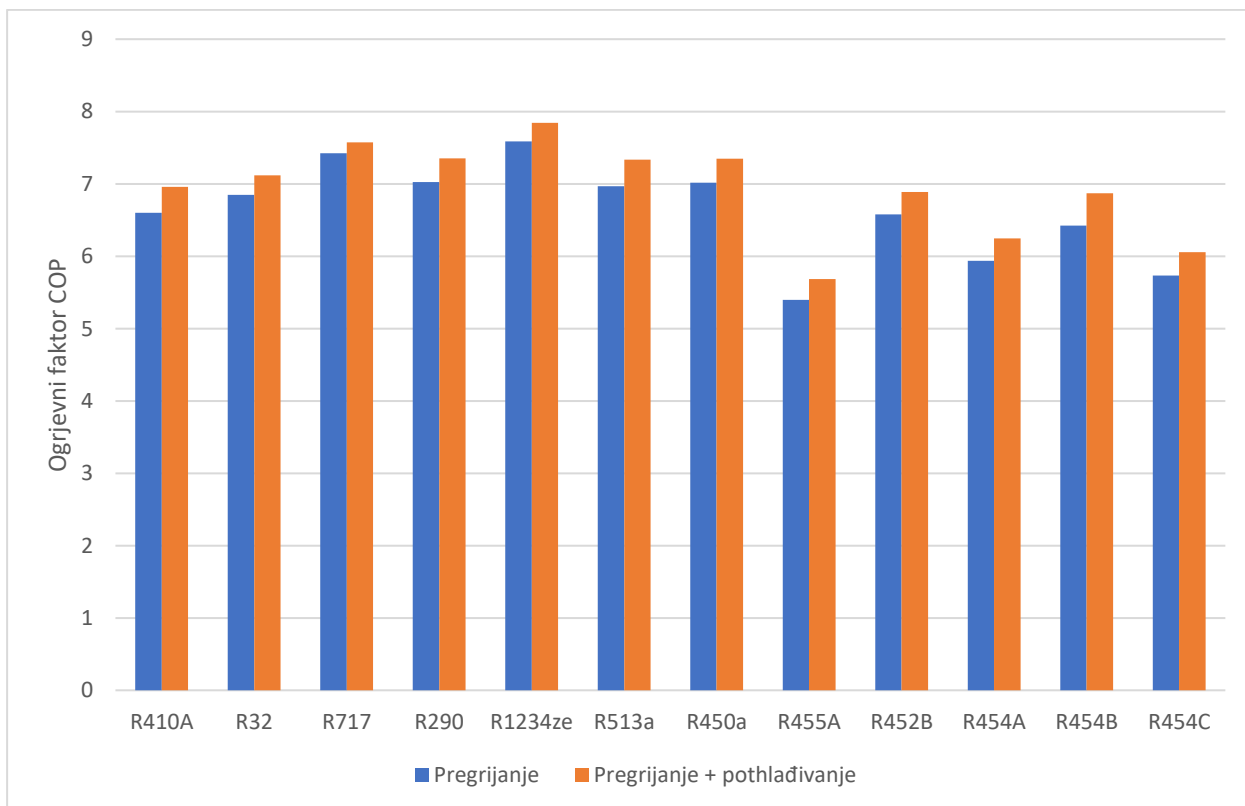
Najviši ogrjevni faktori zimi za osnovni podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem postižu se redom za radne tvari R290, R450A, R32 i R454B.

Najviši ogrjevni faktori ljeti za osnovni podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem postižu se redom za radne tvari R450A, R513A, R290 i R32.

Dizalice topline voda – voda:



Slika 4. 11 - Faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline voda - voda – Zimski režim rada



Slika 4. 12 - Faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline voda - voda - Ljetni režim rada

Najviši ogrjevni faktori zimi za osnovni podkritični proces s pregrijanjem postižu se redom za radne tvari R290, R450A, R513A i R32.

Najviši ogrjevni faktori ljeti za osnovni podkritični proces s pregrijanjem postižu se redom za radne tvari R290, R450A, R513A i R32.

Najviši ogrjevni faktori zimi za osnovni podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem postižu se redom za radne tvari R290, R450A, R513A i R32.

Najviši ogrjevni faktori ljeti za osnovni podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem postižu se redom za radne tvari R290, R450A, R513A i R32.

Ogrjevni faktori uvelike ovise o godišnjem dobu, te su mnogo veći u ljetnom periodu rada jer je tada manja razlika temperatura izvora i ponora.

4.1.2. Dvostupanjske dizalice topline

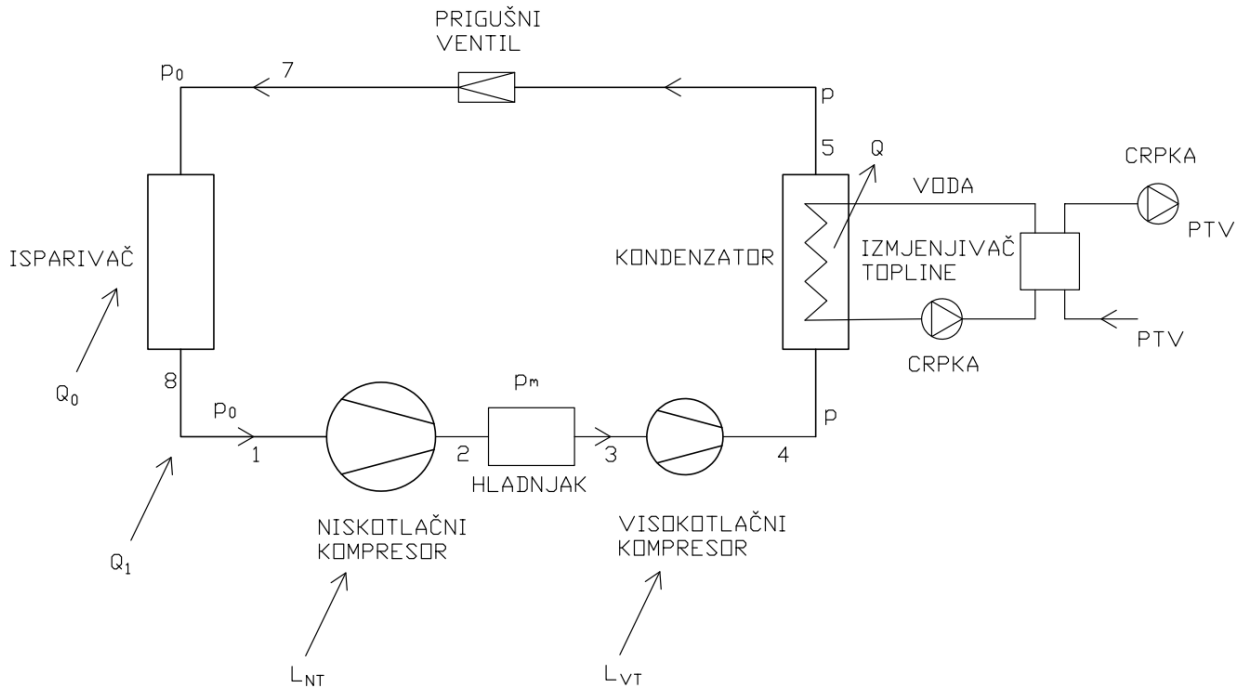
Izvedba dvostupanjskih dizalica topline razmatrana je za radne tvari kod kojih se postižu kompresijski omjeri za zadane temperature isparivanja i kondenzacije:

$$\frac{p_2}{p_1} > 8 \text{ (10,5)} \quad (4.34)$$

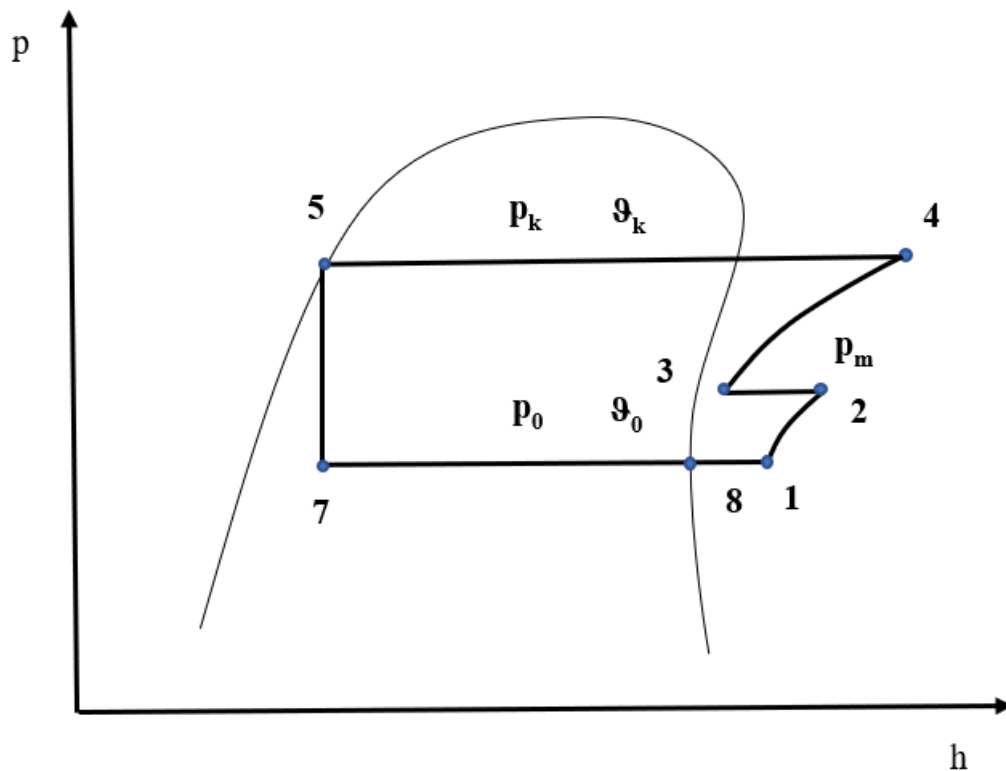
A to su u ovome slučaju: R717 i R1234ze.

Granica od 10,5 usvojena je pomoću dobivenih kompresijskih omjera iz Refprop softvera, te se uvažava isključivo ako je ispunjen uvjet da je temperatura radne tvari na izlazu iz kompresora niža od sigurnosne granice $\vartheta_2 < 130 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.1.2.1. Dvostupanjski podkritični proces s pregrijanjem radne tvari



Slika 4. 13 - Shema dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem



Slika 4. 14 - p,h - dijagram dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem

Kao i kod jednostupanjskih podkritičnih procesa, i u dvostupanjskim se većina procesa odvija u zasićenom području.

U ovome slučaju u zasićenom području odvija se cijeli proces izuzev pregrijanja suhozasićene pare na izlasku iz isparivača prije usisa u kompresor, niskotlačne kompresije, međuhlađenja, visokotlačne kompresije i dijela kondenzacije.

Funkcija međuhlađenja pare između niskotlačne i visokotlačne kompresije je smanjenje izlazne temperature radnog medija na izlasku iz kompresora ispod sigurnosne granice i time sprječavanje zapaljenja ulja za podmazivanje kompresora.

Toplina odvedena pri međuhlađenju iskorištava se za grijanje potrošne tople vode.

Proračun dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem (teoretski proces):

Specifični rad za izentropsku niskotlačnu kompresiju (rad za pogon kompresora):

$$l_{NT} = h_2 - h_1 \quad (4.35)$$

Tlak međuhlađenja usvojen je prema sljedećem kriteriju:

$$p_m = \sqrt{p \cdot p_0} \quad (4.36)$$

Toplina odvedena pri međuhlađenju iznosi:

$$q_{pm} = h_2 - h_3 \quad (4.37)$$

Specifični rad za izentropsku visokotlačnu kompresiju (rad za pogon kompresora):

$$l_{VT} = h_4 - h_3 \quad (4.38)$$

Maseni protok radne tvari potreban za ostvarenje zadanog ogrjevnog učina:

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}_{PTV}}{q_{ds} + q_k + q_{pm}} \quad (4.39)$$

Snaga potrebna za izentropsku kompresiju iznosi:

$$\dot{P} = \dot{M} \cdot (l_{NT} + l_{VT}) \quad (4.40)$$

Ogrjevni faktor iznosi:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{P}} = \frac{q_{ds} + q_k + q_{pm}}{l_{NT} + l_{VT}} \quad (4.41)$$

Za razmatrane radne tvari dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4.5.

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline zrak – voda

Tablica 4. 5 - Rezultati - Dvostupanjski proces s pregrijanjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline zrak - voda

| Radna tvar | REŽIM | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p_m [bar] | ϑ_2 [°C] | ϑ_4 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP |
|------------|-------|-------------------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------|--------------------|------------|-------------------------|-------|
| R717 | ZIMA | -20/50 | 1,9 | 20,33 | 6,22 | 66,02 | 110,49 | 0,00739 | 0,00471 | 3,929 |
| | LJETO | 20/50 | 8,57 | 20,33 | 13,2 | 55,62 | 65,63 | 0,00853 | 0,00131 | 9,951 |
| R1234ze | ZIMA | -20/50 | 0,27 | 3,91 | 1,03 | 21,25 | 60,52 | 0,04972 | 0,03406 | 3,695 |
| | LJETO | 20/50 | 1,49 | 3,91 | 2,41 | 39,5 | 50,01 | 0,0514 | 0,00704 | 9,655 |

Vidljivo je u tablici da se za zadane tlakove isparivanja, međuhlađenja i kondenzacije za radne tvari R717 i R1234ze dobivaju temperature radne tvari na kraju kompresije koje su prihvatljive i niže od sigurnosnih kriterija.

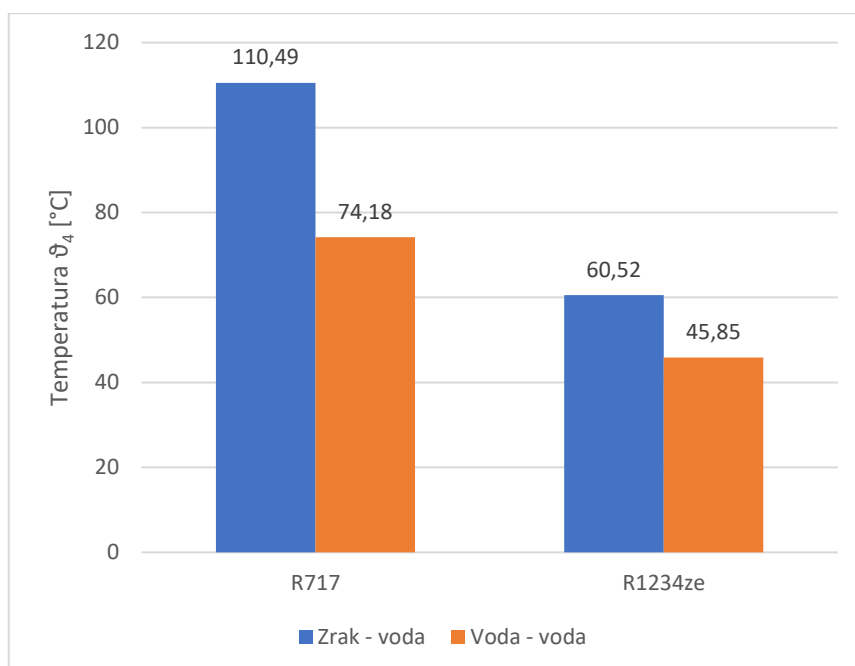
- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline voda – voda

Tablica 4. 6 - Rezultati - Dvostupanjski proces s pregrijanjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda

| Radna tvar | REŽIM | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p_m [bar] | ϑ_2 [°C] | ϑ_4 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP |
|------------|-------|-------------------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------|--------------------|------------|-------------------------|-------|
| R717 | ZIMA | -2/45 | 3,98 | 17,82 | 8,422 | 54,56 | 74,18 | 0,0079 | 0,00252 | 6,089 |
| | LJETO | 8/45 | 5,73 | 17,82 | 10,11 | 52,38 | 66 | 0,00817 | 0,00184 | 7,872 |
| R1234ze | ZIMA | -2/45 | 0,63 | 3,38 | 1,459 | 26,72 | 45,85 | 0,05003 | 0,01544 | 5,882 |
| | LJETO | 8/45 | 0,95 | 3,38 | 1,79 | 31,39 | 45,07 | 0,05033 | 0,01055 | 7,683 |

Može se zaključiti da su kod dizalica topline voda – voda, tlakovi međuhlađenja viši.

Temperature radnih tvari na kraju kompresije prikazane su na slici 4.15.



Slika 4. 15 - Temperature radne tvari na kraju visokotlačne kompresije - dvostupanjski podkritični proces s pregrijanjem - zimski režim rada (teoretski proces)

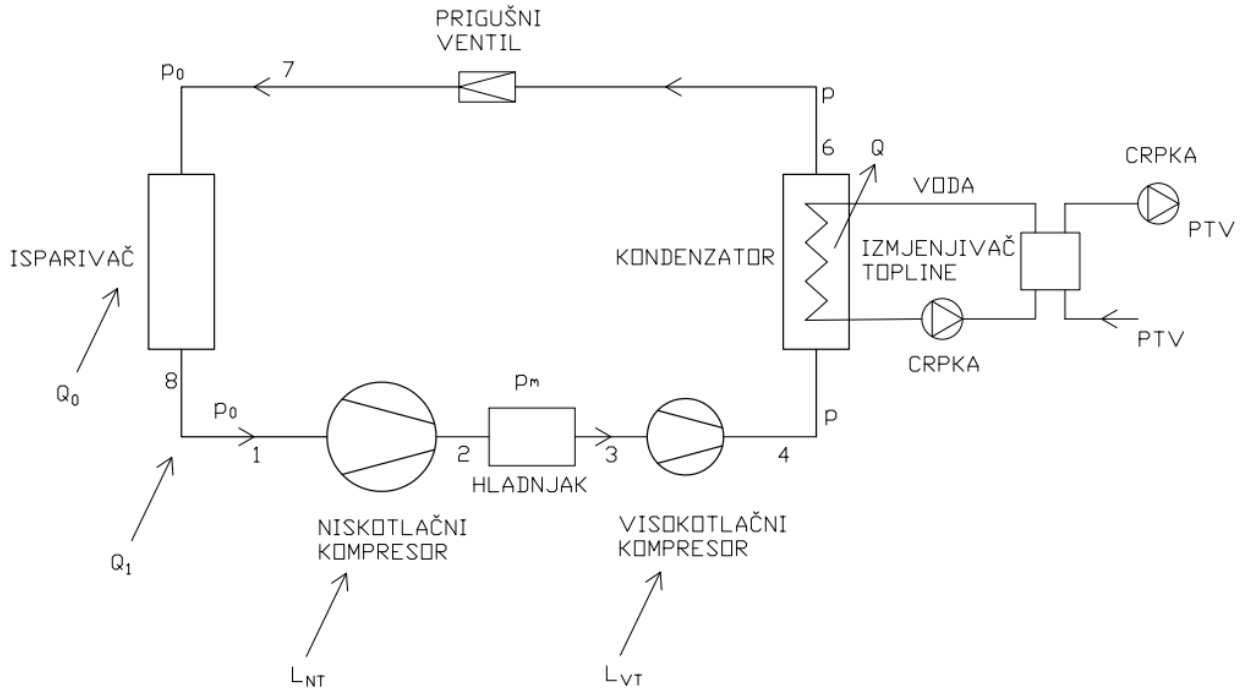
Može se zaključiti da iz sigurnosnog pogleda, sve radne tvari zadovoljavaju, tj. temperature na kraju kompresija su niže od sigurnosne granice.

Temperature na kraju visokotlačne kompresije veće su od temperatura na kraju niskotlačne kompresije.

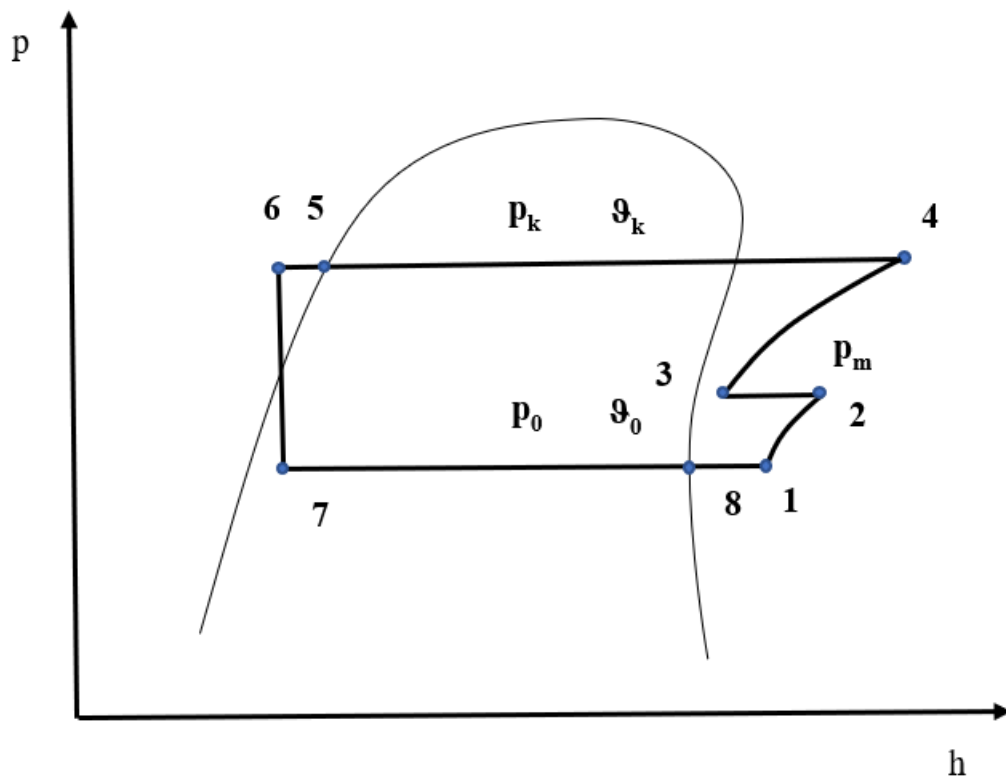
Za radnu tvar R717 postižu se više temperature nego za radnu tvar R1234ze.

U zimskom periodu rada u pravilu se postižu više temperature na kraju kompresije, iako ni to nije uvijek slučaj, razlog tome su viši kompresijski omjeri.

4.1.2.2. Dvostupanjski podkritični proces s pregrijanjem i pothlađenjem radne tvari



Slika 4. 16 - Shema dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem



Slika 4. 17 - p,h - dijagram dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem

Proces je vrlo sličan prethodnome, te se kao i u prethodnom većina procesa odvija u zasićenom području.

I u ovome slučaju u zasićenom području odvija se cijeli proces izuzev pregrijanja suhozasićene pare na izlasku iz isparivača prije usisa u kompresor, niskotlačne kompresije, međuhlađenja, visokotlačne kompresije, dijela kondenzacije i pothlađenja radne tvari.

Proračun dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem (teoretski proces):

Pothlađenje radne tvari na izlasku iz kondenzatora usvojeno je:

$$\Delta T_{\text{poth}} = 5 \text{ K} \quad (4.42)$$

Specifični rad za izentropsku visokotlačnu kompresiju (rad za pogon kompresora):

$$l_{VT} = h_4 - h_3 \quad (4.43)$$

Specifični ogrjevni učin pothlađivanja radne tvari:

$$q_p = h_5 - h_6 \quad (4.43)$$

Maseni protok radne tvari potreban za ostvarenje zadanog ogrjevnog učina:

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}_{PTV}}{q_{ds} + q_k + q_{pm} + q_p} \quad (4.44)$$

Ogrjevni faktor iznosi:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{P}} = \frac{q_{ds} + q_k + q_{pm} + q_p}{l_{NT} + l_{VT}} \quad (4.45)$$

Uz zadani ogrjevni učin, moguće je zagrijati sljedeću količinu PTV:

$$\begin{aligned} \dot{M}_w &= \frac{\dot{Q}_{PTV}}{c_w \cdot \Delta T_w} = \frac{\dot{Q}_{PTV}}{c_w \cdot (t_{w''} - t_{w'})} = \frac{10}{4,187 \cdot (40 - 10)} \cdot 3600 \\ &= 286,601 \text{ kg/h} \end{aligned} \quad (4.46)$$

Za razmatrane radne tvari dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4.7.

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline zrak – voda

Tablica 4. 7 - Rezultati - Dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline zrak - voda

| Radna tvar | REŽIM | g_0/g | p_0 [bar] | p [bar] | p_m [bar] | g_2 [°C] | g_4 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP |
|------------|-------|---------|----------------|--------------|----------------|---------------|------------|------------|-------------------------|--------|
| R717 | ZIMA | -20/50 | 1,9 | 20,33 | 6,22 | 66,02 | 110,49 | 0,00725 | 0,00462 | 4,002 |
| | LJETO | 20/50 | 8,57 | 20,33 | 13,2 | 55,62 | 65,63 | 0,00835 | 0,00128 | 10,165 |
| R1234ze | ZIMA | -20/50 | 0,27 | 3,91 | 1,03 | 21,25 | 60,52 | 0,04811 | 0,03295 | 3,818 |
| | LJETO | 20/50 | 1,49 | 3,91 | 2,41 | 39,5 | 50,01 | 0,04969 | 0,00681 | 9,988 |

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline voda – voda

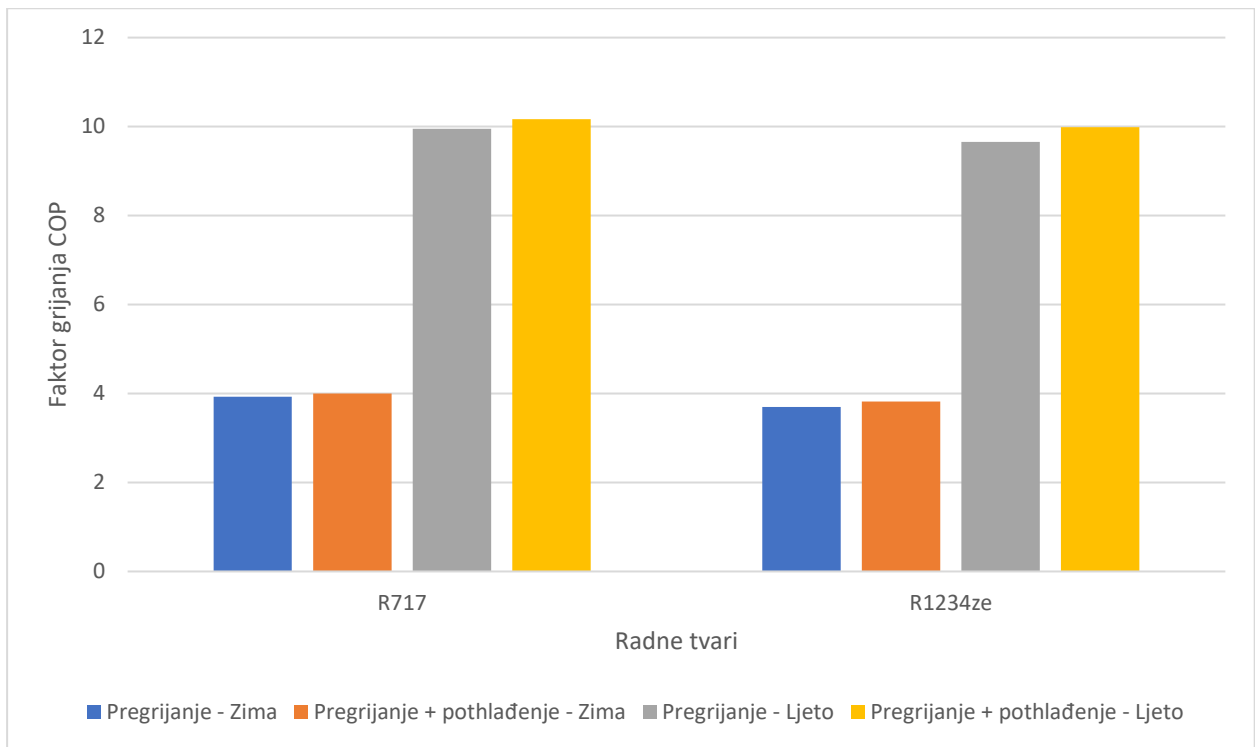
Tablica 4. 8 - Rezultati - Dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda

| Radna tvar | REŽIM | g_0/g | p_0 [bar] | p [bar] | p_m [bar] | g_2 [°C] | g_4 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP |
|------------|-------|---------|----------------|--------------|----------------|---------------|------------|------------|-------------------------|-------|
| R717 | ZIMA | -2/45 | 3,98 | 17,82 | 8,422 | 54,56 | 74,18 | 0,00775 | 0,00247 | 6,208 |
| | LJETO | 8/45 | 5,73 | 17,82 | 10,11 | 52,38 | 66 | 0,00801 | 0,0018 | 8,031 |
| R1234ze | ZIMA | -2/45 | 0,63 | 3,38 | 1,459 | 26,72 | 45,85 | 0,04842 | 0,01494 | 6,078 |
| | LJETO | 8/45 | 0,95 | 3,38 | 1,79 | 31,39 | 45,07 | 0,0487 | 0,01021 | 7,941 |

Temperature radnih tvari na kraju niskotlačne i visokotlačne kompresije jednake su kao i u prethodnom slučaju.

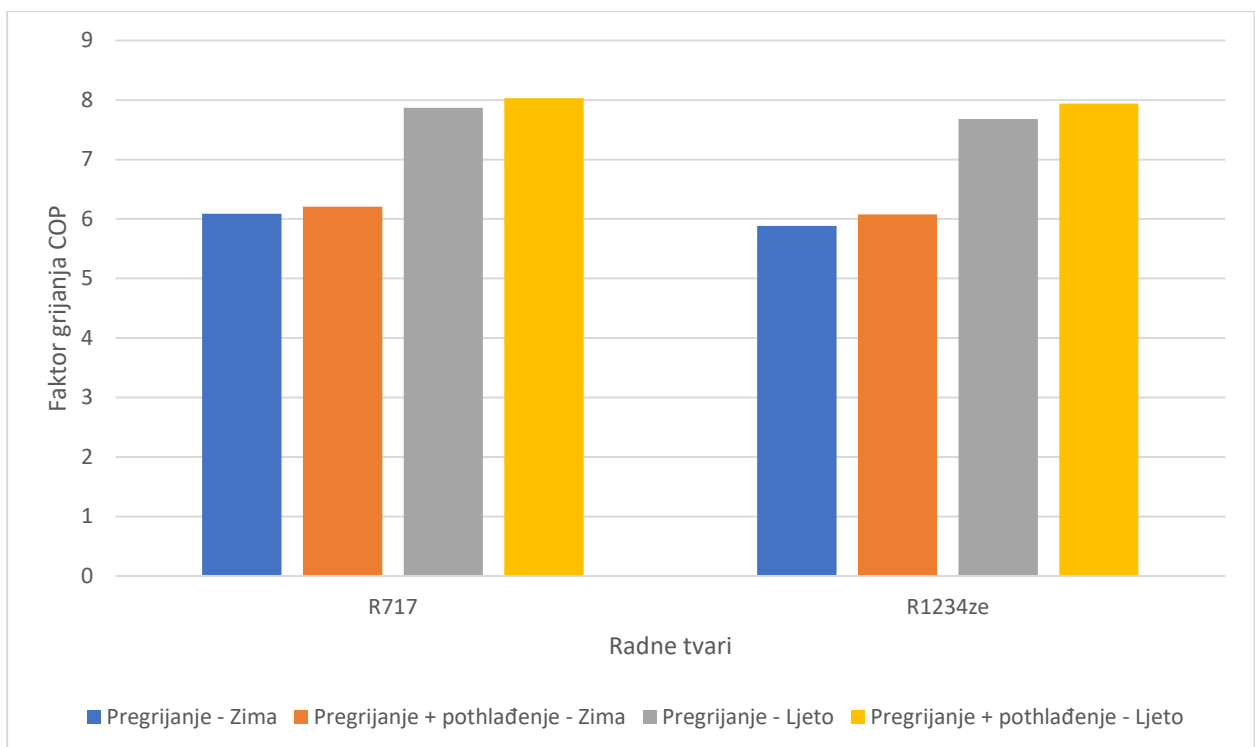
Potrebni maseni protoci radne tvari za ostvarenje toplinskog učina za zagrijanje PTV - a su se u odnosu na prethodni slučaj smanjili, zato što su raspoložive specifične topline uvećane za specifičnu toplinu pothlađivanja radne tvari.

Ogrjevni faktori dvostupanjskih dizalica topline zrak – voda prikazani su na slici 4.18.



Slika 4. 18 - Faktori grijanja dvostupanjskih dizalica topline zrak - voda za zimski režim rada (teoretski proces)

Slijede faktori grijanja za dizalice topline voda – voda.



Slika 4. 19 - Faktori grijanja dvostupanjskih dizalica topline voda - voda za zimski/ljetni režim rada (teoretski proces)

Vidljivo je da su kao i kod jednostupanjskih dizalica topline, faktori grijanja viši za slučaj dvostupanjskog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem jer se iskorištava dodatna toplina pothlađene radne tvari.

4.1.3. Transkritični jednostupanjski proces s obilaznim vodom parne faze na srednjem tlaku

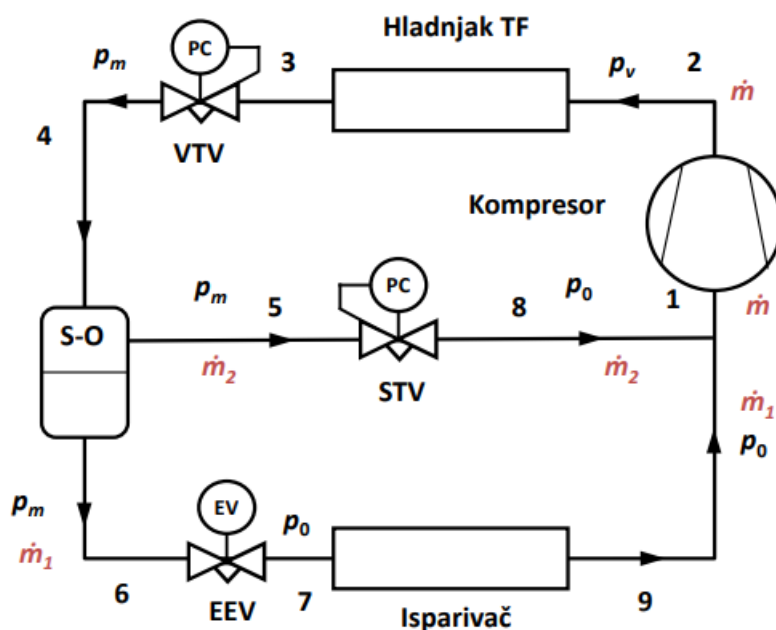
Transkritični proces se nešto razlikuje od podkritičnog, ponajviše po tome što se jedan dio procesa odvija u transkritičnom području, tj. u području iznad kritične točke.

U transkritičnom području odvija se hlađenje transkritičnog fluida, čija se toplina iskorištava za zagrijavanje potrošne tople vode.

Uređaji poput ovoga uobičajeno se koriste u komercijalnom hlađenju.

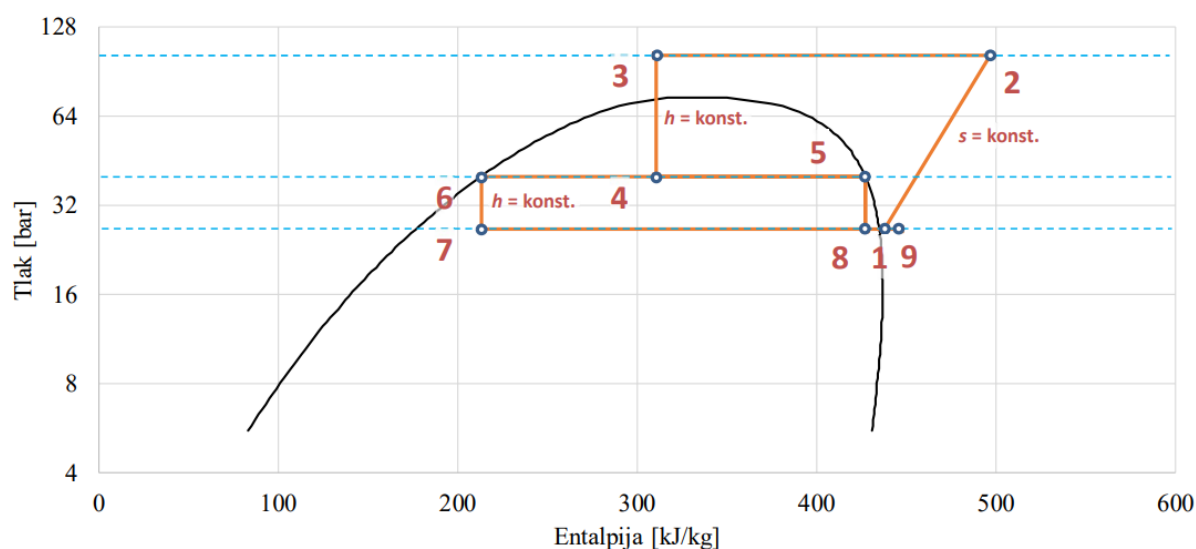
Uređaj se sastoji od 2 ventila: visokotlačnog VTV koji održava tlak u hladnjaku plina i srednjetačnog STV koji održava tlak u spremniku – odvajaču.

Prisutan je i termoekspanzijski ventil TEV koji regulira protok pare kroz isparivač i time održava željeno pregrijanje.



Slika 4. 20 - Shema transkritičnog jednostupanjskog procesa [32]

log p, h dijagram procesa



Slika 4. 21 - log p, h - dijagram transkritičnog jednostupanjskog procesa [33]

Proračun transkritičnog jednostupanjskog procesa s obilaznim vodom parne faze na srednjem tlaku:

Usvojeni su tlak u hladnjaku plina i ogrjevni učinak na sljedeće vrijednosti:

$$p_v = 110 \text{ bar} \quad (4.47)$$

$$Q_{PTV} = 10 \text{ kW} \quad (4.48)$$

Vrijednost rashladnog učinka proračunata je na onu vrijednost kojoj odgovara ogrjevni učinak hladnjaka plina od 10 kW, koji se u ovom slučaju u potpunosti iskorištava za grijanje PTV – a:

$$Q_0 = 6,95845 \text{ kW} \quad (4.49)$$

Temperatura isparivanja usvojena je u skladu s prethodnim vrijednostima:

$$\vartheta_0 = -20 \text{ °C} \quad (4.50)$$

Tablica 4. 9 - Stanja u specifičnim točkama transkritičnog procesa

| Točka | Temperatura ϑ [°C] | Tlak p [bar] | Entalpija h [kJ/kg] | Entropija s [kJ/kgK] | Spec. Volumen ν [m ³ /kg] | Udio pare x |
|-------|---------------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|--|------------------|
| 1 | -15,645 | 19,696 | 442,37 | 1,9700 | 0,020043 | |
| 2 | 118,85 | 110 | 524,65 | 1,9700 | 0,0052732 | |
| 3 | 25 | 110 | 254,13 | 1,1597 | 0,0012011 | |
| 4 | 18,269 | 55 | 254,13 | 1,1828 | 0,0013695 | 0,02482 |
| 5 | 18,269 | 55 | 411,28 | 1,7221 | 0,0055118 | |
| 6 | 18,269 | 55 | 250,13 | 1,1691 | 0,001264 | |
| 7 | -20 | 19,696 | 250,13 | 1,2108 | 0,0071936 | |
| 8 | -20 | 19,696 | 411,28 | 1,8474 | 0,017677 | |
| 9 | -15 | 19,696 | 443,16 | 1,9731 | 0,020144 | |

Prigušenjem transkritičnog fluida stanja 3 razvija se u spremniku – odvajaču x kg pare i $1-x$ kg kapljevine.

Udio pare u spremniku – odvajaču iznosi:

$$x = 0,02482 \quad (4.51)$$

Udio kapljevine u spremniku – odvajaču:

$$y = 1 - x = 0,97518 \quad (4.52)$$

Specifični rashladni učin uređaja iznosi:

$$q_0 = h_9 - h_7 = 443,16 - 250,13 = 193,03 \text{ kJ/kg} \quad (4.53)$$

Protoke radne tvari izračunavamo na sljedeći način:

Protok radne tvari kroz isparivač:

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{Q}_0}{q_0} = \frac{6,95845}{193,03} = 0,03605 \text{ kg/s} \quad (4.54)$$

Maseni protok m_2 :

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \frac{x}{1-x} = 0,03605 \cdot \frac{0,02482}{0,97518} = 0,00092 \text{ kg/s} \quad (4.55)$$

Ukupni protok radne tvari koju dobavlja kompresor:

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 0,03605 + 0,00092 = 0,03697 \text{ kg/s} \quad (4.56)$$

Kompresor usisava stanje pare koje se dobije miješanjem stanja 8 i stanja 9, te se entalpija pare stanja 1 izračunava na sljedeći način:

$$\dot{m}h_1 = \dot{m}_1h_9 + \dot{m}_2h_8 \quad (4.57)$$

$$h_1 = \frac{\dot{m}_1h_9 + \dot{m}_2h_8}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = \frac{0,03605 \cdot 443,16 + 0,00092 \cdot 411,28}{0,03697} = 442,37 \text{ kJ/kg} \quad (4.58)$$

Entalpija pare na izlazu iz kompresora:

$$h_2 = 524,65 \text{ kJ/kg} \quad (4.59)$$

Snaga za pogon kompresora:

$$\dot{P} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) = 0,03697 \cdot (524,65 - 442,37) = 3,042 \text{ kW} \quad (4.60)$$

Toplina odvedena u hladnjaku transkritičnog fluida u ovom se slučaju koristi u potpunosti za zagrijavanje potrošne tople vode i ona iznosi 10 kW:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = 0,03697 \cdot (524,65 - 254,13) = 10 \text{ kW} \quad (4.61)$$

Faktor grijanja iznosi:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{P}} = \frac{10}{3,042} = 3,288 \quad (4.62)$$

Proračun je izvršen za dizalicu topline zrak – voda i može se zaključiti da se u usporedbi s podkritičnim dizalicama topline postižu otprilike faktori grijanja jednaki prosječnim faktorima grijanja kod podkritičnih dizalica topline.

Prednosti dizalica topline na ugljikov dioksid su brojne, jedna od važnijih je postizanje viših temperatura potrošne tople vode.

U usporedbi s konvencionalnim dizalicama topline zrak – voda na HFC radne tvari, dizalice topline na CO₂ postižu više temperature potrošne tople vode pri nižim okolnim temperaturama i time smanjuju potrebu za energijom.

Još jedna prednost ovih uređaja je smanjen rizik za pojavu legionele što je posljedica viših temperatura potrošne tople vode.

Ostale velike prednosti CO₂ dizalica topline su energetska učinkovitost, otpornost i pouzdanost.

CO₂ je prirodna radna tvar te sa sobom nosi nekoliko prednosti, jedna od njih je nizak GWP jednak 1, te se korištenjem uređaja na CO₂ značajno smanjuje utjecaj na globalno zatopljenje.

Također CO₂ je nezapaljiv i neotrovan, te relativno jednostavan, učinkovit i održiv za proizvodnju.

4.1.4. Kaskadna dizalica topline

Kaskadni procesi koriste se kod niskih temperatura hlađenja u rashladnoj tehnici, gdje je sužen izbor radnih tvari zbog fizikalnih svojstava tvari (temperatura ledišta).

Kaskadni procesi sastoje se od dva rashladna kruga s dvije različite radne tvari, pri čemu se jedna radna tvar koja je prikladna za upotrebu pri višim temperaturama koristi u krugu više temperature (gornja kaskada), a ona koja je prikladnija za niže u krugu niže temperature (donja kaskada).

Kondenzator donje kaskade je i isparivač gornje kaskade.

Pri tome vrijedi:

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_{0II} \quad (4.63)$$

Tj. toplina odvedena kondenzatoru donje kaskade Q_I dovodi se isparivaču gornje kaskade te predstavlja toplinu isparivanja Q_{0II} gornje kaskade.

Kondenzator i isparivač procesa su izvedeni kao jedan izmjenjivač topline.

Navedeno ima primjenu kod dizalica topline namijenjenih grijanju, kod kojih se iskorištava velika razlika temperatura kondenzacije i isparivanja u svrhu postizanja visokih temperatura potrošne tople vode.

Da bi izmjena topline bila moguća, temperatura kondenzacije donje kaskade mora biti viša od temperature isparivanja gornje kaskade.

Kaskadne dizalice topline primjenjuju se kada su potrebne velike ili promjenjive količine potrošne tople vode pri čemu se više dizalica topline povezuju u kaskadni sustav da bi se efikasno ostvarile potrebe za grijanjem ili potrošnom toplom vodom.

Kaskadni sustavi primjenjuju se da bi se ostvarile visoke potrebe za toplinom, za prilagodbu sezonskim varijacijama, maksimizirala efikasnost u više temperaturnih zona i smanjilo pregrijanje.

Kada je potreba za toplinom niska, što je najčešće ljeti, sustav može djelovati samo s jednom kaskadom u svrhu optimiziranja efikasnosti i smanjenja troškova pogona.

Kaskadne dizalice topline posebno su korisne u komercijalnoj primjeni, ne samo da efikasno djeluju u širokom polju potrebe za toplinom, već i svaka kaskada može imati svoju primjenu.

Na primjer, jedna bi se mogla koristiti za grijanje, dok se druga koristi za potrebe grijanja potrošne tople vode, čime se izbjegava ikakva odgađanja u isporuci bilo toplinske energije ili potrošne tople vode.

Kaskadne dizalice topline su dizajnirane na način da se njihov rad prilagođava potrebi za toplinom, to znači da je sustav jako učinkovit, jer proizvodi samo potrebnu količinu topline i tople vode.

U ovom slučaju napravljen je proračun kaskadne dizalice topline zrak – voda za zimski i ljetni režim rada, za navedene kombinacije radnih tvari:

- R744/R717
- R410A/R134A
- R290/R1234ze
- R744/R1234ze
- R717/R290

Usvojene su sljedeće vrijednosti:

Toplinski učin dizalice topline:

$$\dot{Q}_{PTV} = 10 \text{ kW} \quad (4.64)$$

Temperatura potrošne tople vode:

$$\vartheta_{PTV} = \vartheta_{w''} = 40 \text{ °C} \quad (4.65)$$

Temperaturni režimi rada za kaskadnu dizalicu topline zrak - voda:

- Zimski režim rada:

Temperatura isparivanja donje kaskade:

$$\vartheta_{0,DK} = -20 \text{ °C} \quad (4.66)$$

Temperatura kondenzacije gornje kaskade:

$$\vartheta_{k,GK} = 50 \text{ °C} \quad (4.67)$$

Usvojena 5 K viša od izlazne temperature vode za hlađenje kondenzatora.

Temperatura kondenzacije donje kaskade:

$$\vartheta_{k,DK} = 15 \text{ °C} \quad (4.68)$$

Usvojena 5 K viša od temperature isparivanja gornje kaskade.

Temperatura isparivanja gornje kaskade:

$$\vartheta_{0,GK} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.69)$$

Temperatura isparivanja gornje kaskade i temperatura kondenzacije donje kaskade usvojene su s ciljem da u obje kaskade kompresijski omjeri budu približno jednaki ($\approx 2,5 - 4$).

Radna tvar se pregrijava za 5 K:

$$\Delta\vartheta_{\text{preg}} = 5 \text{ K} \quad (4.70)$$

- Ljetni režim rada:

Temperatura isparivanja donje kaskade:

$$\vartheta_{0,DK} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.71)$$

Temperatura kondenzacije gornje kaskade:

$$\vartheta_{k,GK} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.72)$$

Temperatura kondenzacije donje kaskade:

$$\vartheta_{k,DK} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.73)$$

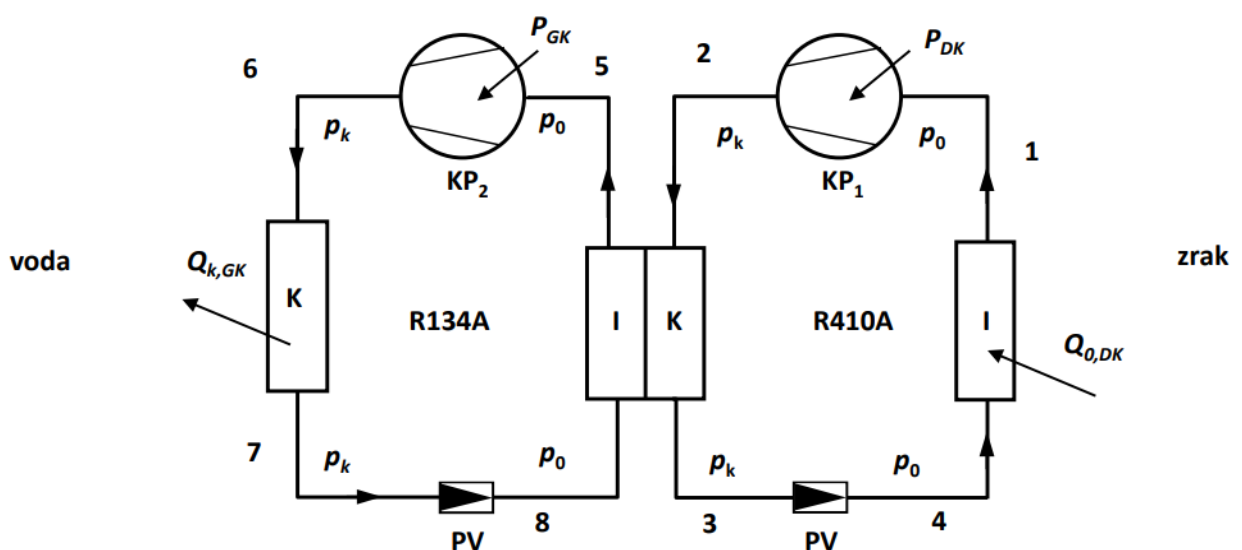
Temperatura isparivanja gornje kaskade:

$$\vartheta_{0,GK} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.74)$$

Radna tvar se pregrijava za 5 K:

$$\Delta\vartheta_{\text{preg}} = 5 \text{ K} \quad (4.75)$$

Proračun kaskadne dizalice topline:



Slika 4. 22 - Shema kaskadne dizalice topline [34]

Tlakovi pri zadanim temperaturama isparivanja i kondenzacije, kao i entalpije i entropije u određenim točkama procesa za različite radne tvari dobiveni su pomoću softvera Refprop.

Iz dobivenih tlakova isparivanja i kondenzacije dobivaju se kompresijski omjeri prema sljedećem izrazu:

$$\frac{p}{p_0} - \text{kompresijski omjer} \quad (4.76)$$

Pri čemu je:

p – tlak kondenzacije [Pa]

p_0 – tlak isparivanja [Pa]

Specifična toplina kondenzacije gornje kaskade iznosi:

$$q_{k,GK} = h_6 - h_7 \quad (4.77)$$

Iz dobivene specifične topline kondenzacije i usvojenog toplinskog učina za zagrijavanje PTV – a možemo dobiti protok radne tvari u gornjoj kaskadi:

$$\dot{Q}_{PTV} = \dot{Q}_{k,GK} = 10 \text{ kW} \quad (4.78)$$

$$\dot{m}_{GK} = \frac{\dot{Q}_{k,GK}}{q_{k,GK}} \quad (4.79)$$

Maseni protok radne tvari u donjoj kaskadi računa se na sljedeći način:

$$\dot{m}_{DK} = \frac{\dot{Q}_{k,DK}}{q_{k,DK}} \quad (4.80)$$

Kao što je već rečeno, toplina kondenzacije donje kaskade jednaka je toplini isparivanja gornje kaskade. Navedeno iskorištavamo za proračun masenog protoka radne tvari u donjoj kaskadi:

$$\dot{Q}_{k,DK} = \dot{Q}_{0,GK} \quad (4.81)$$

Specifična toplina isparivanja gornje kaskade:

$$q_{0,GK} = h_5 - h_8 \quad (4.82)$$

Toplina isparivanja gornje kaskade:

$$\dot{Q}_{0,GK} = \dot{m}_{GK} \cdot q_{0,GK} \quad (4.83)$$

Specifična toplina kondenzacije donje kaskade:

$$q_{k,DK} = h_2 - h_3 \quad (4.84)$$

Konačno, maseni protok radne tvari u donjoj kaskadi iznosi:

$$\dot{m}_{\text{DK}} = \frac{\dot{Q}_{\text{k,DK}}}{q_{\text{k,DK}}} \quad (4.85)$$

Potrebna snaga za pogon dizalice topline:

$$\dot{P}_{\text{DK}} = \dot{m}_{\text{DK}} \cdot (h_2 - h_1) \quad (4.86)$$

$$\dot{P}_{\text{GK}} = \dot{m}_{\text{GK}} \cdot (h_6 - h_5) \quad (4.87)$$

$$\dot{P} = \dot{P}_{\text{DK}} + \dot{P}_{\text{GK}} \quad (4.88)$$

Ukupna snaga potrebna za pogon kaskadne dizalice topline jednaka je zbroju snaga potrebnih za pogon donje i gornje kaskade.

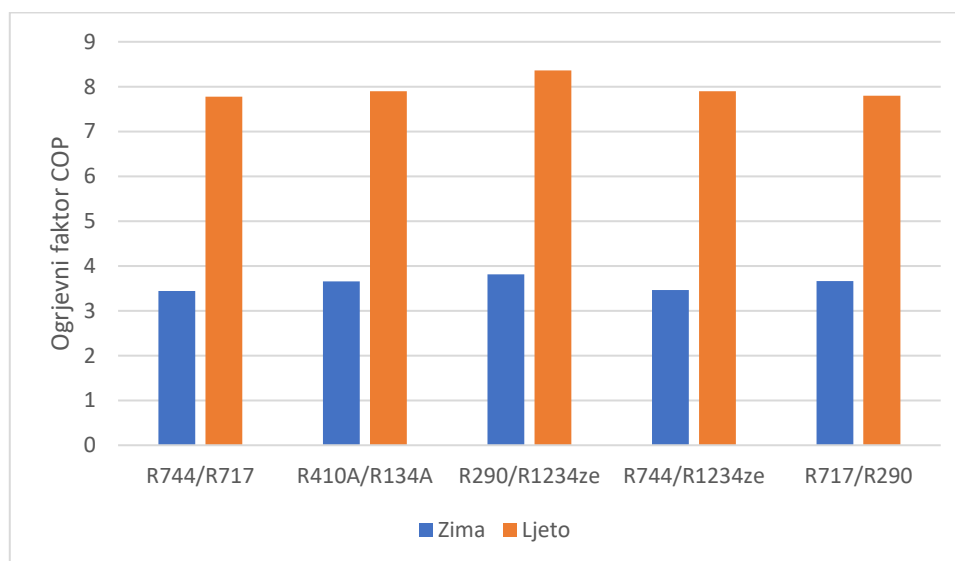
Faktor grijanja iznosi:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{k,GK}}}{\dot{P}} \quad (4.89)$$

Tablica 4. 10 - Rezultati - Kaskadne dizalice topline zrak - voda

| Donja/gornja kaskada | REŽIM | $q_{k,DK}/q_{0,GK}$ | $p_{DK}/p_{0,DK}$ | $p_{GK}/p_{0,GK}$ | m_{DK} | m_{GK} | P_{DK} | P_{GK} | P | COP |
|----------------------|-------|---------------------|-------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|------|-------|
| R744/R717 | ZIMA | 15/10 | 2,58 | 3,31 | 0,03493 | 0,00818 | 1,46 | 1,45 | 2,90 | 3,44 |
| | LJETO | 25/20 | 1,12 | 2,37 | 0,05802 | 0,00848 | 0,23 | 1,06 | 1,29 | 7,77 |
| R410A/R134A | ZIMA | 15/10 | 3,15 | 3,18 | 0,03715 | 0,06172 | 1,22 | 1,52 | 2,74 | 3,65 |
| | LJETO | 25/20 | 1,14 | 2,30 | 0,04539 | 0,06218 | 0,16 | 1,10 | 1,27 | 7,89 |
| R290/R1234ze | ZIMA | 15/10 | 2,99 | 3,83 | 0,02294 | 0,05118 | 1,19 | 1,43 | 2,62 | 3,81 |
| | LJETO | 25/20 | 1,14 | 2,62 | 0,02585 | 0,0514 | 0,16 | 1,04 | 1,20 | 8,36 |
| R744/R1234ze | ZIMA | 15/10 | 2,58 | 3,83 | 0,03501 | 0,05118 | 1,46 | 1,43 | 2,89 | 3,46 |
| | LJETO | 25/20 | 1,12 | 2,62 | 0,05815 | 0,0514 | 0,23 | 1,04 | 1,27 | 7,90 |
| R717/R290 | ZIMA | 15/10 | 3,83 | 2,69 | 0,00617 | 0,03274 | 1,18 | 1,55 | 2,73 | 3,67 |
| | LJETO | 25/20 | 1,17 | 2,05 | 0,0074 | 0,033 | 0,15 | 1,13 | 1,28 | 7,80 |

Grafički prikaz faktora grijanja za razne kombinacije radnih tvari slijedi na slici 4.23.



Slika 4. 23 - Ogrjevni faktori kaskadne dizalice topline zrak - voda za zimski/ljetni režim rada (teoretski proces)

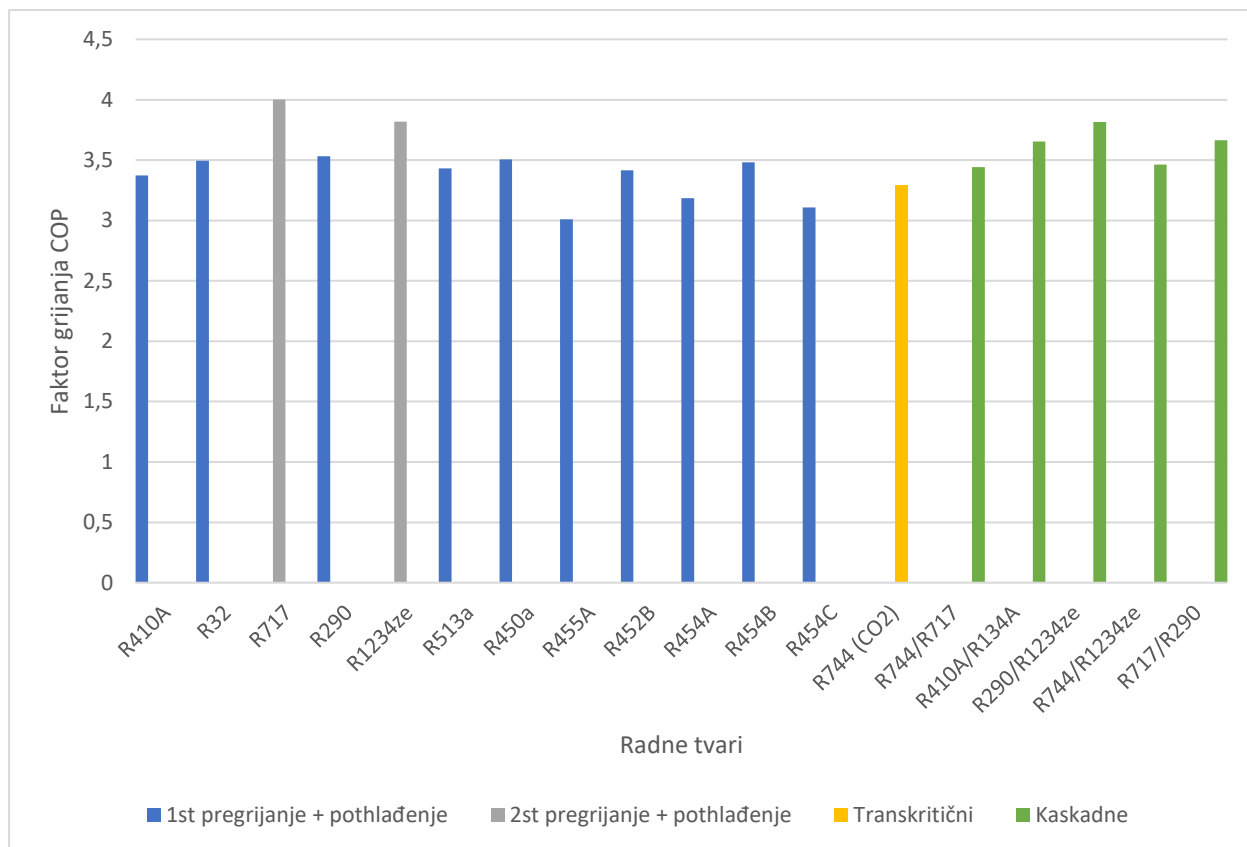
Vidljivo je da se najviši faktori grijanja postižu za kombinaciju radnih tvari R290/R1234ze, a najniži za kombinaciju R744/R717.

Najveća količina, tj. zbroj masa radnih tvari u donjoj i gornjoj kaskadi dobiva se za kombinaciju radnih tvari R410A/R134A u zimskom režimu, za R744/R1234ze u ljetnom režimu, a najmanja za kombinaciju R717/R290 u oba režima rada.

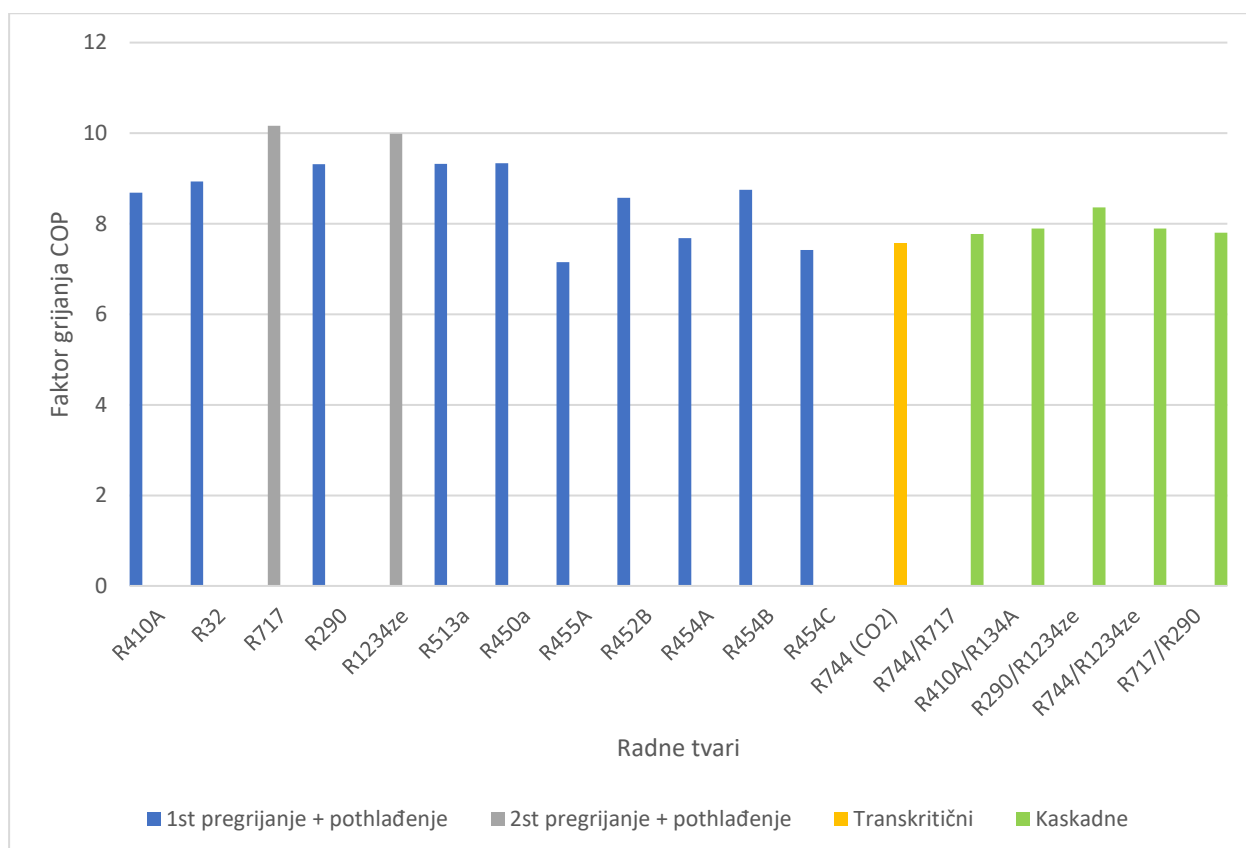
Za kombinaciju R744/R717 potrebna je najveća snaga za pogon dizalice topline, a najmanja za kombinaciju R290/R1234ze.

4.1.5. Usporedba svih procesa s dizalicama topline

Napravljena je usporedba faktora grijanja za sve procese dizalica topline zrak – voda za slučaj zimskog i ljetnog režima rada.



Slika 4. 24 - Usporedba faktora grijanja svih procesa dizalica topline zrak - voda za zimski režim rada (teoretski proces)



Slika 4. 25 - Usporedba faktora grijanja svih procesa dizalica topline zrak - voda za ljetni režim rada (teoretski proces)

Vidljivo je da se za zadani toplinski učinak za zagrijavanje PTV – a najviši faktori grijanja postižu za slučaj dvostupanjskih dizalica topline, točnije za dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem radne tvari, što ih čini najprikladnijim za potrebe grijanja PTV.

Isti zaključci vrijede i za dizalice topline voda – voda.

Za najbolji proces provedena je usporedba teoretskog s stvarnim procesom.

4.1.6. Usporedba sa stvarnim procesom (dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem)

Proračun dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem (stvarni proces):

U ovome slučaju stvarni proces je aproksimiran s usvojenim stupnjem djelovanja kompresora:

$$\eta_{NT} = 0,8 \quad (4.90)$$

$$\eta_{VT} = 0,8 \quad (4.91)$$

Specifični rad za stvarnu niskotlačnu kompresiju (rad za pogon kompresora):

$$l_{NTstv} = \frac{h_2 - h_1}{\eta_{NT}} \quad (4.92)$$

Entalpija stvarnog stanja na kraju niskotlačne kompresije izračunava se na sljedeći način:

$$h_{2stv} = h_1 + l_{NTstv} \quad (4.93)$$

Toplina odvedena pri međuhlađenju iznosi:

$$q_{pm} = h_{2stv} - h_3 \quad (4.94)$$

Specifični rad za stvarnu visokotlačnu kompresiju (rad za pogon kompresora):

$$l_{VTstv} = \frac{h_4 - h_3}{\eta_{VT}} \quad (4.95)$$

Entalpija stvarnog stanja na kraju visokotlačne kompresije izračunava se na sljedeći način:

$$h_{4stv} = h_3 + l_{VTstv} \quad (4.96)$$

Stvarni specifični ogrjevni učin pregrijane pare iznosi:

$$q_{dsstv} = h_{4stv} - h_{4'} \quad (4.97)$$

Stvarni maseni protok radne tvari potreban za ostvarenje zadanog ogrjevnog učina:

$$\dot{M}_{stv} = \frac{\dot{Q}_{PTV}}{q_{dsstv} + q_k + q_{pm} + q_p} \quad (4.98)$$

Stvarni ogrjevni faktor iznosi:

$$COP_{stv} = \frac{\dot{Q}_{stv}}{\dot{P}_{stv}} = \frac{q_{dsstv} + q_k + q_{pm} + q_p}{l_{NTstv} + l_{VTstv}} \quad (4.99)$$

Rezultati proračuna za dizalicu topline zrak – voda:

Za razmatrane radne tvari dobiveni rezultati prikazani su u sljedećoj tablici:

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline zrak – voda

Tablica 4. 11 - Rezultati - Stvarni dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/ljetni režim rada, dizalica topline zrak - voda

| Radna tvar | REŽIM | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p_m [bar] | ϑ_{2stv} [°C] | ϑ_{4stv} [°C] | M_{stv} [kg/s] | V_{stv} [m ³ /s] | COP_{stv} |
|------------|-------|-------------------------|----------------|--------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------|
| R717 | ZIMA | -20/50 | 1,9 | 20,33 | 6,215 | 83,35 | 127,15 | 0,00683 | 0,00435 | 3,343 |
| | LJETO | 20/50 | 8,57 | 20,33 | 13,2 | 60,82 | 70,16 | 0,00815 | 0,00125 | 8,332 |
| R1234ze | ZIMA | -20/50 | 0,27 | 3,91 | 1,027 | 28,83 | 67,65 | 0,04516 | 0,03093 | 3,156 |
| | LJETO | 20/50 | 1,49 | 3,91 | 2,414 | 42,17 | 52,57 | 0,04847 | 0,00664 | 8,190 |

Rezultati proračuna za dizalicu topline voda – voda:

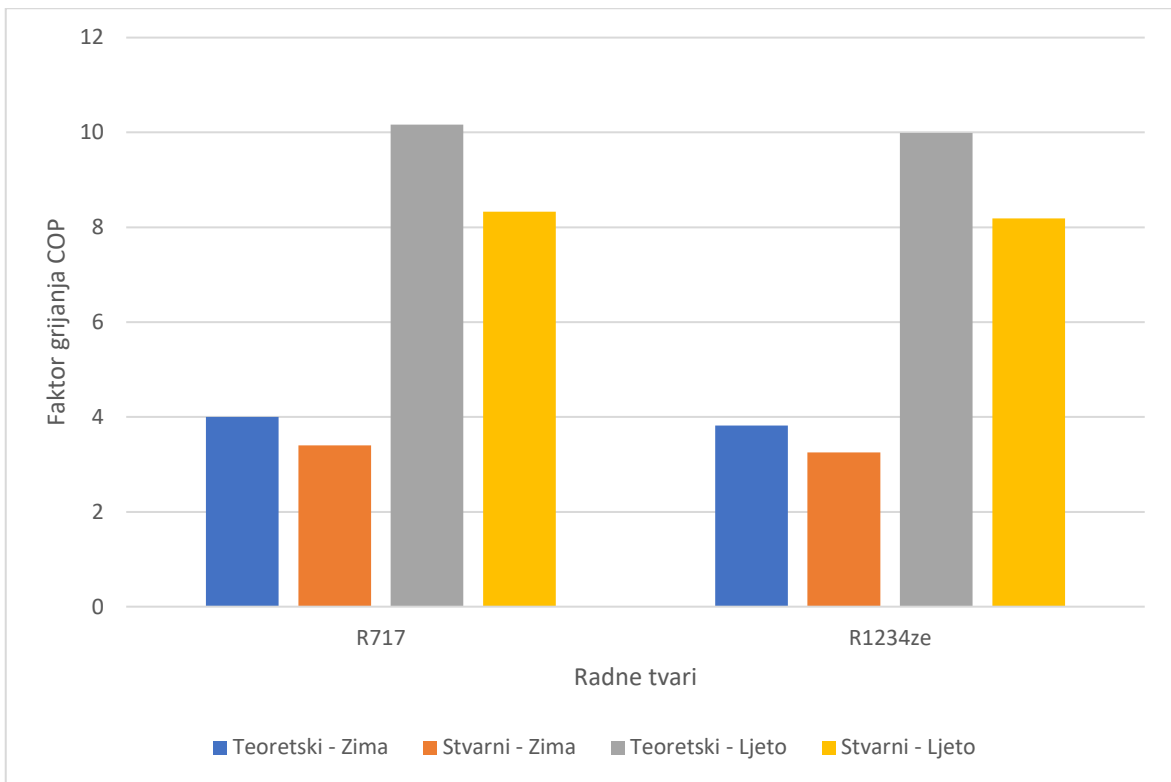
Za razmatrane radne tvari dobiveni rezultati prikazani su u sljedećoj tablici:

- Projektni zimski/ljetni režim rada, dizalica topline voda – voda

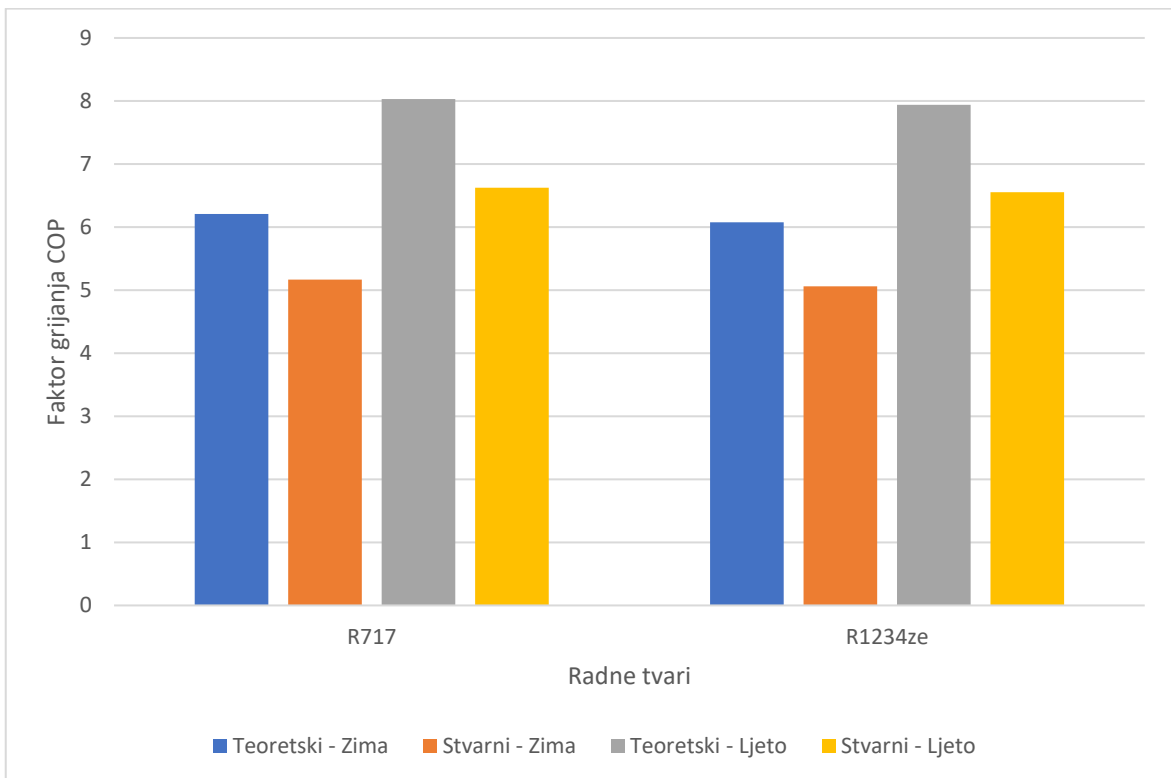
Tablica 4. 12 - Rezultati - Stvarni dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda

| Radna tvar | REŽIM | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p_m [bar] | ϑ_{2stv} [°C] | ϑ_{4stv} [°C] | M_{stv} [kg/s] | V_{stv} [m ³ /s] | COP_{stv} |
|------------|-------|-------------------------|----------------|--------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------|
| R717 | ZIMA | -2/45 | 3,98 | 17,82 | 8,422 | 64,76 | 83,23 | 0,00745 | 0,00237 | 5,166 |
| | LJETO | 8/45 | 5,73 | 17,82 | 10,1 | 59,69 | 72,42 | 0,00777 | 0,00175 | 6,625 |
| R1234ze | ZIMA | -2/45 | 0,63 | 3,38 | 1,459 | 31,49 | 50,26 | 0,04651 | 0,01435 | 5,062 |
| | LJETO | 8/45 | 0,95 | 3,38 | 1,792 | 34,97 | 48,39 | 0,04721 | 0,0099 | 6,552 |

Na slikama 4.26 i 4.27 prikazana je usporedba ogrjevnih faktora radnih tvari između teoretskog i stvarnog procesa.



Slika 4. 26 - Usporedba teoretskog i stvarnog faktora grijanja dizalice topline zrak - voda za zimski/ljetni režim rada - Dvostupanjski s pregrijanjem i pothlađenjem



Slika 4. 27 - Usporedba teoretskog i stvarnog faktora grijanja dizalice topline voda - voda za zimski/ljetni režim rada - Dvoostupanjski s pregrijanjem i pothlađenjem

Može se zaključiti da su se u odnosu na teoretski proces, u stvarnom procesu faktori grijanja osjetno smanjili.

Protoci radne tvari su se također smanjili u stvarnom procesu.

Temperature radne tvari na kraju kompresije nešto su više nego kod teoretskog procesa.

4.2. Priprema potrošne tople vode primjenom kompresijskih rashladnih uređaja

Kod pripreme potrošne tople vode primjenom kompresijskih rashladnih uređaja iskorištava se toplina kondenzacije rashladnog uređaja za zagrijavanje potrošne tople vode.

Potrošna topla voda se u ovome slučaju iskorištava se za hlađenje kondenzatora te se pri prolasku kroz kondenzator zagrijava od usvojenih ulaznih 10 °C na potrebnih 40 °C.

Pri tome razlikujemo dvije vrste rekuperacije topline: potpunu i djelomičnu.

Kod potpune rekuperacije topline, iskorištava se u potpunosti toplina pregrijane pare i toplina kondenzacije, dok se kod djelomične rekuperacije iskorištava samo toplina pregrijane pare.

Proračun je napravljen za osnovni rashladni proces s pregrijanjem radne tvari.

4.2.1. Potpuna rekuperacija topline

Usvojena je temperatura isparivanja:

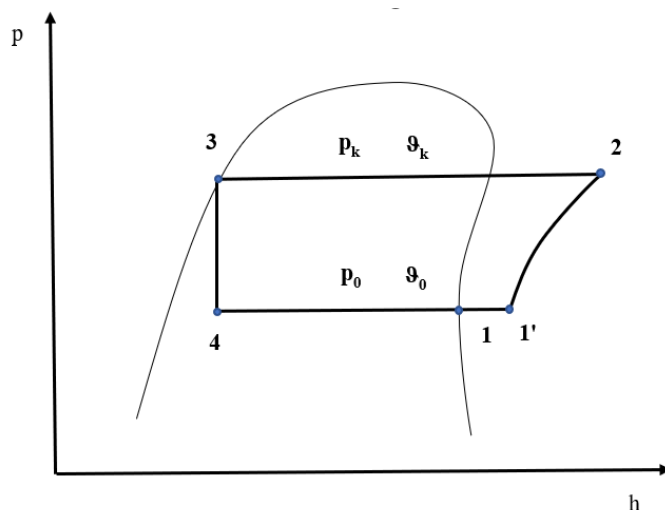
$$\vartheta_0 = 4 \text{ °C} \quad (4.100)$$

Temperatura hladionice:

$$\vartheta_h = 15 \text{ °C} \quad (4.101)$$

Proračun je obavljen za 3 slučaja:

- 1) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 50 \text{ °C}$
- 2) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 40 \text{ °C}$
- 3) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 30 \text{ °C}$



Slika 4. 28 - p, h - dijagram osnovnog rashladnog procesa s pregrijanjem

Kao što je već navedeno usvojena je temperatura isparivanja $\vartheta_0 = 4\text{ }^\circ\text{C}$ i za navedenu temperaturu isparivanja i kondenzacije dobiveni su tlakovi:

p_0 – tlak isparivanja [Pa]

p – tlak kondenzacije [Pa]

U svrhu određivanja je li potrebna jednostupanjska ili dvostupanjska kompresija izračunati su kompresijski omjeri pri čemu vrijedi:

$$\frac{p}{p_0} \leq 8 \text{ – jednostupanjska kompresija} \quad (4.102)$$

Za sve radne tvari zadovoljen je ovaj uvjet i primijenjena je jednostupanjska kompresija.

Proračun:

Specifični rashladni učin:

$$q_0 = h_1 - h_4 \quad (4.103)$$

Specifični rad izentropske kompresije (rad za pogon kompresora):

$$l = h_2 - h_{1'} \quad (4.104)$$

Specifični ogrjevni učin pregrijane pare (unutar kondenzatora):

$$q_{ds} = h_2 - h_{2'} \quad (4.105)$$

Specifični ogrjevni učin kondenzatora:

$$q_k = h_{2'} - h_3 \quad (4.106)$$

Maseni protok radne tvari izračunava se iz usvojenog rashladnog učinka i specifičnog rashladnog učinka:

$$Q_0 = 20 \text{ kW} \quad (4.107)$$

$$M = \frac{Q_0}{q_0} \quad (4.108)$$

Volumni protok radne tvari:

$$V = \frac{M}{\rho_1} \quad (4.109)$$

Snaga potrebna za pogon kompresora:

$$P = M \cdot l \quad (4.110)$$

Ogrjevni učin kondenzatora:

$$Q_k = M \cdot q_k \quad (4.111)$$

Ogrjevni učin pregrijane pare:

$$Q_{ds} = M \cdot q_{ds} \quad (4.112)$$

Ukupni faktor:

$$COP_{UK} = \frac{q_0 + q_k + q_{ds}}{l} = \frac{Q_0 + Q_k + Q_{ds}}{P} \quad (4.113)$$

Faktor hlađenja:

$$\varepsilon_0 = \frac{q_0}{l} = \frac{Q_0}{P} \quad (4.114)$$

U nastavku slijede rezultati proračuna:

- Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50\text{ °C}$ i $\vartheta_k = 40\text{ °C}$

Tablica 4. 13 - Rezultati - Potpuna rekuperacija topline, kompresijski rashladni uređaj -
Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50\text{ °C}$ i $\vartheta_k = 40\text{ °C}$

| Radna tvar | ϑ_k [°C] | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p/p_0 | ϑ_2 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP_{UK} | ε_0 |
|----------------|--------------------|-------------------------|-------------|-----------|---------|--------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------|
| R410A | 50 | 4/50 | 9,05 | 30,71 | 3,393 | 74,43 | 0,1464 | 0,00437 | 9,079 | 3,957 |
| | 40 | 4/40 | 9,05 | 24,26 | 2,681 | 60,56 | 0,1281 | 0,00382 | 12,490 | 5,643 |
| R32 | 50 | 4/50 | 9,22 | 31,41 | 3,407 | 89,7 | 0,09155 | 0,00378 | 9,616 | 4,247 |
| | 40 | 4/40 | 9,22 | 24,78 | 2,688 | 72,66 | 0,08321 | 0,00344 | 12,951 | 5,898 |
| R717 | 50 | 4/50 | 4,97 | 20,33 | 4,091 | 115,32 | 0,0195 | 0,00503 | 10,757 | 4,846 |
| | 40 | 4/40 | 4,97 | 15,55 | 3,129 | 92,55 | 0,0186 | 0,00479 | 14,024 | 6,471 |
| R290 | 50 | 4/50 | 5,35 | 17,13 | 3,202 | 59,25 | 0,08249 | 0,00729 | 9,833 | 4,337 |
| | 40 | 4/40 | 5,35 | 13,69 | 2,559 | 48,56 | 0,07351 | 0,00649 | 13,252 | 6,028 |
| R1234ze | 50 | 4/50 | 0,81 | 3,91 | 4,827 | 56,28 | 0,12562 | 0,03064 | 10,915 | 4,894 |
| | 40 | 4/40 | 0,81 | 2,9 | 3,580 | 46,61 | 0,11588 | 0,02826 | 14,342 | 6,592 |
| R513A | 50 | 4/50 | 3,72 | 13,78 | 3,704 | 54,99 | 0,1862 | 0,00973 | 9,626 | 4,220 |
| | 40 | 4/40 | 3,72 | 10,73 | 2,884 | 44,97 | 0,16316 | 0,00852 | 13,088 | 5,930 |
| R450A | 50 | 4/50 | 2,93 | 11,69 | 3,990 | 55,97 | 0,1656 | 0,0112 | 9,857 | 4,347 |
| | 40 | 4/40 | 2,93 | 9,02 | 3,079 | 46,02 | 0,14741 | 0,00997 | 13,207 | 6,004 |
| R455A | 50 | 4/50 | 5,53 | 24,43 | 4,418 | 73,05 | 0,17198 | 0,00737 | 7,635 | 3,248 |
| | 40 | 4/40 | 5,53 | 19,69 | 3,561 | 62,31 | 0,14986 | 0,00642 | 9,876 | 4,357 |
| R452B | 50 | 4/50 | 8,4 | 29,31 | 3,489 | 79,96 | 0,11918 | 0,00443 | 9,212 | 4,037 |
| | 40 | 4/40 | 8,4 | 23,18 | 2,760 | 65,36 | 0,10639 | 0,00396 | 12,422 | 5,625 |
| R454A | 50 | 4/50 | 6,23 | 24,56 | 3,942 | 72,66 | 0,15579 | 0,00634 | 8,341 | 3,598 |
| | 40 | 4/40 | 6,23 | 19,52 | 3,133 | 60,65 | 0,13669 | 0,00556 | 11,041 | 4,933 |
| R454B | 50 | 4/50 | 8,27 | 29,02 | 3,509 | 80,61 | 0,1165 | 0,00447 | 9,213 | 4,038 |
| | 40 | 4/40 | 8,27 | 22,96 | 2,776 | 65,96 | 0,10423 | 0,004 | 12,388 | 5,609 |
| R454C | 50 | 4/50 | 5,18 | 21,64 | 4,178 | 68,58 | 0,17527 | 0,00771 | 8,079 | 3,464 |
| | 40 | 4/40 | 5,18 | 17,24 | 3,328 | 57,68 | 0,15273 | 0,00672 | 10,613 | 4,717 |
| R134A | 50 | 4/50 | 3,38 | 13,18 | 3,899 | 59,26 | 0,15468 | 0,00957 | 10,055 | 4,449 |
| | 40 | 4/40 | 3,38 | 10,17 | 3,009 | 48,57 | 0,1384 | 0,00856 | 13,492 | 6,149 |

- Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 30\text{ °C}$

Tablica 4. 14 - Rezultati - Potpuna rekuperacija topline, kompresijski rashladni uređaj - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 30\text{ °C}$

| Radna tvar | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p/p_0 | ϑ_2 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP_{UK} | ε_0 |
|----------------|-------------------------|----------------|--------------|---------|--------------------|---------------|----------------------------|------------|-----------------|
| R410A | 4/30 | 9,05 | 18,89 | 2,087 | 46,53 | 0,11491 | 0,00343 | 18,274 | 8,499 |
| R32 | 4/30 | 9,22 | 19,28 | 2,091 | 55,36 | 0,07673 | 0,00317 | 18,692 | 8,740 |
| R717 | 4/30 | 4,97 | 11,67 | 2,348 | 69,51 | 0,01779 | 0,00458 | 19,791 | 9,338 |
| R290 | 4/30 | 5,35 | 10,79 | 2,017 | 37,84 | 0,06658 | 0,00588 | 19,125 | 8,930 |
| R1234ze | 4/30 | 0,81 | 2,1 | 2,593 | 36,61 | 0,10772 | 0,02627 | 20,362 | 9,575 |
| R513A | 4/30 | 3,72 | 8,21 | 2,207 | 35,04 | 0,1458 | 0,00762 | 19,038 | 8,867 |
| R450A | 4/30 | 2,93 | 6,83 | 2,331 | 36,07 | 0,13323 | 0,00901 | 18,927 | 8,831 |
| R455A | 4/30 | 5,53 | 15,63 | 2,826 | 51,47 | 0,13358 | 0,00572 | 13,146 | 5,974 |
| R452B | 4/30 | 8,4 | 18,07 | 2,151 | 50,54 | 0,09676 | 0,0036 | 17,807 | 8,288 |
| R454A | 4/30 | 6,23 | 15,29 | 2,454 | 48,56 | 0,12255 | 0,00498 | 15,261 | 7,019 |
| R454B | 4/30 | 8,27 | 17,9 | 2,164 | 62,05 | 0,09492 | 0,00365 | 13,551 | 6,190 |
| R454C | 4/30 | 5,18 | 13,53 | 2,612 | 47,92 | 0,13613 | 0,00599 | 13,974 | 6,380 |
| R134A | 4/30 | 3,38 | 7,7 | 2,278 | 37,8 | 0,12563 | 0,00777 | 19,444 | 9,092 |

Najviši ukupni faktori za slučaj 1) $\vartheta_k = 50\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R1234ze, R717, R134a i R450A, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454C, R454A i R410A.

Najviši ukupni faktori za slučaj 2) $\vartheta_k = 40\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R1234ze, R717, R134a i R290, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454C, R454A i R454B.

Najviši ukupni faktori za slučaj 3) $\vartheta_k = 30\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R1234ze, R717, R134a i R290, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454B, R454C i R454A.

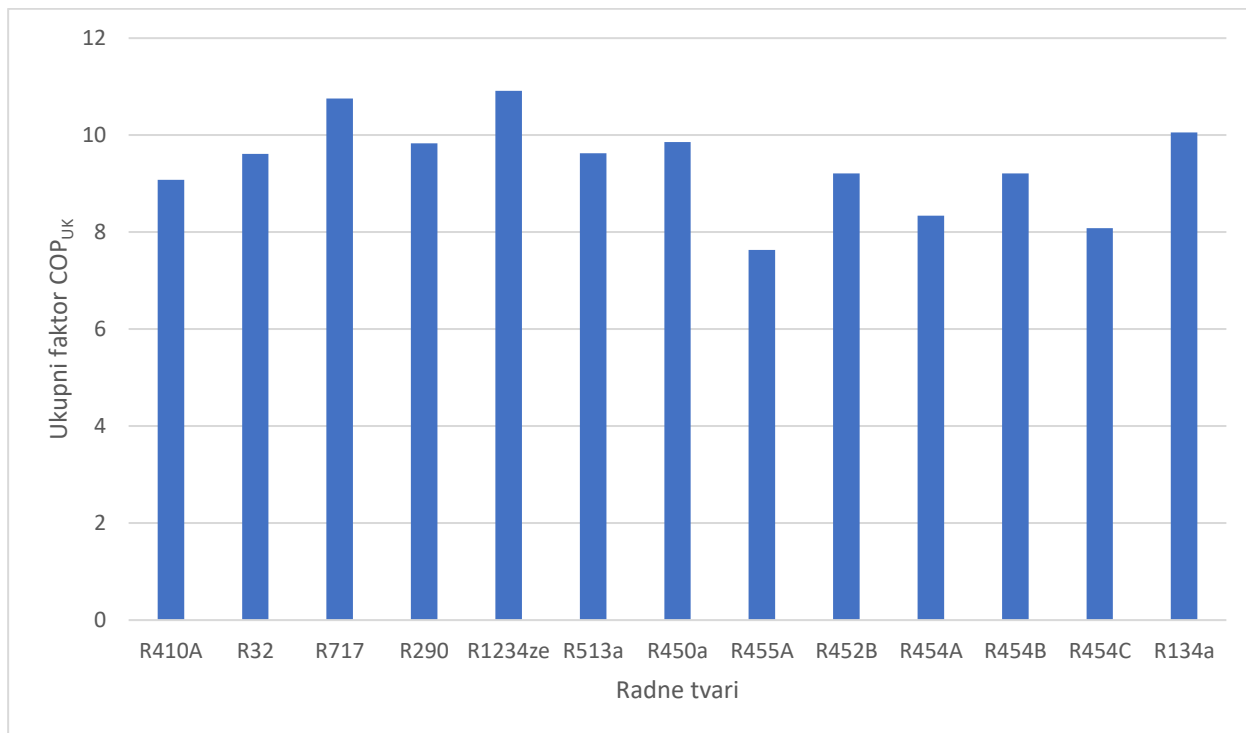
Najviši faktori hlađenja za slučaj 1) $\vartheta_k = 50\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R1234ze, R717, R134a i R450A, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454C, R454A i R410A.

Najviši faktori hlađenja za slučaj 2) $\vartheta_k = 40\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R1234ze, R717, R134a i R290, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454C, R454A i R454B.

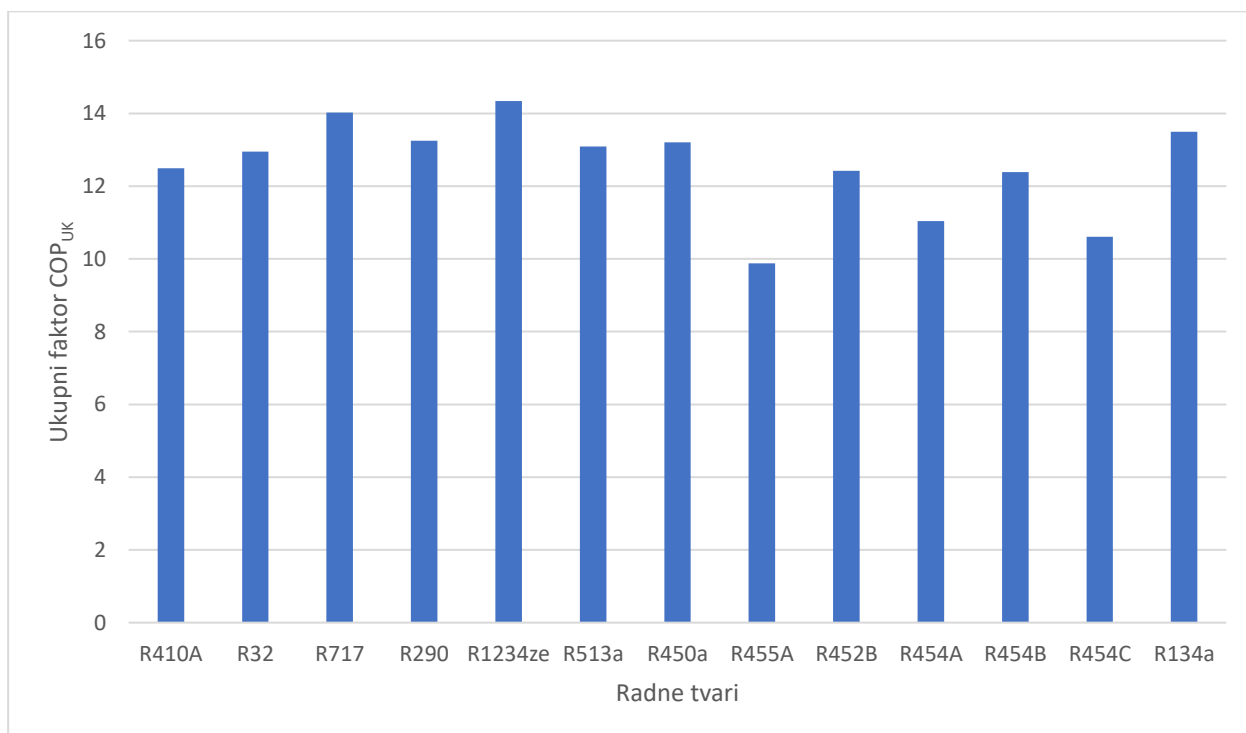
Najviši faktori hlađenja za slučaj 3) $\vartheta_k = 30\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R1234ze, R717, R134a i R290, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454B, R454C i R454A.

Može se zaključiti da se za iste radne tvari za koje se postižu najviši ukupni faktori, ujedno postižu i najviši faktori hlađenja, te radne tvari su zaključujemo, najpovoljnije.

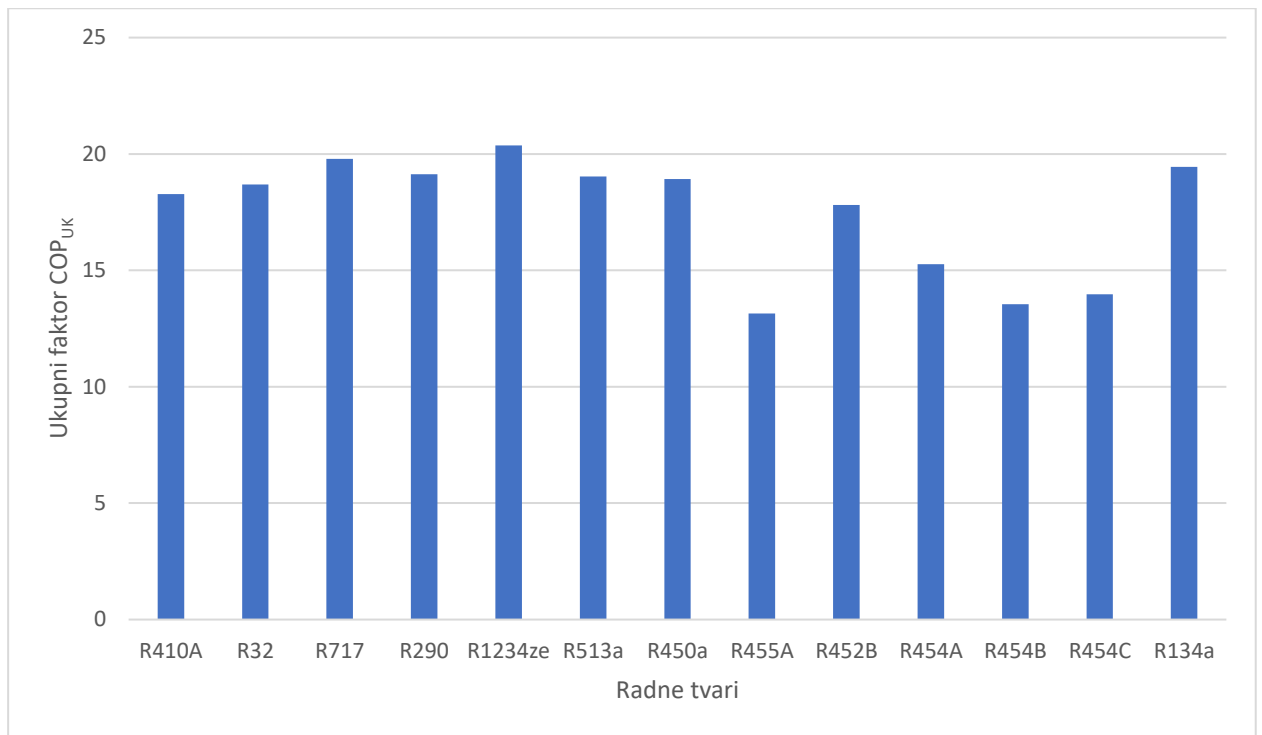
Na slikama 4.29, 4.30 i 4.31 prikazani su ukupni faktori rashladnog uređaja za potpunu rekuperaciju i temperaturu kondenzacije $\vartheta_k = 50\text{ °C}$, $\vartheta_k = 40\text{ °C}$ i $\vartheta_k = 30\text{ °C}$.



Slika 4. 29 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za potpunu rekuperaciju - $\vartheta_k = 50\text{ °C}$



Slika 4. 30 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za potpunu rekuperaciju - $\vartheta_k = 40\text{ °C}$



Slika 4. 31 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za potpunu rekuperaciju - $\vartheta_k = 30^\circ\text{C}$

Vidljivo je da padom temperature kondenzacije rastu ukupni faktori, razlog tome jesu smanjeni kompresijski omjeri.

Napravljena je i analiza koliko je potrošne tople vode moguće zagrijati na potrebnu temperaturu od 40°C ili 30°C za slučajeve:

- 1) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$
- 2) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$

Količina potrošne tople vode koju je moguće zagrijati:

$$\dot{M}_w = \frac{\dot{Q}_{uk}}{c_w \cdot \Delta T_w} = \frac{\dot{Q}_{uk}}{c_w \cdot (t_{w''} - t_{w'})} \quad (4.115)$$

Pri čemu su:

$\dot{Q}_{uk} = \dot{Q}_k + \dot{Q}_{ds}$ – ukupno iskorištena kondenzacijska toplina za zagrijavanje PTV – a

$c_w = 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ – specifični toplinski kapacitet vode

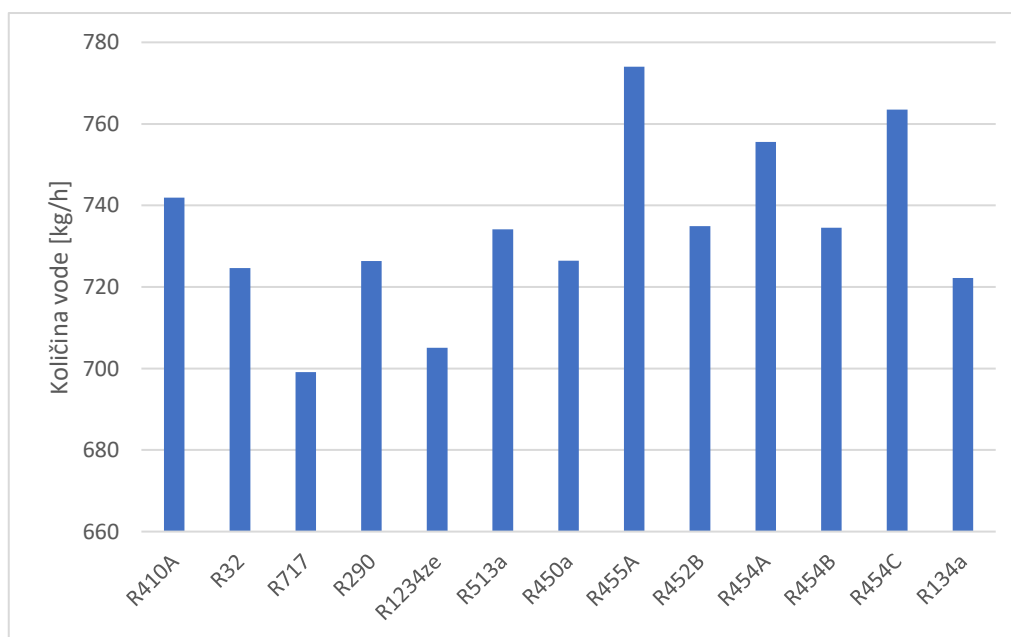
$t_{w'} = 10^\circ\text{C}$ – ulazna temperatura hladne vode

$t_{w''} = t_{PTV}$ – temperatura potrošne tople vode

1) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 50\text{ }^\circ\text{C}$

Tablica 4. 15 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na $40\text{ }^\circ\text{C}$ - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50\text{ }^\circ\text{C}$

| Radna tvar | ϑ_0/ϑ | $\vartheta_2\text{ [}^\circ\text{C]}$ | $Q_k\text{ [kW]}$ | $Q_{ds}\text{ [kW]}$ | $Q_{uk}\text{ [kW]}$ | $M_w\text{ [kg/h]}$ |
|----------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| R410A | 4/50 | 74,43 | 19,89 | 5,99 | 25,89 | 741,878 |
| R32 | 4/50 | 89,7 | 19,19 | 6,10 | 25,28 | 724,67 |
| R717 | 4/50 | 115,32 | 20,50 | 3,90 | 24,39 | 699,139 |
| R290 | 4/50 | 59,25 | 23,50 | 1,85 | 25,34 | 726,386 |
| R1234ze | 4/50 | 56,28 | 23,82 | 0,78 | 24,60 | 705,118 |
| R513a | 4/50 | 54,99 | 24,45 | 1,17 | 25,61 | 734,101 |
| R450a | 4/50 | 55,97 | 24,27 | 1,07 | 25,35 | 726,459 |
| R455A | 4/50 | 73,05 | 23,17 | 3,84 | 27,01 | 774,063 |
| R452B | 4/50 | 79,96 | 20,05 | 5,60 | 25,64 | 734,906 |
| R454A | 4/50 | 72,66 | 22,1 | 4,26 | 26,36 | 755,549 |
| R454B | 4/50 | 80,61 | 20,09 | 5,54 | 25,63 | 734,542 |
| R454C | 4/50 | 68,58 | 23,32 | 3,32 | 26,64 | 763,534 |
| R134a | 4/50 | 59,26 | 23,48 | 1,72 | 25,20 | 722,2 |



Slika 4. 32 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na $40\text{ }^\circ\text{C}$ za potpunu rekuperaciju pri $\vartheta_k = 50\text{ }^\circ\text{C}$

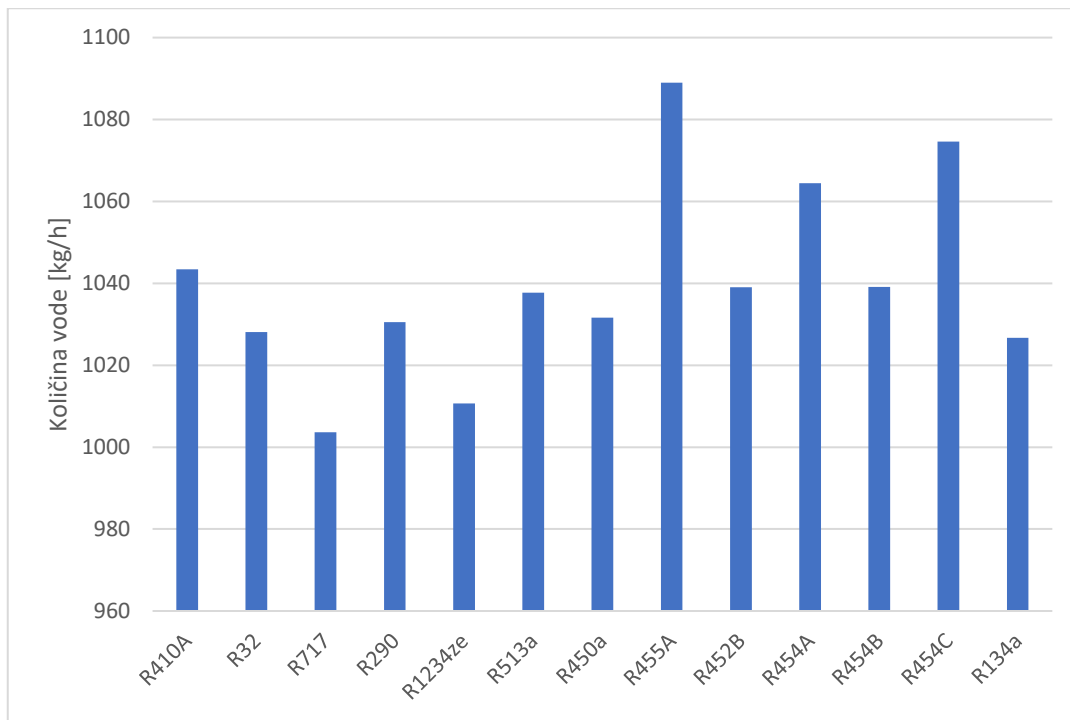
Najviše vršne temperature na kraju kompresije postižu se redom za radne tvari R717, R32, R454B i R452B, što znači da su ove radne tvari u ovom slučaju najprikladnije za visoko temperaturno grijanje.

Najveću količinu PTV – a moguće je zagrijati redom za radne tvari: R455A, R454C, R454A i R410A.

2) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 40\text{ °C}$

Tablica 4. 16 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 30°C - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 40\text{ °C}$

| Radna tvar | ϑ_0/ϑ | $\vartheta_2\text{ [°C]}$ | $Q_k\text{ [kW]}$ | $Q_{ds}\text{ [kW]}$ | $Q_{uk}\text{ [kW]}$ | $M_w\text{ [kg/h]}$ |
|----------------|-------------------------|---------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| R410A | 4/40 | 60,56 | 20,36 | 3,91 | 24,27 | 1043,462 |
| R32 | 4/40 | 72,66 | 19,73 | 4,18 | 23,91 | 1028,08 |
| R717 | 4/40 | 92,55 | 20,45 | 2,90 | 23,35 | 1003,627 |
| R290 | 4/40 | 48,56 | 22,57 | 1,40 | 23,97 | 1030,539 |
| R1234ze | 4/40 | 46,61 | 22,78 | 0,73 | 23,51 | 1010,702 |
| R513a | 4/40 | 44,97 | 23,20 | 0,94 | 24,14 | 1037,755 |
| R450a | 4/40 | 46,02 | 23,09 | 0,91 | 24,00 | 1031,6 |
| R455A | 4/40 | 62,31 | 22,39 | 2,94 | 25,33 | 1089,025 |
| R452B | 4/40 | 65,36 | 20,36 | 3,81 | 24,17 | 1039,056 |
| R454A | 4/40 | 60,65 | 21,71 | 3,05 | 24,76 | 1064,413 |
| R454B | 4/40 | 65,96 | 20,38 | 3,79 | 24,17 | 1039,122 |
| R454C | 4/40 | 57,68 | 22,49 | 2,50 | 25,00 | 1074,575 |
| R134a | 4/40 | 48,57 | 22,56 | 1,32 | 23,88 | 1026,696 |



Slika 4. 33 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 30°C za potpunu rekuperaciju pri $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$

U usporedbi sa prethodnim slučajem, vršne temperature na kraju kompresije su nešto niže i količina PTV – a koju je moguće zagrijati nešto je viša jer se zagrijava na nižu temperaturu.

Najviše vršne temperature na kraju kompresije postižu se, isto kao i u prethodnom slučaju, redom za radne tvari R717, R32, R454B i R452B, što znači da su ove radne tvari u ovom slučaju najprikladnije za visoko temperaturno grijanje.

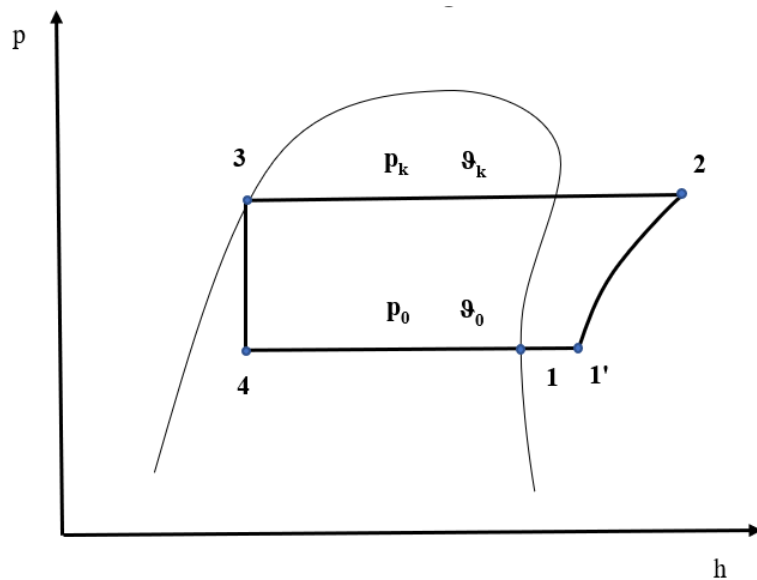
Najveću količinu PTV – a kao i u prethodnom slučaju, moguće je zagrijati redom za radne tvari: R455A, R454C, R454A i R410A.

4.2.2. Djelomična rekuperacija topline

Kao i u prethodnom slučaju usvojena je temperatura isparivanja i izračunati kompresijski omjeri.

Proračun je obavljen za 3 slučaja:

- 4) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$
- 5) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$
- 6) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 30^\circ\text{C}$



Slika 4. 34 - p,h - dijagram osnovnog rashladnog procesa s pregrijanjem - djelomična rekuperacija

Proračun:

U ovome slučaju, za zagrijavanje potrošne tople vode iskoristava se isključivo toplina pregrijane pare.

Specifični ogrjevni učin pregrijane pare (unutar kondenzatora):

$$q_{ds} = h_2 - h_{2'} \quad (4.116)$$

Izračunat je i ukupni faktor:

$$COP_{UK} = \frac{q_0 + q_{ds}}{l} = \frac{Q_0 + Q_{ds}}{P} \quad (4.117)$$

U nastavku slijede rezultati proračuna:

1) Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50\text{ °C}$ i $\vartheta_k = 40\text{ °C}$

Tablica 4. 17 - Rezultati - Djelomična rekuperacija topline, kompresijski rashadni uređaj - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50\text{ °C}$ i $\vartheta_k = 40\text{ °C}$

| Radna tvar | ϑ_k [°C] | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p/p_0 | ϑ_2 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP_{UK} | ε_0 |
|----------------|--------------------|-------------------------|-------------|-----------|---------|--------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------|
| R410A | 50 | 4/50 | 9,05 | 30,71 | 3,393 | 74,43 | 0,1464 | 0,00437 | 5,143 | 3,957 |
| | 40 | 4/40 | 9,05 | 24,26 | 2,681 | 60,56 | 0,1281 | 0,00382 | 6,747 | 5,643 |
| R32 | 50 | 4/50 | 9,22 | 31,41 | 3,407 | 89,7 | 0,09155 | 0,00378 | 5,542 | 4,247 |
| | 40 | 4/40 | 9,22 | 24,78 | 2,688 | 72,66 | 0,08321 | 0,00344 | 7,132 | 5,898 |
| R717 | 50 | 4/50 | 4,97 | 20,33 | 4,091 | 115,32 | 0,0195 | 0,00503 | 5,790 | 4,846 |
| | 40 | 4/40 | 4,97 | 15,55 | 3,129 | 92,55 | 0,0186 | 0,00479 | 7,408 | 6,471 |
| R290 | 50 | 4/50 | 5,35 | 17,13 | 3,202 | 59,25 | 0,08249 | 0,00729 | 4,737 | 4,337 |
| | 40 | 4/40 | 5,35 | 13,69 | 2,559 | 48,56 | 0,07351 | 0,00649 | 6,450 | 6,028 |
| R1234ze | 50 | 4/50 | 0,81 | 3,91 | 4,827 | 56,28 | 0,12562 | 0,03064 | 5,086 | 4,894 |
| | 40 | 4/40 | 0,81 | 2,9 | 3,580 | 46,61 | 0,11588 | 0,02826 | 6,833 | 6,592 |
| R513A | 50 | 4/50 | 3,72 | 13,78 | 3,704 | 54,99 | 0,1862 | 0,00973 | 4,467 | 4,220 |
| | 40 | 4/40 | 3,72 | 10,73 | 2,884 | 44,97 | 0,16316 | 0,00852 | 6,209 | 5,930 |
| R450A | 50 | 4/50 | 2,93 | 11,69 | 3,990 | 55,97 | 0,1656 | 0,0112 | 4,581 | 4,347 |
| | 40 | 4/40 | 2,93 | 9,02 | 3,079 | 46,02 | 0,14741 | 0,00997 | 6,276 | 6,004 |
| R455A | 50 | 4/50 | 5,53 | 24,43 | 4,418 | 73,05 | 0,17198 | 0,00737 | 3,872 | 3,248 |
| | 40 | 4/40 | 5,53 | 19,69 | 3,561 | 62,31 | 0,14986 | 0,00642 | 4,999 | 4,357 |
| R452B | 50 | 4/50 | 8,4 | 29,31 | 3,489 | 79,96 | 0,11918 | 0,00443 | 5,166 | 4,037 |
| | 40 | 4/40 | 8,4 | 23,18 | 2,760 | 65,36 | 0,10639 | 0,00396 | 6,697 | 5,625 |
| R454A | 50 | 4/50 | 6,23 | 24,56 | 3,942 | 72,66 | 0,15579 | 0,00634 | 4,365 | 3,598 |
| | 40 | 4/40 | 6,23 | 19,52 | 3,133 | 60,65 | 0,13669 | 0,00556 | 5,685 | 4,933 |
| R454B | 50 | 4/50 | 8,27 | 29,02 | 3,509 | 80,61 | 0,1165 | 0,00447 | 5,156 | 4,038 |
| | 40 | 4/40 | 8,27 | 22,96 | 2,776 | 65,96 | 0,10423 | 0,004 | 6,673 | 5,609 |
| R454C | 50 | 4/50 | 5,18 | 21,64 | 4,178 | 68,58 | 0,17527 | 0,00771 | 4,039 | 3,464 |
| | 40 | 4/40 | 5,18 | 17,24 | 3,328 | 57,68 | 0,15273 | 0,00672 | 5,307 | 4,717 |
| R134A | 50 | 4/50 | 3,38 | 13,18 | 3,899 | 59,26 | 0,15468 | 0,00957 | 4,831 | 4,449 |
| | 40 | 4/40 | 3,38 | 10,17 | 3,009 | 48,57 | 0,1384 | 0,00856 | 6,555 | 6,149 |

2) Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 30\text{ °C}$

Tablica 4. 18 - Rezultati - Djelomična rekuperacija topline, kompresijski rashladni uređaj -
Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 30\text{ °C}$

| Radna tvar | ϑ_0/ϑ | p_0 [bar] | p [bar] | p/p_0 | ϑ_2 [°C] | M [kg/s] | V [m ³ /s] | COP_{UK} | ε_0 |
|----------------|-------------------------|----------------|--------------|---------|--------------------|---------------|----------------------------|------------|-----------------|
| R410A | 4/30 | 9,05 | 18,89 | 2,087 | 46,53 | 0,11491 | 0,00343 | 9,588 | 8,499 |
| R32 | 4/30 | 9,22 | 19,28 | 2,091 | 55,36 | 0,07673 | 0,00317 | 9,959 | 8,740 |
| R717 | 4/30 | 4,97 | 11,67 | 2,348 | 69,51 | 0,01779 | 0,00458 | 10,285 | 9,338 |
| R290 | 4/30 | 5,35 | 10,79 | 2,017 | 37,84 | 0,06658 | 0,00588 | 9,413 | 8,930 |
| R1234ze | 4/30 | 0,81 | 2,1 | 2,593 | 36,61 | 0,10772 | 0,02627 | 9,887 | 9,575 |
| R513A | 4/30 | 3,72 | 8,21 | 2,207 | 35,04 | 0,1458 | 0,00762 | 9,220 | 8,867 |
| R450A | 4/30 | 2,93 | 6,83 | 2,331 | 36,07 | 0,13323 | 0,00901 | 9,179 | 8,831 |
| R455A | 4/30 | 5,53 | 15,63 | 2,826 | 51,47 | 0,13358 | 0,00572 | 6,678 | 5,974 |
| R452B | 4/30 | 8,4 | 18,07 | 2,151 | 50,54 | 0,09676 | 0,0036 | 9,353 | 8,288 |
| R454A | 4/30 | 6,23 | 15,29 | 2,454 | 48,56 | 0,12255 | 0,00498 | 7,804 | 7,019 |
| R454B | 4/30 | 8,27 | 17,9 | 2,164 | 62,05 | 0,09492 | 0,00365 | 7,234 | 6,190 |
| R454C | 4/30 | 5,18 | 13,53 | 2,612 | 47,92 | 0,13613 | 0,00599 | 7,046 | 6,380 |
| R134A | 4/30 | 3,38 | 7,7 | 2,278 | 37,8 | 0,12563 | 0,00777 | 9,558 | 9,092 |

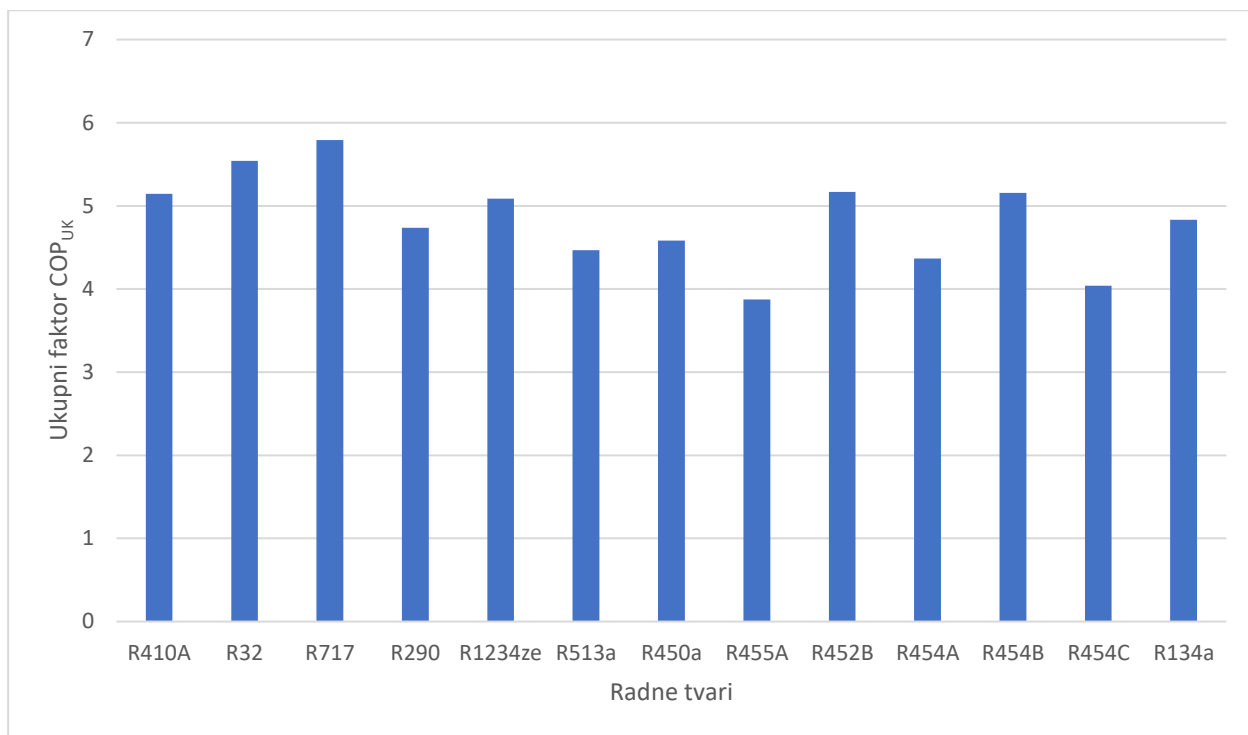
Najviši ukupni faktori za slučaj 1) $\vartheta_k = 50\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R717, R32, R452B i R454B, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454C, R454A i R513A.

Najviši ukupni faktori za slučaj 2) $\vartheta_k = 40\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R717, R32, R1234ze i R410A, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454C, R454A i R513A.

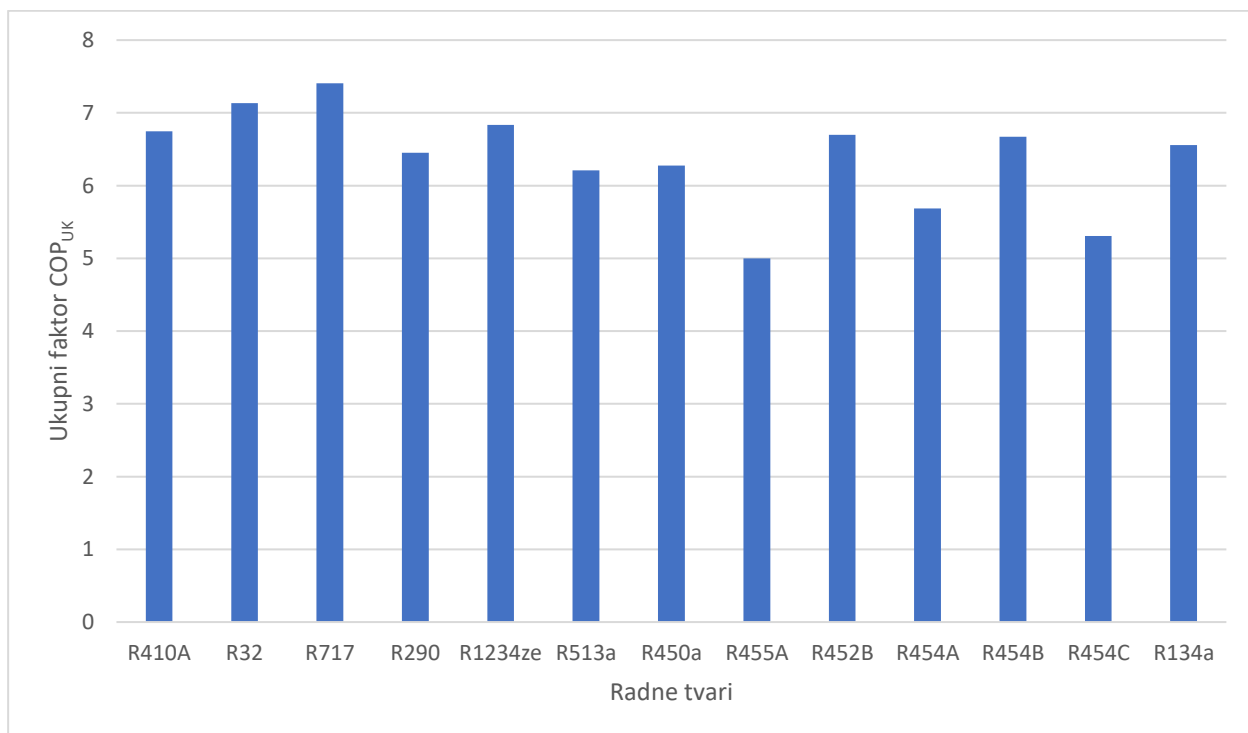
Najviši ukupni faktori za slučaj 3) $\vartheta_k = 30\text{ °C}$ postižu se redom za radne tvari: R717, R32, R1234ze i R410A, a najmanji redom za radne tvari: R455A, R454C, R454B i R454A.

Faktori hlađenja isti su kao i u prethodnom slučaju.

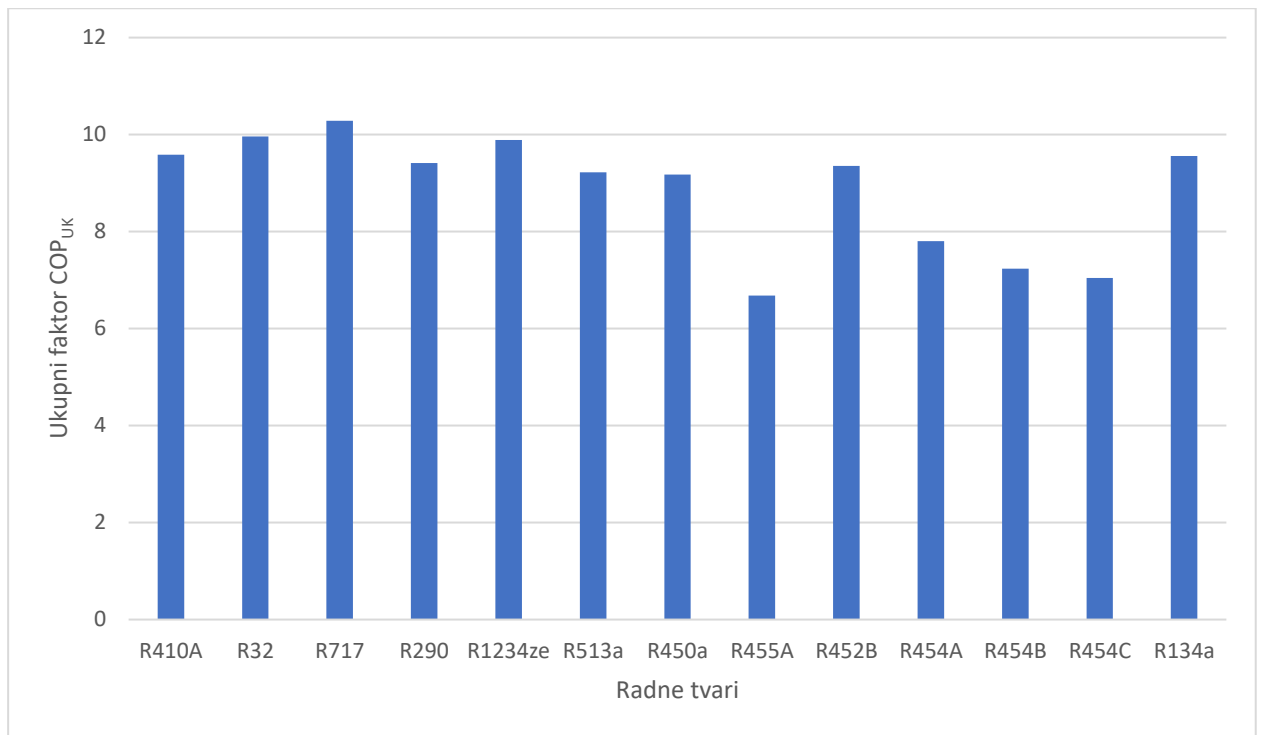
Na slikama 4.35, 4.36 i 4.37 prikazani su ukupni faktori rashladnog uređaja za djelomičnu rekuperaciju i temperaturu kondenzacije $\vartheta_k = 50\text{ °C}$, $\vartheta_k = 40\text{ °C}$ i $\vartheta_k = 30\text{ °C}$.



Slika 4. 35 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za djelomičnu rekuperaciju - $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$



Slika 4. 36 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za djelomičnu rekuperaciju - $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$



Slika 4. 37 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za djelomičnu rekuperaciju - $\vartheta_k = 30^\circ\text{C}$

Kao i za potpunu rekuperaciju, napravljena je analiza koliko je potrošne tople vode moguće zagrijati na potrebnu temperaturu od 40°C ili 30°C za slučajeve:

- 3) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$
- 4) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$

Količina potrošne tople vode koju je moguće zagrijati:

$$\dot{M}_w = \frac{\dot{Q}_{uk}}{c_w \cdot \Delta T_w} = \frac{\dot{Q}_{uk}}{c_w \cdot (t_{w''} - t_{w'})} \quad (4.118)$$

Pri čemu su:

$\dot{Q}_{uk} = \dot{Q}_{ds}$ – ukupno iskorištena kondenzacijska toplina za zagrijavanje PTV – a

$c_w = 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ – specifični toplinski kapacitet vode

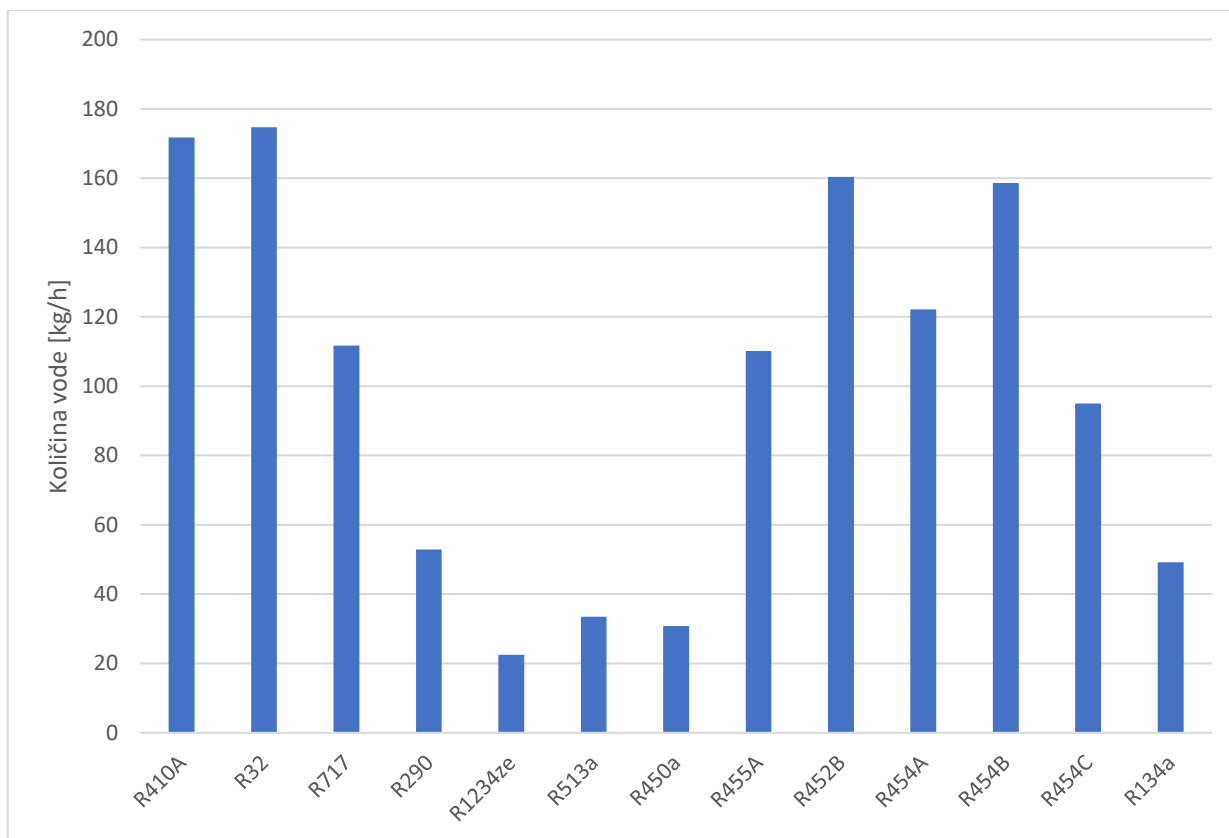
$t_{w'} = 10^\circ\text{C}$ – ulazna temperatura hladne vode

$t_{w''} = t_{PTV}$ – temperatura potrošne tople vode

1) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 50\text{ °C}$

Tablica 4. 19 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 40°C - Djelomična rekuperacija, temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50\text{ °C}$

| Radna tvar | ϑ_0/ϑ | $\vartheta_2\text{ [°C]}$ | Q_{ds} [kW] | Q_{uk} [kW] | $M_w\text{ [kg/h]}$ |
|-------------------|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| R410A | 4/50 | 74,43 | 5,99 | 5,99 | 171,78 |
| R32 | 4/50 | 89,7 | 6,10 | 6,10 | 174,713 |
| R717 | 4/50 | 115,32 | 3,90 | 3,90 | 111,682 |
| R290 | 4/50 | 59,25 | 1,85 | 1,85 | 52,8896 |
| R1234ze | 4/50 | 56,28 | 0,78 | 0,78 | 22,4658 |
| R513a | 4/50 | 54,99 | 1,17 | 1,17 | 33,4604 |
| R450a | 4/50 | 55,97 | 1,07 | 1,07 | 30,8031 |
| R455A | 4/50 | 73,05 | 3,84 | 3,84 | 110,116 |
| R452B | 4/50 | 79,96 | 5,60 | 5,60 | 160,371 |
| R454A | 4/50 | 72,66 | 4,26 | 4,26 | 122,159 |
| R454B | 4/50 | 80,61 | 5,54 | 5,54 | 158,635 |
| R454C | 4/50 | 68,58 | 3,32 | 3,32 | 95,0398 |
| R134a | 4/50 | 59,26 | 1,72 | 1,72 | 49,1633 |



Slika 4. 38 - Količina PTV – a koju je moguće zagrijati na 40°C za djelomičnu rekuperaciju pri $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$

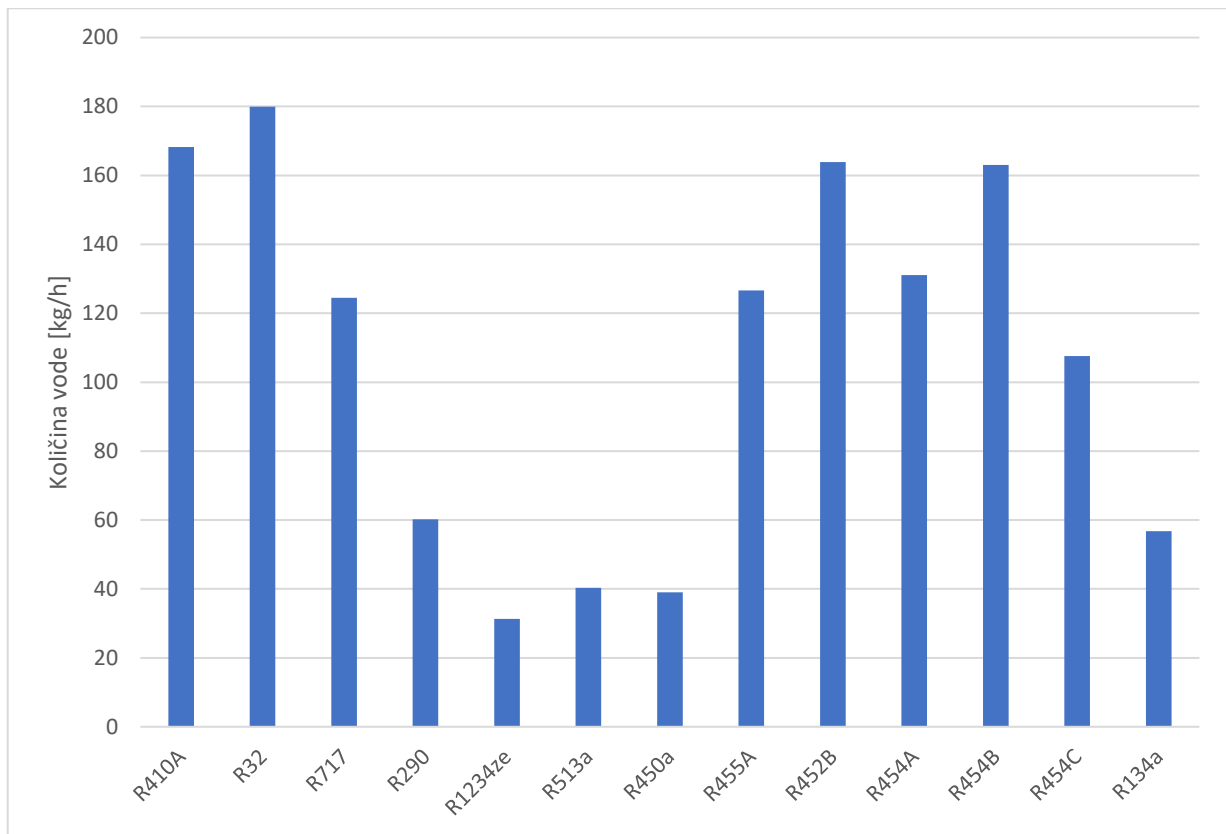
Najviše vršne temperature na kraju kompresije postižu se redom za radne tvari R717, R32, R454B i R452B, što znači da su ove radne tvari u ovom slučaju najprikladnije za visoko temperaturno grijanje.

Najveću količinu PTV – a moguće je zagrijati redom za radne tvari: R32, R410A, R452B i R454B, te su navedene radne tvari najprikladnije za djelomičnu rekuperaciju pri temperaturi kondenzacije 50°C.

3) Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 40\text{ °C}$

Tablica 4. 20 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 30 °C - Djelomična rekuperacija, temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 40\text{ °C}$

| Radna tvar | ϑ_0/ϑ | $\vartheta_2\text{ [°C]}$ | Q_{ds} [kW] | Q_{uk} [kW] | $M_w\text{ [kg/h]}$ |
|-------------------|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| R410A | 4/40 | 60,56 | 3,91 | 3,91 | 168,238 |
| R32 | 4/40 | 72,66 | 4,18 | 4,18 | 179,902 |
| R717 | 4/40 | 92,55 | 2,90 | 2,90 | 124,476 |
| R290 | 4/40 | 48,56 | 1,40 | 1,40 | 60,230 |
| R1234ze | 4/40 | 46,61 | 0,73 | 0,73 | 31,335 |
| R513a | 4/40 | 44,97 | 0,94 | 0,94 | 40,332 |
| R450a | 4/40 | 46,02 | 0,91 | 0,91 | 38,973 |
| R455A | 4/40 | 62,31 | 2,94 | 2,94 | 126,593 |
| R452B | 4/40 | 65,36 | 3,81 | 3,81 | 163,883 |
| R454A | 4/40 | 60,65 | 3,05 | 3,05 | 131,039 |
| R454B | 4/40 | 65,96 | 3,79 | 3,79 | 163,008 |
| R454C | 4/40 | 57,68 | 2,50 | 2,50 | 107,549 |
| R134a | 4/40 | 48,57 | 1,32 | 1,32 | 56,761 |



Slika 4. 39 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 30°C za djelomičnu rekuperaciju pri $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$

U usporedbi sa slučajem potpune rekuperacije, temperature na koje je moguće zagrijati više su ako se koristi grijač u akumulacijskom sustavu PTV.

Količina PTV – a koju je moguće zagrijati značajno je niža.

Uspoređeni su i ukupni faktori djelomične i potpune rekuperacije te su ukupni faktori djelomične rekuperacije znatno manji.

5. ZAKLJUČAK

Dizalice topline i kompresijski rashladni uređaji sve se češće primjenjuju za potrebe pripreme potrošne tople vode te bi u skoroj budućnosti mogle zavladati tržištem zbog velikog broja pogodnosti vezanih uz njihovu primjenu kao i zbog povećanog zahtjeva tržišta za metodama pripreme PTV s manjim utjecajem na okoliš.

Oba načina pripreme PTV imaju prednosti ali i mane. Dizalice topline predstavljaju pouzdaniju i lakše primjenjivu metodu, zato što nisu ograničene dobom godine poput rashladnih uređaja koji većinom primjenu nalaze tijekom ljetnih mjeseci.

I dizalice topline imaju svoje mane, od kojih je najvažnija nemogućnost pripreme PTV u slučaju jednostupanjskih dizalica topline zrak – voda pri zimskom režimu rada za određene radne tvari uslijed previsokih kompresijskih omjera, koji predstavljaju opasnost za kompresor dizalice topline.

Primjena dizalica topline proračunata je kroz nekoliko procesa: jednostupanjski podkritični s pregrijanjem, jednostupanjski podkritični s pregrijanjem i pothlađenjem, dvostupanjski podkritični s pregrijanjem, dvostupanjski podkritični s pregrijanjem i pothlađenjem, transkritični proces i kaskadne dizalice topline.

Najboljim se pokazao podkritični dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem radne tvari.

Svaka radna tvar ima određene prednosti i prema tome, primjenu koja joj je najprikladnija, iako za neke se definitivno može zaključiti da će radi svojih izrazito povoljnih svojstava, u skoroj budućnosti zavladati tržištem te se na njemu zadržati vrlo dugo.

Tako se najboljom radnom tvari za potrebe grijanja PTV dizalicama topline pokazao amonijak R717 ostvarivši najviše faktore grijanja, također i zbog izrazito povoljnog utjecaja na okoliš, nema utjecaja na ozonski sloj i globalno zatopljenje. Međutim primjena amonijaka je donekle ograničena zbog problema njegove otrovnosti, koji iziskuje posebne konstrukcije uređaja te posebne materijale otporne na koroziju što ograničava njegovu primjenu u domaćinstvu i primjenama manjih razmjera.

Primjena kompresijskih rashladnih uređaja za pripremu PTV promotrena je kroz potpunu i djelomičnu rekuperaciju kondenzacijske topline.

Potpuna rekuperacija ima svoje prednosti poput veće količine raspoložive topline za zagrijavanje PTV, ali ima i mane poput nemogućnosti ostvarenja potrebnih traženih temperatura PTV.

S druge strane djelomičnom rekuperacijom postižu se više temperature PTV, ali je moguće zagrijati znatno manje količine PTV.

Najboljom radnom tvari kod kompresijskih rashladnih uređaja pokazala se radna tvar R1234ze kod potpune rekuperacije topline, te R717 kod djelomične rekuperacije topline.

Zbog ekoloških razloga postavljaju se stroži zahtjevi tržišta spram radnih tvari u tehnici hlađenja, grijanja i klimatizaciji te je stoga neizbježan prijelaz na nove, ekološki prihvatljivije radne tvari budućnosti.

LITERATURA

- [1,2,3,4,5,6]Emerson Climate Technologies, Inc.: “Refrigerant transition under F – gas regulation 517/2014”, s Interneta, <https://climate.emerson.com/documents/refrigerant-transition-under-f-gas-regulation-517-2014-en-gb-4214588.pdf>, 15.4.2022.
- [7,8,9]Wikipedia: “1,1,1,2-Tetrafluoroethane”, s Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/1,1,1,2-Tetrafluoroethane>, 15.4.2022.
- [10]Wikipedia: “Ammonia”, s Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Ammonia>, 15.4.2022.
- [11]Wikipedia: “Carbon dioxide”, s Interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide, 15.4.2022.
- [12]Wikipedia: “Difluoromethane”, s Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Difluoromethane>, 15.4.2022.
- [13,14]A-gas: “R32”, s Interneta, <https://www.agas.com/uk/products-and-services/refrigerants/r32/>, 15.4.2022.
- [15]Wikipedia: “Propane”, s Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Propane>, 15.4.2022.
- [16,17]A-gas: “R290 (Propane)”, s Interneta, <https://www.agas.com/uk/products-and-services/refrigerants/r290-propane/>, 15.4.2022.
- [18]A-gas: “R410A”, s Interneta, <https://www.agas.com/uk/products-and-services/refrigerants/r410a/>, 15.4.2022.
- [19]Wikipedia: “R-410A”, s Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/R-410A>, 15.4.2022.
- [20]Kaltra GmbH: “Refrigerant R1234ze”, s Interneta, <https://www.kaltra.com/r-1234ze>, 15.4.2022.
- [21]Kaltra GmbH: “Refrigerant R513a”, s Interneta, <https://www.kaltra.com/r-513a>, 15.4.2022.
- [22]Kaltra GmbH: “Refrigerant R450a”, s Interneta, <https://www.kaltra.com/r450a-refrigerant>, 15.4.2022.
- [23]Kaltra GmbH: “Refrigerant R455a”, s Interneta, <https://www.kaltra.com/r-455a>, 15.4.2022.
- [24]Kaltra GmbH: “Refrigerant R452b”, s Interneta, <https://www.kaltra.com/r-452b>, 15.4.2022.
- [25]Kaltra GmbH: “Refrigerant R454a”, s Interneta, <https://www.kaltra.com/r454a>, 15.4.2022.

[26]Kaltra GmbH: “Refrigerant R454b”, s Interneta, <https://www.kaltra.com/r454b-refrigerant>, 15.4.2022.

[27]Kaltra GmbH: “Refrigerant R454c”, s Interneta, <https://www.kaltra.com/r-454c>, 15.4.2022.

[28,31,32,33,34]Pavković, B.: “Tehnika hlađenja Predavanja 2021/2022”, Tehnički fakultet Rijeka

[29]Recknagel, Sprenger, Schramek, Čeperković: “Grejanje i klimatizacija”, Interklima, Vrnjačka Banja, 2004.

[30]National Institute of Standards and Technology: REFPROP – NIST Reference Fluid Properties (DLL version 10.0) NIST Standard Reference Database 23

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLLESKOM JEZIKU

U radu su sa svrhom uspoređivanja svojstva i mogućnosti primjene različitih radnih tvari za svrhu zagrijavanja potrošne tople vode provedeni proračuni različitih rashladnih i ogrjevnih procesa koristeći softver Refprop.

Definirani su i proračunati etalonski procesi kao i realni procesi koji se najčešće koriste u praksi, te su na navedenima uspoređene mogućnosti i svojstva danas najkorištenijih i zamjenskih novih ekološki prihvatljivijih radnih tvari koje su razvijene sa svrhom da ih zamijene u skorijoj budućnosti.

Ključne riječi: Refprop, radne tvari, potrošna topla voda, dizalice topline, kompresijski rashladni uređaji, potencijal razgradnje ozona, potencijal globalnog zatopljenja, faktor grijanja

This paper's purpose was to compare properties and possibilities of application of different refrigerants for the purpose of heating domestic hot water. Calculations of different cooling and heating processes were carried out using the Refprop software.

Ideal as well as realistic processes that are most often used in practice were defined and calculated, and were used for comparing the possibilities of application and properties of the most used today and substitute new, more environmentally friendly refrigerants that were developed in order to replace them in the near future.

Key words: Refprop, refrigerants, domestic hot water, heat pumps, compression refrigeration units, ozone depletion potential, global warming potential, coefficient of performance

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 2. 1 – Definirane granice GWP – indeksa za određene primjene prema F – gas regulative [2] | 8 |
| Tablica 2. 2 - Podjela radnih tvari po kategorijama i njihova održivost na tržištu [3]..... | 10 |
| Tablica 2. 3 - Svojstva često korištenih radnih tvari i dostupne alternativne radne tvari niskog GWP – a [5]..... | 13 |
| Tablica 2. 4 - Posredne i zamjenske radne tvari za najčešće korištene radne tvari po segmentima primjene [6] | 14 |
| | |
| Tablica 4. 1 - Rezultati - Osnovni s pregrijanjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline zrak - voda..... | 42 |
| Tablica 4. 2 - Rezultati - Osnovni s pregrijanjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda | 43 |
| Tablica 4. 3 - Rezultati - Osnovni s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/Ljetni režim rada - dizalica topline zrak - voda | 47 |
| Tablica 4. 4 - Rezultati - Osnovni s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda | 48 |
| Tablica 4. 5 - Rezultati - Dvostupanjski proces s pregrijanjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline zrak - voda | 55 |
| Tablica 4. 6 - Rezultati - Dvostupanjski proces s pregrijanjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda | 55 |
| Tablica 4. 7 - Rezultati - Dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline zrak - voda | 59 |
| Tablica 4. 8 - Rezultati - Dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/Ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda | 59 |
| Tablica 4. 9 - Stanja u specifičnim točkama transkritičnog procesa | 63 |
| Tablica 4. 10 - Rezultati - Kaskadne dizalice topline zrak - voda | 70 |
| Tablica 4. 11 - Rezultati - Stvarni dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/ljetni režim rada, dizalica topline zrak - voda..... | 74 |
| Tablica 4. 12 - Rezultati - Stvarni dvostupanjski proces s pregrijanjem i pothlađenjem - Zimski/ljetni režim rada, dizalica topline voda - voda..... | 74 |
| Tablica 4. 13 - Rezultati - Potpuna rekuperacija topline, kompresijski rashladni uređaj - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$ i $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$ | 79 |
| Tablica 4. 14 - Rezultati - Potpuna rekuperacija topline, kompresijski rashladni uređaj - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 30^\circ\text{C}$ | 80 |
| Tablica 4. 15 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 40°C - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$ | 83 |
| Tablica 4. 16 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 30°C - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$ | 84 |
| Tablica 4. 17 - Rezultati - Djelomična rekuperacija topline, kompresijski rashadni uređaj - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$ i $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$ | 87 |
| Tablica 4. 18 - Rezultati - Djelomična rekuperacija topline, kompresijski rashladni uređaj - Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 30^\circ\text{C}$ | 88 |
| Tablica 4. 19 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 40°C - Djelomična rekuperacija, temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$ | 91 |
| Tablica 4. 20 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 30°C - Djelomična rekuperacija, temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$ | 93 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 2. 1 – Postupno smanjenje dozvoljene primjene HFC – a [1]..... | 7 |
| Slika 2. 2 - Dijagram ocjenjivanja radnih tvari prema relevantnim kriterijima odabira [4] | 11 |
| | |
| Slika 3. 1 - R134a - 1,1,1,2 – tetrafluoretan [7] | 15 |
| Slika 3. 2 - Cilindar s R134a [9]..... | 16 |
| Slika 3. 3 - R717 - amonijak [10]..... | 17 |
| Slika 3. 4 - R744 - ugljikov dioksid [11]..... | 18 |
| Slika 3. 5 - R32 - difluorometan [12] | 20 |
| Slika 3. 6 - Cilindar s R32 [14] | 21 |
| Slika 3. 7 - R290 - Propan [15] | 21 |
| Slika 3. 8 - Cilindar s R290 [17] | 23 |
| Slika 3. 9 - Krivulje zasićenja radnih tvari..... | 32 |
| Slika 3. 10 - Ovisnost toplinske vodljivosti kapljevite faze i temperature..... | 33 |
| Slika 3. 11 - Ovisnost toplinske vodljivosti parne faze i temperature..... | 34 |
| Slika 3. 12 - Ovisnost temperature i topline isparivanja | 34 |
| | |
| Slika 4. 1 - Shema jednostupanjske dizalice topline za pripremu PTV | 35 |
| Slika 4. 2 - Promjena temperatura u isparivaču i kondenzatoru dizalice topline zrak - voda za zimski/ljetni režim rada..... | 36 |
| Slika 4. 3 - Promjena temperatura u isparivaču i kondenzatoru dizalice topline voda - voda za zimski/ljetni režim rada..... | 37 |
| Slika 4. 4 - Shema osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem | 39 |
| Slika 4. 5 - p,h - dijagram osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem..... | 39 |
| Slika 4. 6 - Temperatura radne tvari na kraju kompresije - osnovni podkritični proces s pregrijanjem - zimski režim rada (teoretski proces)..... | 44 |
| Slika 4. 7 - Shema osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem | 45 |
| Slika 4. 8 - p,h - dijagram osnovnog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem..... | 45 |
| Slika 4. 9 - Faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline zrak - voda - Zimski režim rada .. | 49 |
| Slika 4. 10 - Faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline zrak - voda - Ljetni režim rada .. | 50 |
| Slika 4. 11 - Faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline voda - voda – Zimski režim rada | 51 |
| Slika 4. 12 - Faktori grijanja jednostupanjskih dizalica topline voda - voda - Ljetni režim rada . | 51 |
| Slika 4. 13 - Shema dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem..... | 53 |
| Slika 4. 14 - p,h - dijagram dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem | 53 |
| Slika 4. 15 - Temperature radne tvari na kraju visokotlačne kompresije - dvostupanjski podkritični proces s pregrijanjem - zimski režim rada (teoretski proces) | 56 |
| Slika 4. 16 - Shema dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem i pothlađenjem..... | 57 |
| Slika 4. 17 - p,h - dijagram dvostupanjskog podkritičnog procesa s pregrijanjem | 57 |
| Slika 4. 18 - Faktori grijanja dvostupanjskih dizalica topline zrak - voda za zimski režim rada (teoretski proces)..... | 60 |
| Slika 4. 19 - Faktori grijanja dvostupanjskih dizalica topline voda - voda za zimski/ljetni režim rada (teoretski proces) | 60 |
| Slika 4. 20 - Shema transkritičnog jednostupanjskog procesa [32] | 61 |
| Slika 4. 21 - log p,h - dijagram transkritičnog jednostupanjskog procesa [33]..... | 62 |
| Slika 4. 22 - Shema kaskadne dizalice topline [34] | 67 |

| | |
|---|----|
| Slika 4. 23 - Ogrjevni faktori kaskadne dizalice topline zrak - voda za zimski/ljetni režim rada (teoretski proces) | 70 |
| Slika 4. 24 - Usporedba faktora grijanja svih procesa dizalica topline zrak - voda za zimski režim rada (teoretski proces) | 71 |
| Slika 4. 25 - Usporedba faktora grijanja svih procesa dizalica topline zrak - voda za ljetni režim rada (teoretski proces) | 72 |
| Slika 4. 26 - Usporedba teoretskog i stvarnog faktora grijanja dizalice topline zrak - voda za zimski/ljetni režim rada - Dvostupanjski s pregrijanjem i pothlađenjem..... | 75 |
| Slika 4. 27 - Usporedba teoretskog i stvarnog faktora grijanja dizalice topline voda - voda za zimski/ljetni režim rada - Dvoostupanjski s pregrijanjem i pothlađenjem..... | 75 |
| Slika 4. 28 - p,h - dijagram osnovnog rashladnog procesa s pregrijanjem | 77 |
| Slika 4. 29 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za potpunu rekuperaciju - $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$ | 81 |
| Slika 4. 30 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za potpunu rekuperaciju - $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$ | 81 |
| Slika 4. 31 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za potpunu rekuperaciju - $\vartheta_k = 30^\circ\text{C}$ | 82 |
| Slika 4. 32 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 40°C za potpunu rekuperaciju pri $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$ | 83 |
| Slika 4. 33 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 30°C za potpunu rekuperaciju pri $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$ | 85 |
| Slika 4. 34 - p,h - dijagram osnovnog rashladnog procesa s pregrijanjem - djelomična rekuperacija | 86 |
| Slika 4. 35 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za djelomičnu rekuperaciju - $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$ | 89 |
| Slika 4. 36 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za djelomičnu rekuperaciju - $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$ | 89 |
| Slika 4. 37 - Ukupni faktori rashladnog uređaja za djelomičnu rekuperaciju - $\vartheta_k = 30^\circ\text{C}$ | 90 |
| Slika 4. 38 - Količina PTV – a koju je moguće zagrijati na 40°C za djelomičnu rekuperaciju pri $\vartheta_k = 50^\circ\text{C}$ | 92 |
| Slika 4. 39 - Količina PTV - a koju je moguće zagrijati na 30°C za djelomičnu rekuperaciju pri $\vartheta_k = 40^\circ\text{C}$ | 94 |