

CO₂ KAO RADNA TVAR U SUVREMENIM RASHLADNIM SUSTAVIMA

Mađerić D.¹, Kondić Ž.¹, Botak Z.¹

¹ Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, Hrvatska

Sažetak: Štetni utjecaj konvencionalnih radnih tvari na okolinu, doprinio je pojačanom interesu za „prirodne“ radne tvari u koje spada i CO₂. Brojna istraživanja, probne instalacije i serijska proizvodnja provedena zadnjih petnaestak godina daju ohrabrujuće naznake da bi CO₂ mogao postati efikasna i ekološki prihvatljiva radna tvar sa širokom primjenom u modernim rashladnim sustavima.

Ključne riječi: CO₂, hlađenje, rashladni sustav, radna tvar, transkritični rashladni sustav, kaskadni rashladni sustav

Abstract: Conventional refrigerant adverse impact on the environment has contributed to increasing interest in the CO₂ and other “natural” refrigerants. Wide research, prototype installations and serial production conducted in the last fifteen years provide promising indications that the CO₂ could become efficient and environmentally acceptable refrigerant with wide application in modern refrigeration systems.

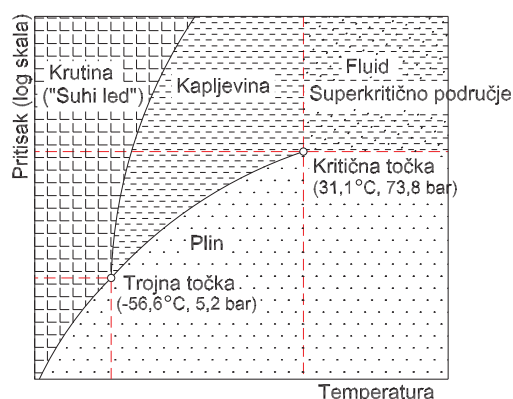
Key words: CO₂, refrigeration, refrigeration system, refrigerant, transcritical refrigeration system, cascade refrigeration system

1. UVOD

Prve studije koje predlažu CO₂ kao radnu tvar u kompresijskom rashladnom sustavu pojavile su se još polovicom 19. stoljeća, a 1886. napravljen je prvi kompresor. CO₂ kao radna tvar je u širokoj upotrebi početkom 20. stoljeća. Njegova popularnost temeljila se na njegovim osnovnim prednostima u odnosu na druge, dotad poznate radne tvari: niskoj cijeni, nezapaljivosti i neotrovnosti. Međutim navedenih prednosti CO₂ kao radna tvar, imao je i bitne nedostatke: niski stupanj iskorištenja i visoke pritiske u rashladnim sustavima. Kada su se 30-ih godina 20. st. pojavili klorofluorugljici (CFC) i klorofluorugljikovodici (HCFC) kao sintetizirane radne tvari koje su karakterizirali visoki stupanj iskorištenja i niski pritisci u rashladnim sustavima, činilo se da je pronađeno idealno rješenje, i CO₂ je potpuno potisnut iz upotrebe. Kada je krajem 20. st. ustanovljen negativni utjecaj CFC i HCFC na okolinu u vidu uništavanja ozonskog sloja i visokog utjecaja na globalno zagrijavanje Zemlje, CO₂ sa svojim karakteristikama ponovno postaje interesantan. CO₂, naime, ne oštećuje ozonski omotač a utjecaj na globalno zagrijavanje izražen preko GWP (Global Warming Potential) mu je višestruko manji u usporedbi s CFC i HCFC. Tako primjerice GWP za CO₂ iznosi 1, za R404a - 3260, za R134a - 1300, za R22 - 1500, a za R12 - 8100.

2. SVOJSTVA CO₂

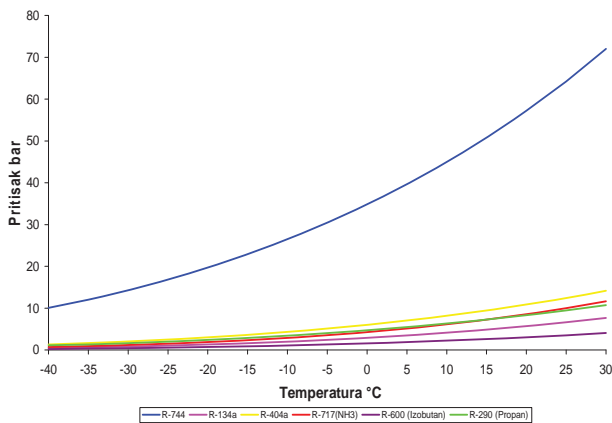
Osnovna karakteristika CO₂ kao radne tvari, koji se u rashladnoj tehnici označava kao R-744, relativno su niske temperature trojne i kritične točke. Kritična temperatura iznosi 31,1 °C i njoj odgovara pritisak od 7,38 MPa, dok temperatura trojne točke iznosi -56,6 °C i njoj odgovara pritisak od 0,52 MPa.



Slika 1. Krivulje napetosti za CO₂

Slika 1 prikazuje kvalitativno, krivulje napetosti za CO₂. Na njoj su označene dvije važne točke: trojna točka i kritična točka. Trojna točka predstavlja uvjete u kojima mogu koegzistirati sva tri agregatna stanja, drugim riječima to je donja granična točka kod koje se prijenos topline može vršiti procesom isparavanja ili kondenzacije. S druge strane kritična točka predstavlja gornju takvu granicu. Pojam „kritična“ ne označava nešto „opasno“, već označava da u području iznad te točke ne postoji jasno razgraničenje između tekuće i plinovite faze. Linija ispod trojne točke naziva se linija sublimacije. To je područje gdje se prijelaz između krute i plinovite faze vrši direktno bez sudjelovanja tekuće faze kao međufaze procesa. Proces sublimacije krute faze CO₂ („suhi led“) u plinovitu fazu, kod atmosferskog pritiska događa se na temperaturi od -78 °C što daje mogućnost da se proces koristi u rashladnoj tehnici. Sama sublimacija „suhog leda“ osigurava 577 kJ/kg rashladnog učina. Ako se još tome doda toplina koju plinoviti CO₂ preuzme na sebe, zagrijavanjem od -78 °C do npr. 0 °C, rashladni će učin biti 640 kJ/kg.

Druga bitna karakteristika R-744 su mnogo viši radni pritisci u usporedbi s rashladnim sustavima napunjenim klasičnim radnim tvarima (slika 2.).



Slika 2. Dijagram temperatura zasićenja radnih tvari s pripadajućim pritiscima

Ova karakteristika nosi sa sobom i pozitivne i negativne efekte. Negativni utjecaj je taj što komponente rashladnog sustava moraju biti dimenzionirane tako da izdrže ovako visoke radne pritiske i što veća pažnja treba biti posvećena spojevima komponenti i cjevovoda zbog mogućih propuštanja. Pozitivni efekt očituje se u tome što zbog visokih pritisaka R-744 ima veliku gustoću. Kao rezultat toga R-744 za istu rashladnu snagu zahtijeva kompresore nekoliko puta manjih radnih volumena u odnosu na ostale radne tvari (primjerice 6-8 puta manji u odnosu na kompresore za R134a), a i cijevi i armatura su značajno manjih promjera. Na taj se način akumulirana eksplozivna energija sustava, na koji utječu znatno viši pritisci i znatno manje dimenzije komponenata, ne mijenja značajno u odnosu na rashladne sustave punjene klasičnim radnim tvarima.

Običaj je u rashladnoj tehnici da se pad tlaka uslijed linijskih i lokalnih gubitaka izražava preko temperature (u Kelvinima) i to zbog toga što u zasićenom području (gdje koegzistiraju i tekuća i plinovita faza radne tvari), svaka temperatura ima svoj odgovarajući pritisak i obrnuto. Kod R-744, zbog visokih radnih tlakova, pad tlaka uslijed linijskih i lokalnih gubitaka, u tlačnim i usisnim cjevovodima, ima manju odgovarajuću vrijednost izraženu preko temperature u K, što značajno pridonosi većem stupnju iskorištenja procesa, naročito kod rashladnih procesa s niskim temperaturama isparavanja. Stupanj iskorištenja procesa izražava se preko COP-a (Coeficient Operating Performance) i predstavlja odnos između ostvarene rashladne snage i uložene snage (obično električne) u proces. COP se može izraziti za kompresor ili za cijeli rashladni sustav. Ako se COP izražava samo za kompresor, onda se za uloženu snagu uzima samo snaga koju on troši. Ako se COP izražava za cjelokupni rashladni sustav, onda se u nazivniku uzima zbroj svih uložениh snaga, a u što pored kompresora ulaze i snage ventilatora i crpka ako su uključene u proces.

Kompresijski omjeri su kod R-744 20-50-% niži u odnosu na kompresijske omjere kod rashladnih sustava punjenih HCFC ili amonijakom, što kao rezultat daje već volumetrički i izentropski stupanj iskorištenja.

R-744 također posjeduje bolja svojstva za prijenos topline, u odnosu na konvencionalne radne tvari, i omogućava da razlika između temperature isparavanja i temperature hlađene okoline bude manja. Na taj način temperatura isparavanja može biti viša, što utječe na povećanje rashladnog kapaciteta i COP-a. Primjerice, u usporedbi s R404a, R-744 može omogućiti višu temperaturu isparavanja za najmanje 2 K. Također je, zbog toga što razlici temperature od 1 K odgovara relativno velika razlika pritiska, moguće nametnuti veće brzine strujanja što značajno pridonosi boljem prijenosu topline. To omogućava smanjenje dimenzija izmjenjivača topline (isparivača i kondenzatora), a time i niže investicijske troškove.

CO₂ je u usporedbi s drugim radnim tvarima, jeftina radna tvar jer može biti proizveden kao nusprodukt nekih tehnoloških procesa. On je nazapaljiv i neotrovan iako ne bezopasan. Iako je glavni uzrok globalnog zatopljanja jer nastaje kao osnovni produkt izgaranja, njegovo korištenje u rashladnim sustavima ne mora se tretirati kao dodatni problem, jer se on može sakupiti i iskoristiti kao radna tvar u rashladnom sustavu prije nego što će ionako završiti u atmosferi. CO₂ je kompatibilan s gotovo svim konstrukcijskim materijalima (osim nekim materijalima za izradu brtvi) i uljima koja se koriste za podmazivanje, i kao takav ne zahtijeva dodatne troškove za pronalaženje nekih specijalnih materijala za komponente i instalacije.

3. TRANSKRITIČNI RASHLADNI PROCES

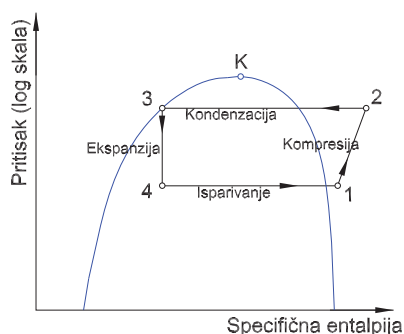
Kao što je već spomenuto, kritična temperatura za CO₂ kao radnu tvar u rashladnoj tehnici, iznosi 31,1 °C, što je relativno niska temperatura u usporedbi s kritičnim temperaturama ostalih radnih tvari. Samim time je i određena max. temperatura kondenzacije u klasičnom kondenzacijskom rashladnom sustavu. Da bi se proces kondenzacije mogao odvijati, temperatura okoline na koju se toplina prenosi, mora biti nešto niža. To se može ostvariti na način da je temperatura okoline (najčešće zrak ili voda) prirodno niža ili da se to ostvari na posredan način, upotrebom posebnog rashladnog sustava. Ovakav se sustav naziva kaskadni rashladni sustav.

Radna tvar	Kritični pritisak [bar]	Kritična temperatura [°C]
R134a	40,6	101,1
R404a	37,3	72,0
R410a	49,0	71,4
R290 (Propan)	42,5	96,7
R600a (Izobutan)	36,4	134,7
R717 (Amonijak)	113,3	132,3
R744 (CO ₂)	73,8	31,1

Tablica 1. Kritične veličine za neke češće korištene radne tvari

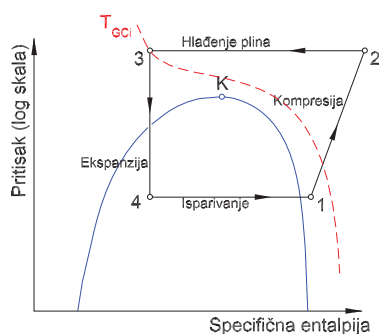
Ako temperatura pri kojoj R-744 predaje toplinu okolini, prijeđe kritičnu temperaturu onda ovaj proces više nije kondenzacija, već ulazi u „superkritično“ područje i

predstavlja hlađenje plinske faze radne tvari. Bitna razlika između kondenzacije i hlađenja plina je ta što se kondenzacija odvija pri konstantnoj temperaturi a proces hlađenja plina karakterizira stalna promjena temperature. Oba ova procesa odvijaju se kod približno konstantnog pritiska. Izmjenjivač topline u kojem se ovaj proces odvija, više nije „kondenzator“, već se u engleskoj terminologiji naziva „gas cooler“ (hladnjak plina). Rashladni proces gdje radna tvar predaje toplinu okolini procesom hlađenja plina („superkritično“ područje), a preuzima toplinu iz okoline koja se hladi procesom isparavanja („subkritično“ područje), naziva se „transkritični“ rashladni proces.



Slika 3. Subkritični rashladni proces

„Transkritični“ proces, prikazan na slici 3 počinje jednostupanjskom kompresijom od točke 1 do točke 2. Prijenos topline s rashladnog sredstva na okolinu (2-3) odvija se kod približno konstantnog pritiska, iznad kritične točke. Temperatura se pri tome kontinuirano smanjuje od ulazne (T_2) do izlazne ($T_3=T_{GCi}$). Proces ekspanzije (3-4) odvija se kod približno konstantne specifične entalpije. Isparavanje (4-1) se kao i kod klasičnog kondenzacijskog rashladnog procesa odvija kod približno konstantnog pritiska.



Slika 4. Transkritični rashladni proces

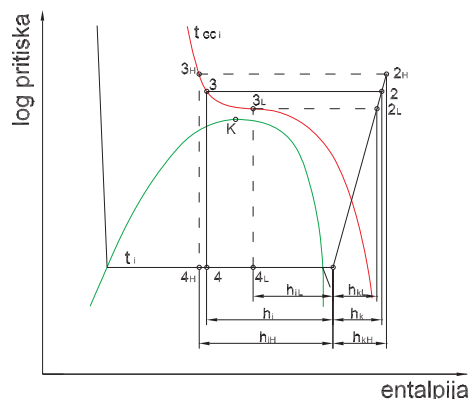
Idealna energetska bilanca daje:

$$Q_{GC} = P_i + W \quad (1)$$

gdje Q_{GC} predstavlja toplinu predanu hladnjakom plina („gas cooler“), P_i toplinu koju radna tvar preuzima prilikom isparavanja, a W – rad kompresora.

3.1. Utjecaj pritiska u hladnjaku plina na efikasnost rashladnog sistema

Pritisak kod kojeg se odvija taj prijenos topline, može biti kontroliran i nekontroliran. Pritisak je nekontroliran za procese koji koriste npr. kapilaru kao ekspanzijski organ. U takvim sustavima pritisak ovisi o količini radne tvari u rashladnom sustavu, te o njezinoj distribuciji između komponenata sustava. Distribucija radne tvari između komponenata mijenja se promjenom parametara rashladnog procesa pa će to rezultirati promjenjivim pritiskom u hladnjaku plina.



Slika 5. Utjecaj promjene pritiska u hladnjaku plina na rashladni proces

Na slici 5 prikazana su tri različita procesa. Svi oni imaju iste temperature isparavanja, isto stanje temperature i pritiska na izlazu iz isparivača, odnosno na ulazu u kompresor te istu temperaturu na izlazu iz hladnjaka plina. Oni se jedino razlikuju po pritiscima u hladnjaku plina. Slika ilustrira posljedice promjene pritiska u hladnjaku plina od +/- 0,5 MPa. Proces čije su točke označene slovom L (Low), predstavlja proces s nižim pritiskom u odnosu na referentni, a proces s oznakom H (High) predstavlja proces s višim pritiskom u hladnjaku plina. Utjecaj povećanja/smanjenja pritiska evidentno se vidi kroz promjenu entalpije Δh_i koja se odnosi na isparivač i entalpije Δh_k koja se odnosi na kompresor. Kako umnožak:

$$\dot{m}^* \Delta h_i = P_i \quad (2)$$

predstavlja rashladnu snagu realiziranu na isparivaču a

$$\dot{m}^* \Delta h_k = W \quad (3)$$

predstavlja snagu koju troši kompresor, onda prema definiciji proizlazi:

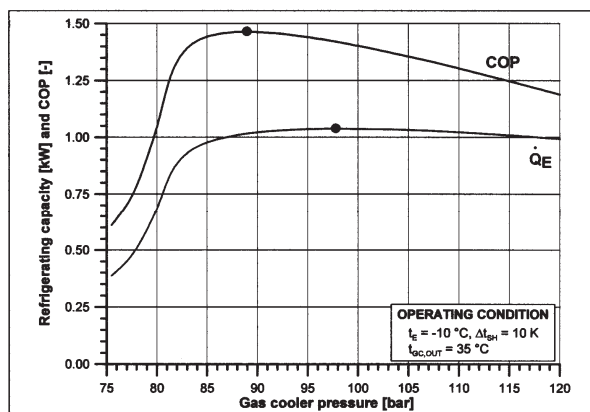
$$COP = \frac{P_i}{W} = \frac{\dot{m}^* \Delta h_i}{\dot{m}^* \Delta h_k} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_k} \quad (4)$$

a to je odnos koji se i vizualno može vidjeti s obzirom na to da je na slici predstavljen kotom, tj. duljinom.

Za konkretni slučaj rashladni kapacitet procesa s nižim pritiskom u hladnjaku plina je 64% rashladne snage nominalnog procesa, dok je rashladni kapacitet procesa s višim pritiskom, 106% rashladne snage nominalnog procesa. To pokazuje da pritisak u hladnjaku plina ima značajan utjecaj na rashladnu snagu. Ako sada

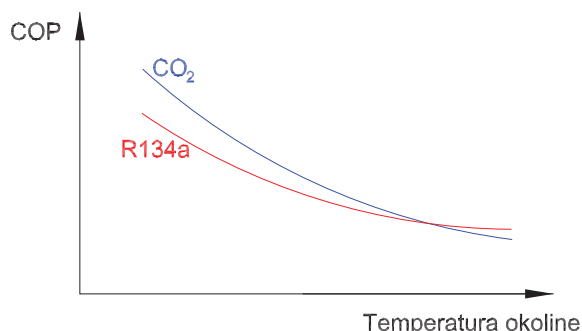
pogledamo promjenu snage koju kompresor troši, onda vidimo da za promjenu pritiska hladnjaka plina od $\pm 0,5$ MPa iznosi otprilike $\pm 10\%$. Ako sada ove vrijednosti uvrstimo u relaciju za COP, dobivamo da je $COP_L = 1,8$, nominalni $COP = 2,6$, a $COP_H = 2,5$.

Iz navedenog se može zaključiti da utjecaj pritiska u hladnjaku plina, ovisno od područja u kojem promatramo, može biti znatan. Također se vidi da s obzirom na COP, postoji optimalni pritisak kod kojeg je COP maksimalan, i taj pritisak je ovisan o temperaturi na izlazu iz hladnjaka plina. Ova pak je temperatura ovisna o veličini i koeficijentu prijelaza topline hladnjaka plina kao i o okolišnoj temperaturi.



Slika 6. Ovisnost optimalnog COP-a i maksimalne rashladne snage o pritisku u hladnjaku plina (Preuzeto iz Danfoss: "Transcritical refrigeration systems using CO₂")

Slika 6 pokazuje varijaciju rashladnog kapaciteta i COP za rashladni sustav koji radi kod konstantnog pritiska isparivanja, temperature pregrijavanja i temperature na izlazu iz hladnjaka plina. Može se vidjeti da se optimalni rashladni kapacitet dosegne kod višeg pritiska u hladnjaku plina, nego što je to slučaj za COP. Ako se promjene parametri rada rashladnog sustava, promijenit će se i optimalni pritisak u hladnjaku plina.



Slika 7. Ovisnost COP-a o temperaturi okoline

Slika 7 prikazuje kvalitativnu ovisnost COP-a o temperaturi okoline za CO₂ u transkriticnom rashladnom procesu i jednu klasičnu radnu tvar (R134 a). Vidljivo je da se COP za CO₂ u usporedbi s COP-om za klasične radne tvari brže mijenja s promjenom temperature i da je

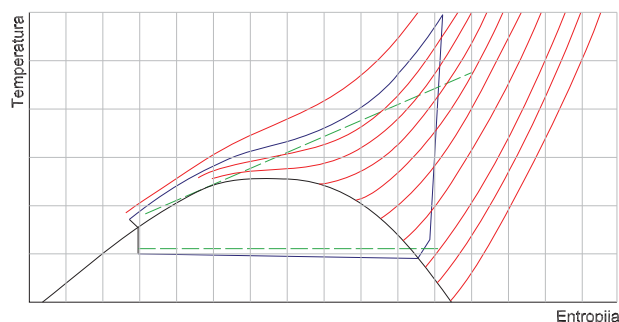
veći u području nižih temperatura, a nešto niži u području viših temperatura.

Zbog svega navedenog za „transkriticne“ rashladne procese pokazalo se svrsishodnijim, kontrolirati pritisak u hladnjaku plina, nego koristiti klasični termoekspanzijski ventil koji kontrolira pritisak u isparivaču. Izmjenjivač topline gdje se izmjenjuje toplina između usisnog voda kompresora i voda koji povezuje izlaz hladnjaka plina i ekspanzijskog ventila, može poboljšati efikasnost rashladnog sustava, ali pri tome treba, kod jednostupanjskih kompresijskih sustava obratiti pažnju da izlazna temperatura radne tvari na izlazu iz kompresora ne bude previsoka.

3.2 Primjena „transkriticnih“ CO₂ rashladnih sustava

Prva primjena „transkriticnih“ rashladnih sustava s CO₂ kao radnom tvari bila je kod zagrijača vode koji rade kao toplinske crpke, gdje termodinamička svojstva CO₂ dolaze do punog izražaja. Proces grijanja vode postiže se protustrujnim izmjenjivačem topline koji s jedne strane grije vodu, a s druge predstavlja hladnjak plina transkriticnog rashladnog sustava. Zbog visoke temperature CO₂ na izlazu iz kompresora i stalnog pada temperature u hladnjaku plina, mogu se realizirati male temperaturne razlike između vode i CO₂ što utječe na visoki termodinamički stupanj iskorištenja i visoki COP.

Tako se može ostvariti COP više od 4, a da izlazna temperatura zagrijane vode dosegne 60°C. Pokazalo se da temperatura zagrijane vode bez dogrijavanja i operativnih problema može dosegnuti 90°C i to s neznatnim padom COP-a. Grijači vode s R-744 su već u serijskoj proizvodnji i primjenjuju se u hotelima, apartmanima, bolnicama i procesnoj industriji.



Slika 8. Transkriticni rashladni proces u funkciji zagrijavanja vode.

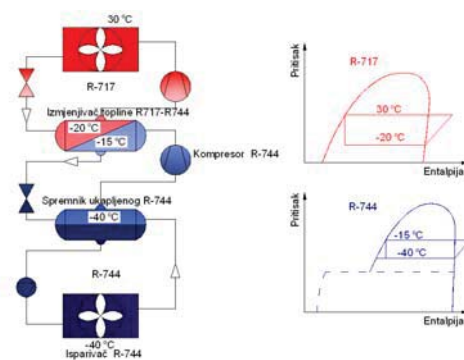
Provedena su mnogobrojna istraživanja oko primjene „transkriticnih“ CO₂ rashladnih sustava u automobilske industriji (za klima-uređaje), koja zbog svoje masovne proizvodnje slovi kao najveći zagađivač okoline freonima. Dobiveni su ohrabrujući rezultati, manje dimenzije kompresora i kompletne instalacije te se možemo nadati da će se u skoroj budućnosti naći u masovnoj proizvodnji.

Kompanije „Coca-Cola“, „Mc Donalds“ i „Unilever“ osnovali su na jednodnevnoj konferenciji 2004. udruženje „Refrigerants naturally“ čiji je cilj zamijeniti kompletnu rashladnu opremu (koju te kompanije koriste i koja kao radne tvari koristi HFC i HCFC), opremom punjenom ekološki prihvatljivom radnom tvari. Kasnije su se ovom udruženju pridružile kompanije „Carlsberg“, „Ikea“ i „PepsiCo“. Provedena su mnoga istraživanja i CO₂ je pokazao niz prednosti koje bi ga mogle promovirati u „radnu tvar budućnosti“. Kompanije „Danfoss“, „Embraco“ i „ACC-Compresors“ već su napravile prototipne uzorke jednostupanjskih klipnih kompresora manjih snaga koji se mogu koristiti u komercijalnom hlađenju. „Danfoss“ je već na pragu serijske proizvodnje za kompresore 1, 1.5 i 2.5 cm³ radnih volumena koji su sposobni za rad u transkritičnim rashladnim procesima. Ovi su kompresori sposobni pokriti područje komercijalnog hlađenja koje čine frižideri, vending aparati, uređaji za hlađenje vode, piva, ledomati, postmix uređaji i sl. Tvrtka „Oprema-uredjaji“ iz Ludbrega je u 11/06 izložila prototipni uređaj za hlađenje piva na sajmu „Brau“ u Nurnbergu, koji koristi Danfoss kompresor 2.5 cm³ i radi kao transkritični rashladni proces. Autori ovog članka sudjelovali su u razvoju i laboratorijskom testiranju ovog prototipnog uređaja. Kad i ako komponente za CO₂ hlađenje uđu u masovnu proizvodnju, rashladni uređaji će i cijenom moći biti konkurentni sadašnjim punjenim freonima.

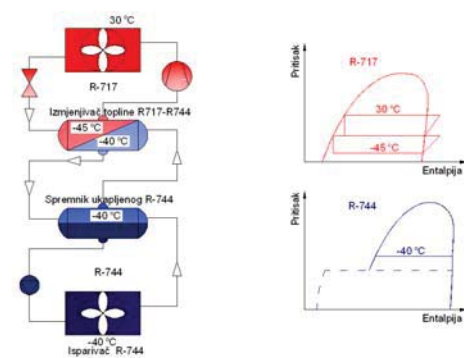
3. CO₂ KAO RADNA TVAR U KASKADNOM RASHLADNOM SUSTAVU

3.1 Industrijsko hlađenje uz primjenu kaskadnog rashladnog sustava

Slika 9 prikazuje rashladni sustav za duboko hlađenje gdje se CO₂ koristi kao radna tvar u donjoj kaskadi dok se u gornjoj kaskadi koristi amonijak. Treba napomenuti da se temperatura kondenzacije amonijaka (koja je ovdje uzeta 30°C) mijenja s promjenom temperature okoline i obično je za 10-15 °C, viša od temperature okoline. Tekući R-744 se ovdje koristi u tzv. indirektnom rashladnom sustavu gdje se uz pomoć pumpe transportira iz spremnika ukapljenog CO₂ u isparivač gdje djelomično isparava i zatim se vraća u spremnik. Plinska faza R-744 se kompresorom uzima iz spremnika i komprimira na viši tlak te transportira u izmjenjivač topline. Tamo se odvija kondenzacija pa se tekući CO₂ vraća u spremnik. Izmjenjivač topline koji predstavlja kondenzator niže kaskade (CO₂), istovremeno je i isparivač više kaskade (R-717). Vidimo da se kompletni rashladni proces za CO₂ odvija ispod kritične točke, duboko u „subkritičnom“ području gdje su radni tlakovi na razini kao u sustavima s klasičnim rashladnim sredstvima (za temperaturu -40 °C pripadajući pritisak zasićenja ~1 MPa, za -15 °C, 2,3 MPa)



Slika 9. Kaskadni rashladni sustav



Slika 10. Kaskadni rashladni sustav

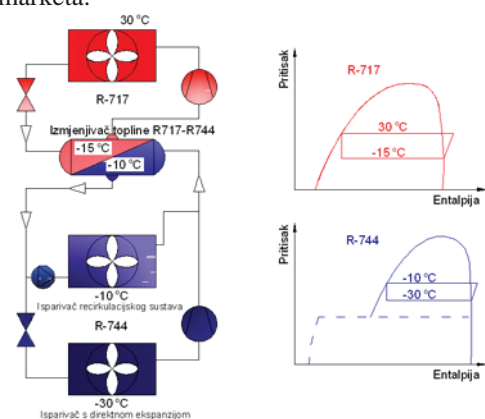
Slika 10 prikazuje također kaskadni rashladni sustav gdje R-744 kao radna tvar u indirektnom sustavu hlađenja kroz isparivač struji pomoću crpke. U odnosu na rashladni sustav na slici 8 ovaj rashladni sustav nema kompresor za CO₂ pa amonijak treba isparavati na temperaturi (-45°C) nižoj od temperature CO₂ (-40°C). Zbog visokih kompresijskih omjera za amonijak se koristi dvostupanjski kompresor. Rashladni sustavi koji su shematski prikazani na slikama 9 i 10 s navedenim temperaturama, uglavnom se koriste za duboko industrijsko hlađenje.

3.2. Hlađenje supermarketa

Supermarketi su veliki potrošači električne energije i ubrajaju se među najveće potrošače u komparaciji komercijalnih građevina. Od 1650 do 2700 MJ/m² energije godišnje. Od toga otprilike 40% se troši na hlađenje. Hlađenje troši 2 -2.5% ukupno potrošene energije u komercijalnim zgradama. Rashladni sustavi za hlađenje supermarketa su velikih snaga i dimenzija komponenti i cjevovoda tako da zahtijevaju veliku količinu radne tvari za punjenje. Prosječno se, što zbog kvarova, što zbog servisa a što zbog propuštanja sustava, oko 10% radne tvari godišnje ispusti u okolinu. Uočavamo da takvi rashladni sustavi dvojako utječu na globalno zatopljanje: potrošnjom energije (uglavnom električne) za čiju se proizvodnju u okolinu ispušta CO₂ kao produkt izgaranja i ispuštanjem radnih tvari koje su donedavno bile sve s visokim GWP-om. Kad se krajem 20. st. počelo voditi računa o stanju okoliša, postalo je interesantna upotreba „prirodnih“ radnih tvari, tj. onih koje ne oštećuju ozonski omotač i imaju mali GWP, ali pod uvjetom da istodobno rashladni procesi budu efikasni, tj. da troše energiju što je manje moguće.

U „prirodne“ radne tvari ubrajaju se voda, zrak, amonijak, ugljikovodici i CO₂. Voda i zrak imaju zbog svojih termodinamičkih svojstava velika ograničenja u primjeni i nisu pogodni biti radne tvari u hlađenju supermarketa. Amonijak i ugljikovodici imaju dobra termodinamička svojstva, ali nisu podesni, zbog mogućih propuštanja i zbog svojih svojstava zapaljivosti ili otrovnosti, za korištenje u prostorima gdje boravi puno ljudi. Zato je CO₂ kao radna tvar- logičan izbor iako se ne može reći da je to idealna radna tvar. CO₂ je neotrovan i ima ga u zraku koji svakodnevno udišemo u maloj koncentraciji. No, on je po život opasan ako se čovjek izloži većoj koncentraciji. Pored toga CO₂ je teži od zraka i u zatvorenim prostorima ima najveću koncentraciju pri podu. Ako još k tome dodamo da nema nikakav miris i da čovjek ne može osjetiti njegovu prisutnost, onda je jasno da supermarketi koji ga koriste kao radnu tvar moraju imati osjetnike koji će brzo dojaviti pojačavanje njegove koncentracije (zbog eventualnog propuštanja rashladnog sustava), i moraju imati dobru ventilaciju koja će brzo smanjiti njegovu koncentraciju.

Zbog svega navedenog, kao i zbog činjenice da kod hlađenja supermarketa postoji velika razlika između najniže temperature isparavanja (~-30°C) i temperature kondenzacije (+30°C ili više, ovisno o temperaturi okoline), svrsishodno je CO₂ sustave hlađenja za supermarkete projektirati kao kaskadni rashladni sustav. Slika 11 prikazuje tipični kaskadni rashladni sustav koji se koristi za hlađenje supermarketa. Gornja kaskada rashladnog sustava na slici kao radnu tvar koristi amonijak. U praksi se pored amonijaka provode ispitivanja s R404a i s R290 (propan). Cjevovodi gornje kaskade su smješteni u strojarnici, tako da eventualno propuštanje ne može naškoditi ljudima unutar prostora supermarketa.



Slika 11. Tipični kaskadni rashladni sustav za supermarkete

Kao opcije u sustav se prije kondenzatora može uključiti izmjenjivač toplote koji će dio otpadne toplote iskoristiti za grijanje prostora ili zagrijavanje sanitarne vode, što znatno poboljšava stupanj iskorištenja sustava. Hlađenje rashladnih vitrina, frižidera i ostalih hlađenih prostora čija se temperatura obično kreće u granicama +2 / +6 °C, provodi se indirektnim sustavom hlađenja, recirkulacijom tekućeg CO₂ temperature ~ -10 °C uz

pomoć crpke, dok se duboko hlađenje provodi direktnom ekspanzijom CO₂ na temperaturi isparavanja ~ -30 °C. Pritisci u donjoj kaskadi su ~2,65 MPa za temperaturu -10 °C, odnosno ~1,4 MPa za -30 °C što su pritisci koji se susreću i kod rashladnih sustava supermarketa punjenih konvencionalnim radnim tvarima. CO₂ je zbog svojih karakteristika: dobrog prijelaza toplote i velike gustoće, koji rezultiraju relativno niskim potrebnim volumnim protokom te zbog malog pada tlaka, izuzetno pogodan za sekundarni fluid u indirektnom rashladnom sustavu. Crpke za recirkulaciju zahtijevaju malu snagu kao i sami isparivači. Zbog djelomične promjene agregatnog stanja i boljeg prijelaza toplote, mogu biti manjih dimenzija što povoljno utječe na investicijske troškove.

Poteškoće nastaju kada je sustav u fazi mirovanja ili u fazi odleđivanja isparivača. Tada pritisak može porasti u znatnoj mjeri. Tako npr. temperaturi od +20 °C odgovara pritisak zasićenja od 5,7 MPa, a tu temperaturu sustav vrlo lako može doseći u fazi mirovanja, primanjem toplote od okoline. Najčešća rješenja koja su na napravljenim instalacijama bila primjenjivana, bila su da se pomoću posebnog rashladnog sustava male snage ili rashladnog sustava u gornjoj kaskadi, održava temperatura CO₂ u donjoj kaskadi na razini koja osigurava prihvatljivu razinu pritiska ili da se izbacivanjem dijela CO₂ iz sustava, održava tlak na dopuštenoj razini.

Napravljena su mnoga istraživanja s ovakvim kaskadnim rashladnim sustavima i ustanovljeno da su uštede u utrošenoj energiji 11-15% u usporedbi s rashladnim sustavima s direktnom ekspanzijom, punjenim R404a. Investicijski troškovi na sadašnjoj razini cijena su oko 20% veći za CO₂ rashladne sustave iako se očekuje da će se masovnijom proizvodnjom komponenata oni postupno smanjivati. Investicijski troškovi mogu s vremenom postati i niži od investicijskih troškova rashladnih sustava s konvencionalnim radnim tvarima, zahvaljujući činjenici da zbog znatno viših pritisaka a time i veće gustoće radne tvari, CO₂ instalacije su osjetno manjih dimenzija. Time se štedi na materijalu, cijevi su manjih promjera, komponente su manjih dimenzija, a i smanjuju se troškovi samog izvođenja instalacije.

Rashladni sustav	Usisni/ povratni vod	Kapljevinski/ odlazni vod
Direktna ekspanzija R404a	76/102 mm	35 mm
Indirektno hlađenje sa sek. radnom tvari	76/140 mm	76/140 mm
Indirektno hlađenje s CO ₂ kao sek. radnom tvari	54/116 mm	35/73 mm
Direktna ekspanzija CO ₂ kao radne tvari	42/68 mm	22/48 mm

Tablica 2. Odnos promjera otvora cijevi i promjera izolacije za pojedine vrste rashladnih sustava, kod rashladne snage od 100 kW.

Rashladni sustav	TEWI	Potrošnja	Troškovi
------------------	------	-----------	----------

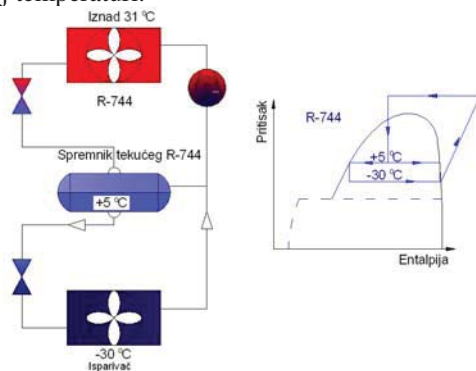
		energije	investicije
Direktna ekspanzija R404a	- *	+	+
Direktna ekspanzija CO ₂	+	+	O *
R404a indirektni sustav sa sek. fluidom	O	-	O
NH ₃ indirektni sustav sa sek. fluidom	O	O	-

+ dobro
O zadovoljavajuće
- nezadovoljavajuće
* potencijal za poboljšanje

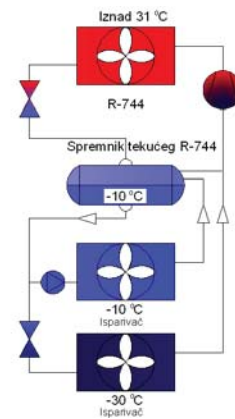
Tablica 3. Sveukupna procjena rashladnih sustava s obzirom na TEWI (Total equivalent warming impact odnosno ukupni utjecaj na globalno zagrijavanje), potrošnju energije i investicijske troškove

3.3. Hlađenje supermarketa transkritičnim CO₂ rashladnim sustavom

U najnovije vrijeme instaliraju se rashladni sustavi za hlađenje supermarketa punjeni samo CO₂. To su za sada malobrojne instalacije koje služe za ispitivanje i unapređivanje sustava. CO₂ predaje toplinu okolini u subkritičnom ili u transkritičnom području. Proces se odvija u subkritičnom području, kada su okolišne temperature dovoljno niske da se može odvijati proces kondenzacije. Kada temperatura okoline poraste, proces ulazi u transkritično područje. Sjever Europe je zbog svoje klime naročito pogodan za ovakve instalacije. Vrijeme, kad su temperature relativno visoke, (~>25°C) je s obzirom na ukupno vrijeme rada, relativno kratko tako da relativno niži COP transkritičnog procesa ne utječe znatno na ukupnu efikasnost rashladnog sustava. Osnovna prednost ovakvog rashladnog sustava, koji je punjen samo CO₂, je u tome što se, u odnosu na kaskadne sustave s nekom drugom tvari u gornjoj kaskadi, izbjegava temperaturna razlika na izmjenjivaču topline koji je isparivač gornje kaskade, odnosno kondenzator donje. Na taj način sustavu raste COP, a i samo punjenje je zbog niske cijene CO₂, jeftinije. Postoji također veliki potencijal za iskorištenje otpadne topline na relativno visokoj temperaturi.



Slika 12. Transkritični CO₂ rashladni sustav za duboko hlađenje



Slika 13. Transkritični CO₂ rashladni sustav za srednje i niske temperature hlađenja

4. ZAKLJUČAK

Sva provedena istraživanja i studije pokazali su da se CO₂ kao radna tvar sa svojim karakteristikama može ravnopravno nositi s drugim radnim tvarima. Stanje svijesti o okolini i briga o njezinom očuvanju mogla bi CO₂ promovirati kao radnu tvar za masovnu upotrebu. Neke razvijene europske zemlje već su napravile zakonsku regulativu koja ograničava i destimulira korištenje konvencionalnih radnih tvari. Vidjet će se, hoće li i kojom brzinom i ostale europske i svjetske države slijediti ovaj primjer. Pojedinačne mjere i napori neće uspjeti riješiti probleme s okolinom koji su globalni. Mnogo toga ovisi o SAD-u kao najvećoj svjetskoj gospodarskoj sili koja proizvodi najviše tzv. stakleničkih plinova, a nije pristupila sporazumu iz Kyota.

S tehničke strane, pokazalo se, na svim dosad napravljenim instalacijama da rashladni sustavi s CO₂ nemaju neke nepremostive probleme, a imaju niz prednosti. CO₂ je dio atmosfere tako da se ne mogu očekivati neki naknadni problemi i utjecaji na okolinu, kao što je to bilo s freonima. Kada komponente rashladnih sustava uđu u serijsku proizvodnju, može se očekivati daljnje snižavanje investicijskih troškova i još veća konkurentnost CO₂ kao radne tvari.

5. LITERATURA

- 2006 ASHRAE Handbook – Refrigeration, Poglavlja R03 i R46
- Bitzer: Refrigerant report 13th edition
- Danfoss: „Transcritical refrigeration system using carbon dioxide“ 2004.
- Pearson Andy, Star Refrigeration Ltd: „Carbon dioxide-new uses for an old refrigerant“
- Perales Cabrejas Carlos: „Parametric evaluation of a NH₃/CO₂ cascade system for supermarket refrigeration in laboratory environment“
- <http://www.iucsek.se/upload/file/projekt%20Nat%20kol%20co2/Master%20Thesis%20NH3-CO2%20jun06.pdf>
- <http://www.refrigerantsnaturally.com>