

PRIRODNI RASHLADNI FLUIDI NATURAL REFRIGERANTS

Željka Vuković, Dušan Regodić

Univerzitet Singidunum, Danijelova 32, Beograd
dregodic@singidunum.ac.rs, zeljka@sokoing.rs

Rezime: Povećanje broja stanovnika na zemlji, a pre svega intenzivna industrijalizacija i tehnološki napredak u prošlom i ovom veku doveli su do znatnih promena u prirodi. Velike promene u prirodi prouzrokuju klimatske promene, koje su direktna posledica povećane potrošnje energije i upotrebe sintetičkih rashladnih fluida (freona) koji utiču na oštećenje ozonskog omotača i globalno zagrevanje. Zbog zabrinjavajućih podataka o klimatskim promenama, ovaj rad je pokušaj povećanja svesti o očuvanju životne sredine u zemlji sa ekonomijom u tranziciji.

Cilj rada je da se predstave rešenja za supstituciju freona.

Ključne reči: prirodan rashladni fluid, ugljen dioksid, kaskadni rashladni sistem.

Abstract: Increase inhabitants on the Earth, especially intensive industrialization and technological progress in the previous and this century have led to significant changes in nature. Big changes in nature are caused by climate changes, which are direct consequence of energy consumption increase and use of synthetic refrigerants (Freon), which affect ozone depletion and global warming. Because of the disturbing facts about climate change, this work is an attempt to increase awareness of environmental protection in country with economies in transition.

The aim of this work is to present solutions for the substitution of Freon.

Key words: natural refrigerant, carbon dioxide, cascade refrigeration system.

1. UVOD

Freoni kojima se pune rashladni sistemi za hlađenje prehrambenih namirnica, kao i sistemi za klimatizaciju vazduha oštećuju ozonski omotač i utiču na globalno zagrevanje. Rešenje ovog problema je u upotrebi prirodnih rashladnih fluida, koji su sa pojavom freona potisnuti iz upotrebe. Zabrinjavajući podaci o klimatskim promenama usmerili su istraživanja u pravcu ponovne upotrebe prirodnih rashladnih fluida.

2. RASHLADNI FLUIDI I NJIHOV UTICAJ NA ŽIVOTNU SREDINU

2.1. Rashladni fluidi

Rashladni fluidi se mogu podeliti na pet osnovnih grupa. To su CFC (potpuno halogenizovani hlorofluorouglenici), HCFC (delimično halogenizovani hidrohlorofluorouglenici), FC (potpuno halogenizovani fluorouglenici), HFC (delimično

halogenizovani hidrofluorouglenici) i prirodni rashladni fluidi. Freoni (CFC, HCFC, FC i HFC) su sintetički dobijena jedinjenja sa pogodnim termodinamičkim osobinama da bi se koristili kao rashladni fluidi. Prirodni rashladni fluidi predstavljaju hemijska jedinjenja ili elemente koji se mogu naći u prirodi. Da bi rashladni sistem mogao da radi sa što boljim efektom uz što manji utrošak energije, da nema opasnosti od štetnog dejstva na ljudski organizam i na materijalna dobra koja se nalaze u blizini rashladnog sistema, rashladni fluid mora da ispunjava određene termičke, fizičke i hemijske uslove, kao i da ima određene osobine praktične primene.

2.2. Uticaj freona na životnu sredinu

Dobre termodinamičke osobine sintetičkih rashladnih fluida potisnute su u drugi plan zbog štetnog uticaja na životnu sredinu. Freoni CFC grupe koji sadrže hlor oštećuju ozonski omotač i utiču na globalno zagrevanje. Freoni iz HCFC grupe koji su proizvedeni kao zamena za freone CFC grupe imaju manji uticaj na oštećenje ozonskog omotača i na globalno zagrevanje. Pošto sadrže hlor i oštećuju ozonski omotač freoni iz HCFC grupe su se takođe našli na listi nepoželjnih. Nova vrsta freona koja spada u HFC grupu i ne sadrži hlor proizvedena je kao zamena za freone iz HCFC grupe.

U tabeli 1. dati su faktor oštećenja ozonskog omotača (ODP - **O**zone **D**epletion **P**otential“) i faktor globalnog zagrevanja (GWP - **G**lobal **W**arming **P**otential“) za različite freone. Faktor oštećenja ozonskog omotača pokazuje uticaj na oštećenje ozonskog omotača ostalih freona u odnosu na freon R11, čiji je ODP faktor uzet kao referentna vrednost ($ODP_{R11}=1$). Faktor globalnog zagrevanja pokazuje koliki je uticaj GHG (**G**reen **H**ouse **G**ases) gasova na globalno zagrevanje u odnosu na ugljen dioksid. Faktor globalnog zagrevanja za ugljen dioksid je uzet kao referentna vrednost ($GWP_{CO_2}=1$).

Tabela 1. Faktor oštećenja ozonskog omotača ODP i faktor globalnog zagrevanja GWP za različite vrste freona

Grupa freona	Freon	ODP	GWP
CFC	R11	1	4000
	R12	1	8500
HCFC	R22	0.05	1500
HFC	R134a	0	1300
	R404a	0	3260
	R407c	0	1525
	R410a	0	1725

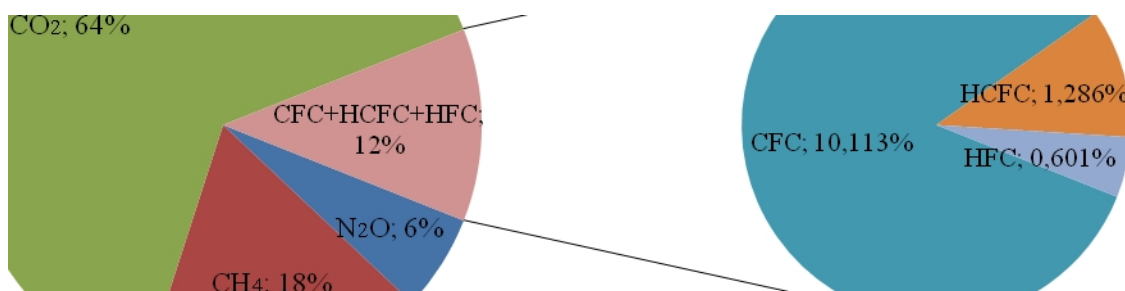
Osim navedenih faktora bitna karakteristika freona je njihova trajnost u atmosferi (ALT – **A**tmosferic **L**ife **T**ime). U tabeli 2. data je trajnost u atmosferi pojedinih vrsta freona iz CFC, HCFC i HFC grupe.

Tabela 2. Trajnost u atmosferi (ALT – Atmospheric Life Time), pojedinih vrsta freona

Grupa freona	Freon	ALT (godina)
<i>CFC</i>	<i>R11</i>	<i>50</i>
	<i>R12</i>	<i>102</i>
	<i>R114</i>	<i>300</i>
<i>HCFC</i>	<i>R22</i>	<i>12,1</i>
<i>HFC</i>	<i>R134a</i>	<i>14,6</i>

Nova vrsta freona iako ne oštećuje ozonski omotač, takođe ima negativne posledice po životnu sredinu. Faktor globalnog zagrevanja za freon R404a iznosi 3260, što znači da 1kg freona R404a utiče na globalno zagrevanje 3260 puta više nego 1kg CO₂.

Na slici 1. prikazano je učešće u globalnom zagrevanju gasova sa efektom staklene bašte. Veliko učešće CO₂ u globalnom zagrevanju je posledica velikih količina koje se ispuštaju u atmosferu pri proizvodnji energije, ali je upotreba CO₂ kao rashladnog fluida sasvim opravdana, jer se radi o zatvorenom sistemu u kome je umesto freona koji je daleko opasniji po okolinu približno ista količina CO₂.



Slika 1. Procentualno učešće u globalnom zagrevanju gasova sa efektom staklene bašte [12]

2.3. Totalni ekvivalentni faktor globalnog zagrevanja

Faktor globalnog zagrevanja GWP koristi se za poređenje uticaja različitih rashladnih fluida na globalno zagrevanje. Da bi se odredio uticaj konkretnog rashladnog sistema na globalno zagrevanje uveden je totalni ekvivalentni faktor globalnog zagrevanja koji se označava sa TEWI (**T**otal **E**quivalent **W**arming **I**mpact).

Direktan potencijal globalnog zagrevanja potiče od isticanja rashladnog fluida sa visokim GWP faktorom, prilikom montaže, kvarova, pucanja instalacije, servisnih intervencija i demontaže radi izbacivanja iz upotrebe. Indirektan potencijal globalnog zagrevanja potiče od potrošnje energije rashladnog sistema za čiju proizvodnju se u okolinu ispušta CO₂.

$$TEWI = (GWP \times L \times n) + (GWP \times m [1 - arecovery]) + (n \times E_{annual} \times \beta),$$

gde su:

- $(GWP \times L \times n) + (GWP \times m [1 - arecovery])$ – direktan potencijal globalnog zagrevanja;
- $(n \times E_{annual} \times \beta)$ – indirektan potencijal globalnog zagrevanja;
- GWP - faktor globalnog zagrevanja;
- L - isticanje na godišnjem nivou [kg];
- n - vreme rada sistema [godina];
- m - punjenje rashladnim sredstvom [kg];
- $arecovery$ - faktor recikliranja;
- E_{annual} - godišnja potrošnja energije [kWh];
- β - emisija CO₂ po kWh [kg].

2.4. LCCP faktor

LCCP (Life-Cycle Climate Performance) faktor je nadgradnja TEWI faktora i sadrži uticaje koji nisu obuhvaćeni TEWI faktorom.

$$LCCP = TEWI + GWP_{indirektan} + GWP_{direktan}$$

Indirektan uticaj na globalno zagrevanje obuhvaćen LCCP faktorom potiče od potrošnje energije pri proizvodnji rashladnog fluida i potrebnih komponenata, kao i potrošnje energije pri transportu, a direktan uticaj na globalno zagrevanje potiče od isticanja rashladnog fluida u samom procesu proizvodnje. Institut AHRTI (Air Conditioning, Heating and Refrigeration Technology Institute) je razvio i standardizovao model za izračunavanje LCCP faktora.

2.5. Montrealski protokol

Montrealski protokol je usvojen 1987. godine, a Srbija ga je ratifikovala 2007. godine. Montrealskim protokolom iz 1987. godine nisu bili obuhvaćeni HCFC fluidi zbog male vrednosti ODP faktora, ali su 1992. godine doneseni amandmani kojima su obuhvaćeni i ovi fluidi. U razvijenim zemljama prema odredbama Montrealskog protokola CFC freoni su eliminisani iz upotrebe. Srbija koja spada u grupu zemalja u razvoju je imala obavezu da izbacii freone CFC grupe do 01.01.2010. godine i od tog datuma njihov uvoz je zabranjen čak i za potrebe servisnih intervencija. U tabeli 3. dat je plan izbacivanja HCFC freona za razvijene zemlje prema Montrealskom protokolu.

Tabela 3. Plan izbacivanja HCFC freona prema Montrealskom protokolu za razvijene zemlje

Bazna potrošnja	1989
<i>Zamrzavanje potrošnje na nivou bazne</i>	<i>1996</i>
<i>Smanjenje 35%</i>	<i>2004</i>
<i>Smanjenje 65%</i>	<i>2010</i>
<i>Smanjenje 90%</i>	<i>2015</i>
<i>Smanjenje 99.5%</i>	<i>2020</i>
<i>Potpuno izbacivanje iz upotrebe</i>	<i>2030</i>

U tabeli 4. dat je plan izbacivanja HCFC freona za zemlje u razvoju prema Montrealskom protoklu.

Tabela 4. Plan izbacivanja HCFC freona prema Montrealskom protokolu za zemlje u razvoju

Bazna potrošnja	Prosek za 2009 i 2010
<i>Zamrzavanje potrošnje na nivou bazne</i>	<i>2013</i>
<i>Smanjenje 10%</i>	<i>2015</i>
<i>Smanjenje 35%</i>	<i>2020</i>
<i>Smanjenje 67.5%</i>	<i>2025</i>
<i>Smanjenje 97.5%</i>	<i>2030</i>
<i>Potpuno izbacivanje iz upotrebe</i>	<i>2040</i>

Kao bazna potrošnja za zemlje u razvoju definisana je prosečna potrošnja za 2009. i 2010. godinu, a od 2040. godine biće u potpunosti zabranjena upotreba, proizvodnja i uvoz ovih freona za zemlje u razvoju.

U tabeli 5. data je godišnja potrošnja freona u Srbiji prema podacima Ministarstva životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja, gde se vidi da se u Srbiji i dalje troše velike količine freona R22.

Tabela 5. Potrošnja freona u Republici Srbiji za 2007., 2008., 2009. i 2010. godinu prema podacima Ministarstva životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja

Potrošnja freona (kg)				
<i>Freon</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>
<i>R22</i>	<i>157580</i>	<i>121080</i>	<i>148160</i>	<i>133840</i>
<i>R134a</i>	<i>60760</i>	<i>147060</i>	<i>113040</i>	<i>211190</i>
<i>R404a</i>	<i>43020</i>	<i>62220</i>	<i>120330</i>	<i>97870</i>
<i>R407c</i>	<i>14360</i>	<i>18260</i>	<i>31990</i>	<i>2070</i>
<i>R410a</i>	<i>6600</i>	<i>12100</i>	<i>21320</i>	<i>-</i>

2.6. Kyoto protokol

Kyoto protokol je usvojen na trećoj konferenciji članica okvirne konvencije Ujedinjenih Nacija o promeni klime 11. decembra 1997. godine, a stupio je na snagu u februaru 2005. godine. Po Kyoto protokolu treba ublažiti i sprečiti globalno zagrevanje zemlje, a HFC freoni se zbog visokog GWP faktora svrstavaju u grupu gasova koji učestvuju u efektu staklene bašte (GHG – **G**reen **H**ouse **G**ases). Kyoto protokolom se industrijske zemlje sveta obavezuju da svoje emisije gasova sa efektom staklene bašte smanje u proseku za 5,2% u odnosu na referentnu 1990. godinu i to u periodu od 2008. do 2012. godine. Evropska unija je preuzela obavezu da svoju emisiju u navedenom periodu smanji za 8%. Zemlje u razvoju nemaju obavezu kvantifikovanog smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte, ali svaka od zemalja u razvoju u bilo kom trenutku takvu obavezu može preuzeti u skladu sa svojim mogućnostima. Opšte obaveze zemalja u razvoju su dostavljanje podataka o emisiji organima Konvencija, saradnja u pripremi mera za ublažavanje posledica globalnog zagrevanja, saradnja u razvoju i istraživanjima,

kao i saradnja u oblasti obrazovanja, obuke i jačanja svesti. Za razliku od Kyoto protokola, prema Montrealskom protokolu HFC freoni se preporučuju kao zamena za CFC i HCFC freone. Zbog neslaganja Montrealskog i Kyoto protokola po pitanju HFC freona ekspertska tela oba protokola organizuju zajedničke susrete radi usaglašavanja.

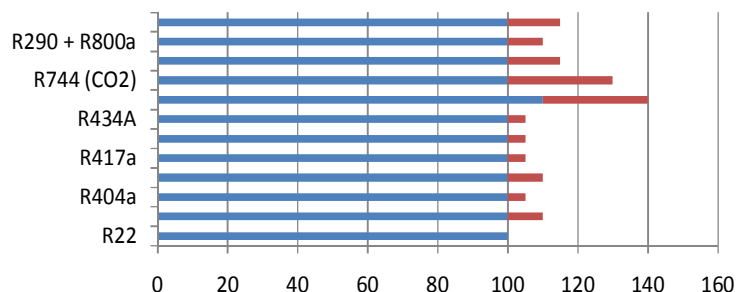
2.7. Rashladni fluidi po sektorima danas

Prirodni rashladni fluidi se pojavljuju u oblasti industrijskog hlađenja (NH_3), komercijalnog hlađenja (CO_2 , propan i propilen), kao i oblasti domaćinstava odnosno u instalacijama kućnih frižidera (isobutan). Trenutna slika rashladnih fluida u upotrebi po pojedinim sektorima u svetu danas je data u tabeli 6.

Tabela 6. Rashladni fluidi po sektorima

Sektor	Rashladni fluid
Industrijsko hlađenje	Amonijak, R404a
Komercijalno hlađenje	R134a, R404a, R507, CO_2 , Propan, Propilen
Klimatizacija	- čileri sa „scroll“ i hermetičkim klipnim kompresorima: R407c i R410a - čileri sa vijčanim kompresorima: R134a
Domaćinstva	- Isobutan, R134a
Transportno hlađenje	- R404a, R134a

Na slici 2. dato je poređenje investicionih troškova za rashladne sisteme sa navedenim rashladnim fluidima u odnosu na rashladni sistem sa freonom R22.



Slika 2. Poređenje investicionih troškova za rashladne sisteme sa različitim rashladnim fluidima u odnosu na sistem sa freonom R22 [13]

2.8. Prirodni rashladni fluidi

Prirodni rashladni fluidi su: **ugljovodonici, voda, vazduh, NH_3 (R717) i CO_2 (R744)**. Ugljovodonici su veoma zapaljivi i eksplozivni, tako da je njihova upotreba ograničena na rashladne sisteme malih kapaciteta, kao što su kućni frižideri ili kućni klima uređaji. Vazduh i voda imaju loše termodinamičke osobine u području niskih temperatura. Na kraju od prirodnih rashladnih fluida osim NH_3 koji se jako dugo koristi u

oblasti industrijskog hlađenja, ostaje CO₂ koji je neotrovan, nezapaljiv, a može se koristiti kao rashladni fluid.

Upotreba prirodnih rashladnih fluida svakako bi uticala na ispunjenje obaveza i Montrealskog i Kyoto protokola.

2.9. Karakteristike NH₃

Amonijak (NH₃) se dugo koristi u oblasti industrijskog hlađenja. Njegove mane su pre svega zapaljivost i eksplozivnost. Iako poseduje dobre termodinamičke osobine zbog činjenice da pri koncentraciji od 16% u vazduhu može da eksplodira, amonijak je proglašen opasnom supstancom. Amonijak ne oštećuje ozonski omotač (ODP=0) i ne utiče na globalno zagrevanje (GWP=0). On je otrovan, ali se lako detektuje. NH₃ ima nisku nabavnu cenu, lako se nabavlja, ne meša se sa uljima za podmazivanje i primenjuje se više od 100 godina u industrijskom hlađenju. Problem sa NH₃ se ogleda u velikim količinama ovog rashladnog fluida kod velikih rashladnih sistema. Male količine amonijaka su bezbedne i dozvoljene regulativama o hemijski opasnim supstancama.

2.10. Karakteristike CO₂

Ugljen dioksid je gas bez boje i mirisa, a kao rashladni fluid se koristio u prošlom veku. Kada su se 30-ih godina prošlog veka pojavili hlorofluorugljenici (CFC) i hlorofluorugljovodonici (HCFC) on je polako potiskivan iz upotrebe. Ugljen dioksid je u potpunosti potisnut iz upotrebe 60-tih godina prošlog veka, pre svega zbog niske kritične temperature (+31°C) i visokih pritisaka. CO₂ ne oštećuje ozonski omotač (ODP=0) i u odnosu na freone malo utiče na globalno zagrevanje (GWP=1), nije zapaljiv, lako se nabavlja, ima nisku cenu, rastvara poliestersko ulje za podmazivanje i ima veliku specifičnu zapreminsku rashladnu sposobnost.

Termodinamičke osobine rashladnog fluida u blizini kritične tačke su loše. Ako temperatura pri kojoj CO₂(R-744) predaje toplotu okolini, pređe kritičnu temperaturu onda ovaj proces više nije kondenzacija, već ulazi u nadkritično područje i predstavlja hlađenje gasne faze radnog fluida. Transkritični rashladni proces je proces u kome rashladni fluid predaje toplotu okolini procesom hlađenja gasa (nadkritično područje), a uzima toplotu iz okoline koja se hladi procesom isparavanja (podkritično područje).

3. RASHLADNI SISTEMI SA PRIRODNIM RASHLADNIM FLUIDIMA

U protekloj deceniji timovi naučnih radnika i inženjera širom sveta radili su na iznalaženju rešenja za eliminisanje ili bar smanjenje količine freona. Ispitivani su rashladni sistemi sa prirodnim rashladnim fluidima, a pre svega rashladni sistemi sa CO₂. U poređenju sa drugim rashladnim fluidima CO₂ je jeftin rashladni fluid (kao i NH₃) i može biti proizveden kao nusprodukt nekih tehnoloških procesa.

3.1. Kaskadni rashladni sistemi sa CO₂

Jedno od rešenja za potpunu eliminaciju ili smanjenje količine freona su kaskadni rashladni sistemi u kojima se u gornjoj kaskadi koristi neki pogodan rashladni fluid, a u donjoj CO_2 jer se na taj način eliminišu sve mane ugljen dioksida kao rashladnog fluida, a kompletan proces sa CO_2 se odvija u podkritičnom području. Poznato je da su do sada rađena ispitivanja sa freonom R404a, kao i sa freonom R134a u gornjoj kaskadi. Na taj način freon se ne eliminiše u potpunosti, ali se njegova količina u sistemu znatno smanjuje, jer je gornja kaskada sa freonom smeštena u mašinskoj prostoriji, a rashladni fluid donje kaskade CO_2 cirkuliše do potrošača praktično kao sekundarni rashladni fluid. Osim ispitivanja sa freonima u gornjoj kaskadi vršena su i ispitivanja sa ugljovodonicima, pre svega sa propanom. Eksplozivnost i zapaljivost ugljovodonika kod ovakvih sistema je manje zabrinjavajuća jer je deo sistema sa ugljovodonikom smešten u mašinsku prostoriju, sa svim merama predostrožnosti koje su za ovakve sisteme potrebne.

Još jedna kombinacija koja daje zadovoljavajuće rezultate je kombinacija amonijaka i ugljen dioksida. Kod ovakvog sistema svaki od ova dva rashladna fluida koristi se u području gde ima najbolje karakteristike. NH_3 se nalazi samo u mašinskoj prostoriji i udaljen je od kupaca i prehrambenih proizvoda. Po Američkoj OSHA PSM (Process safety management) regulativi za visoko štetne hemikalije, CO_2 nije klasifikovan kao visoko štetna supstanca, dok NH_3 jeste. Međutim, kod većine ispravno projektovanih kaskadnih sistema, visoka strana sa amonijakom sadrži manje od 4500kg amonijaka, što je trenutno ograničenje po PSM regulativi. Ušteda u potrošnji energije kod kaskadnih CO_2/NH_3 sistema u odnosu na sisteme sa direktnom ekspanzijom freona R404a iznosi 11-15%, a investicioni troškovi veći su oko 20% [2]. Ovi troškovi imaju tendenciju opadanja zbog sve masovnije proizvodnje komponenata za sisteme sa CO_2 . Proizvođač "Sabroe" koji je u sastavu kompanije "Johnson Controls" proizvodi kompresore tip "HPO/HPC" za kaskadne CO_2/NH_3 sisteme. Na slici 3. prikazan je kompresor tip "HPO/HPC" proizvođača "Sabroe".



Slika 3. Kompresor tip "HPO/HPC" za kaskadne CO_2/NH_3 sisteme proizvođača "Sabroe"

Osim kompresora "Sabroe" proizvodi i rashladne agregate tip "CAFP" za kaskadne CO_2/NH_3 sisteme. Na slici 4. prikazan je rashladni agregat tip "CAFP" proizvođača "Sabroe" za kaskadne CO_2/NH_3 sisteme.



Slika 4. Rashladni agregat tip "CAFP" za kaskadne CO₂/NH₃ sisteme proizvođača "Sabroe"

3.2. Klasični rashladni sistemi sa CO₂

U zemljama u kojima je svest o očuvanju životne sredine na visokom nivou ne beži se čak ni od klasičnih rashladnih sistema sa ugljen dioksidom, pa se osim kaskadnih sistema kod kojih se CO₂ kao rashladni fluid koristi u donjoj kaskadi, u poslednje vreme širom sveta instaliraju rashladni sistemi u kojima je rashladni fluid samo CO₂. Kada je temperatura okoline iznad kritične temperature, CO₂ predaje toplotu u transkritičnom području, dok se onda kada su okolne temperature dovoljno niske da se može odvijati kondenzacija, proces odvija u podkritičnom području. Zemlje sa hladnijom klimom su pogodne za ovakve instalacije, pošto je zbog niskih spoljnih temperatura vreme rada u transkritičnom području kratko, pa ne utiče znatno na smanjenje ukupne efikasnosti rashladnog sistema.

Jedan od vodećih svetskih proizvođača rashladnih vitrina, kompanija "Arneg" proizvela je rashladne vitrine za rad sa CO₂ i 2009 godine otvorila u Budimpešti supermarket iz lanca "Tesco" gde se kao rashladni fluid koristi CO₂ [5]. Na slici 5. prikazan je supermarket lanca "Tesco" u Budimpešti.



Slika 5. Supermarket lanca "Tesco" u Budimpešti [5]

Za sada u proizvodnom programu kompanije “Arneg” postoje dva tipa rashladnih vitrina koje su namenjene za rad sa CO₂. Kompanija „Johnson Controls“, jedna od vodećih kompanija u svetu u primeni ove tehnologije, do sada je instalirala brojne rashladne sisteme sa CO₂. U tabeli 7. prikazan je broj i kapacitet instaliranih rashladnih sistema po vrstama. Najveći broj instaliranih sistema su nisko temperaturni LT sistemi, jer u tom području CO₂ kao rashladni fluid ima najbolje karakteristike. Razvijene zemlje prednjače po broju do sada instaliranih rashladnih sistema sa CO₂, a od zemalja u regionu je samo jedan ovakav sistem instaliran u Sloveniji.

Tabela 7. Rashladni sistemi sa CO₂ instaliranih od strane kompanije „Johnson Controls“

	<i>Realizovanih projekata</i>	<i>Ukupno kW</i>
<i>Brodovi</i>	<i>4</i>	<i>5900</i>
<i>Supermarketi</i>	<i>94</i>	<i>7866</i>
<i>Ostalo</i>	<i>5</i>	<i>5800</i>
<i>Rashladne komore za voće i povrće</i>	<i>1</i>	<i>2000</i>
<i>Nisko temperaturni LT sistemi</i>	<i>121</i>	<i>79185</i>
<i>Ukupno</i>	<i>225</i>	<i>100751</i>

Kod sistema sa CO₂ potrebno je preduzeti odgovarajuće sigurnosne mere. U slučaju dužeg nestanka električne energije, u objektu u kome ne postoji dizel agregat, pritisak CO₂ će rasti. Temperaturi od +20°C, odgovara pritisak zasićenja od 57 bar, a tu temperaturu sistem može lako dostići u stanju mirovanja primanjem toplote od okoline. Zato je neophodno da postoji automatski sigurnosni sistem koji će izbaciti deo CO₂ da bi instalacija ostala ispod dozvoljenog pritiska. Kratak prekid napajanja ne predstavlja problem. Detektori za CO₂ se moraju postaviti u mašinskoj sali, ali i u prostoru u kome se nalaze rashladni uređaji (rashladne vitrine i komore). Pošto se CO₂ nalazi inače u vazduhu, detektori moraju biti setovani na veći sadržaj CO₂ u vazduhu od onog koji je normalan.

U tabeli 8. dati su prečnici cevovoda za različite vrste srednje temperaturnih (MT) rashladnih sistema kapaciteta 100kW. Zbog znatno viših pritisaka, veće gustine CO₂ prečnici cevovoda su znatno manjih dimenzija, čime se postiže ušteda u cevovodima i armaturi. Takođe, za isti rashladni kapacitet kompresori u sistemima sa CO₂ su nekoliko puta manjih radnih zapremina u odnosu na kompresore u freonskim rashladnim sistemima (na primer 6-8 puta u odnosu na R134a).

Tabela 8. Prečnici cevovoda za različite rashladne sisteme u “srednje temperaturnom” - MT režimu kapaciteta 100 kW [7]

MT rashladni sistem kapaciteta 100kW	Usisni vod	Tečni vod
<i>Direktna ekspanzija 404a</i>	<i>Ø76</i>	<i>Ø35</i>
<i>Indirektno hlađenje sa sekundarnim rashladnim fluidom</i>	<i>Ø76</i>	<i>Ø76</i>
<i>Direktna ekspanzija CO₂</i>	<i>Ø42</i>	<i>Ø22</i>

Zahvaljujući tome što je CO₂ kompatibilan sa svim materijalima od kojih se prave cevovodi i komponente rashladnih sistema kao i sa uljima za podmazivanje, nisu potrebni

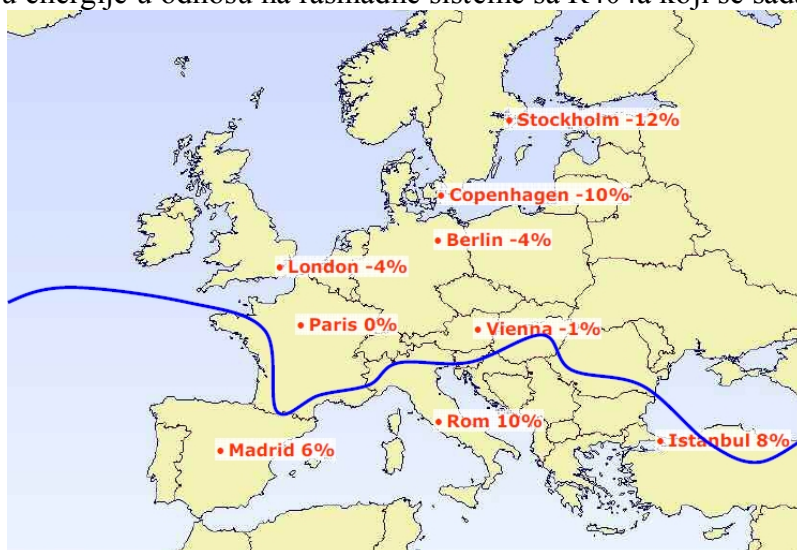
dodatni troškovi za pronalaženje novih materijala za izradu cevovoda i komponenti za rashladne sisteme sa CO₂.

4. RASHLADNI SISTEM ZA KOMERCIJALNO HLAĐENJE SA CO₂

4.1. Razvoj rashladnog sistema

U decembru 2009. godine u kompaniji “Soko Inženjering” pojavila se ideja i predlog po kome bi trebalo istražiti mogućnost primene prirodnih rashladnih fluida uopšteno, a pre svega u oblasti komercijalnog hlađenja pošto je komercijalno hlađenje primarni posao kompanije. Ovaj predlog je bio podstaknut saznanjima o početku razvoja ovakvih sistema u razvijenim evropskim zemljama. Rukovodstvo firme je prihvatilo predlog i odobrilo finansijska sredstva za razvoj u koji su bila uključena četiri mašinska inženjera i jedan elektro inženjer kompanije Soko Inženjering. Razvoj sistema je trajao skoro dve godine, a puštanje probnog sistema u rad se očekuje u oktobru 2011. godine.

Srbija spada među zemlje u kojima bi primena klasičnih rashladnih sistema sa CO₂ prozurokovala oko 10% veću potrošnju energije u odnosu na rashladne sisteme sa R404a jer bi sistem veliki broj dana u godini radio u nadkritičnom području [9]. Na slici 6. prikazana je klimatska granica ispod koje bi klasični rashladni sistemi sa CO₂ imali veću potrošnju energije u odnosu na rashladne sisteme sa R404a koji se sada primenjuju.



Slika 6. Poređenje potrošnje energije sistema sa CO₂ i sistema sa R404a u zavisnosti od klimatskog podneblja u Evropi [9]

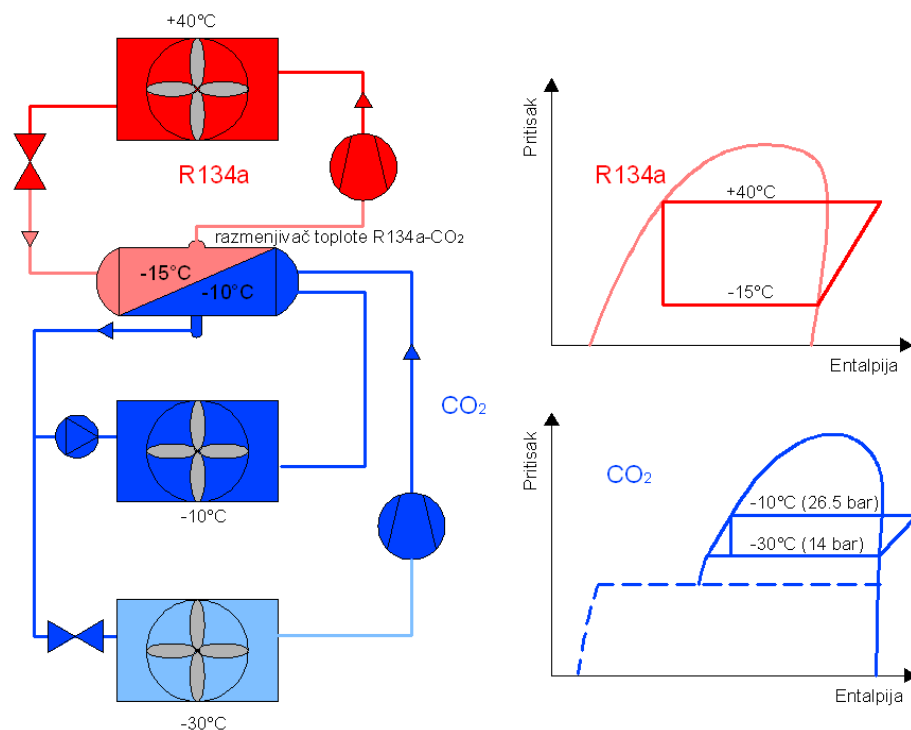
Pošto veća potrošnja energije utiče na globalno zagrevanje donesena je odluka da se u kompaniji “Soko Inženjering” razvija kaskadni rashladni sistem zahvaljujući kome se rashladni proces sa ugljen dioksidom neće odvijati u nadkritičnom području.

4.2. Karakteristike sistema

Prvi rashladni sistem sa ugljen dioksidom osmišljen je kao prototip sistema kakav je potreban za hlađenje prehrambenih proizvoda u supermarketu. Motivacija kompanije za ulaganje u ovakav projekat je pre svega mogućnost da se savladavanjem ovakvog sistema stekne prednost na tržištu u odnosu na druge konkurentne kompanije, kada prema očekivanjima zaživi koncept ovakvih rashladnih sistema. Osnovne karakteristike rashladnog sistema sa ugljen dioksidom su sledeće:

- Tip rashladnog sistema: kaskadni rashladni sistem.
- Rashladni fluid u gornjoj kaskadi: R134a.
- Rashladni fluid u donjoj kaskadi: CO₂.
- Rashladni kapacitet u “srednje temperaturnom” sistemu: 10 kW.
- Rashladni kapacitet u “nisko temperaturnom” sistemu: 5 kW.
- Hlađenje u “srednje temperaturnom” sistemu: tečni CO₂ se pumpom potiskuje iz resivera u isparivač, gde delimično isparava.
- Hlađenje u “nisko temperaturnom” sistemu: direktna ekspanzija.

Za potrebe ispitivanja napravljene su dve rashladne komore, jedna koja treba imati radnu temperaturu od +2 do +6°C (srednje temperaturni režim) i rashladni kapacitet 10 kW, i druga koja treba imati radnu temperaturu od -22 do -18°C (nisko temperaturni režim) i rashladni kapacitet 5 kW. U rashladnoj komori “srednje temperaturnog - MT” režima predviđena su dva “preplavljena” isparivača, a u rashladnoj komori “nisko temperaturnog-LT” režima predviđena su dva “suva” isparivača. Da bi sistem bio prilagodljiv trenutnom toplotnom opterećenju predviđeni su kompresori sa frekventnim regulatorima, što utiče na povećanje energetske efikasnosti sistema i smanjenje eksploatacionih troškova. Radi sigurnosti u okviru donje kaskade predviđen je automatski ispuštač ugljen dioksida, koji ispušta ugljen dioksid iz sistema kada pritisak u sistemu poraste iznad određene vrednosti. Na slici 7. prikazana je uprošćena principska šema kaskadnog sistema sa R134a i CO₂. Za hlađenje u MT režimu tečni CO₂ temperature -10°C pomoću pumpe cirkuliše kroz “preplavljene” isparivače. Hlađenje u LT režimu ostvaruje se potpunim isparavanjem tečnog CO₂ na temperaturi -30°C u isparivačima. Hladnu paru iz isparivača usisava kompresor, sabija je na visoki pritisak i potiskuje u kaskadni razmenjivač toplote koji je kondenzator donje kaskade (kondenzator za CO₂), odnosno u separator koji se u sistemu nalazi pre kaskadnog razmenjivača toplote. Para iz separatora odlazi u kaskadni razmenjivač toplote koji je kondenzator za CO₂, odakle se kondenzovani CO₂ vraća u separator. Tečni CO₂ se iz separatora potiskuje pumpom u isparivače.



Slika 7. Kaskadni rashladni sistem sa R134a i CO₂ za supermarket

Pošto su pritisci u sistemu tek nešto veći od pritisa u rashladnim sistemima sa freonima (pritisak isparavanja 14 bara i pritisak kondenzacije 26.5 bara), moguće je koristiti sve komponente koje se koriste u freonskim sistemima. Ovaj rashladni sistem je probni i malog je rashladnog kapaciteta, pa su sve komponente gornje kaskade sa freonom R134a upakovane kao jedinica za spoljnu ugradnju zajedno sa vazduhom hlađenim kondenzatorom. Kako su rashladni sistemi za supermarkete većih kapaciteta, zbog veličine uređaja i buke kompresora, povoljnije je da gornja kaskada bude izvedena kao “split” uređaj. Sve komponente gornje kaskade u ovom slučaju nalaze se u mašinskoj prostoriji, dok je vazduhom hlađen kondenzator napolju.

4.3. Poređenje sa freonskim rashladnim sistemom

Prednost kaskadnog rashladnog sistema sa freonom R134a i CO₂ u odnosu na klasičan rashladni sistem sa freonom R404a kakav se najčešće primenjuje u supermarketima je pre svega u tome što je uticaj na globalno zagrevanje daleko manji. Faktor globalnog zagrevanja freona R404a iznosi 3260, dok faktor globalnog zagrevanja freona R134a iznosi 1300. Osim toga u klasičnim rashladnim sistemima sa freonom, freon cirkuliše do isparivača u rashladnim vitrinama i rashladnim komorama, dok u ovom slučaju do isparivača cirkuliše samo CO₂, pa je količina freona u sistemu daleko manja.

Prema podatku kompanije “Danfos” investicioni troškovi kaskadnog rashladnog sistema sa CO₂ i NH₃ veći su za 20% u odnosu na rashladni sistem sa direktnom ekspanzijom freona R404a. Nakon analize investicijih troškova kaskadnog rashladnog

sistema sa freonom R134a i CO₂ u kompaniji “Soko Inženjering” došlo se do podatka da su investicioni troškovi u odnosu na sistem sa direktnom ekspanzijom freona R404a veći za 48%. Bitno veći troškovi od očekivanih nisu posledica različitog rashladnog fluida u gornjoj kaskadi, jer je taj uticaj neznatan, već su pre svega posledica veličine rashladnog sistema. Za razvoj i istraživanje u kompaniji “Soko Inženjering” odabran je rashladni sistem malog kapaciteta, a očekivanja su da bi za rashladne sisteme onih kapaciteta koji su potrebni za supermarkete investicioni troškovi bili veći za oko 20%. U tabeli 9. su prikazane radne električne snage predstavljenog kaskadnog rashladnog sistema sa R134a i CO₂ i ekvivalentnog sistema sa direktnom ekspanzijom freona R404a.

Tabela 9. Poređenje radnih električnih snaga kaskadnog rashladnog sistema sa R134a i CO₂ i sistema sa direktnom ekspanzijom freona R404a

Kaskadni sistem sa R134a i CO₂		Sistem sa direktnom ekspanzijom R404a	
<i>Komponenta</i>	<i>Radna snaga [kW]</i>	<i>Komponenta</i>	<i>Radna snaga [kW]</i>
<i>Kompresor gornje kaskade</i>	4,62	<i>Kompresor MT sistema</i>	5,66
<i>Kondenzator gornje kaskade</i>	0,91	<i>Kondenzator MT sistema</i>	0,47
<i>Kompresor donje kaskade</i>	1,01	<i>Kompresor LT sistema</i>	3,88
<i>Cirkulaciona pumpa za CO₂</i>	1,1	<i>Kondenzator LT sistema</i>	0,17
<i>Isparivač MT sistema</i>	2 x 0,23=0,46	<i>Isparivač MT sistema</i>	2 x 0,47=0,94
<i>Isparivač LT sistema</i>	2 x 0,09=0,18	<i>Isparivač LT sistema</i>	2 x 0,23=0,46
<i>Ukupno:</i>	8,28	<i>Ukupno:</i>	11,58

Iz prikazanih rezultata se vidi da ovakav sistem ima prednost u odnosu na sistem sa direktnom ekspanzijom freona R404a i kada je u pitanju potrošnja energije. Zamena sistema sa freonima, sistemom koji će u sebi sadržati rashladni fluid koji ne oštećuje ozonski omotač i ne utiče na globalno zagrevanje ne rešava problem ili ga čak povećava ukoliko takav sistem troši više energije. Izračunavanjem TEWI faktora za neki rashladni sistem lako se dolazi do podatka da je indirektni potencijal mnogo veći od direktnog potencijala globalnog zagrevanja. Prikazani kaskadni rashladni sistem sa R134a i CO₂ za isti rashladni kapacitet ima manji i direktni i indirektni potencijal globalnog zagrevanja u odnosu na klasične sisteme sa freonima. Osim ove prednosti važna prednost prikazanog sistema u odnosu na rashladne sisteme sa freonima su manji eksploatacioni troškovi. Manji eksploatacioni troškovi su posledica manje potrošnje energije, ali i znatno niže cene CO₂ u odnosu na freone, čime su smanjeni troškovi prvog punjenja sistema rashladnim fluidom, ali i troškovi servisnih intervencija u toku eksploatacije.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je mogućnost modifikovane primene CO₂ kao rashladnog fluida, kojom se eliminišu njegove osobine zbog kojih je potisnut iz upotrebe. Primenom kaskadnih rashladnih sistema u potpunosti se eliminišu mane ugljen dioksida koje su

dovele do njegovog izbacivanja. Kombinacijom ugljen dioksida u donjoj kaskadi i nekog drugog rashladnog fluida u gornjoj kaskadi proces sa ugljen dioksidom uvek je podkritičnom području, a radni pritisci tek nešto veći od pritisaka sa kojima se srećemo u sistemima sa direktnom ekspanzijom freona.

Investicioni troškovi za prikazani kaskadni rashladni sistem sa R134a i CO₂ su veći od očekivanih. Ovi troškovi su veći za 48% od investicionih troškova sistema sa freonom R404a. Razlog je u tome što je rashladni sistem probni i kao takav je malog kapaciteta, a predstavlja prototip rashladnog sistema u supermarketima u kojima su potrebni znatno veći rashladni kapaciteti.

Potrošnja energije prikazanog kaskadnog sistema sa R134a i CO₂ iznosi samo 71,5% od potrošnje energije ekvivalentnog rashladnog sistema sa freonom R404a. Veća energetska efikasnost novih rešenja je neophodna jer se na taj način smanjuje indirektni uticaj na globalno zagrevanje koji je kod svih rashladnih sistema veći od direktnog.

Zbog sve veće brige o očuvanju životne sredine CO₂ se na velika vrata vraća kao rashladni fluid, a njegova upotreba će po svemu sudeći biti masovna. Razvijene evropske zemlje (npr. Švedska, Austrija...) zakonskim regulativama ograničavaju i destimulišu čak i upotrebu freona koji se smatraju ekološkim, odnosno freona koji ne sadrže hlor. Pošto je CO₂ deo atmosfere ne mogu se očekivati dodatni problemi i uticaji na okolinu, kao što je to sa freonima, a sve masovnija proizvodnja komponenata za rashladne sisteme sa CO₂ utiče na dalje smanjivanje investicionih troškova.

LITERATURA

- [1] Daniel Giguère - Natural Resources Canada, *CO₂ in Refrigeration: Valuable Tehnology*, 2008.
- [2] Danfoss, *CO₂ refrigerant for Industrial Refrigeration*, 2007.
- [3] G. Pajani, D. Giguère, S Hosatte, *Energy efficiency in supermarkets*, Natural Resources Canada, 2004.
- [4] Carel, *Importance of the use of electronic expansion valves for coolong control in supermarkets in terms of energy savings*, 2004.
- [5] Arneg, *Newsletter no 1*, 2009.
- [6] S. Raha, *CO₂ / NH₃ Cascade Refrigeration Systems*, Air conditioning and refrigeration journal – The magazine of Indian Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2002.
- [7] D. Mađerić, Ž. Kondić, Z. Botak, *CO₂ kao radna tvar u suvremenim rashladnim sustavima*, Tehnički glasnik, Veleučilište u Varaždinu, 2007.
- [8] Danfoss, *Refrigeration fundamentals*, 2010.
- [9] Danfoss, *Danfoss CO₂ Gas Cooler solution with EKC326A*, 2010.
- [10] AIRAH guide, *Methods of calculating TEWI Draft v1.1*, 2011.
- [11] Željka Vuković, *Primena prirodnih rashladnih sredstava – kaskadni sistemi sa NH₃ i CO₂*, Zbornik radova 41. međunardnog kongresa o grejanju, hlađenju i klimatizaciji u Beogradu, 2010.

- [12] Alexander Chor Pachai, *Global Experience with R717 and R744 Systems*, Presentation, 2007.
- [13] Daniel Colbourne, *Opportunities for the Application of Natural Refrigerants*, Proklima – Natural Refrigerants, 2008.
- [14] Johnson Controls, *CAFP CO₂/Ammonia Freeze Package*, Katalog, 2008.
- [15] Danfoss, *Food Retail CO₂ Refrigeration Systems*, Application Handbook, 2009.
- [16] Johnson Controls, *HPO/HPC high-pressure reciprocating compressors*, Katalog, 2008.
- [17] Arash Soleimani Karimabad, *Experimental Investigations of NH₃/CO₂ cascade system for supermarket refrigeration*, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology - Stockholm, 2006.