

Utjecaj zamjene radne tvari kod orebrenog isparivača i kondenzatora na prijelaz topline odnosno rashladni učin rashladnika/dizalice topline

Darko PREBEG

Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci (Faculty of Engineering, University of Rijeka),
Vukovarska 58, HR-10000 Zagreb,
Republic of Croatia

darko.prebeg@petprom.hr

Ključne riječi

Numerička analiza
Orebreni isparivač i kondenzator
Rashladni učin
Utjecaj na prijelaz topline
Zamjena radne tvari

Keywords

Cooling efficiency
Framed evaporator and condenser
Heat transfer influence
Numerical analysis
Refrigerant retrofit

Received (primljeno): 2010-11-17

Accepted (prihvaćeno): 2011-01-28

Pregledni članak

Rad sadrži pregled rezultata utjecaja zamjene radne tvari na prijelaz topline i rashladni učin kod orebrenog isparivača i kondenzatora dizalice topline. Analiza je provedena za šest sintetičkih (freoni) i šest prirodnih radnih tvari. Kao posredni mediji prijelaza topline korišteni su zrak i voda. Numeričke analize su prikazane za režime hlađenja i grijanja odabirom promatrane domene izračuna. Uz usporedbu rezultata, dat je komentar i zaključak analize.

The influence of refrigerant retrofit by heat pump framed evaporator and condenser on the heat transfer and cooling efficiency

Subject review

The influence of refrigerant retrofit by heat pump framed evaporator and condenser on the heat transfer and cooling efficiency results is analyzed in this paper. Six syntetic (freons) and six natural working fluids have been taken into consideration. Air and water are used as well as the intermediate fluids of heat transfer. The numerical analysies are shown for cooling and heating mode by selection of calculated domain. Comparation of results has been made accompanied by commentary and final conclusions.

1. Uvod

Unutar današnjih svjetskih prilika, povezanih s problemima globalnog zagrijavanja i onečišćenja ozonskog omotača, razmatranje veličine utjecaja zamjene vrste radnih tvari na procese izmjena topline, svakako predstavlja interesantan istraživački doprinos. Kako se prvenstveno radi o masovnoj uporabi sintetičkih radnih tvari (freoni) u tehnici hlađenja (i grijanja), koje velikom mjerom nisu kemijski dovoljno brzo razgradive u atmosferi, tehnološki razvoj takvih sustava potrebno je razvijati u pravcu što sigurnijeg ekološkog statusa. Sadašnji opći trend razvoja i sve veći tehnički poticaji uvođenja prirodnih radnih tvari (amonijak, ugljični dioksid, ugljikovodici, voda, zrak) u rashladne radne procese dokaz su vrlo ozbiljnih nastojanja znanstvenih krugova što više smanjiti postojeću i spriječiti još veću globalnu ekološku katastrofu. Istraživanje i definiranje važnosti utjecaja zamjene radne tvari kod parnog procesa u orebrenom isparivaču i kondenzatoru na prijelaz topline, odnosno rashladni učin dizalice topline/rashladnika, mali je prinos takvim stručnim nastojanjima.

1.1. Općenito

Prirodna temperatura nekog tijela (T) uglavnom je viša od temperature okoline (T_{ok}) pa ono s njom nastoji uspostaviti toplinsku ravnotežu te se hladi predajući joj toplinu, a ukupni je prirast entropije (s) pritom pozitivan. Kod hlađenja tijela sa temperaturom (T_0) nižom od temperature okoline, prirast entropije bio bi negativan, toplina bi trebala prijeći s niže na višu temperaturu, što u praksi nikako nije moguće samo od sebe. Zato okolini (uz toplinu Q_0) treba dovesti i određenu toplinu (ΔQ), nastalu pretvaranjem nekog drugog oblika energije (osigurava se dodatni pozitivni prirast entropije). Neka radna tvar u isparivaču dovođenjem topline (Q_0) isparava pri konstantnoj temperaturi (T_0) i tlaku (p_0), a odvođenjem topline (Q) kondenzira (ukapljuje) u kondenzatoru kod konstantne temperature (T) i tlaka (p). Promjene agregatnih stanja u parnom kružnom procesu pritom idu po dvije izentrope i dvije izobare, koje su ujedino i izoterme. Veličina (q_0) predstavlja specifičan rashladni učin (po 1 kg), a (l) je specifični rad odnosno:

Symbols/Oznake	
A	- površina, m ² - area
c	- specifični toplinski kapacitet, Jkg ⁻¹ K ⁻¹ - specific heat capacity
d	- promjer cijevi, mm - tube diameter
H	- visina lamele, mm - fin height
k	- koeficijent prolaza topline, Wm ² K - heat conduct coefficient
L	- duljina, mm - length
p	- tlak, Pa - pressure
q	- specifični toplinski tok, Wm ⁻² - specific heat flux
s	- aksijalni razmak lamela, mm - axial fin spacing
T	- temperatura, K - temperature
w	- brzina, ms ⁻¹ - velocity
Δ	- gustoća mreže, mm - grid thick
x, y, z	- pravokutne koordinate, mm - Cartesian coordinates
α	- koeficijent prijelaza topline, Wm ⁻² K ⁻¹ - heat transfer coefficient
δ	- debljina, mm - thickness
ε	- rashladni učin, W - efficiency of cooling
Φ	- općenita značajka - general characteristic
η	- dinamički viskozitet, Pas - dynamic viscosity
λ	- koef. topl. vodljivosti, Wm ⁻¹ K ⁻¹ - thermal conductivity
ρ	- gustoća, kgm ⁻³ - density
Indices / Indeksi	
cij	- cijev - tube
lam	- lamela - fin
stj	- stjenka - wall
RT	- radna tvar - working fluid
V	- voda - water
Zr	- zrak - air
isp	- isparivač - evaporator

$$q_0 = h_1 - h_4, \quad (1)$$

$$l = (h_2 - h_1) - (h_3 - h_4) = q - q_0, \quad (2)$$

Učinkovitost rashladnog parnog procesa moguće je ocijeniti pomoću faktora hlađenja (rashladni množilac). On predstavlja omjer toplinske energije koju je rashladnik odveo iz nekog prostora ili medija i pogonske (mehaničke, električne) energije s kojom se takav proces ostvaruje. Isti je to viši (povoljniji), što je manja razlika temperatura (T_{ok} i T). Pri konstantnoj temperaturi T_0 (isparivač) faktor hlađenja je viši, što je niža temperatura T_{ok} (kondenzator). Za konstantnu temperaturu T_{ok} (kondenzator), faktor hlađenja je viši, što je viša temperatura T_0 (isparivač). Potrebni protok mase radne tvari za ostvarenje rashladnog učina (\dot{Q}_0) je:

$$M = \frac{\dot{Q}_0}{q_0}. \quad (3)$$

Takav je rashladni učin puno manji nego kod plinskih kružnih procesa. Parni je proces identičan Carnotovom pa mu je i faktor hlađenja (ε) jednak odnosno:

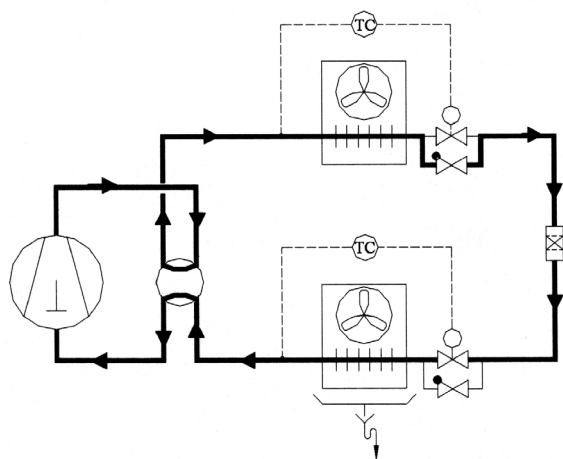
$$\varepsilon_{oc} = \frac{q_0}{l} = \frac{T_0}{T_{ok} - T_0}. \quad (4)$$

Evidentno je, kako faktor hlađenja ovisi samo o temperaturi, a ne i o vrsti radne tvari. Isto će biti dokazivano na nizu primjera zamjene radne tvari kod orebrenog isparivača i kondenzatora dizalice topline/rashladnika.

1.2. Dizalica topline/rashladnik

Francuski fizičar Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832) prvi je opisao radnju, prema njemu danas poznatu kao *Carnotov lijevokretni kružni proces*. Isti pak predstavlja teoretsku osnovu za razvoj dizalice topline i rashladnika. Povijest razvoja ovih uređaja nastavlja se

preko irskog fizičara Williama Thomsona (lord Kelvin) otkrivanjem mogućnosti povišenja temperaturne razine radne tvari dovođenjem toplote (1851.) do njemačkog izumitelja Carl Paul Gottfried von Linde, konstruktora prvog kompresijskog rashladnog uređaja s amonijakom kao radnom tvari (1877.). Suvremena dizalica toplote (engl. *heat pump*) te rashladnik (engl. *chiller*) omogućava prijenos toplinske energije iz sustava niže (toplinski izvor) u sustav više (toplinski ponor) temperaturne razine korištenjem dodatne energije (rada) pomoću lijevokretnog kružnog procesa odgovarajuće radne tvari. Svaki je rashladni uređaj ustvari dizalica toplote. Kao najčešći toplinski izvor dizalica toplote uglavnom koristi prirodni zrak iz okoline, što omogućava odbacivanje toplote tijekom hlađenja ljeti odnosno dobavu toplote za grijanje zimi. Tu su i podzemne vode, slojevi tla, sunčeva energija, otpadni zrak i voda itd. Prema toplinskom izvoru dijele se na dizalice toplote zrak-voda, zrak-zrak, voda-voda, tlo-voda itd. Prema izvoru dodatne energije mogu biti kompresijske (rad kompresora), sorpcijske (apsorpcija i adsorpcija) dovođenjem toplinske energije te Vuilleumierove (inačica sorpcijske dizalice toplote). Ovakvi uređaji, spojeni na radijatorsko ili podno grijanje, ventilokonvektore ili klima komore, omogućavaju kvalitetno vodeno, zračno ili plinsko grijanje, hlađenje i klimatizaciju raznih prostora u stambenim i poslovnim zgradama, industrijskim postrojenjima i procesima, zdravstvenim ustanovama, hotelima, trgovinama te pripreme tople sanitarne vode (PTV). Namijenjeni su za vanjsku i unutarnju ugradnju, a uglavnom koriste ekološki prihvatljive radne tvari tehnika hlađenja i grijanja (freoni R-410A, R-407C, R-134a).

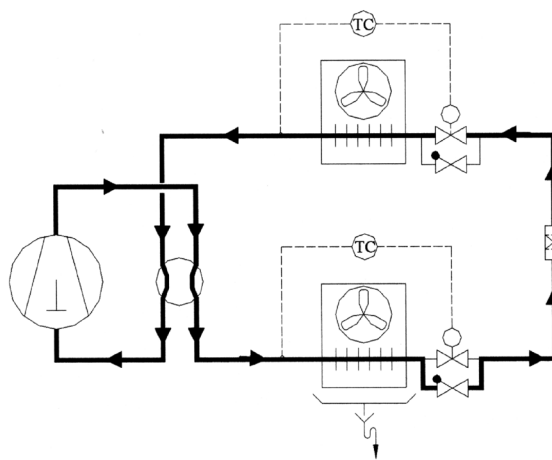


Slika 1. Dizalica toplote u režimu hlađenja

Figure 1. Heat pump in the cooling mode

Kad je dizalica toplote u sustavu hlađenja (slika 1.), za prijelaz u sustav grijanja (slika 2.) jednostavno se promijeni smjer toka radne tvari, čime isparivač (hladnjak) postaje kondenzator (grijač) i obrnuto.

Orebreni isparivač i kondenzator dizalice toplote/rashladnika najčešće se izvodi u vidu lamela (nehrđajući čelik AISI 316, aluminij) bez brtvi, zalemljenih bakrom ili niklom.



Slika 2. Dizalica toplote u režimu grijanja

Figure 2. Heat pump in the heating mode

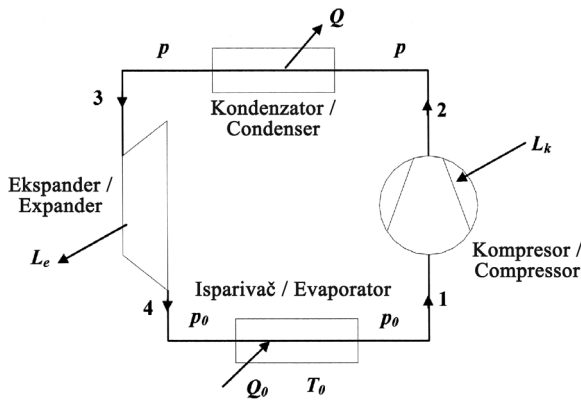
Isparivanje radne tvari se odvija u tehnološki posebno izvedenim kanalima, koje čine profilirane (orebljene) ploče. Kroz lamele s jedne strane struji posredni hlađeni medij (najčešće voda), a s druge radna tvar koja isparava. Orebljeni kondenzator (zrakom hlađen) izveden je iz aluminijskih lamela s cijevima ili prstenasto orebljenih bakrenih cijevi kojima struji radna tvar. Proces hlađenja se uglavnom provodi pri temperaturi vode na ulazu/izlazu iz isparivača 12/7 °C te temperaturi zraka okoline na ulazu u kondenzator do 35 °C. Proces grijanja se odvija pri temperaturi tople vode na izlazu do 45 °C te temperaturi vanjskog zraka 7 °C (relativna vlažnost 86 %).

1.2.1. Princip rada dizalice toplote/rashladnika

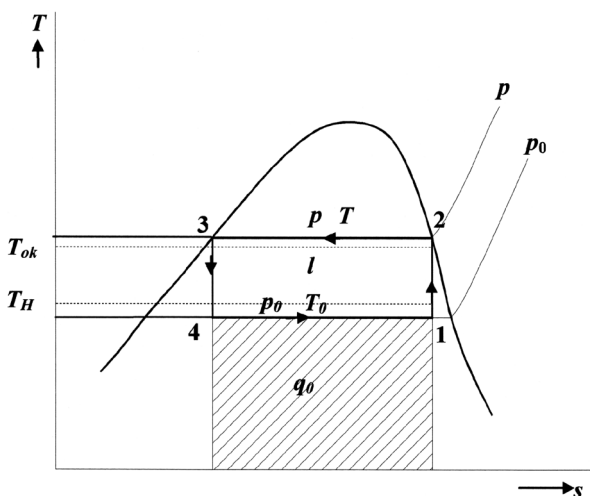
Princip rada dizalice toplote/rashladnika zasniva se na lijevokretnom kružnom procesu radne tvari, koja bakrenim cijevima kruži u zatvorenom sustavu, stalno mijenjajući svoje agregatno stanje dovođenjem i odvođenjem toplote. Uređaj takav naziv ima upravo zbog termodinamičke sposobnosti lijevokretnih rashladnih procesa, da trošenjem energije ostvare podizanje temperature s niže na višu razinu. Postoje slijedeće vrste radnih procesa:

- prijenosom toplote s niske na višu temperaturu okoline, vrši se rashladni proces (rashladnik)
- prijenosom toplote s temperature okoline na višu temperaturu, vrši se proces grijanja (dizalica toplote)
- prijenosom toplote s niže temperature okoline na višu, vrši se ogrijevno-rashladni proces (dizalica toplote/rashladnik)

Osnovni dijelovi sustava dizalice topline/rashladnika su kompresor, isparivač, ekspanzioni ventil i kondenzator (slika 3.). Isparivač i kondenzator su posebno izvedeni izmjenjivači topline, kojima se ostvaruje potrebni prijelaz topline unutar parnih kružnih procesa hlađenja ili grijanja [2].

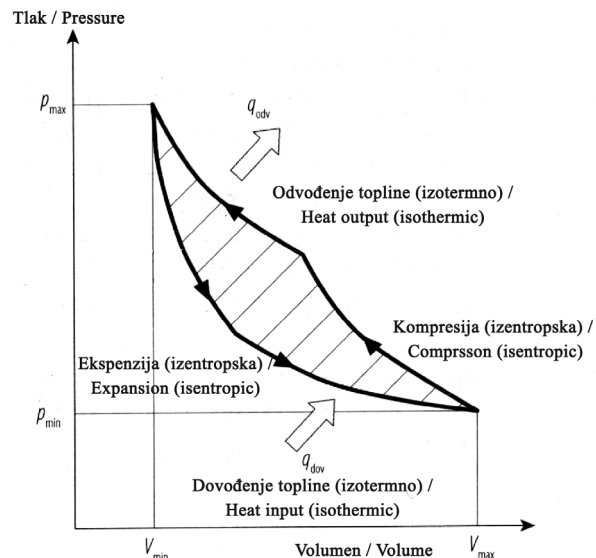


Slika 3. Shema rada dizalice topline/rashladnika
Figure 3. Heat pump/chiller working process



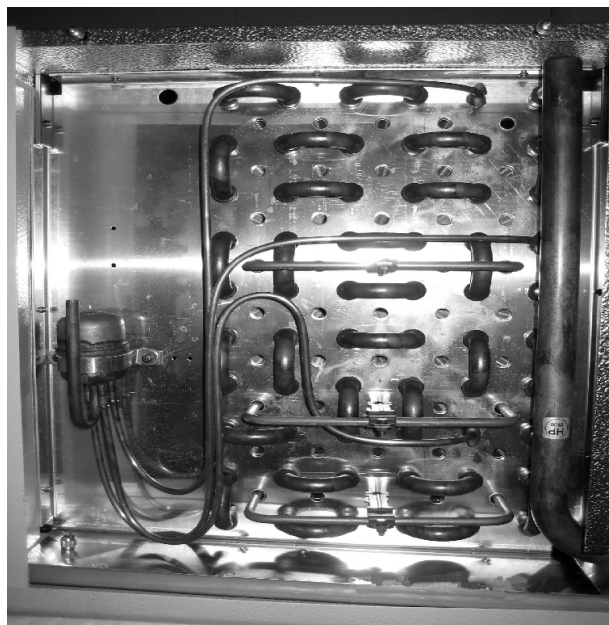
Slika 4. T, s - dijagram Carnotovog procesa
Figure 4. T, s - diagram of Carnot process

Dizalica topline/rashladnik radi s radnim tvarima čiji procesi padaju u zasićeno područje. Dovođenje topline je pri konstantnoj temperaturi i tlaku (T_0 , p_0), a odvođenje kod (T , p). To je praktično moguće, jer su kod jednokomponentnih radnih tvari u zasićenom području izoterme ujedino i izobare, a između temperatura T_0 i T unutar zasićenog područja, moguće je provesti lijevakretni kružni proces.



Slika 5. p, v - dijagram Carnotovog procesa
Figure 5. p, v - diagram of Carnot process

Promatrano u T,s-dijagramu (slika 4) i p,v-dijagramu (slika 5.), kompresor usisava zasićenu paru stanja (1) pri tlaku isparavanja radne tvari (izobara) te je komprimira (povećava radni tlak i temperaturu) do suhozasićenog stanja (2). Plinovita radna tvar se uvodi u kondenzator, gdje se u bakrenim cijevima pri konstantnoj temperaturi (T) i tlaku (p) ukapljuje (kondenzira) do stanja (3), odvođenjem topline u okolinu zrakom (aksijalni ventilatori), koji se pritom prolaskom kroz vanjske lamele (aluminij) kondenzatora zagrijava. Vruće pare i kapljice radna tvar odvođe se prema prigušnom ventilu (termoekspanzioner), gdje radna tvar prelazi iz područja visokog tlaka kondenzacije do stanja niskog isparivačkog tlaka (4), zbog čega ekspanzira i isparava. Radna tvar u isparivaču isparava do stanja (1) apsorbirajući toplinu te hladi okolinu (posredni medij, zrak iz prostora) kroz što veću površinu izmjene topline, izrađenu od mnogobrojnih lamela, cjevnih prstenova ili gusto postavljenih cijevi. U kompresoru se radna tvar komprimira od tlaka isparavanja na tlak kondenzacije s ciljem podizanja temperature iznad one u okolini. Kada se postigne potrebna temperatura, započinje proces izmjene topline. Zamjenom mjesta isparivača i kondenzatora, dobije se obrnuti proces (prostor se grije, okolina hladi). Isto se u praksi rješava ugradnjom preklopnog četveroputnog ventil, koji omogućava strujanje radne tvari u oba smjera. Kako bi direktno usisavanje zasićene pare radne tvari kompresoru stvaralo niz tehničkih problema, uobičajeno se vrši dodatno pothlađivanje ukapljene radne tvari pri tlaku (p), što ujedino povećava i faktor hlađenja (rashladni množilac).

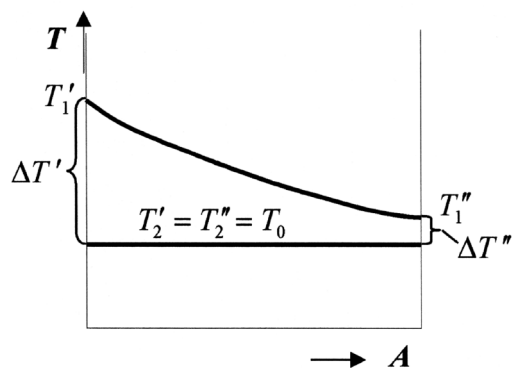


Slika 6. Lamelle i cijevi isparivača, GEA

Figure 6. Evaporator fins and tubes

1.3. Isparivači

Kako bi se toplina u rashladnom procesu mogla prenijeti s niže na višu temperaturu, potrebna su najmanje dva izmjenjivača topline. Jedan omogućava prijelaz topline s hladnog tijela na radnu tvar procesa, a drugi predaju toplinu s radne tvari na okoliš. Kod parnih procesa radna tvar pri prolasku kroz takve izmjenjivače mijenja agregatno stanje pa se tehnički govori o posebnim toplinskim uređajima, isparivaču i kondenzatoru. Temperatura (T_1') kod isparivača predstavlja ulaznu temperaturu hladnog medija (zrak u prostoru), a kod kondenzatora ulaznu temperaturu medija, koji hladi radnu tvar (zrak iz okoline). Da bi se postigao čim povoljniji faktor hlađenja treba temperatura kondenzacije biti što niža, a temperatura isparivanja što viša, dakle $\Delta T'$ treba biti što manji (slika 7).



Slika 7. Isparavanje

Figure 7. Evaporation

Poboljšanje faktora hlađenja može se postići većom površinom izmjenjivača, povećanjem protoka tvari za prijenos topline, koja u kondenzatoru hladi radnu tvar te povećanjem protoka hladene tvari u isparivaču ili pak povećanjem koeficijenta prijelaza topline. Uređaj s većim faktorom hlađenja trošiti će manje snage za postizavanje istog rashladnog učina (niži troškovi pogona). Površine pak izmjenjivača, a time i troškovi njihove dobave biti će manji, ako su srednje razlike temperatura veće.

1.3.1. Prijelaz topline kod isparavanja

U isparivaču se odvija proces izmjene topline isparavanjem radne tvari, koja kroz stijenke pločastih lamela ili prstenasto orebrenih cijevi prima (apsorbira) toplinu od posrednog medija (ili okoline) te ga pritom hladi. Posredni medij (voda, zrak) izlazi iz isparivača s nižom temperaturom, dok radna tvar (freoni) prelazi u drugo agregatno stanje (zasićena para i kapljice vlage) uz $T=const.$ i $p=const.$ Isparavanje se može odvijati na ogrjevnoj površini u velikom volumenu (u posudi) ili u cijevima, slobodnim (prirodno) ili prisilnim strujanjem radne tvari [1].

Kod isparavanja u velikom volumenu, koeficijent prijelaza topline ovisi o toplinskim svojstvima radne tvari (gustoća, specifična toplota, površinski napon), hrapavosti površine isparivača u dodiru s radnom tvari, tlaku i temperaturi zasićenja, toplinskom toku, različite temperature ogrjevne stijenke i radne tvari, geometrijskom obliku površine isparivača itd. Kod cijevnih snopova, samo na donjim redovima promjena koeficijenta prijelaza topline ima određenu karakteristiku, a na gornjim redovima koeficijent prijelaza topline je veći zbog intenzivnijeg strujanja dvofaznog toka radne tvari. Povećanje ukupnog koeficijenta prijelaza topline ovisi o broju redova cijevi po visini, rasporedu i dimenzijama, vrsti radne tvari, temperaturi isparavanja i toplinskom toku. Isparavanje strujanjem radne tvari kroz cijevi povezano je s nizom različitih termomehanizama prijelaza topline, u ovisnosti o promjeni sadržaja pare i odgovarajućem režimu strujanja, gustoći masenog protoka radne tvari kroz poprečni presjek cijevi m , kg/m^2s te gustoći toplinskog toka na unutrašnjoj stijenci cijevi. Kako je koeficijent prijelaza topline između stijenke i kapljevine veći nego između stijenke i pare, cijela unutrašnja stijenka treba biti u dodiru s kapljevnom.

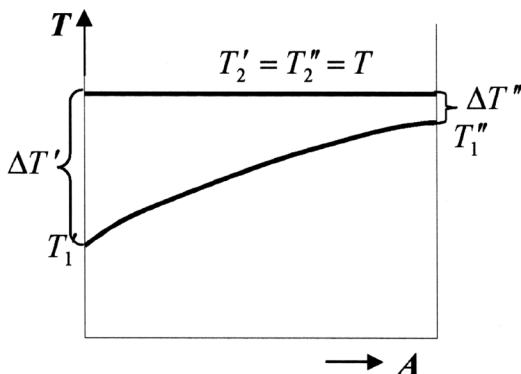
U isparivačima za hlađenje zraka, na cijevima i lamelama formira se sloj inja, čim je temperatura tih površina niža od $0^\circ C$. To je nestacionaran proces periodičkog ponavljanja između dvaju prekida rada rashladnog uređaja, a koji se provodi upravo radi odležavanja. Složen je i slučaj prijelaza topline na strani hladene kapljevine u isparivačima za hlađenje kapljevine, zbog različitih mogućnosti prolaska kapljevine kroz zazoru mimo cijevi, promjene smjera toka kapljevine u odnosu na cijevi i sl [1-2].

1.4. Kondenzatori

Kondenzator je vodom, zrakom ili kombinirano hlađeni izmjenjivač topline za odvođenje topline radnoj tvari u vrućem parnom agregatnom stanju, čime je kondenzira (ukapljuje) i pri konstantnoj temperaturi (T) i tlaku (p) pretvara u tekuće stanje, dodatno se pothlađujući. Prigušni ventil privodi radnu tvar s višeg tlaka kondenzacije na niži tlak isparavanja.

U kondenzatoru se odvija proces izmjene topline ukapljivanjem (kondenzacijom) radne tvari, koja kroz stijenke lamele s cijevima predaje toplinu svojoj okolini (zrak, voda). Površine za prijenos topline mogu biti glatke cijevi, orebrene lamelne cijevi ili profilirane ploče. Na kućište se ugrađuju ventilatori zbog prisilne cirkulacije, a time i povećanja koeficijenta prijelaza topline. Ventilatori mogu biti aksijalni i radijalni.

Radna tvar (uglavnom freoni, rijetko amonijak) protječe kroz cijevi promjera 6-20 mm. Koeficijenti prolaza topline svedeni na vanjsku površinu kreću se oko $k = 15-30$, W/m^2K , a zagrijavanje zraka $\Delta T' = 3-10$, K dok je temperatura kondenzacije za $\Delta T'' = 12-18$ K viša od ulazne temperature zraka [1-2].



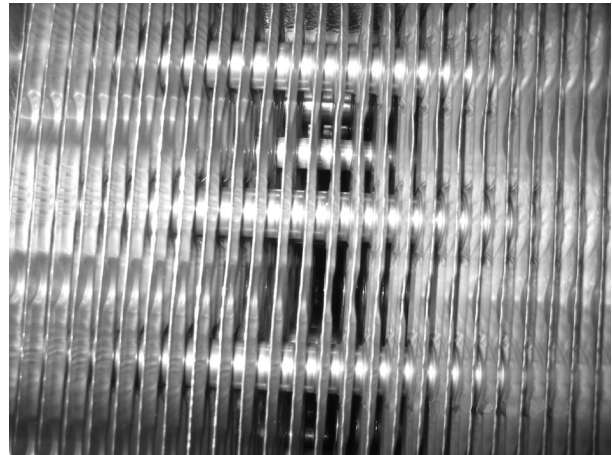
Slika 8. Kondenzacija

Figure 8. Condensation

2. Postavljanje matematičkog modela

2.1. Određivanje domene proračuna

Za točno određivanje potrebne količine izmijenjene topline te iskoristivost (učinkovitost) isparivača i kondenzatora dizalice topline/rashladnika, potrebno je poznavati točne raspodjele temperatura na ulazu i izlazu iz neke promatrane domene, koju čini odabrani segment presjeka bakrene cijevi između dviju aluminijskih pločastih lamela. Lamelle su debljine $\delta = 0,5$ mm, međusobnog standardnog razmaka $s = 4-8$ mm (ovisno o tipu) i visine $H = 100$ mm. Cijev je unutarnjeg promjera $d = 10$ mm, debljine stijenke $\delta = 1$ mm, na unaprijed definiranoj izračunskoj duljini $L = 30$ mm (slika 9.).



Slika 9. Segment lamela i cijevi isparivača, GEA

Figure 9. Detail of evaporator fins and tubes

Izmjena topline između dvaju posrednih radnih medija (radna tvar-zrak ili radna tvar-voda) odvija se konvekcijskim prijelazom topline s toplijeg fluida na površinu granične stijenke, provođenjem kroz razdjelnu stijenku i konvekcijskim prijelazom topline s površine stijenke na hladniji fluid [3-4].

2.2. Diferencijalne jednadžbe očuvanja

Matematički model, kojim je opisano prisilno, stacionarno, laminarno, nestišljivo (Newtonovski fluid s konstantnim fizikalnim osobinama) strujanje radne tvari (fluida) i prijenos topline sa (na) posredne medije u orebrenom lamelnom isparivaču i kondenzatoru dizalice topline/rashladnika za trodimenzijski (3D) slučaj, čine slijedeće diferencijalne jednadžbe očuvanja:

a) Područje proračuna isparivača – radna tvar (RT).

- Jednadžbe očuvanja za:

$$\rho_{RT} = \text{const.}; \lambda_{RT} = \text{const.}$$

$$\eta_{RT} = \text{const.}; c_{RT} = \text{const.}$$

- jednadžba očuvanja mase:

$$\rho_{RT} \left(\frac{\partial w_{RTx}}{\partial x} + \frac{\partial w_{RTy}}{\partial y} + \frac{\partial w_{RTz}}{\partial z} \right) = 0, \quad (5)$$

- jednadžbe očuvanja količine gibanja:

$$\rho_{RT} \left(w_{RTx} \frac{\partial w_{RTx}}{\partial x} + w_{RTy} \frac{\partial w_{RTx}}{\partial y} + w_{RTz} \frac{\partial w_{RTx}}{\partial z} \right) =$$

$$x \dots - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta_{RT} \left(\frac{\partial^2 w_{RTx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{RTx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{RTx}}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{RT} \left(w_{RTx} \frac{\partial w_{RTy}}{\partial x} + w_{RTy} \frac{\partial w_{RTy}}{\partial y} + w_{RTz} \frac{\partial w_{RTy}}{\partial z} \right) = \\ y \dots & - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta_{RT} \left(\frac{\partial^2 w_{RTy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{RTy}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{RTy}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{RT} \left(w_{RTx} \frac{\partial w_{RTz}}{\partial x} + w_{wy} \frac{\partial w_{RTz}}{\partial y} + w_{wz} \frac{\partial w_{RTz}}{\partial z} \right) = \\ z \dots & - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta_{RT} \left(\frac{\partial^2 w_{RTz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{RTz}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{RTz}}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

- jednađzba očuvanja energije:

$$\begin{aligned} & \rho_{RT} \cdot c_{RT} \left(w_{RTx} \frac{\partial T_{RT}}{\partial x} + w_{RTy} \frac{\partial T_{RT}}{\partial y} + w_{RTz} \frac{\partial T_{RT}}{\partial z} \right) = \\ & = \lambda_{RT} \left(\frac{\partial^2 T_{RT}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{RT}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{RT}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

b) Područje proračuna isparivača – voda (v)

- jednađzbe očuvanja za:

$$\begin{aligned} \rho_v &= \text{const.}; \lambda_v = \text{const.} \\ \eta_v &= \text{cinst.}; c_v = \text{const.} \end{aligned}$$

- jednađzba očuvanja mase:

$$\rho_v \left(\frac{\partial w_{vx}}{\partial x} + \frac{\partial w_{vy}}{\partial y} + \frac{\partial w_{vz}}{\partial z} \right) = 0, \quad (10)$$

- jednađzbe očuvanja količine gibanja:

$$\begin{aligned} & \rho_v \left(w_{vx} \frac{\partial w_{vx}}{\partial x} + w_{vy} \frac{\partial w_{vx}}{\partial y} + w_{vz} \frac{\partial w_{vx}}{\partial z} \right) = \\ x \dots & - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta_v \left(\frac{\partial^2 w_{vx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{vx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{vx}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \rho_v \left(w_{vx} \frac{\partial w_{vy}}{\partial x} + w_{vy} \frac{\partial w_{vy}}{\partial y} + w_{vz} \frac{\partial w_{vy}}{\partial z} \right) = \\ y \dots & - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta_v \left(\frac{\partial^2 w_{vy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{vy}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{vy}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \rho_v \left(w_{vx} \frac{\partial w_{vz}}{\partial x} + w_{vy} \frac{\partial w_{vz}}{\partial y} + w_{vz} \frac{\partial w_{vz}}{\partial z} \right) = \\ z \dots & - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta_v \left(\frac{\partial^2 w_{vz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{vz}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{vz}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

- jednađzba očuvanja energije:

$$\begin{aligned} & \rho_v \cdot c_v \left(w_{vx} \frac{\partial T_v}{\partial x} + w_{vy} \frac{\partial T_v}{\partial y} + w_{vz} \frac{\partial T_v}{\partial z} \right) = \\ & = \lambda_v \left(\frac{\partial^2 T_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_v}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

e) Područje proračuna isparivača – lamela (lam)

- jednađzba očuvanja energije za

$$\begin{aligned} & \lambda_{lam} = \text{const.} \\ \lambda_{lam} \left(\frac{\partial^2 T_{lam}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{lam}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{lam}}{\partial z^2} \right) &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

d) Područje proračuna isparivača – stjenka (stj)

- jednađzba očuvanja energije za

$$\begin{aligned} & \lambda_{stj} = \text{const.} \\ \lambda_{stj} \left(\frac{\partial^2 T_{stj}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{stj}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{stj}}{\partial z^2} \right) &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

e) Područje proračuna kondenzatora – zrak (zr)

- jednađzbe očuvanja za:

$$\begin{aligned} \rho_{zr} &= \text{const.}; \lambda_{zr} = \text{const.} \\ \eta_{zr} &= \text{cinst.}; c_{zr} = \text{const.} \end{aligned}$$

- jednađzba očuvanja mase:

$$\rho_{zr} \left(\frac{\partial w_{zrx}}{\partial x} + \frac{\partial w_{zry}}{\partial y} + \frac{\partial w_{zrz}}{\partial z} \right) = 0, \quad (17)$$

- jednađzbe očuvanja količine gibanja:

$$\begin{aligned} & \rho_{zr} \left(w_{zrx} \frac{\partial w_{zrx}}{\partial x} + w_{zry} \frac{\partial w_{zrx}}{\partial y} + w_{zrz} \frac{\partial w_{zrx}}{\partial z} \right) = \\ x \dots & - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta_{zr} \left(\frac{\partial^2 w_{zrx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{zrx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{zrx}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{zr} \left(w_{zrx} \frac{\partial w_{zry}}{\partial x} + w_{zry} \frac{\partial w_{zry}}{\partial y} + w_{zrz} \frac{\partial w_{zry}}{\partial z} \right) = \\ y \dots & - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta_{zr} \left(\frac{\partial^2 w_{zry}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{zry}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{zry}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{zr} \left(w_{zrx} \frac{\partial w_{zrz}}{\partial x} + w_{zry} \frac{\partial w_{zrz}}{\partial y} + w_{zrz} \frac{\partial w_{zrz}}{\partial z} \right) = \\ z \dots & - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta_{zr} \left(\frac{\partial^2 w_{zrz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{zrz}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{zrz}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (20)$$

- jednađzba očuvanja energije:

$$\begin{aligned} & \rho_{zr} \cdot c_{zr} \left(w_{zrx} \frac{\partial T_{zr}}{\partial x} + w_{zry} \frac{\partial T_{zr}}{\partial y} + w_{zrz} \frac{\partial T_{zr}}{\partial z} \right) = \\ & = \lambda_{zr} \left(\frac{\partial^2 T_{zr}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{zr}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{zr}}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (21)$$

f) Područje proračuna kondenzatora – radna tvar (RT)

- jednađzbe očuvanja za:

$$\begin{aligned} \rho_{RT} &= \text{const.}; \lambda_{RT} = \text{const.} \\ \eta_{RT} &= \text{cinst.}; c_{RT} = \text{const.} \end{aligned}$$

- jednadžba očuvanja mase:

$$\rho_{RT} \left(\frac{\partial w_{RTx}}{\partial x} + \frac{\partial w_{RTy}}{\partial y} + \frac{\partial w_{RTz}}{\partial z} \right) = 0, \quad (22)$$

- jednadžbe očuvanja količine gibanja:

$$\rho_{RT} \left(w_{RTx} \frac{\partial w_{RTx}}{\partial x} + w_{RTy} \frac{\partial w_{RTx}}{\partial y} + w_{RTz} \frac{\partial w_{RTx}}{\partial z} \right) =$$

$$x \dots - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta_{RT} \left(\frac{\partial^2 w_{RTx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{RTx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{RTx}}{\partial z^2} \right), \quad (23)$$

$$\rho_{RT} \left(w_{RTx} \frac{\partial w_{RTy}}{\partial x} + w_{RTy} \frac{\partial w_{RTy}}{\partial y} + w_{RTz} \frac{\partial w_{RTy}}{\partial z} \right) =$$

$$y \dots - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta_{RT} \left(\frac{\partial^2 w_{RTy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{RTy}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{RTy}}{\partial z^2} \right), \quad (24)$$

$$\rho_{RT} \left(w_{RTx} \frac{\partial w_{RTz}}{\partial x} + w_{wy} \frac{\partial w_{RTz}}{\partial y} + w_{wz} \frac{\partial w_{RTz}}{\partial z} \right) =$$

$$z \dots - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta_{RT} \left(\frac{\partial^2 w_{RTz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{RTz}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_{RTz}}{\partial z^2} \right), \quad (25)$$

- jednadžba očuvanja energije:

$$\rho_{RT} \cdot c_{RT} \left(w_{RTx} \frac{\partial T_{RT}}{\partial x} + w_{RTy} \frac{\partial T_{RT}}{\partial y} + w_{RTz} \frac{\partial T_{RT}}{\partial z} \right) =$$

$$(26) = \lambda_{RT} \left(\frac{\partial^2 T_{RT}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{RT}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{RT}}{\partial z^2} \right),$$

g) Područje proračuna kondenzatora – lamela (lam)

- Jednadžba očuvanja energije za:

$$\lambda_{lam} = \text{const.}$$

$$\lambda_{lam} \left(\frac{\partial^2 T_{lam}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{lam}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{lam}}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (27)$$

h) Područje proračuna kondenzatora – stjenka (stj)

- Jednadžba očuvanja energije za:

$$\lambda_{stj} = \text{const.}$$

$$\lambda_{stj} \left(\frac{\partial^2 T_{stj}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{stj}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{stj}}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (28)$$

2.3. Određivanje rubnih uvjeta

2.3.1. Isparivač

$$\text{Za } x = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < z < \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right),$$

$$w_{Vx} = 0; \quad w_{Vy} = 0; \quad w_{Vz} = 0; \quad \frac{\partial T_V}{\partial x} = 0,$$

$$\text{Za } x = c, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < z < \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right),$$

$$w_{Vx} = 0; \quad w_{Vy} = 0; \quad w_{Vz} = 0; \quad \frac{\partial T_V}{\partial x} = 0,$$

$$\text{Za } z = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

radna tvar-ulaz:

$$w_{RTx} = w_{RTulaz}; \quad w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad T_{RT} = T_{RTulaz}$$

$$\text{Za } z = a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

radna tvar-izlaz:

$$\frac{\partial w_{RTx}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w_{RTy}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w_{RTz}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial T_{RT}}{\partial z} = 0$$

$$\text{Za } x = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right) < z < \left(\frac{a}{2} + \frac{d_{cj}}{2} + \delta_{stj} \right),$$

voda-ulaz:

$$w_{Vx} = w_{Vulaz}; \quad w_{Vy} = 0; \quad w_{Vz} = 0; \quad T_V = T_{Vulaz}$$

$$\text{Za } x = c, \quad 0 \leq y \leq b, \quad \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right) < z < \left(\frac{a}{2} + \frac{d_{cj}}{2} + \delta_{stj} \right),$$

voda-izlaz:

$$\frac{\partial w_{Vx}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial w_{Vy}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial w_{Vz}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T_V}{\partial x} = 0$$

$$\text{Za } z = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \frac{\partial T_{RT}}{\partial z} = 0$$

$$\text{Za } z = a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \frac{\partial T_{RT}}{\partial z} = 0$$

Poddomene:

$$\text{Za } x = \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right), \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < z < \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right),$$

radna tvar-lamela:

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \lambda_{RT} \frac{\partial T_{RT}}{\partial x} = \lambda_{lam} \frac{\partial T_{lam}}{\partial x}$$

$$\text{Za } x = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < z < \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right),$$

radna tvar-stjenka:

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \alpha_{RT} (T_{RT} - T_{stj}) = \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial z}$$

stjenka-voda:

$$w_{Vx} = 0; \quad w_{Vy} = 0; \quad w_{Vz} = 0; \quad \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial z} = \alpha_V (T_V - T_{stj})$$

$$\text{Za } z = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

radna tvar-lamela:

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \lambda_{RT} \frac{\partial T_{RT}}{\partial z} = \lambda_{lam} \frac{T_{lam}}{\partial z}$$

$$\text{Za } z = \left(\frac{a}{2} + \frac{d_{cj}}{2} + \delta_{stj} \right), \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

voda-stjenka:

$$w_{Vx} = 0; \quad w_{Vy} = 0; \quad w_{Vz} = 0; \quad \alpha_V (T_V - T_{stj}) = \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial z}$$

stjenka-radna tvar:

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial z} = \alpha_{RT} (T_{RT} - T_{stj})$$

$$\text{Za } y = 0, \quad 0 \leq x \leq c, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$\frac{\partial \varphi_{RT}}{\partial y} = 0 \text{ odnosno } \frac{\partial w_{RTx}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial w_{RTz}}{\partial y} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad \frac{\partial T_{RT}}{\partial y} = 0$$

$$\text{Za } y = \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right), \quad 0 \leq x \leq c, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \lambda_{RT} \frac{\partial T_{RT}}{\partial y} = \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial y}$$

$$\text{Za } y = \left(\frac{a}{2} + \frac{d_{cj}}{2} + \delta_{stj} \right), \quad 0 \leq x \leq c, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$w_{Vx} = 0; \quad w_{Vy} = 0; \quad w_{Vz} = 0; \quad \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial y} = \lambda_V \frac{\partial T_V}{\partial y}$$

$$\text{Za } y = b, \quad 0 \leq x \leq c, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$\frac{\partial \varphi_{RT}}{\partial y} = 0 \text{ odnosno } \frac{\partial w_{RTx}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial w_{RTz}}{\partial y} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad \frac{\partial T_{RT}}{\partial y} = 0$$

2.3.2. Kondenzator

$$\text{Za } x = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < z < \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right),$$

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \frac{\partial T_{RT}}{\partial x} = 0$$

$$\text{Za } x = c, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < z < \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right),$$

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \frac{\partial T_{RT}}{\partial x} = 0$$

$$\text{Za } z = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

zrak-ulaz:

$$w_{ZRx} = w_{ZRulaz}; \quad w_{ZRy} = 0; \quad w_{ZRz} = 0; \quad T_{ZR} = T_{ZRulaz}$$

$$\text{Za } z = a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

zrak-izlaz:

$$\frac{\partial w_{ZRx}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w_{ZRy}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w_{ZRz}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial T_{ZR}}{\partial z} = 0$$

$$\text{Za } x = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right) < z < \left(\frac{a}{2} + \frac{d_{cj}}{2} + \delta_{stj} \right),$$

radna tvar-ulaz:

$$w_{RTx} = w_{RTulaz}; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad T_{RT} = T_{RTulaz}$$

$$\text{Za } x = c, \quad 0 \leq y \leq b, \quad \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right) < z < \left(\frac{a}{2} + \frac{d_{cj}}{2} + \delta_{stj} \right),$$

radna tvar-izlaz:

$$\frac{\partial w_{RTx}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial w_{RTy}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial w_{RTz}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T_{RT}}{\partial x} = 0$$

$$\text{Za } z = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

$$w_{ZRx} = 0; \quad w_{ZRy} = 0; \quad w_{ZRz} = 0; \quad \frac{\partial T_{ZR}}{\partial z} = 0$$

$$\text{Za } z = a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

$$w_{ZRx} = 0; \quad w_{ZRy} = 0; \quad w_{ZRz} = 0; \quad \frac{\partial T_{ZR}}{\partial z} = 0$$

Poddomene:

$$\text{Za } x = \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right), \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < z < \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right),$$

zrak-lamela:

$$w_{ZRx} = 0; \quad w_{ZRy} = 0; \quad w_{ZRz} = 0; \quad \lambda_{ZR} \frac{\partial T_{ZR}}{\partial x} = \lambda_{lam} \frac{T_{lam}}{\partial x}$$

$$\text{Za } x = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < z < \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right),$$

zrak-stjenka:

$$w_{ZRx} = 0; \quad w_{ZRy} = 0; \quad w_{ZRz} = 0; \quad \alpha_{ZR} (T_{ZR} - T_{stj}) = \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial z}$$

stjenka-radna tvar:

$$w_{RTx} = 0; \quad w_{RTy} = 0; \quad w_{RTz} = 0; \quad \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial z} = \alpha_{RT} (T_{RT} - T_{stj})$$

$$\text{Za } z = 0, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

zrak-lamela:

$$w_{ZR_x} = 0; \quad w_{ZR_y} = 0; \quad w_{ZR_z} = 0; \quad \lambda_{ZR} \frac{\partial T_{ZR}}{\partial z} = \lambda_{lam} \frac{T_{lam}}{\partial z}$$

$$\text{Za } z = \left(\frac{a}{2} + \frac{d_{cj}}{2} + \delta_{stj} \right), \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 < x < \left(\frac{c}{2} + \frac{\delta_{lam}}{2} \right),$$

radna tvar-stjenka:

$$w_{RT_x} = 0; \quad w_{RT_y} = 0; \quad w_{RT_z} = 0; \quad \alpha_{RT} (T_{RT} - T_{stj}) = \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial z}$$

stjenka-zrak:

$$w_{ZR_x} = 0; \quad w_{ZR_y} = 0; \quad w_{ZR_z} = 0; \quad \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial x} = \alpha_{ZR} (T_{ZR} - T_{stj})$$

$$\text{Za } y = 0, \quad 0 \leq x \leq c, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$\frac{\partial \phi_{ZR}}{\partial y} = 0 \text{ odnosno } \frac{\partial w_{ZR_x}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial w_{ZR_z}}{\partial y} = 0; \quad w_{ZR_y} = 0; \quad \frac{\partial T_{ZR}}{\partial y} = 0$$

$$\text{Za } y = \left(\frac{a}{2} - \frac{d_{cj}}{2} - \delta_{stj} \right), \quad 0 \leq x \leq c, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$w_{ZR_x} = 0; \quad w_{ZR_y} = 0; \quad w_{ZR_z} = 0; \quad \lambda_{ZR} \frac{\partial T_{ZR}}{\partial y} = \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial y};$$

$$\text{Za } y = \left(\frac{a}{2} + \frac{d_{cj}}{2} + \delta_{stj} \right), \quad 0 \leq x \leq c, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$w_{RT_x} = 0; \quad w_{RT_y} = 0; \quad w_{RT_z} = 0; \quad \lambda_{stj} \frac{\partial T_{stj}}{\partial y} = \lambda_{RT} \frac{\partial T_{RT}}{\partial y};$$

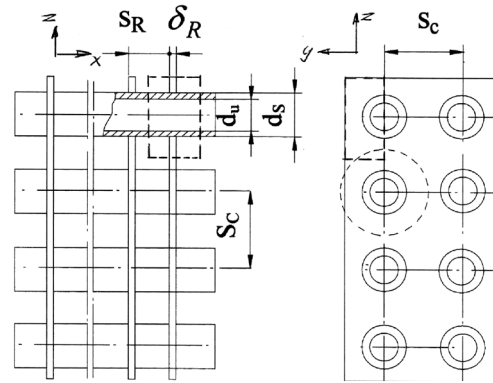
$$\text{Za } y = b \quad 0 \leq x \leq c, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$\frac{\partial \phi_{ZR}}{\partial y} = 0 \text{ odnosno } \frac{\partial w_{ZR_x}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial w_{ZR_z}}{\partial y} = 0; \quad w_{ZR_y} = 0; \quad \frac{\partial T_{ZR}}{\partial y} = 0$$

3. Numeričko rješavanje

3.1. Crtanje geometrije i umrežavanje domene

Postavljanjem matematičkog modela s osnova određivanja diferencijalnih jednadžbi očuvanja i rubnih uvjeta promatranih domena orebrenih isparivača i kondenzatora dizalice topline/rashladnika, postignuti su svi potrebni parametri za izračunavanje traženih korelacija utjecaja promjene vrste radnih tvari na prijelaz topline temeljem određivanja izlaznih temperatura.



Slika 10. Shema domene proračuna

Figure 10. Detail of calculation domain

Danas se takav izračun vrši uporabom specijaliziranih komercijalnih računalnih programa, kojima prethodi odgovarajuće crtanje geometrije i umrežavanja promatrane proračunske domene (program Gambit), koja ustvari predstavlja dio orebrenog isparivača i kondenzatora dizalice topline/rashladnika [3-4]. Pritom se smatra kako se toplinske pojave ponavljaju unutar svih ostalih jednakih djelova uređaja (slika 10.). Umrežavanje tako nacrtane geometrije promatrane domene izvršeno je korištenjem hibridne mreže, pri čemu je ista oko lamele i cijevi (najveći gradijenti temperatura i brzina) velike gustoće ($\Delta = 1$ mm), a onaj dio domene na većoj udaljenosti umrežen je s manjom gustoćom ($\Delta = 2,5$ mm).

3.2. Numerički postupak rješavanja

Nakon izrade geometrije i umrežavanja promatrane domene pristupljeno je numeričkom rješavanju metodom kontrolnih volumena, uporabom specijaliziranog komercijalnog računalnog programa Fluent. Promatrana domena proračuna se podijeli na mnogo manjih djelova te se vrši integracija diferencijalnih jednadžbi očuvanja po kontrolnim volumenima, čime se dobiva sustav diskretiziranih algebarskih jednadžbi, rješivih iteracijskim postupkom. Za diskretizaciju konveksijsko-difuzijskih jednadžbi korištena je shema diskretizacije UPWIND, a za povezivanje polja tlakova i brzina algoritam SIMPLE. Konveksijska izmjena topline između radnih tvari, posrednih medija te unutarnje površine stjenki lamele i cijevi promatrana je u kontekstu unaprijed zadanih i konstantnih ulaznih temperatura za režime hlađenja odnosno grijanja.

4. Utjecaj zamjene radne tvari

Numerički postupak rješavanja primijenjen je na ciljano odabranoj domeni orebrenog cijevnog isparivača i kondenzatora s lamelom (slika 10.) od aluminijske (λ = 202,4 W/mK) i cijevi iz bakra (λ = 387,6 W/mK). Temperature stjenke lamele i cijevi uvrštavane su kao konstantne odnosno jednake odabranoj ulaznoj temperaturi posrednih medija, zraka $T_{zr} = 7 \text{ °C}$ (280,15 K) kod kondenzatora odnosno vode $T_v = 12 \text{ °C}$ (285,15 K) kod isparivača dizalice topline/rashladnika. Ulazne brzine posrednih medija, zraka su $w_z = 0,05 \text{ m/s}$, vode $w_v = 0,001 \text{ m/s}$, a radne tvari prosiječno $w_{RT} = 0,01 \text{ m/s}$. Postupak numeričkog izračuna računalnim paketom Fluent proveden je višekratno, za ukupno šest različitih radnih tvari iz praktične uporabe kod dizalica topline/rashladnika te četiri različite ulazne temperature posrednog medija u režimu hlađenja i četiri u režimu grijanja [5].

Tablica 1. Fizikalne osobine radne tvari – kondenzator (režim grijanja)

Table 1. Working fluid physical characteristics – condenser (heating mode)

T_{RTul} , °C	ρ , m ³ /kg	C_p , J/kg K	λ , W/m K	η , (Pas) x e-04
R-22 26	1186.7	1261	0.0832	1.639
34	1154.3	1302	0.0796	1.496
42	1119.6	1353	0.0760	1.361
58	1041.3	1511	0.0686	1.107
R-12 26	1307.4	991	0.0668	1.890
34	1277.6	1014	0.0641	1.735
42	1246.3	1040	0.0614	1.590
58	1177.5	1111	0.0560	1.322
R-134a 26	1202.9	1429	0.0807	1.954
34	1171.6	1466	0.0773	1.766
42	1138.2	1510	0.0739	1.592
58	1063.2	1638	0.0670	1.279
R-152a 26	896.9	1805	0.0975	1.613
34	876.0	1848	0.0942	1.470
42	854.1	1898	0.0908	1.340
58	805.9	2030	0.0842	1.755
R-407C 26	1149.9	1517	0.0911	1.592
34	1123.0	1557	0.0879	1.469
42	1085.5	1622	0.0837	1.318
58	993.1	1847	0.0749	1.030
R-410A 26	1053.8	1719	0.0985	1.204
34	1009.9	1830	0.0933	1.070
42	967.5	1898	0.0889	0.959
58	846.3	2752	0.0793	0.717

4.1. Sintetičke radne tvari – kondenzator

Radne tvari tehnika grijanja i hlađenja iz razreda sintetičkih (umjetnih) proizvoda, rabljene kod promatranja i numeričkog modeliranja njihova zamjenskog utjecaja na prijelaz topline orebrenog kondenzatora u režimu grijanja su upravo one, koje su kroz godine razvoja dizalica topline/rashladnika najčešće bile (ili još uvijek jesu) korištene u praksi odnosno, to su freoni R-22, R-12, R-134a, R-152a, R-407C i R-410A [6-7]. Sve su bitne fizikalne osobine tih radnih tvari za određene režime rada predočene u sljedećim tablicama.

Pri modeliranju prijelaza topline kod orebrenog kondenzatora u režimu hlađenja korištene su radne tvari R-22 (zabranjena i izbačena iz uporabe) te danas vrlo aktualnih freona R-407C i R-410 [8]. Predočene vrijednosti izlaznih temperatura posrednog medija zraka (T_{zRiz}), izračunski su dobivene za različite radne tvari tehnika grijanja i hlađenja, svake sa svojim fizikalnim osobinama kod jednako odabranih ulaznih temperatura (T_{RTul}). Razlike u rezultatima svih izlaznih temperatura grijanja zraka odnosno prijelaza topline na okolinu su zanemarivo male, bez obzira na zamjenu vrste radne tvari pri numeričkom modeliranju prijelaza topline. Tablice 3. i 4. izražavaju dobivene, gotovo identične vrijednosti izlaznih temperatura posrednog medija zraka za svaku od šest različitih radnih tvari za njihove četiri jednake ulazne temperature što znači, da promjena vrste radne tvari nema bitnijeg utjecaja na promjenu rashladnog učina dizalice topline/rashladnika [9-10].

Tablica 2. Fizikalne osobine radne tvari – kondenzator (režim hlađenja)

Table 2. Working fluid physical characteristics – condenser (cooling mode)

T_{RTul} , °C	ρ , m ³ /kg	C_p , J/kg K	λ , W/m K x e-04	η , Pas x e-06
R-22 -42	1412.6	603	6.990	9.700
-50	1435.6	585	6.590	9.360
-60	1463.7	564	6.120	8.940
-80	1518.2	528	5.250	8.090
R-407C -43.6	1380.7	787	9.290	9.980
-50	1412.0	750	8.640	9.570
-60	1433.7	727	8.190	9.280
-80	1495.5	668	6.940	8.430
R-410A -42	1319.6	854	9.400	10.300
-50	1350.5	805	8.930	9.880
-60	1380.0	762	8.500	9.470
-80	1450.0	675	7.570	8.950

Tablica 3. Izlazne temperature radne tvari i zraka – kondenzator (režim grijanja)

Table 3. Working fluid and air outlet temperatures – condenser (heating mode)

T_{RTul} , °C	T_{RTiz} , K	T_{zriz} , K	T_{zriz} , °C	W_{RT} , m/s	W_{zr} , m/s
26	299	282	9.0	0.01	0.05
34	307	283	9.8	0.01	0.05
42	315	284	10.6	0.01	0.05
58	331	285	12.2	0.01	0.05

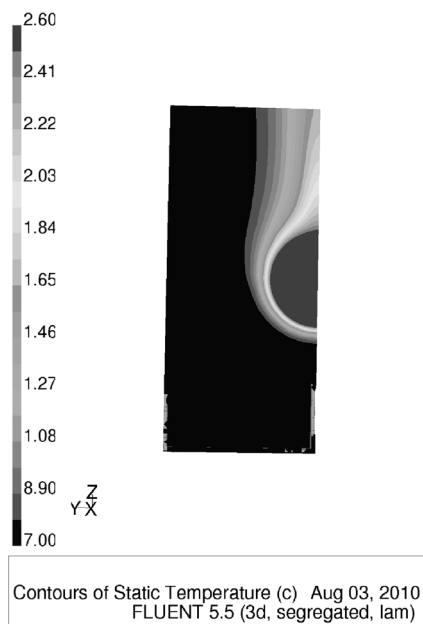
Tablica 4. Izlazne temperature radne tvari i zraka – kondenzator (režim hlađenja)

Table 4. Working fluid and air outlet temperatures – condenser (cooling mode)

T_{RTul} , °C	T_{RTiz} , K	T_{zriz} , K	T_{zriz} , °C	W_{RT} , m/s	W_{zr} , m/s
-42	232	296	22.7	0.01	0.05
-50	224	295	21.8	0.01	0.05
-60	214	294	20.8	0.01	0.05
-80	194	292	18.8	0.01	0.05

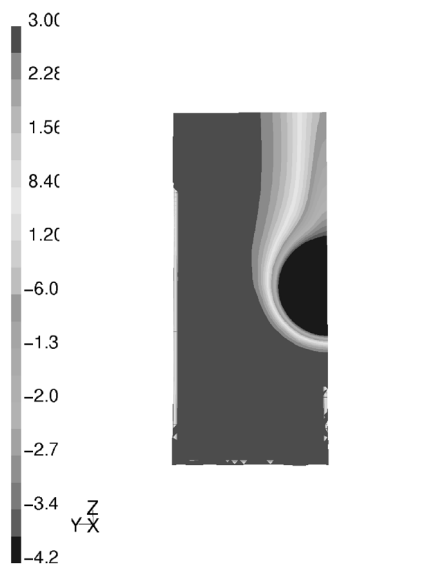
4.1.1. Grafički prikaz rezultata

Na dijagramima (slike 11. i 12.) predstavljeni su grafički prikazi dobivenih rezultata izlaznih temperatura radnih tvari i posrednog medija (zrak) u režimima grijanja i hlađenja kod orebrenog kondenzatora dizalice topline/rashladnika. Evidentan je proces izmjene topline između stjenke cijevi i aluminijske lamele odnosno radne tvari i posrednog medija kao i vrijednosti njihovih izlaznih temperatura, °C. Unutar presjeka bakrene cijevi struji radna tvar, u jednom slučaju kod sustava grijanja, a u drugom kod sustava hlađenja.



Slika 11. Kondenzator - zrak (režim grijanja)

Figure 11. Condenser – air (heating mode)



Slika 12. Kondenzator – zrak (režim hlađenja)

Figure 12. Condenser – air (cooling mode)

4.2. Sintetičke radne tvari – isparivač

Radne tvari iz razreda sintetičkih (umjetnih) proizvoda, rabljene kod promatranja i numeričkog modeliranja njihova zamjenskog utjecaja na prijelaz topline orebrenog isparivača u režimu grijanja su one, koje su kroz godine razvoja dizalica topline/rashladnika najčešće bile (ili još uvijek jesu) korištene u praksi odnosno freoni R-22, R-12, R-134a, R-152a, R-407C i R-410A. Sve su fizikalne osobine tih čestih radnih tvari za određene režime rada i primjenu predočene (tablice 5. i 6.) [11].

Tablica 5. Fizikalne osobine radne tvari – isparivač (režim hlađenja)

Table 5. Working fluid physical characteristics – evaporator (cooling mode)

T_{RTul} , °C	ρ , m ³ /kg	C_p , J/kg K	λ , W/m K x e-04	η , Pas x e-06
R-22 -40	1409.2	606	7.050	9.750
-50	1435.6	585	6.590	9.360
-70	1491.2	545	5.680	8.520
-80	1518.2	528	5.250	8.090
R-407C -40	1369.7	800	9.520	10.120
-50	1400.0	757	8.850	9.680
-70	1466.7	694	7.520	8.830
-80	1495.5	668	6.940	8.430
R-410A -40	1315.0	860	9.450	10.350
-50	1349.7	807	8.940	9.900
-70	1410.0	745	7.950	8.950
-80	1450.0	685	7.550	8.550

Tablica 6. Fizikalne osobine radne tvari – isparivač (režim grijanja)

Table 6. Working fluid physical characteristics – evaporator (heating mode)

T_{RTul} , °C	ρ , m ³ /kg	C_p , J/kg K	λ , W/m K	η , Pas x e-04	
R-22	28	1178.7	1271	0.0823	1.603
	38	1137.3	1326	0.0778	1.427
	48	1091.9	1401	0.0732	1.263
	60	1030.4	1539	0.0676	1.076
R-12	28	1300.1	997	0.0661	1.850
	38	1262.2	1026	0.0627	1.661
	48	1221.5	1063	0.0594	1.486
	60	1168.1	1122	0.0553	1.291
R-134a	28	1195.2	1429	0.0807	1.954
	38	1171.6	1437	0.0798	1.905
	48	1155.1	1487	0.0756	1.677
	60	1052.9	1660	0.0661	1.242
R-152a	28	891.8	1815	0.0967	1.576
	38	865.2	1872	0.0925	1.403
	48	836.7	1941	0.0884	1.250
	60	799.4	2051	0.0834	1.084
R-407C	28	1123.0	1557	0.0879	1.469
	38	1073.5	1645	0.0824	1.275
	48	1027.1	1750	0.0779	1.125
	60	947.5	2016	0.0713	0.919
R-410A	28	1042.6	1745	0.0972	1.168
	38	988.6	1894	0.0911	1.012
	48	914.5	2211	0.0841	0.841
	60	821.0	3070	0.0779	0.677

Pri modeliranju prijelaza topline kod orebrenog isparivača u režimu hlađenja korištene su radne tvari R-22 te danas praksom vrlo korišteni tipski freoni R-407C i R-410A. U tablicama 7. i 8. predočene su sve vrijednosti izlaznih temperatura posrednog medija vode (T_{viz}), izračunski dobivenih za različite ulazne temperature radne tvari (T_{RTul}). Šest različitih radnih tvari, svaka sa svojim fizikalnim osobinama, korištene su za proračun pri njihove četiri iste ulazne temperature. Razlike u rezultatima izlaznih temperatura grijanja vode odnosno prijelaza topline na posredni medij su zanemarivo male, a vrijednosti gotovo identične, bez obzira na zamjenu vrste korištene radne tvari [12-14].

Tablica 7. Izlazne temperature radne tvari i vode – isparivač (režim grijanja)

Table 7. Working fluid and water outlet temperatures – evaporator (heating mode)

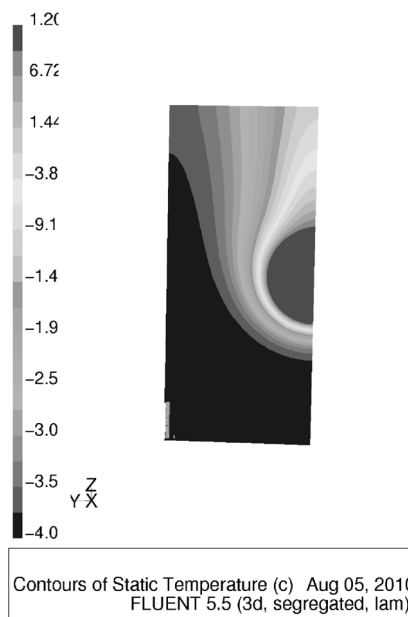
T_{RTul} , °C	T_{RTiz} , K	T_{ziz} , K	T_{ziz} , °C	W_{RT} , m/s	W_z , m/s
28	294	280	7.2	0.002	0.001
38	300	280	7.3	0.002	0.001
48	306	280	7.3	0.002	0.001
60	314	281	7.4	0.002	0.001

Tablica 8. Izlazne temperature radne tvari i vode – isparivač (režim hlađenja)

Table 8. Working fluid and water outlet temperatures – evaporator (cooling mode)

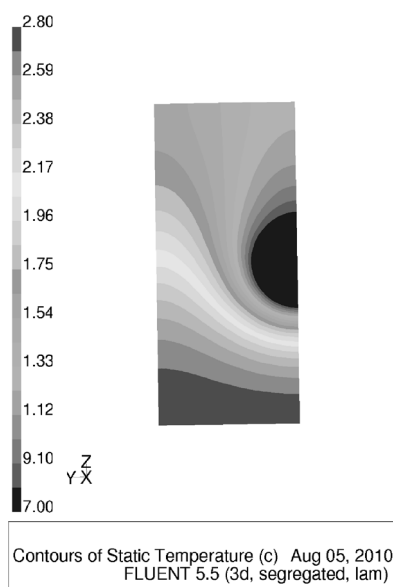
T_{RTul} , °C	T_{RTiz} , K	T_{ziz} , K	T_{ziz} , °C	W_{RT} , m/s	W_z , m/s
-40	242	285	11.6	0.01	0.05
-50	235	285	11.5	0.01	0.05
-60	218	284	11.3	0.01	0.05
-80	210	284	11.3	0.01	0.05

4.2.1. Grafički prikazi rezultata



Slika 13. Isparivač – voda (režim hlađenja)

Figure 13. Evaporator – water (cooling mode)



Slika 14. Isparivač – voda (režim grijanja)

Figure 14. Evaporator – water (heating mode)

4.3. Prirodne radne tvari (kondenzator/isparivač)

Radne tvari iz razreda onih prirodnih, rabljene kod promatranja i numeričkog modeliranja njihova zamjenskog utjecaja na prijelaz topline orebrenih kondenzatora i isparivača dizalice topline/rashladnika u režimu grijanja zraka i hlađenja vode su one, koje se zbog svjetskog problema oko globalnog zatopljanja i ozonskih rupa sve više vraćaju u praksu rashladne tehnike, a te su zrak, ugljični dioksid, amonijak, ugljikovodici (propan, izobutan, propilen) te voda. Sve su fizikalne osobine tih prirodnih radnih tvari za određene režime rada grijanja i hlađenja predočene u tablici 9 [15-17].

Tablica 9. Prirodne radne tvari – fizikalne osobine (kondenzator i isparivač)

Table 9. Natural working fluids – physical characteristics (condenser and evaporator)

Radna tvar	T_{RTul} , °C	ρ , m ³ /kg	C_p , J/kg K	λ , W/m K	η , Pas x e-04
Zrak	26	1.1844	1006.4	0.02614	1.8510
	-50	1.5840	1006.0	0.02037	0.1466
Ugljični dioksid	26	694.5	7640.0	0.08050	0.5500
	-50	1155.0	952.0	0.01158	1.1310
Amonijak	26	601.3	4793.0	0.04827	1.3040
	-50	702.1	2178.0	0.02024	1.0150
Propan	26	490.8	2730.0	0.09330	0.9610
	-50	589.9	1397.0	0.01090	0.7950
Izobutan	26	549.4	2437.0	0.08890	1.4950
	-50	634.4	1344.0	0.07880	0.5650
Propilen	26	502.7	2682.0	0.11020	0.9360
	-50	611.9	1309.0	0.10400	0.8700

Tablica 10. Prirodne radne tvari – kondenzator (režim grijanja zraka)

Table 10. Natural working fluids – condenser (air heating mode)

Radna tvar	T_{RTiz} , K	T_{viz} , K	T_{viz} , °C	W_{RT} , m/s	W_v , m/s
Zrak	299	283	9.6	0.05	0.05
Ugljični dioksid	299	283	9.6	0.001	0.05
Amonijak	299	283	9.6	0.001	0.05
Propan	299	283	9.6	0.001	0.05
Izobutan	299	283	9.6	0.001	0.05
Propilen	299	283	9.6	0.001	0.05

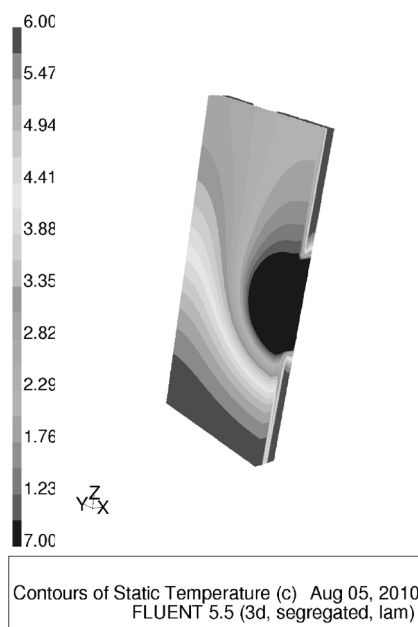
U tablicama 10. i 11. predočene su sve vrijednosti izlaznih temperatura posrednih medija, zraka (T_{ZRIz}) u režimu grijanja i vode (T_{Viz}) u režimu hlađenja, izračunski (Fluent) dobivenih za različite ulazne temperature radnih tvari (T_{RTul}). Šest različitih prirodnih radnih tvari tehnika grijanja i hlađenja su, svaka sa svojim fizikalnim osobinama, korištene za proračun pri njihovim jednakim ulaznim temperaturama. Razlike u rezultatima izlaznih temperatura grijanja zraka iz okoline odnosno prijelaza topline na posredni medij (voda) su zanemarivo male, a rezultati gotovo identični, bez obzira na zamjenu vrste korištene radne tvari [18-20].

Tablica 11. Prirodne radne tvari – isparivač (režim hlađenja vode)

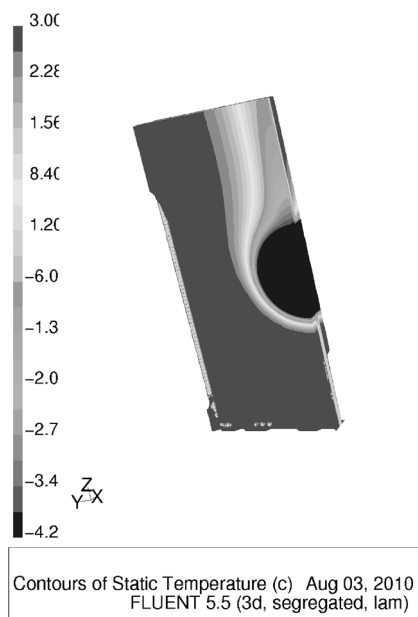
Table 11. Natural working fluids – evaporator (water cooling mode)

Radna tvar	T_{RTiz} , K	T_{viz} , K	T_{viz} , °C	W_{RT} , m/s	W_v , m/s
Zrak	235	285	11.5	0.05	0.001
Ugljični dioksid	235	285	11.5	0.01	0.001
Amonijak	235	285	11.5	0.01	0.001
Propan	235	285	11.5	0.01	0.001
Izobutan	235	285	11.5	0.01	0.001
Propilen	235	285	11.5	0.01	0.001

4.3.1. Grafički prikazi rezultata



Slika 16. Domena izračuna isparivača
Figure 16. Evaporator calculation domain



Slika 17. Domena izračuna kondenzatora
Figure 17. Condenser calculation domain

4.4. Promjena materijala orebrenja - kondenzator i isparivač

U tablici 12. predočene su sve vrijednosti izlaznih temperatura posrednih medija, zraka (T_{ZRiz}) u režimu grijanja i vode (T_{Viz}) u režimu hlađenja, izračunski dobivenih za različite ulazne temperature radne tvari (T_{RTul}). Jedna te ista radna tvar tehnika grijanja i hlađenja (R-12) je, pri primjeni fizikalnih osobina različitih materijala cijevnog orebrenja (čelik, aluminij, bakar), korištene za proračun kod dviju jednakih ulaznih temperatura [22]. Razlike u rezultatima izlaznih temperatura grijanja zraka iz okoline odnosno prijelaza topline na posredni medij (voda) su male, a rezultati približno jednaki, bez obzira na zamjenu vrste materijala orebrenja. S obzirom, da se radi o relativno maloj promatranoj domeni, vjerovatnost poboljšanja prijelaza topline kod primjene cijevnog orebrenja kondenzatora i isparivača dizalice topline/rashladnika iz materijala boljih termičko-fizikalnih osobina razvojem tehnologije ipak postoji te istraživanja treba nastaviti upravo u tom smjeru [29–30].

Tablica 12. Materijali lamele orebrenog kondenzatora i isparivača (režimi grijanja i hlađenja)

Table 12. Fin materials of framed condenser and evaporator (heating and cooling modes)

T_{RTul} , °C	ρ , m ³ /kg	C_p , J/kg K	λ , W/m K	T_{RTiz} , K	T_{zriz} , K	T_{viz} , K
R-12 26č	8030	502.5	16.27	298.98401	282.09213	
26al	2719	871.0	202.40	298.99036	282.09296	
26cu	8978	381.0	387.60	298.99423	282.09378	
R-12 50č	8030	502.5	16.27	234.16743		283.47290
50al	2719	871.0	202.40	234.58894		284.65521
50cu	8978	381.0	387.60	234.59003		284.65802

4.5. Utjecaj na rashladni učin isparivača

Općenito, neko toplinsko opterećenje nastalo uslijed dovođenja topline iz neposredne okoline (npr. posredni medij), koje uzrokuje isparavanje radne tvari i hlađenje samog posrednog medija izmjenom topline, definira rashladni učin isparivača (ϵ_{isp}), a istog je moguće izraziti relacijom:

$$\epsilon_{isp} = k_{isp} A_{isp} \Delta T_{PM}, \quad (29)$$

$$\epsilon_{isp} = k_{isp} A_{isp} (T_{PMsr} - T_i), \quad (30)$$

gdje su:

k_{isp} - koeficijent prolaza topline isparivača, Wm⁻²K

A_{isp} - površina izmjene topline isparivača, m²

ΔT_{PM} - razlika temperaturna posrednog medija na ulazu i izlazu iz isparivača, K

T_{PMsr} - srednja temperatura posrednog medija pri prolasku kroz isparivač, K

T_i - temperatura isparavanja radne tvari, K

Srednju temperaturu posrednog medija moguće je odrediti kao:

$$T_{PMsr} = \frac{T_{PMul} + T_{PMiz}}{2}, \quad (31)$$

gdje su:

T_{PMul} - temperatura posrednog medija na ulazu isparivača, K

T_{PMiz} - temperatura posrednog medija na izlazu isparivača, K

Ako se uz zadane vrijednosti ulaznih temperatura, svi numerički rezultati izlaznih temperatura posrednih medija, zraka (T_{ZRiz}) i vode (T_{Viz}) te radne tvari (T_{RTiz}) orebrenog kondenzatora i isparivača (tablice 3, 4, 7, 8, 10, 11) uvrste u relacije (30) i (31), promjene vrijednosti rashladnog (toplinskog) učina utjecajem zamjene vrste radne tvari unutar dizalice topline/rashladnika gotovo da nema, jer je srednja temperaturna razlika posrednog medija (zrak, voda) pri prolasku kroz odgovarajući izmjenjivač topline uvijek približno ista.

5. Zaključak

Razlike u numeričkim vrijednostima izlaznih temperatura grijanja zraka iz okoline odnosno prijelaza topline na posredni medij (voda) kod orebrenih kondenzatora i isparivača dizalice topline/rashladnika postoje, ali su vrlo male. Dobiveni rezultati su gotovo identični, bez obzira na zamjenu vrste radne tvari. Iz toga se može zaključiti, kako je utjecaj zamjene vrste radne tvari na prijelaz topline prema

posrednom mediju (ili prostoru) svakako prisutan, ali se može smatrati zanemarivim.

Samim time, niti promjene rashladnog učina s aspekta utjecaja zamjene radne tvari gotovo da nema, jer je srednja temperaturna razlika ulaza i izlaza posrednog medija uvijek približno ista. Rashladni učin isparivača (kao i toplinski učin kondenzatora) prvenstveno ovise o ukupnoj površini za izmjenu topline, koeficijentu prolaza topline te razlici temperatura posrednog medija i radne tvari (kod isparavanja treba biti što manja uz što viši tlak).

Veća je vjerovatnost značajnijeg poboljšanja prijelaza topline i rashladnog učina kod primjene cijevnog orebrenja isparivača i kondenzatora dizalice topline/rashladnika prvenstveno u domeni razvoja tehnologija iznalaženja novih materijala boljih termo-fizikalnih osobina (bolji koeficijent prolaza topline) ili uplivom na optimalniju iskoristivost površine samog procesa izmjene topline i sl. pa se sav znanstvenoistraživački rad toga tipa treba nastaviti upravo u tom smjeru.

LITERATURA

- [1] WOLF, I.; FRANKOVIĆ, B.; VILIČIĆ, I.; JURKOWSKI, R.; BAILLY, A.: *Analiza prijelaza topline na valovitom lamelnom orebrenju izmjenjivača topline*, Strojarstvo 46 (6) 137-148 (2004), Zagreb, 2004.
- [2] SENČIĆ, T.; TRP, A.; LENIĆ, K.: *Parametarska analiza utjecaja pogonskih uvjeta i geometrijskih parametara na izmjenutoplineucijevnom izmjenjivaču topline s prstenastim lamelama*, Engineering Review 29-1 (2009) 25-36, Rijeka, 2009.
- [3] KAYA, D.; BUYRUK, E.; CAN, A.; FERTELLI, A.: *Numerička analiza prijenosno toplinskih karakteristika orebrenih površina*, Strojarstvo 49 (3) 137-144 (2007), Zagreb, 2007.
- [4] DOVIĆ, D.; ŠVAIĆ, S.: *Numerički pristup procjene karakteristika strujanja u pločastim izmjenjivačima topline*, Strojarstvo 9 (3) 151-160 (2007), Zagreb, 2007.
- [5] SOLDI, V.; ALUJEVIĆ, V.; GROZDEK, M.; ČURKO, T.: *Svojstva zamjenskih radnih tvari*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference, Trondheim, 2006.
- [6] DIAZ, N.F.; LEBRUN, J.; ANDRE, P.: *Experimental study and modeling of cooling ceiling systems using steady-state analysis*, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Issue 4, 2010/06, p.793-805.
- [7] GEBRESLASSIE, H.; MEDRANO, M.; MENDES, F.; BOER, D.: *Optimum heat exchanger area estimation using coefficients of structural bonds – application to a absorption chiller*, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Issue 3, 2010/05, p.529-537.
- [8] COULOMB, D.: *HFC replacement*, International Journal of Refrigeration, Volume 32, Issue 7, 2009/11, p.1515-1516.
- [9] GRANRYD, E.: *Analytical expression for optimum flow rates in evaporators and condensers of heat pumping systems*, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Issue 7, 2010/11, p.1211-1220.
- [10] KOCABAS, F.; KORKMAZ, M.; SORGUCU, U.; DONMEZ, S.: *Modeling of heating and cooling performance of counter flow type vortex tube by using artificial neural network*, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Issue 5, 2010/08, p.963-972.
- [11] FERNANDEZ-SEARA, J.; UHIA, F.J.; DIAZ, R.; DUPAZO, J.A.: *Vapour condensation of R22 retrofit substitutes R417A, R422A and R422D on CuNi turbo C-tubes*, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Issue 1, 2010/01, p.148-157.
- [12] CAIM, J.M.: *The next generation of refrigerants – historical review, considerations and outlook*, International Journal of Refrigeration, Volume 31, Issue 7, 2008/11, p.1123-1133.
- [13] HAJIDAVALLOO, E.; EGHTEHARI, H.: *Performance improvement of air-cooled refrigeration system by using evaporatively cooled and condenser*, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Issue 5, 2010/08, p.982-988.
- [14] KULČAR, B.; GORIČANEC, D.; KROPE, J.: *Economy of replacing a refrigerant in a cooling system for preparing chilled water*, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Issue 5, 2010/08, p.989-994.
- [15] ARIMA, H.; KIM, J.H.; OKAMOTO, A.; IKEGAMI, Y.: *Local boiling heat transfer characteristics of ammonia in a vertical plate evaporator*, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Issue 2, 2010/03, p.359-370.
- [16] ARORA, A.; KAUSHIK, S.C.: *Theoretical analysis of a vapour compression refrigeration system with R502, R404A and R507A*, International Journal of Refrigeration, Volume 31, Issue 6, 2008/09, p.998-1005.
- [17] PEARSON, A.: *Refrigeration with ammonia*, International Journal of Refrigeration, Volume 31, Issue 4, 2008/06, p.545-551.
- [18] PEARSON, S.F.: *Ammonia – yesterday, today and forever*, proceedings of the 6th IIR Gustav Lorentzen, Natural working fluids conference, Glasgow, 2004.
- [19] PEARSON, A.B.: *Water chillers with Ammonia for building services*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.
- [20] HALOZAN, H.: *Heat pump systems with Ammonia as refrigerant*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.
- [21] HRNJAK, P.: *Charge minimization in Ammonia refrigeration systems*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.
- [22] VESTERGAARD, N.P.: *CO₂ used as low temperature refrigerant in Ammonia-CO₂ cascade systems*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.
- [23] SINGH, V.; AUTE, V.; RADERMACHER, R.: *A heat exchanger model for air-to-refrigerant fin-and-tube heat exchanger with arbitrary fin sheet*, International Journal of Refrigeration, Volume 32, Issue 7, 2009/11, p.1724-1735.

- [24] YUN, R.; HEO, J.; KIM, Y.: *Film condensation heat transfer characteristics of R134a on horizontal stainless steel integral fin-tubes at low heat transfer rate*, International Journal of Refrigeration, Volume 32, Issue 5, 2009/08, p.865-873.
- [25] LONG, G.A.: *Refrigerant R134a condensation heat transfer and pressure drop inside a small brazed plate heat exchanger*, International Journal of Refrigeration, Volume 31, Issue 5, 2008/08, p.780-789.
- [26] PALM, B.: *Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems – a review*, International Journal of Refrigeration, Volume 31, Issue 4, 2008/06, p.552-563.
- [27] PALM, B.: *Ammonia in low capacity refrigeration and heat pump systems*, International Journal of Refrigeration, Volume 31, Issue 4, 2008/06, p.709-715.
- [28] PARK, C.; CHO, H.; LEE, Y.; KIM, Y.: *Mass flow characteristics and empirical modeling of R22 and R410A flowing through electronic expansion valves*, International Journal of Refrigeration, Volume 30, Issue 8, 2007/12, p.1401-1407.
- [29] ČARIJA, Z.; FRANKOVIĆ, B.; FUČAK, S.: *Heat transfer analysis of fin-and tube heat exchangers using fluid-solid interaction*, Zbornik radova međunarodnog kongresa Energija i okoliš 2010., Volumen II., Opatija, 2010/10, p.199-208.
- [30] GLAŽAR, V.; LENIĆ, K.; BONEFAČIĆ, I.: *Numerical and experimental analyses of heat exchanger with microchannel coil*, Zbornik radova međunarodnog kongresa Energija i okoliš 2010., Volumen II., Opatija, 2010/10, p.233-240.
- [31] HOEHNE, M.; HRNJAK, P.: *Charge minimization in Hydrocarbon systems*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [32] UCHKIN, G.; RAKHIMOV, K.; GAPPAROVA, Z.; TURSUNOV, T.: *Retrofitting the ozone depleting R12 to ozone friendly R290/R600 blends*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [33] PERAN, M.; JELUŠIĆ, K.; PAVKOVIĆ, B.: *Charge minimization in a multi-stage Ammonia refrigeration system by introducing carbon dioxide*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia refrigeration technology for today and tomorrow, Ohrid, 2007.
- [34] LINDBORG, A.: *Ammonia's future as a refrigerant*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia refrigeration technology for today and tomorrow, Ohrid, 2007.
- [35] HALOZAN, H.; RIEBERER, E.: *HFCs or the old refrigerants?*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia refrigeration technology for today and tomorrow, Ohrid, 2007.
- [36] JÜRGENSEN, H.: *Propane as R-22 replacement in commercial appliances*, DANFOSS, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal, 2008/04.
- [37] TILLNER-ROTH, R.; CORBAN, K.: *R-22 retrofit with ISCEON MO29 (R-442D) in German supermarkets*, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal, 2008/04.
- [38] HWANG, Y.; GADO, A.; REDERMACHER, R.: *Performance comparison of Hydrocarbon R290 with R22 in residential heat pump system*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [39] WANG, H.; LI, H.; MA, L.; LIU, C.: *PVTx measurements for three Hydrocarbon/fire-suppressant binary mixtures*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [40] WANG, H.; LI, H.; MA, L.: *Hydrocarbon/fire-suppressant mixtures as alternatives of HCFC22 in air-conditioning cycles*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [41] MIYAMOTO, H.; WATANABE, K.; HELMOLTZ, M.: *Type equations of state for binary and/or ternary Hydrocarbon mixtures of Propane, n-Butane and Isobutane*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [42] KERHERVE, B.; CLODIC, D.: *Energy efficiency comparisons for heat pump working with CO₂ and R407c*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [43] SONG, S.; BULLARD, C.W.: *Effect of comfort constraints and compressor sizing on cycle efficiency of R410a and R744*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [44] DEVOTTA, S.; JOSHI, R.V.: *Compressor life tests with D-LPG, HFC-134a and blend of HFC-134a/HFC-600a with mineral oil, R744*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [45] PETTERSEN, J.: *Flow vaporization of CO₂ in microchannel tubes, Part 1: Experimental method and two-phase flow pattern*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [46] PETTERSEN, J.: *Flow vaporization of CO₂ in microchannel tubes, Part 2: Heat transfer, pressure drop and correlation*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.

- [47] YAKUMARU, Y.; FUNAKURA, M.; NISHIWAKI, F.; OKAZA, N.: *Experimental study of automotive air conditioning systems using CO₂ as a refrigerant*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [48] NEKSA, P.; GIROTTO, S.: *CO₂ as refrigerant within commercial refrigeration*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [49] WANG, J.; HIHARA, E.: *Performance comparison of heat pump water heaters using carbon dioxide and R22 as refrigerants*, proceedings of the IIR/IIF Commission B1, B2, E1 and E2, Guangzhou, China, 2002/5.
- [50] PEARSON, A.B.: *Assessment of life cycle climate performance for chillers*, proceedings of the 6th IIR Gustav Lorentzen, Natural working fluids conference, Glasgow, 2004.
- [51] ARTEMENKO, S.; KHMELNJUK, M.; MAZUR, V.: *Azeotropy in natural and artificial refrigerant blends*, proceedings of the 6th IIR Gustav Lorentzen, Natural working fluids conference, Glasgow, 2004.
- [52] TAMURA, T.; YAKUMARU, Y.; NISHIWAKI, F.: *Experimental study on automotive cooling and heating air conditioning system using CO₂ as a refrigerant*, proceedings of the 6th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Glasgow, 2004.
- [53] BOWATER, F.J.: *Selection of compressors for low temperature Ammonia refrigeration systems*, proceedings of the 6th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Glasgow, 2004.
- [54] DIETRICH, W.: *Module welded plate heat exchanger within the NH₃ refrigeration circuit – effective technique for using at flooded and dry expansion applications*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.
- [55] ONO, M.; KAWAMURA, K.; MUGABI, N.: *Ammonia refrigeration system with CO₂ as a secondary refrigerant*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.
- [56] NAVARRO, E.; GRANRYD, E.; URCHUEGUIA, J.F.; CORBERAN, J.M.: *Comparative analysis of the different losses in a hermetic reciprocating compressor working with R407C and Propane*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference, Trondheim, 2006.
- [57] MARTINEZ, I.O.; GONZALVES, J.; CORBERAN, J.M.: *Charge and COP optimization of a reversible water to water unit using Propane as alternative refrigerant to R407C*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference, Trondheim, 2006.
- [58] GIGIEL, A.: *The reproducibility of tests for the safety of Hydrocarbons refrigerants in domestic refrigerators*, proceedings of the 7th Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [59] DOORNBOS, G.J.; VERMEEREN, R.J.F.: *Charge minimization of refrigerant systems using natural refrigerants*, proceedings of the 7th Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [60] HRNJAK, P.: *Natural working fluids: Development and future prospects with emphasis on carbon dioxide issues*, proceedings of the 7th Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [61] TADROS, A.; CLARK, J.W.; MACLAINE-CROSS, I.L.; LEONARDI, E.: *Replacing fluorocarbons with hydrocarbon mixtures in centrifugal water chillers*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [62] BEAUGEOIS, O.; THONON, B.; BONTEMPS, A.: *Condensation of pure Butane and Propane and a 44/56 % mixture in a plain and a microfinned tubes*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [63] ADAMSON, B.M.: *Application of Hydrocarbon refrigerants in low temperature cascade systems*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [64] UGES, P.G.H.: *Air conditioning using R718 (Water) as refrigerant*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [65] PASEK, A.D.; SUWONO, A.; ANDRIANSYAH, W.: *Flammability and performance test of R290/R134a mixtures for HCFC22 replacement*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [66] SHIN, J.S.; KIM, M.H.: *Performance evaluation of near-azeotropic R502 alternative refrigerants*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [67] PEARSON, A.B.: *Optimising industrial CO₂ systems*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.
- [68] HALOZAN, H.; RIEBERER, R.: *Heat pump systems with Ammonia as refrigerant*, proceedings of the 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Trondheim, 2006.

- [69] PERANIĆ, J.; BOŽUNOVIĆ, A.; PAVKOVIĆ, B.: *The feasibility of Ammonia-Water absorption refrigeration for fishing vessels*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia refrigeration technology for today and tomorrow, Ohrid, 2007.
- [70] PEARSON, A.B.: *Assessment of life cycle climate performance for chillers*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia refrigeration technology for today and tomorrow, Ohrid, 2007.
- [71] RIGOLA, J.; RAUSH, G.; ABLANQUE, N.; PEREZ-SEGARRA, C.D.; OLIVA, A.: *Comparative analysis of R134a subcritical cycle vs. CO₂ transcritical cycle*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia refrigeration technology for today and tomorrow, Ohrid, 2007.
- [72] HOEHNE, M. HRNJAK, P.: *Charge minimization in Hydrocarbon systems*, proceedings of the IIR Conference: Ammonia refrigeration technology for today and tomorrow, Ohrid, 2007.
- [73] STENE, J.: *Residential CO₂ heat pump system for combined heating and hot water heating*, proceedings of the Ammonia refrigeration technology, Ohrid, 2009.
- [74] ASHFORD, P.; KUIJPERS, L.: *Overview of the challenge HCFC consumption emissions and alternatives*, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal, 2008/04.
- [75] JIA, S.: *Evaluation of HCFC alternative refrigerants*, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal, 2008/04.
- [76] NAKAO, H.: *Assuring reliability of compressors using HFC refrigerants, MITSUBISHI*, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal, 2008/04.
- [77] MOE, J.: *Helical rotary chillers: Transition from HCFCs to non-ozone depleting substances, TRANE*, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal, 2008/04.
- [78] MATE, J.: *Cool technologies: Working without HCFCs, Part 1, Part 2, GREENPEACE*, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal, 2008/04.
- [79] CARBAJAL, P.T.: *Natural refrigerants: the solution*, GREENPEACE, 2007.
- [80] AHMADZAI, H.: *Montreal protocol and climate phasing-out HCFC: Initiatives for success*, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal 2008/04.
- [81] CARVAHO, S.: *Accelerated phase-out of HCFCs*, proceedings of the Technical Meeting on HCFC Phase-out, Montreal, 2008/04.
- [82] PEARSON, A.: *Ammonia's future*, ASHRAE Journal, 2008/02.
- [83] ASHRAE: *Natural Refrigerants*, Atlanta (SAD), 2009/01.
- [84] UNEP: *Handbook for the Montreal protocol on substances that deplete the Ozone layer*, 7th issue, UNON, Nairobi, 2006
- [85] ...: *Refrigeration – an introduction to the basics*, presentation of the Danfoss, Nordborg, 2007/07.
- [86] ...: *Thermophysical properties of refrigerants*, ASHRAE Inc. Handbook – Fundamentals (SI), Chapter 30., 2009.
- [87] ...: *Heat exchangers for natural refrigerants*, proceedings of the Technical meeting on HCFC-phase out, Montreal, 2008/04.
- [88] ...: *The Ozone story*, United Nations Environment Programme, Nairobi, 2000.
- [89] ...: *The Vienna Convention for the protection of Ozone layer*, UNEP, Nairobi, 2001.
- [90] ...: *Scientific assessment of Ozone depletion*, World Meteorological Organization, Report.No.50, 2006.
- [91] ...: *Achievements in stratospheric ozone protection*, Environmental protection agency (EPA), Washington, 2007/04.
- [92] ...: *Refrigeration and energy-the natural choice*, proceedings of the 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural working fluids, Copenhagen, 2008/09.
- [93] ...: *Refrigerants by nature*, Eurammon, 2008/10.
- [94] ...: *Natural refrigerants*, GTZ-Proklima, 2008/04.
- [95] ...: *Natural refrigerants, Australian Institute of refrigeration*, air conditioning and heating, Sidny, 2008.
- [96] ...: *Plenimary findings of the ICF report on the expedited HCFC phase-out*, EURAMMON, Brussels, 2008/05.
- [97] ...: *Media relations evaluation*, Eurammon, 2008/06.
- [98] ...: *The virtuos cicle*, presentation of the COCA COLA, Beijing, 2008/05.
- [99] ...: *Rashladni agregati*, prospekt, Daikin air conditioning, Zagreb, 2005.
- www.iiar.or
- www.iifir.org
- www.heatpumpcenter.org
- www.eurammon.com
- www.ari.org
- www.ashrae.org
- www.nrfund.org
- www.standards.org
- www.rehve.eu
- www.environment.gov