

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Soldo

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Vladimir Soldo, izv.prof.

Student:

Ivan Soldo

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Vladimiru Soldi na ustupljenom vremenu, stručnim savjetima i velikoj pomoći u izradi ovog rada.

Posebno se zahvaljujem tvrtki Oprema d.d. iz Ludbrega na donaciji rashladnog uređaja i mogućnosti provedbe mjerenja. Zahvaljujem se inženjerima iz Tvrtke g. Nenadu Horvatu te g. Matiji Gložiniću na pristupačnosti i pomoći prilikom mjerenja i izrade rada.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima bez čije potpore studiranje ne bi bilo moguće.

Ivan Soldo



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum: 24-02-2017 Prilog
Klasa: 602-04/17-6/4
Ur.broj: 15-1703-17-163

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan SOLDO**

Mat. br.: 0035196024

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rashladni uređaj za hlađenje i točenje pića**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Coolers for cooling and dispensing of beverage**

Opis zadatka:

Uredba (EU) br. 517/2014 o fluoriranim stakleničkim plinovima (tzv. F-gas regulativa) današnja istraživanja u rashladnoj i klimatizacijskoj tehnici i dizalicama topline sve više usmjeravaju na primjenu prirodnih radnih tvari kao što su ugljikovodici (propan, izo-butan), amonijak, ugljični dioksid. Radne tvari, osim što ne smiju imati utjecaj na razgradnju ozona, trebaju imati što manji potencijal globalnog zagrijavanja (GWP).

U radu je potrebno dimenzionirati kompaktni rashladni uređaj za hlađenje i točenje pića s akumulacijom rashladnog učinka u vodenom ledu do 15 kilograma mase leda. Radna tvar je propan. Za prigušivanje i doziranje radne tvari u isparivač koristi se kapilara. Ugradnja uređaja je podpultna.

Rad treba sadržavati:

1. Sigurnosne i funkcionalne osobine propana kao radne tvari.
2. Termodinamički proračun komponenti rashladnog uređaja za hlađenje pića.
3. Shemu spajanja i automatske regulacije.
4. Dispozicijski crtež rashladnog uređaja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.

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

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

Zadatak zadao:

V Soldo

Dr.sc. Vladimir Soldo, izv.prof.

Predsjednik Povjerenstva:

Balen

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY	V
1. TEHNIKA HLAĐENJA	1
1.1. Uvod	1
1.2. Uređaji za hlađenje pića	3
1.2.1. Hlađenje pića u ambalaži	3
1.2.2. Protočno hlađenje pića	4
1.3. Radne tvari u tehnici hlađenja	10
1.4. Propan u rashladnim uređajima	12
2. TERMODINAMIČKI PRORAČUN ISPARIVAČA	18
2.1. Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi	19
2.3.1. Koeficijent prijelaza topline u području $x \leq 0,85$	22
2.3.2. Koeficijent prijelaza topline u području pregrijanja radne tvari	24
2.3.3. Koeficijent prijelaza topline u području $0,85 < x < 1$	25
2.4. Koeficijent prijelaza topline na strani vode	26
2.4.1. Fizikalni svojstva vode.....	26
2.5. Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu	28
2.6. Potrebna duljina isparivača.....	29
2.6.3. Potrebna duljina isparivača za izmjenu topline.....	32
3. AKUMULACIJA RASHLADNE ENERGIJE	34
4. REZULTATI MJERENJA	39
ZAKLJUČAK.....	VI
PRILOG	VII

1. 3D model rashladnog uređaja izrađen u programu SolidWorks	VII
2. Shema upravljanja i regulacije	VII
LITERATURA	VIII

POPIS SLIKA

Slika 1.1	Shema rashladnog procesa	1
Slika 1.2	Proces hlađenja u T, s dijagramu	2
Slika 1.3	Ugradbeni hladnjak pića	3
Slika 1.4	Ugradbeni hladnjak pića	4
Slika 1.5	Uređaj za hlađenje posrednog medija	5
Slika 1.6	„Piton“	6
Slika 1.7	Hlađenje točenog piva propilen-glikolom.....	6
Slika 1.8	Hlađenje točenog piva akumulacijom vodenog leda	8
Slika 1.9	Uređaj za hlađenje piva akumulacijom leda [5].....	9
Slika 1.10	Zamjene radnih tvari [6]	11
Slika 1.11	Promjena gustoće kapljevine s temperaturom	13
Slika 1.12	Promjena gustoće pare s temperaturom	13
Slika 1.13	Promjena specifične topline isparavanja s promjenom temperature.....	14
Slika 2.1	Karakteristične točke procesa hlađenja.....	20
Slika 2.2	Isparavanje radne tvari	29
Slika 2.3	ϑ,A-dijagram isparivača	30
Slika 3.1	Promjena značajnih veličina sa stvaranjem leda.....	37
Slika 4.1	Shema pozicije ugradnje mjerne opreme	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
Slika 4.2	Mjerenje karakterističnih veličina.....	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
Slika 4.3	Promjena temperature isparavanja i vode u vremenu ...	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
Slika 4.4	Početak stvaranja kristala leda	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
Slika 4.5	Led oko cijevi isparivača	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
Slika 4.6	Promjena karakterističnih veličina u vremenu.....	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.

POPIS TABLICA

Tablica 1.1	Termodinamička i fizikalna svojstva radnih tvari [2]	12
Tablica 1.2	Sigurnosna svojstva radnih tvari [4].....	15
Tablica 1.3	Visina ugradnje unutarnje jedinice prema načinu izvedbe [4].....	16
Tablica 2.1	Fizikalna svojstva radne tvari na temperaturi isparavanja [7].....	19
Tablica 2.2	Točke procesa hlađenja [10].....	20
Tablica 2.3	Lokalni koeficijent prijelaza topline u području $x < 0,85$	24
Tablica 2.4	Lokalni koeficijent prijelaza topline u području $x > 0,85$	25
Tablica 2.5	Fizikalna svojstva vode	26
Tablica 3.1	Proračun akumulacije leda	36
Tablica 3.2	Povećanje toplinskog otpora sa stvaranjem leda.....	38

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
LFL	kg/m^3	Donja granica zapaljivosti radne tvari
h_0	m	Visina ugradnje unutarnje jedinice
A	m^2	Površina prostora u koji se ugrađuje sustav direktnog hlađenja/grijanja
PL	kg/m^3	Praktična granica punjenja
V	m^3	Volumen kondicioniranog prostora
d	m	Promjer cijevi
N	-	Broj zavoja zavojnice
L	m	Duljina zavojnice
h'	J/kg	Entalpija vrele kapljevine
h''	J/kg	Entalpija suhozasićene pare
c_p	J/(kg·K)	Specifični toplinski kapacitet
p	bar	Tlak
s	J/(kg·K)	Specifična entropija
x	$\text{kg}_{szp}/\text{kg}_{mp}$	Maseni udio suhozasićene pare u mokroj pari
q_m	kg/s	Maseni protok
A	m^2	Površina
G	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Gustoća masenog toka
q	W/m^2	Gustoća toplinskog toka
Pr	-	Prandtlov broj
Bo	-	Koeficijent isparavanja
Re	-	Reynoldsov broj
Nu	-	Nusseltov broj
Xtt	-	Martinelliev broj
E	-	Korekcijski koeficijent dvofaznog isparavanja
V	m^3	Volumen
k	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Koeficijent prolaza topline
r	m	Polumjer
m	kg	Masa
q_l	J/kg	Specifična toplina skrućivanja leda

s	mm	Debljina sloja leda
ΔV	m ³	Promjena volumena
Δm	kg	Promjena mase
T	min	Vrijeme

Grčki simbol	Mjerna jedinica	Značenje
λ	W/(m·K)	Koeficijent toplinske vodljivosti
η	-	Izentropski stupanj djelovanja kompresora
ϑ	°C	Temperatura
Φ	W	Rashladni učinak
ρ	kg/m ³	Gustoća
μ	Pa·s	Dinamička viskoznost
α	W/(m ² ·K)	Koeficijent prijelaza topline
$\Delta\vartheta$	°C	Temperaturna razlika

Indeks	Značenje
U	Unutarnji
V	Vanjski
isp	Isparivač
komp	Kompresor
i	Isparivanje
k	Kondenzacija
pr	Pregrijanje
poth	Pothlađenje
k	Kapljevina
p	Para
szp	Suhozasićena para
mp	Mokra para
RT	Radna tvar
x	Lokalni koeficijent
tp	Područje strujanja do 85% masenog udjela suhozasićene pare (<i>eng. two phase</i>)
mf	Područje strujanja iznad 85% masenog udjela suhozasićene pare (<i>eng. mist flow</i>)

w	Voda
sr	Srednja
ekv	Ekvivalentan
l	Led

SAŽETAK

Zadatak ovog rada je opis procesa i proračun hladnjaka točenog piva. Početni dio rada posvećen je uvodu u tehniku hlađenja te propanu kao radnoj tvari. Prikazani su osnovni načini hlađenja pića pri čemu se najviše pažnje posvetilo opisu hlađenja točenog piva. Navedene su usporedbe propana s ostalim radnim tvarima korištene u uređajima slične namjene, prikazana su termofizikalna svojstva te ponašanje na različitim temperaturama. Zatim je proveden termodinamički proračun pretpostavljenog procesa kako bi se dimenzionirao spiralni isparivač. Izmjenjivač je dimenzioniran za najnepogodnije uvjete, odnosno kad treba ostvariti maksimalan toplinski tok. Nakon dimenzioniranja provedena je akumulacija rashladne energije u obliku banke leda. Dobiveni rezultati kontrolirani su mjerenjem i prikazani u posljednjem dijelu rada u obliku dijagrama. Za navedenu namjenu komercijalni uređaj za hlađenje pića tvrtke Oprema d.d. opremljen je mjernom opremom. Mjerenje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Ključne riječi: hladnjak točenog piva, spiralni isparivač, banka leda

SUMMARY

The goal of this final paper is elaboration and design of draft beer refrigerator. The starting part of the paper is about introduction of cooling techniques and propane as refrigerant. Elementary ways of drink cooling are displayed while the focus is on a comprehensive draft beer cooling technique. Propane is compared with other refrigerants that are used in similar devices, also thermophysical properties of refrigerants on various temperatures are displayed. Following the propane comparison, design of the helical evaporator is conducted. Evaporator is designed to perform in heaviest cooling load, which is maximum heat flux. Cooling energy is stored in the form of ice bank. Acquired results are cross referenced with experiment results and are shown in the form of a diagram in final part of the paper. For a specified purpose commercial cooling device from Oprema d.d. is equipped with measurement probes. Experiment is conducted on Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb.

Key words: draft beer cooler, helical coil evaporator, ice bank

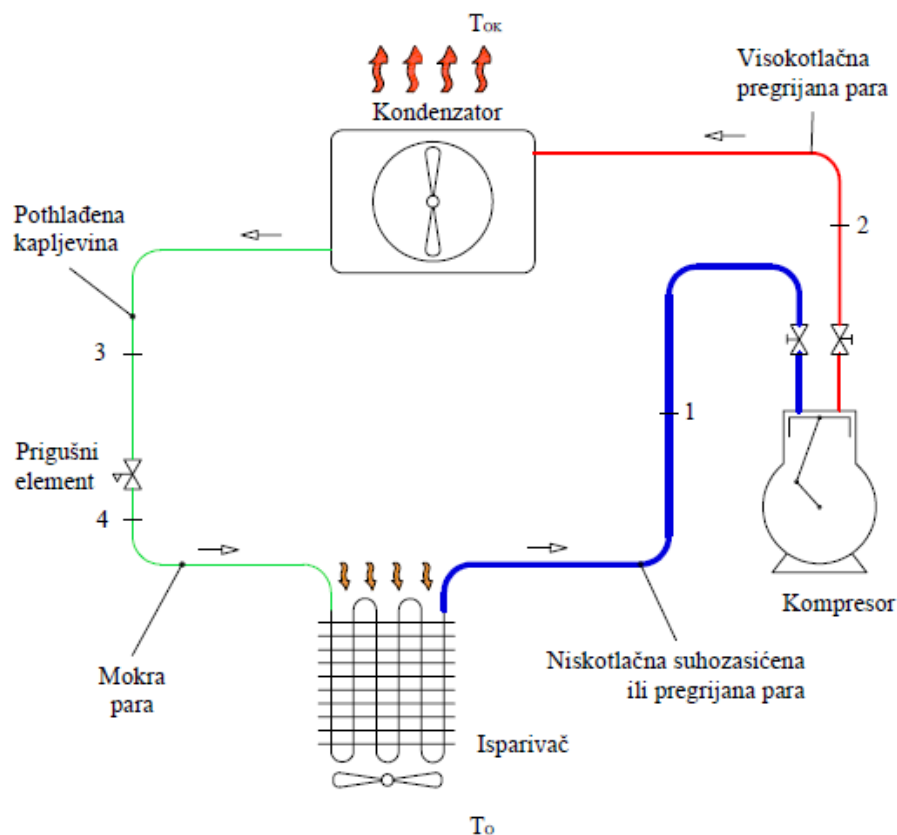
1. TEHNIKA HLAĐENJA

1.1. Uvod

Od davnina ljudima je jasno da toplina prelazi s tijela više na tijelo niže temperature jer priroda sama po sebi teži ravnoteži, odnosno da tijela između kojih se izmjenjuje toplina imaju istu temperaturu. Veći problem ljudima bio je kako ostvariti prijenos topline s tijela niže na tijelo više temperature.

Poljski fizičar Rudolf Clausius 1850. godine ustanovio je da ukoliko se želi prijenos topline s tijela niže na tijelo više temperature mora se uložiti rad, odnosno dodatan iznos energije.

Hlađenje je proces prijenosa topline s medija niže na medij više temperature koristeći radnu tvar u zatvorenom krugu. Termodinamički, hlađenje je ljevokretni proces pri čemu medij koji se hladi predstavlja ogrjevni spremnik, a medij kojemu se predaje toplina rashladni spremnik za radnu tvar. Osnovni dijelovi rashladnog kruga su: kompresor, kondenzator, prigušni element, isparivač te spojne cijevi, a odgovarajući proces prikazan je Slikom 1.1.



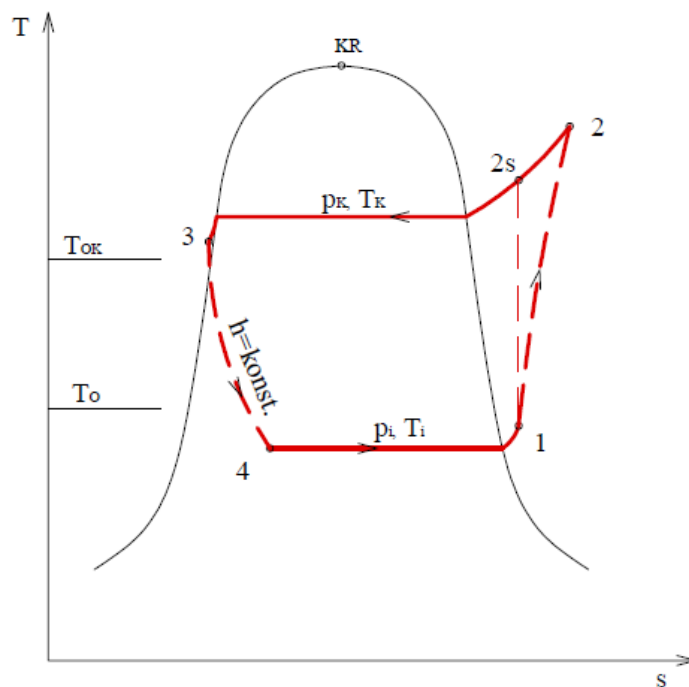
Slika 1.1 Shema rashladnog procesa

Isparivač je uređaj u kojemu se odvija promjena agregatnog stanja radne tvari. Mokra para stanja „4“ prolaskom kroz isparivač prelazi u stanje suhozasićene ili pregrijane pare stanja „1“ na račun dovedene topline od medija koji se hladi. Da bi taj transfer energije bio moguć, temperatura isparavanja radne tvari mora biti niža od temperature hlađenog medija.

Nakon što ispari, kompresor usisava radnu tvar i podiže ju na viši energetski nivo uz utrošak energije. Pri tome nastaje pregrijana para stanja „2“ dovoljno visokog tlaka određenog temperaturom kondenzacije T_K .

Pregrijana para stanja „2“ ulazi u kondenzator gdje izmjenjujući toplinu s rashladnim medijem niže temperature, na primjer okolišem, kondenzira i blago se pothlađuje pri čemu nastaje pothlađena kapljevina stanja „3“.

Prigušni element smanjuje tlak pothlađene kapljevine na tlak isparavanja određen temperaturom isparavanja. Opisani proces prikazan u T,s dijagramu prikazan je Slikom 1.2.



Slika 1.2 Proces hlađenja u T, s dijagramu

Osim osnovnih elemenata, ovisno o namjeni sustava, vrsti i punjenju radne tvari, potrebom za upravljanjem i tako dalje, postoji i niz drugih elemenata koji se mogu ugraditi u sustav poput filtera, oglednog stakalca, regulatora tlaka, zapornih ventila, sakupljača radne tvari, odvajač ulja i slično.

Tri su različite primjene tehnike hlađenja: klimatizacija, komercijalno hlađenje i industrijsko hlađenje. Osim izbora opreme, važno je odabrati i odgovarajuću radnu tvar za pojedini temperaturni režim. Uz navedeno, odabir odgovarajućeg ulja nužan je za efikasan rad uređaja. Ulje podmazuje pokretne dijelove kompresora, hladi ga te služi kao brtvilo.

1.2. Uređaji za hlađenje pića

Dio tehnike hlađenja pripada komercijalnim uređajima za hlađenje pića. U današnje vrijeme nije luksuz zatražiti hladno vino, pivo ili sok u restoranu, baru ili hotelskoj sobi. Za takva mjesta dizajnirani su razni hladnjaci napitaka. Ovakvi uređaji moraju se jednostavno čistiti kako bi razina higijene bila zadovoljavajuća te se spriječila moguća zagađenja i kvarenje.

1.2.1. Hlađenje pića u ambalaži

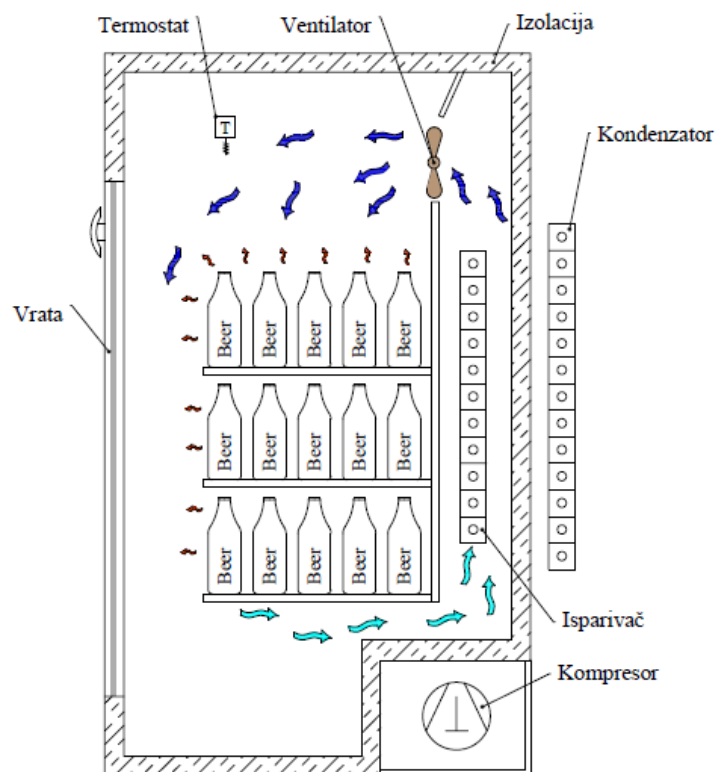
Za hlađenje sokova, vina ili drugih napitaka u ambalaži koriste se rashladni uređaji slični kućnim hladnjacima, prikazan na Slici 1.3.



Slika 1.3 Ugradbeni hladnjak pića

Princip rada ovakvog hladnjaka prikazan je Slikom 1.4. Sve komponente hladnjaka smještene su unutar izoliranog kućišta s čije prednje strane su prozirna vrata kako bi se vidjela

popunjenost hladnjaka. Kondenzator u obliku savijene cijevi, takozvana „cijevna zmija“, nalazi se sa stražnje strane uređaja predajući toplinu okolini u koju je uređaj smješten. Ventilator povlači zrak iz aktivnog prostora unutar kojeg se nalazi piće preko isparivača skrivenog iza polica za slaganje pića. Prelaskom preko isparivača, zrak se ohladi te putem ventilatora ponovo usmjerava na piće kako bi se skratio proces hlađenja.



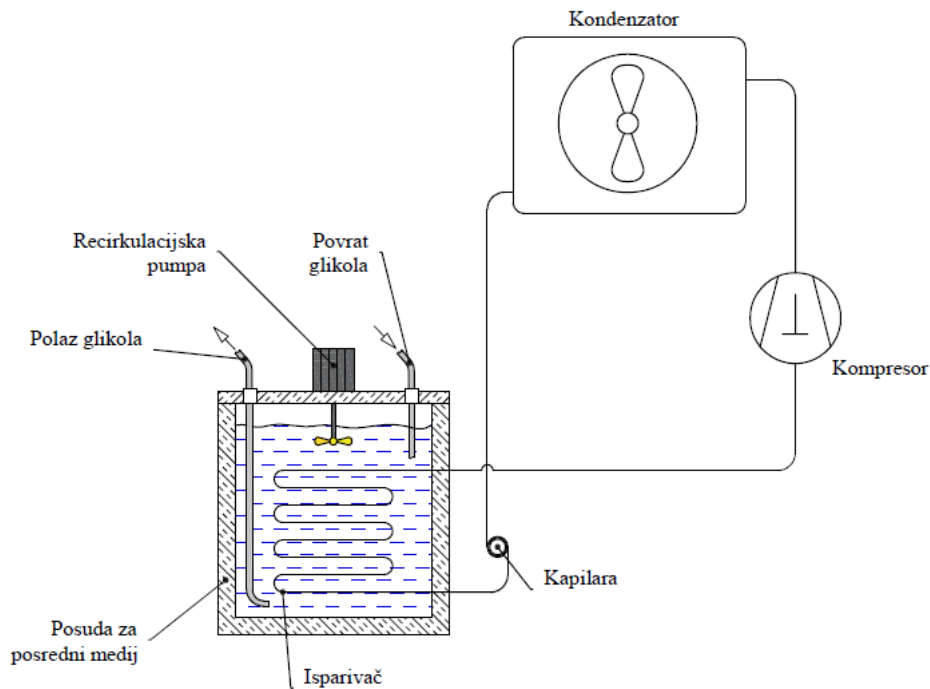
Slika 1.4 Ugradbeni hladnjak pića

Željenu temperaturu unutar hladionice postavlja korisnik. Kad termostat „T“ registrira da je postignuta željena temperatura hlađenja, kompresor se isključuje. Dođe li do novog toplinskog opterećenja, porast temperature registrira se termostatom koji zatvori strujni krug i pokrene kompresor.

1.2.2. Protočno hlađenje pića

Hlađenje točenog piva znatno je drugačije. Dvije su osnovne izvedbe uređaja za protočno hlađenje piva pri čemu oba rade kao posredni sustavi što je u nastavku objašnjeno.

Uređaj za hlađenje posrednog medija prikazan je Slikom 1.5. Svi dijelovi rashladnog sustava uključujući i posudu za posredni medij nalaze se unutar kućišta rashladnog uređaja, poznatiji kao „chiller“. Isparivač rashladnog kruga uronjen je u posudu i tako hladi posredni medij. Kako bi se poboljšala izmjena topline, pumpa pospješuje cirkulaciju medija oko cijevi isparivača.



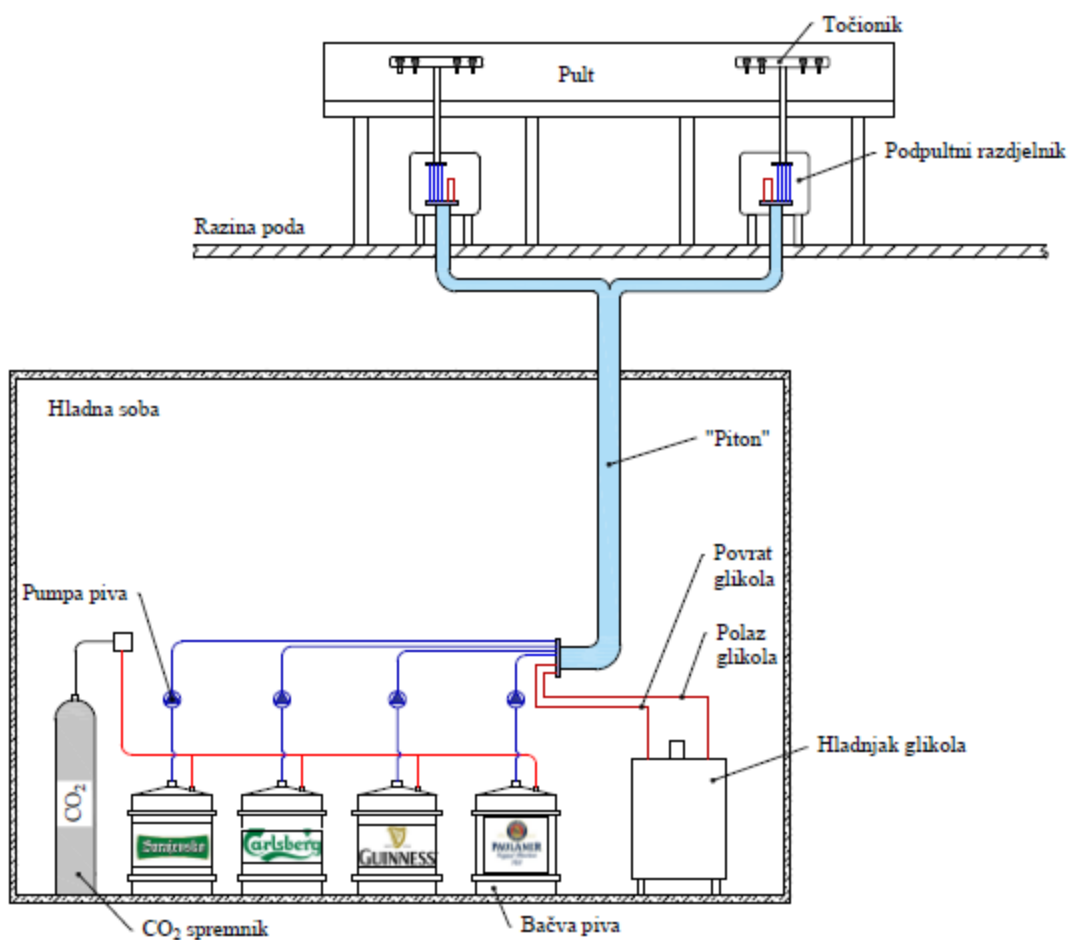
Slika 1.5 Uređaj za hlađenje posrednog medija

Prvi tip hlađenja točenog piva koristi propilen glikol kao radnu tvar i prikazan je Slikom 1.7. Svaka bačva piva svojim cjevovodom spojena je do točionika. Na putu do točionika, cijevi piva i glikola spojene su u svežanj koji se naziva „piton“. To je skup cijevi povezanih u jedan svežanj i umotan u izolaciju poput primjera na Slici 1.6. Unutar tog cjevovoda odvija se izmjena topline pri čemu se glikolna smjesa zagrijava a pivo hladi.



Slika 1.6 „Piton“

Nakon pitona, skup cijevi dolazi u podpultni razdjelnik gdje se cijevi posrednog medija zaokreću i provodi se povrat do rashladnog uređaja. Pivo je na željenoj temperaturi te se cijevi spajaju s točionikom.



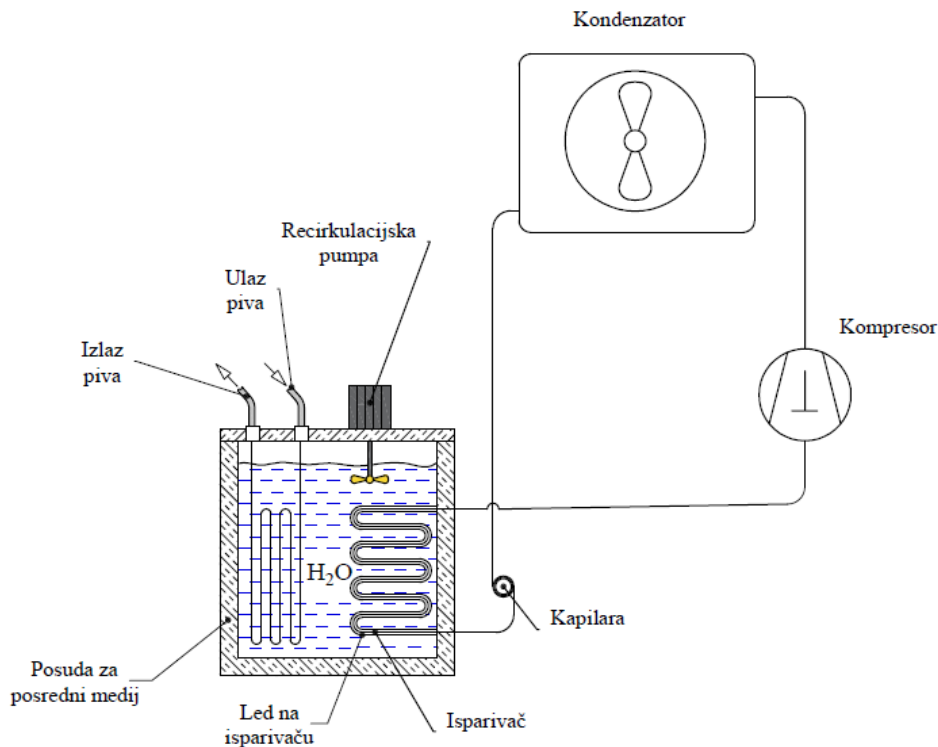
Slika 1.7 Hlađenje točnog piva propilen-glikolom

Ovakvi sustavi koriste se u barovima s više vrsta piva. Kako bi se uštedio prostor ispod pulta, bačve piva zajedno s ostalom opremom smještaju se u posebnu prostoriju, koja može biti i ispod razine samog lokala, kako je prikazano Slikom 1.7. Taj prostor mora biti hlađen i temperature do 10 °C kako bi glikolna smjesa uspjela ohladiti pivo na željenih 2, 3 ili više stupnjeva Celzijevih. Uz to, ako su bačve izložene višoj temperaturi, može doći do neželjenih kemijskih reakcija unutar pića. Potrebno je napomenuti da sve vrste piva spojene na isti „pilon“ postižu istu temperaturu hlađenja.

Kao posredni medij koristi se propilen glikol razrijeđen s vodom u odgovarajućem omjeru. Takva smjesa ima nižu točku ledišta stoga pruža mogućnost hlađenja na niže temperature. Cijevi ili posude u kojima je piće moraju biti izvedene od materijala koji kemijski ne reagiraju s pićem. Najčešće se koristi nehrđajući čelik ili akrilonitril-butadien stiren, poznatiji kao ABS.

Prema stranici „[BeerAdvocate](#)“, u svijetu su poznate preko 32000 vrste piva. Svaka od njih pravljen je na svoj, specifičan način kako bi se postigao željeni okus. Da bi doživljaj okusa bio potpun, nužno je poslužiti pivo na odgovarajućoj temperaturi. Tako postoji široka lepeza serviranja piva ovisno o vrsti. Neka od njih serviraju se vrlo hladna na temperaturama 0 do 4 °C, nama najpoznatija na temperaturama 4 do 12 °C. Postoje i piva koja se serviraju grijana na temperature do 70 °C poput *Quelque Chose* i *Daleside Marocco Ale*.

Za hlađenje na različite temperature opisan sustav s propilen glikolom nije prikladan. Zato se koristi drugi tip sustava hlađenja točenog piva prikazan Slikom 1.8.

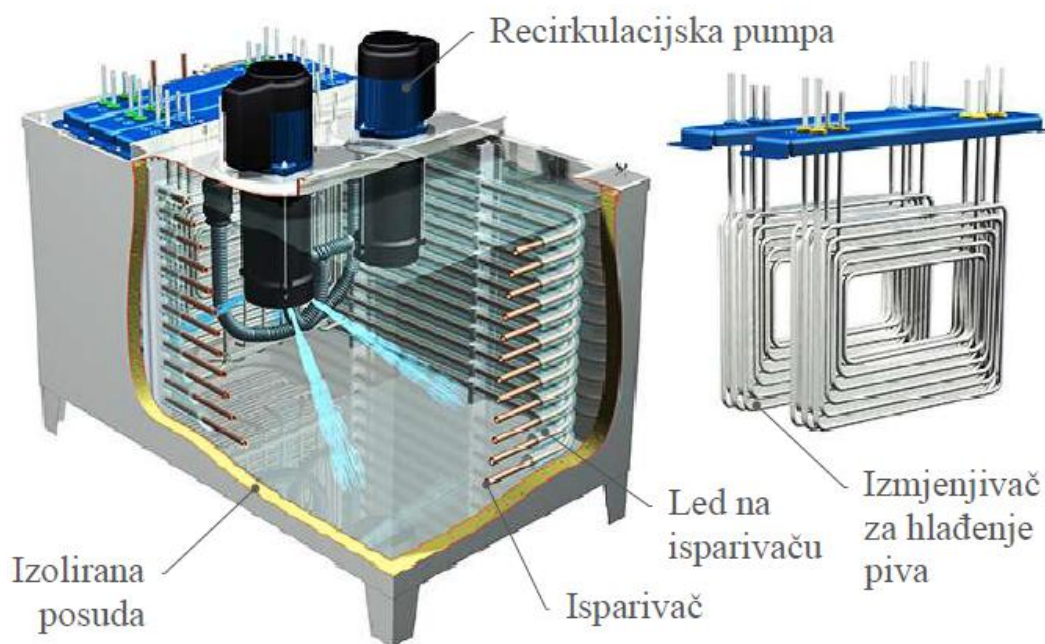


Slika 1.8 Hlađenje točenog piva akumulacijom vodenog leda

Sve komponente rashladnog kruga smještene su unutar kućišta koje se najčešće ugrađuje ispod pulta. Razlika u odnosu na sustav s propilen-glikolom je ta što se unutar posude nalazi voda. Kako je temperatura isparavanja niža od 0 °C, oko isparivača se stvara sloj leda. Senzor unutar posude mjeri debljinu leda na isparivaču. Kad se postigne odgovarajuća vrijednost, senzor isključuje kompresor. Unutar posude smješten je još jedan izmjenjivač. Kroz njega struji pivo i hladi se izmjenjujući toplinu s hladnijom vodom. Kako se voda grije, led se otapa što senzor registrira i pokreće kompresor. Debljina leda mora se strogo kontrolirati i nikako ne smije zahvatiti cijevi unutar kojih struji pivo jer može doći do deformacije. Cijevi za pivo izrađene su od nehrđajućeg čelika, mikrobiološki pogodnog za kontakt s pićem.

Ovakvi uređaji imaju nekoliko prednosti nad srodnim sustavima sa smjesom glikola. Voda u posudi jeftinija je od propilen-glikola te ukoliko dođe do propuštanja jednostavno se sustav nadopuni vodom iz vodovoda. Pri servisiranju, voda se jednostavno ispusti u kanalizaciju dok se glikolna smjesa mora posebno zbrinuti. Specifični toplinski kapacitet vode veći je od glikolne smjese, uz to postoji i „akumulirana“ rashladna energija u ledu. Iz toga se može zaključiti da za istu promjenu temperature posrednog medija, na primjer s 0 °C

na 1 °C, sustav s vodom može ohladiti veću količinu piva. Time se smanjuje učestalost uključivanja i isključivanja kompresora što produkuje vijek trajanja sustava. Sustavi s glikolnom smjesom kompliciraniji su za održavanje i vođenje jer u kombinaciji s kisikom, glikol stvara kiselinu koja može nagrizati opremu što dovodi do propuštanja. Prednost propile-glikolnih sustava svakako je korištenje u velikim sustavima jer štede prostor ugostiteljskog objekta.



Slika 1.9 Uređaj za hlađenje piva akumulacijom leda [5]

Ovakvi mali rashladni uređaji kao prigušni element ne koriste ventil. Radi jednostavnosti izvedbe, kao prigušni element koristi se kapilara. Prigušenje radne tvari s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja rezultat je velikog hidrauličkog otpora strujanju zbog malog promjera cijevi, a velike duljine. Duljinom kapilare regulira se rad isparivača, odnosno temperatura pregrijanja radne tvari što znatno utječe na proces. Promjeri se kreću od 0,8 do 1,25 mm, a duljine od 0,8 m do 5 m. Smještaj kapilare u uređaj relativno je jednostavan. Cjevčica se spiralno namota i savije po želji.

1.3. Radne tvari u tehnici hlađenja

Uloga radne tvari u rashladnom sustavu je prijenos energije s jednog toplinskog spremnika na drugi. Prijenos energije najčešće se odvija preko isparivača s jedne, te kondenzatora s druge strane.

Za kvalitetan rad rashladnog uređaja, radna tvar mora ispuniti određene uvjete [2]:

- Termodinamičke osobine:
 - Visoka latentna toplina isparavanja i kondenzacije
 - Niska temperatura isparavanja pri atmosferskom tlaku
 - Umjeren tlak zasićena pri temperaturama 35...45 °C
 - Niska viskoznost
 - Visoko položena kritična točka
 - Visoka gustoća pare na temperaturi isparavanja
 - Niska gustoća kapljevine na temperaturi kondenzacije
 - Niska točka smrzavanje
 - Visok dielektrični otpor
 - Visok koeficijent toplinske vodljivosti
- Funkcionalne osobine:
 - Ne smije biti korozivna
 - Ne smije otapati konstrukcijske materijale
 - Bez fizikalne i kemijske reakcije s uljem
 - Kemijska i fizikalna stabilnost
- Sigurnosne osobine:
 - Nezapaljivost i neeksplozivnost kao čista tvar ili u smjesi
 - Neotrovna za živa bića
 - Jednostavno otkrivanje prisutnosti
- Osobine utjecaja na okoliš:
 - Bez utjecaja na razgradnju ozonskog sloja($ODP^1=0$)
 - Mali utjecaj na zagrijavanje atmosfere(GWP^2)

¹ ODP (eng. Ozone Depletion Potential), potencijal razgradnje ozona, mjera je sposobnosti oslobađanja klora i broma te vremenske postojanosti u atmosferi. Kao referentna vrijednost uzeto je djelovanje freona R11, $ODP(R11)=1$.

² GWP (eng. Global Warming Potential), potencijal globalnog zagrijavanja je broj koji govori koliki je relativni utjecaj te tvari na stvaranje efekta staklenika u odnosu na utjecaj CO_2 . Kao referentna vrijednost uzeto je djelovanje CO_2 (R744), $GWP(R744)=1$.

Ne postoji radna tvar koja zadovoljava sve gore navedene uvjete. Stoga se, ovisno o zahtjevima i primjeni rashladnog procesa, odabire ona radna tvar koja ispunjava tražene zahtjeve za određenu primjenu rashladnog sustava.

Radi zaštite okoliša i poboljšanja kvalitete života na Zemlji, radne tvari koje razgrađuju ozonski omotač ili utječu na globalno zagrijavanje postupno se izbacuju iz upotrebe. Montrealskim sporazumom iz 1987. zemlje potpisnice obvezale su se na smanjenje upotrebe freona, radnih tvari s visokim ODP brojem, za najmanje 50%. Revizijom sporazuma dogovoreno je potpuno izbacivanje iz uporabe freona, halona i ostalih halogeniranih ugljikovodika koji sadrže klor i brom, poput R12 i R22, do 2000. godine.

Daljnijim istraživanjem ustanovljeno je zagrijavanje Zemljine atmosfere uzrokovano emisijom CO₂. Kako bi se smanjila emisija stakleničkih plinova, 2005. godine na snagu je stupio protokol iz Kyota. Njime su se zemlje potpisnice obvezale smanjiti upotrebu radnih tvari s visokim potencijalom globalnog zagrijavanja i prelazak na prirodne radne tvari, bez ili s malim utjecajem na okoliš.

U tom smjeru nastavila je u Europska unija. Uredbom broj 517/2014, poznatija kao „F-gas regulativa“ [1], propisano je postupanje s fluoriranim stakleničkim plinovima tijekom njihovog životnog ciklusa te postupno povlačenje radnih tvari koje imaju visok GWP broj s tržišta.



Slika 1.10 Zamjene radnih tvari [6]

Sve ove zabrane dovele su do napuštanja halogeniranih ugljikovodika i prelaska na prirodne radne tvari u tehnici hlađenja. Svakako treba istaknuti amonijak (R717), koji se koristi u industrijskom hlađenju, CO₂ (R744), koji je svoju primjenu našao u kaskadnim rashladnim uređajima, te ugljikovodike poput propana (R290), izobutana (R600a) te propilena (R1270).

1.4. Propan u rashladnim uređajima

Propan je prirodna radna tvar iz skupine ugljikovodika, kemijskog sastava C_3H_8 , poznatija kao R290 ili CARE®40.

Zbog povoljnih termodinamičkih i fizikalnih svojstava ima široko područje primijene. Koristi se za hlađenje na više, srednje i niže temperature i to u komercijalnim i industrijskim uređajima, klimatizaciji, ali posebno valja istaknuti primjenu u hladnjacima kapljevine i dizalicama topline.

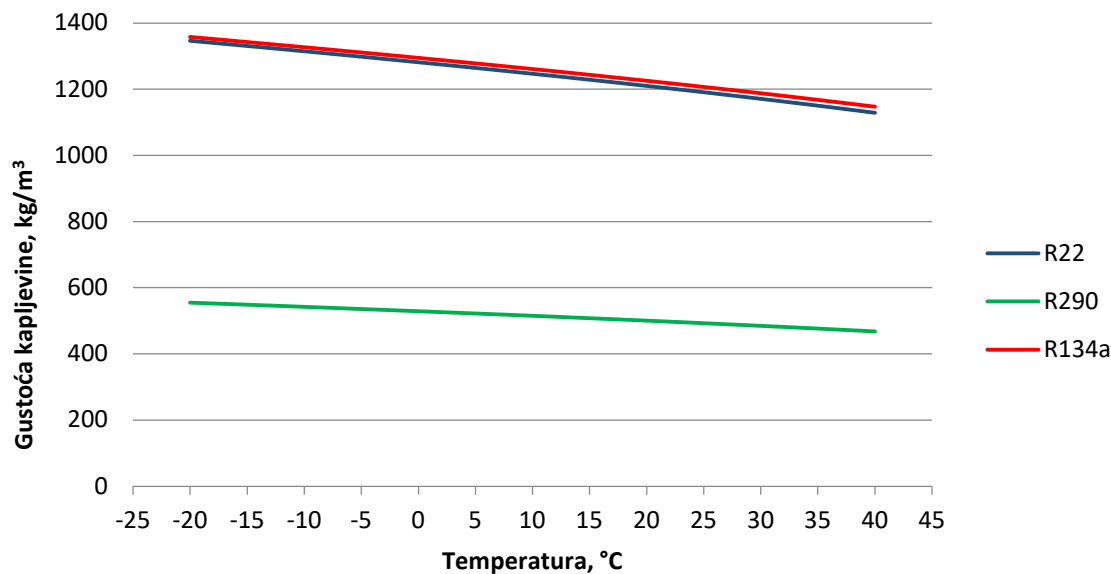
Svojstvo	R290	R600a	R134a	R404a	R407C	R22
ODP	0	0	0	0	0	0,055
GWP ₁₀₀	20	20	1300	3922	1526	1500
Molekularna masa	44,1	58,12	102,03	72,59	86,2	86,47
Kritična temperatura, °C	96,7	134,7	101	72,14	86,05	96,2
Kritični tlak, bar	42,5	36,4	40,6	37,4	46,3	49,9
Temperatura isparavanja(1 bar), °C	-42,4	-11,6	-26,1	-46,6	-43,8	-40,8
Gustoća kapljevine (30 °C), kg/m ³	484,4	544,3	1187	1021	1116	1171
Gustoća pare (-15°C), kg/m ³	6,5	2,49	8,29	18,57	11,48	12,9
Spec. toplotina isparavanja (-15°C), kJ/kg	394,4	369,8	209,5	177,7	221,9	216,5
Volumetrički rashladni učinak (-15°C), kJ/m ³	1897,4	688	1285,3	2250,7	1888,5	2178,8

Tablica 1.1 Termodinamička i fizikalna svojstva radnih tvari [2]

Iz Tablice 1.1 jasno se vidi povratak prirodnim radnim tvarima u tehnici hlađenja.

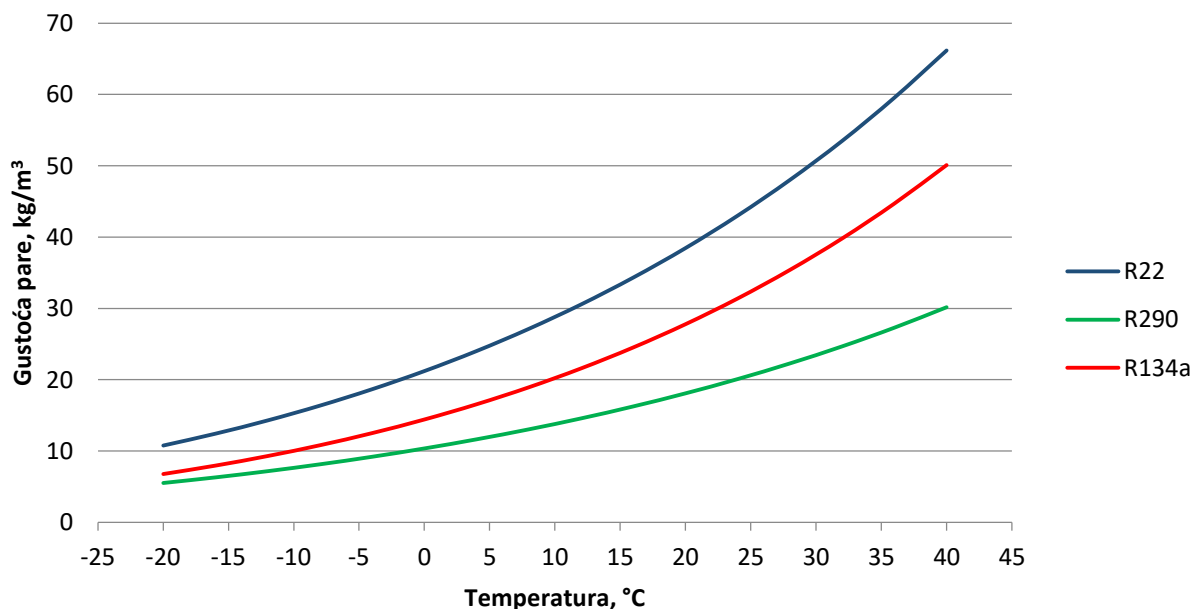
Ugljikovodici su bez utjecaja na razgradnju ozonskog sloja (ODP=0) dok im je GWP višestruko manji od halogeniranih ugljikovodika.

Prema termodinamičkim svojstvima, R290 ne zaostaje za „freonima“. Na istoj temperaturi kondenzacije ima dvostruko manju gustoću kapljevine (Slika 1.11) zbog čega je punjenje sustava radnom tvari manje za približno isti omjer. U sustavima gdje R290 zamjenjuje R22 punjenje se smanjuje oko 60%. Manje punjenje rezultira manjom potrebom kontrole sustava koja je zakonski propisana kako bi se spriječilo propuštanje i druge neželjene pojave.



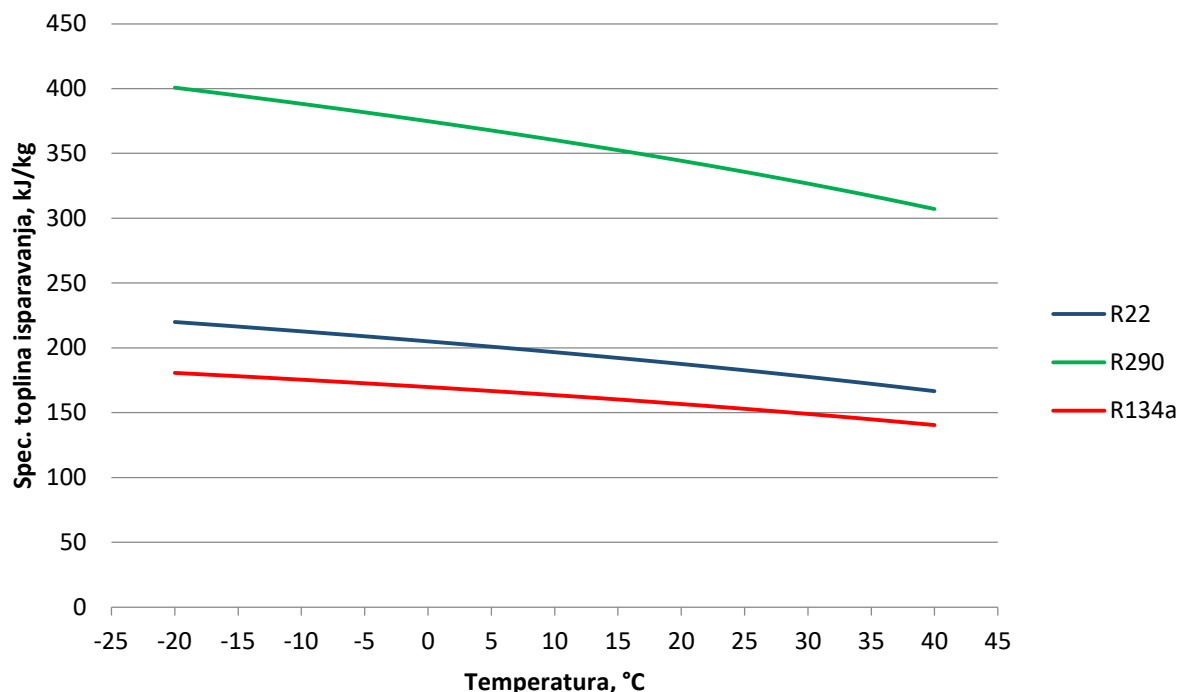
Slika 1.11 Promjena gustoće kapljevine s temperaturom

Gustoća pare propana na istoj temperaturi isparavanja je manja u odnosu na radne tvari koje zamjenjuje, kako je prikazano Slikom 1.12. Međutim, zbog veće topline isparavanja, volumetrički učinci su podjednaki što rezultira podjednakim dimenzijama kompresora za isti rashladni učinak.



Slika 1.12 Promjena gustoće pare s temperaturom

Veća toplina isparavanja propana rezultira manjim protokom radne tvari čime su dimenzije cjevovoda manje, a samim time i pripadna armatura jeftinija. Odnos toplina isparavanja prikazan je Slikom 1.13.



Slika 1.13 Promjena specifične topline isparavanja s promjenom temperature

Osim dobrih termodinamičkih i fizikalnih svojstava, treba istaknuti i loša sigurnosna svojstva. R290 pripada klasi A3 [3], što ga obilježava kao netoksičnu, ali visokozapaljivu radnu tvar. Stoga se primjenjuje u manjim, dobro brtvljenim sustavima s minimalnim mogućnostima propuštanja. Dozvoljene količine punjenja rashladnih uređaja i dizalica topline određene su prema HRN EN 378-1[4]. Norma definira količinu punjenja prema smještaju opreme te kontroli pristupa hlađenom i/ili grijanom prostoru.

Prema smještaju opreme, Norma dijeli prostore u tri klase:

- I Oprema rashladnog sustava smještena u kondicionirani prostor,
- II Kompresor, spremnik radne tvari i kondenzator smješteni u strojarnicu ili na otvorenoj površini
- III Sva oprema rashladnog sustava smještena u strojarnicu ili na otvorenoj površini.

Tri su kategorije prostora s obzirom na kontrolu pristupa:

- A Opći prostori³,
- B Prostori pod nadzorom⁴,
- C Prostori s dopuštenim pristupom⁵.

Sustavi s punjenjem do 150 g radne tvari mogu biti ugrađeni u prostorije bilo kojeg volumena. Za veće sustave, dopuštena količina punjenja računa se prema sljedećim izrazima:

- Komforno hlađenje i grijanje:

$$m_{\max} = 2,5 \cdot \text{LFL}^{\frac{5}{4}} \cdot h_0 \cdot \sqrt{A}, [\text{kg}]$$

- Nekomforno i industrijsko grijanje i hlađenje:

$$m_{\max} = \text{PL} \cdot V, [\text{kg}]$$

Radna tvar	Sigurnosna grupa	LFL ⁶ , [kg/m ³]	PL ⁷ , [kg/m ³]
R22	A1	-	0,21
R134a	A1	-	0,25
R404a	A1	-	0,52
R410A	A1	-	0,44
R407C	A1	-	0,31
R290	A3	0,038	0,008
R600a	A3	0,038	0,011
R1234yf	A2	0,299	0,06
R717	B2	0,116	0,00035
R744	A1	-	0,07

Tablica 1.2 Sigurnosna svojstva radnih tvari [4]

³ Opći prostori- područja gdje svi imaju pravo pristupa, gdje se ulazi bez posebne kontrole i bez posebne obuke za sigurnosne mjere opreza (npr. bolnice, zatvori, kazališta, hoteli, itd.)

⁴ Prostori pod nadzora-područja u koja može ući samo određeni broj ljudi od kojih su neki upoznati sa sigurnosnim mjerama opreza (npr. laboratoriji, poslovne zgrade, itd.)

⁵ Prostori s dopuštenim pristupom-područja zatvorena za javnost. Pristup imaju sam ovlaštene osobe upoznate sa sigurnosnim mjerama opreza (npr. rafinerije, tuneli za zamrzavanje, klaonice, itd.)

⁶ LFL (eng. Lower Flammability Limit)-donja granica zapaljenja radne tvari

⁷ PL-Praktična granica punjenja (eng. Practical Limit) najveća je dopuštena koncentracija radne tvari po m³ prostora

Tip ugradnje	h_0 , m
Podna	0,6
Prozorska	1,0
Zidna	1,8
Stropna	2,2

Tablica 1.3 Visina ugradnje unutarnje jedinice prema načinu izvedbe [4]

Bez obzira na volumen prostora i tip ugradnje, postoji gornja granica punjenja radne tvari koja se ne smije prekoračiti i te vrijednosti dane su u Tablici C.1. Norme [1].

Za prostore klase I, kategorije A, maksimalna količina punjenja iznosi 1,5 kg. Ukoliko je prostor klase III, kategorije C, nema ograničenja na količinu punjenja rashladnog uređaja jer je sva oprema smještena u strojarnici ili na otvorenom bez izravnog kontakta s ljudima.

Zbog visoke zapaljivosti, ne preporuča se direktna zamjena halogeniranih ugljikovodika propanom (takozvani „retrofitting“). Problemi se mogu javiti ukoliko dođe do propuštanja i izloženosti otvorenom plamenu.

Temperatura samozapaljenja propana iznosi 470 °C, a zapaljiv je ako mu volumna koncentracija u zraku iznosi između 1,7 i 10,9 % [4].

Da bi došlo do zapaljenja radne tvari, moraju se ispuniti tri preduvjeta: propuštanje radne tvari, koncentracija radne tvari u zraku unutar granica zapaljenja te izloženost radne tvari plamenu dovoljne energije i temperature.

S ciljem izbjegavanja gore navedenih preduvjeta, poduzimaju se sljedeći koraci:

- hermetička izvedba kućišta kompresora,
- ugradnja detektora propuštanja propana,
- ventilator ventilacijskog sustava izveden u protueksplozivnoj izvedbi, izvod propanskog cjevovoda u slobodnu okolinu, izvod ventilacijskog kanala u slobodnu okolinu.

R290 kompatibilna je s gotovo svim vrstama ulja. Problem može stvarati visoka topivost ugljikovodika u ulju što dovodi do pjenjenja ulja i razrjeđenja te u konačnici do trošenja

strojnih dijelova. Preporuka je izabrati ulje s nižom topivošću i višom viskoznošću. Ulja koja sadrže silikon i silikat nisu kompatibilna za rad s ugljikovodicima i trebaju se izbjegavati.

Za kvalitetan rad rashladnog uređaja, propan mora biti visoke čistoće (99 % ili više). LPG⁸ nije prikladan za primjenu u rashladnoj tehnici. Nečistoće poput drugih ugljikovodika mogu utjecati na tlak isparavanja i tako smanjiti učinkovitost sustava, sumpor može stvoriti koroziju na konstrukcijskim dijelovima, a vlaga može reagirati s uljem i utjecati na njegova svojstva.

⁸ LPG- ukapljeni naftni plin (eng. *liquified petroleum gas*)

2. TERMODINAMIČKI PRORAČUN ISPARIVAČA

U ovom radu proveden je proračun dimenzioniranja spiralnog isparivača za hlađenje točenog piva s akumulacijom vodenog leda. Isparivač je izveden kao spirala s ravnim dijelovima i smješten je po obodu posude za vodu. Proračun koeficijenta prolaza topline proveden je uz nekoliko pretpostavki među kojima treba istaknuti geometriju isparivača. Zbog specifične geometrije isparivača, spirale s ravnim segmentima, potpuno adekvatan proračun nije dostupan stoga je proračun proveden kao da se radi o spiralnom isparivaču bez ravnih segmenata. Za takve isparivače postoji nekoliko modela proračuna čiji se rezultati razlikuju u svega nekoliko posto. Kako se na isparivaču nalaze ravni dijelovi, za proračun je odabran model koji se temelji na podjeli spirale na male segmente te promatranju tih segmenata kao samostalnih isparivača.

Isparivač je dimenzioniran za maksimalan rashladni učinak prije početka stvaranja leda.

- Konstrukcijski podaci isparivača
 - Unutarnji promjer cijevi: $d_{U,isp} = 9 \text{ mm}$
 - Vanjski promjer cijevi: $d_{V,isp} = 10 \text{ mm}$
 - Broj zavoja spirale isparivača: $N = 12$
 - Pretpostavljena duljina isparivača: $L_{isp} = 15,8 \text{ m}$
 - Materijal cijevi: Cu
 - Koeficijent toplinske vodljivosti: $\lambda_{cijevi} = 372 \frac{W}{m \cdot K}$
 - Izentropski stupanj djelovanja kompresora: $\eta_{komp.} = 0,75$

- Termodinamički podaci
 - Temperatura isparavanja: $\vartheta_i = -4 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Temperatura kondenzacije: $\vartheta_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Temperatura pregrijanja: $\Delta\vartheta_{pr} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Temperatura pothlađenja: $\Delta\vartheta_{poth} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Rashladni učinak: $\Phi_0 = 1100 \text{ W}$

- Fizikalna svojstva radne tvari pri temperaturi isparavanja

ρ_k	kg/m ³	533,9
v_p	m ³ /kg	0,10887
ρ_p	kg/m ³	9,18527
h'	kJ/kg	190,05
h''	kJ/kg	570,42
$c_{p,k}$	kJ/kg·K	2,464
$c_{p,p}$	kJ/kg·K	1,704
μ_k	Pa·s	$1,31 \cdot 10^{-4}$
μ_p	Pa·s	$7,33 \cdot 10^{-6}$
λ_k	W/m·K	0,108
λ_p	W/m·K	0,01529

Tablica 2.1 Fizikalna svojstva radne tvari na temperaturi isparavanja [7]

2.1. Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi

Unutar isparivača odvija se isparavanje i pregrijanje radne tvari. Zbog razlike u strujanju potrebno je odvojeno promatranje ova dva procesa.

Za proračun koeficijenta prijelaza topline u području pregrijanja koristi se izraz Incorpere i DeWitta [8] prikladan za jednofazno strujanje.

Dvofazno strujanje nešto je kompliciranije. Prema Domanskom [9], promjena faze radne tvari podijeljena je na dva dijela. Dok je maseni udio suhozasićene pare u struji mokre pare manji od 85% pretpostavlja se strujanje kapljevine po obodu cijevi. Kad većina radne tvari ispari, odnosno kad udio suhozasićene pare bude veći od 85%, pretpostavlja se strujanje pare koja sa sobom nosi kapljice.

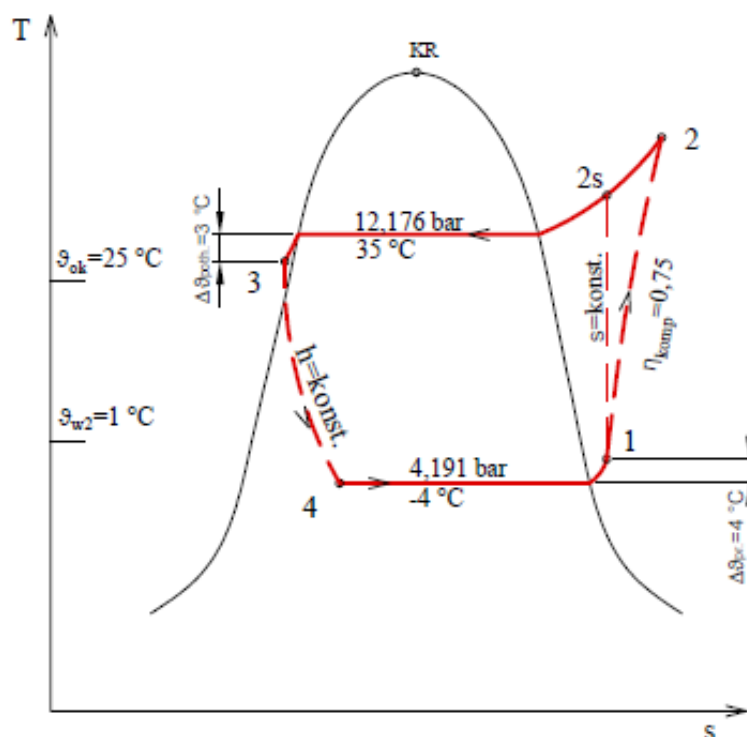
- Postavljanje procesa hlađenja

Uz poznate temperature isparavanja, kondenzacije, pregrijanja i pothlađenja te izentropski stupanj djelovanja kompresora mogu se odrediti karakteristične točke

procesa. Vrijednosti veličina stanja prikazane su Tablicom 2.2. dok je sam proces prikazan u T,s dijagramu Slikom 2.1.

Točka	ϑ	p	h	s
-	$^{\circ}\text{C}$	bar	kJ/kg	kJ/kg·K
1	0	4,191	576	2,4
2s	43	12,176	628	2,4
2	52	12,176	645,3	2,46
3	32	12,176	285,03	-
4	-4	4,191	285,03	-

Tablica 2.2 Točke procesa hlađenja [10]



Slika 2.1 Karakteristične točke procesa hlađenja

- Maseni udio pare nakon prigušenja:

$$x_4 = \frac{h_4 - h'}{h'' - h'}$$

$$x_4 = \frac{285,03 - 190,05}{570,42 - 190,05}$$

$$x_4 = 0,25 \frac{\text{kg}_{\text{szp}}}{\text{kg}_{\text{mp}}}$$

- Maseni protok radne tvari:

$$q_{m,RT} = \frac{\Phi}{h_1 - h_4}$$

$$q_{m,RT} = \frac{1100}{(576 - 285,03) \cdot 1000}$$

$$q_{m,RT} = 0,00378 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- Snaga kompresora:

$$P_{\text{komp}} = q_{m,RT} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$P_{\text{komp}} = 0,00378 \cdot (645,3 - 576) \cdot 1000$$

$$P_{\text{komp}} = 262 \text{ W}$$

- Učink kondenzatora:

$$\Phi_k = P_{\text{komp}} + \Phi_0$$

$$\Phi_k = 1100 + 262$$

$$\Phi_k = 1362 \text{ W}$$

- Unutarnja površina poprečnog presjeka cijevi:

$$A_{U,isp} = \frac{d_{U,isp}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_{U,isp} = \frac{0,009^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_{U,isp} = 0,0000636 \text{ m}^2$$

- Gustoća masenog toka:

$$G = \frac{q_{m,RT}}{A_{U,isp}}$$

$$G = \frac{0,00378}{0,0000636}$$

$$G = 59,43 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

- Toplinski tok izmijenjen tijekom isparavanja radne tvari:

$$\Phi_{isp} = q_{m,RT} \cdot (h'' - h_4)$$

$$\Phi_{isp} = 0,00378 \cdot (570,42 - 285,03) \cdot 1000$$

$$\Phi_{isp} = 1079 \text{ W}$$

- Gustoća toplinskog toka:

$$q = \frac{\Phi_{isp}}{d_{U,isp} \cdot \pi \cdot L_{isp}}$$

$$q = \frac{1079}{0,009 \cdot \pi \cdot 15,8}$$

$$q = 2415,1 \frac{W}{m^2}$$

- Prandtlov broj kapljeviteg dijela dvofazne smjese:

$$Pr_k = \frac{\mu_k \cdot c_{p,k}}{\lambda_k}$$

$$Pr_k = \frac{0,000131 \cdot 2,464 \cdot 1000}{0,108}$$

$$Pr_k = 2,989$$

- Koeficijent isparavanja

$$Bo = \frac{q}{G \cdot (h'' - h')}$$

$$Bo = \frac{2415,1}{59,43 \cdot 1000 \cdot (570,42 - 190,05)}$$

$$Bo = 0,000107$$

Prema modelu Reynoldsov broj funkcija je masenog udjela suhozasićene pare što znači da se mijenja duž isparivača. Prema Domanskom [9], dva su područja isparavanja ovisno o masenom udjelu suhozasićene pare u struji mokre pare. Treće područje isparivača pripada pregrijanju radne tvari. Koeficijent prijelaza topline proračunat je posebno za sva tri područja.

2.3.1. Koeficijent prijelaza topline u području $x \leq 0,85$

U ovom području proračun je proveden prema modelu Gungora i Wintertona [11] koji je potvrđen za radne tvari R11, R12, R22, R113 i R114 [13] uz korekcijski faktor izračunat prema Thomeu [12] koji je potvrđen za R-134a. Standardna devijacija modela iznosi $\pm 21,4\%$ prema [13].

- Reynoldsov broj samo kapljevite faze dvofazne smjese:

$$Re_{k,x} = \frac{G \cdot (1 - x) \cdot d_{U,isp}}{\mu_k}$$

- Martinelli-ev parametar:

$$X_{tt,x} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_k}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_k}{\mu_p}\right)^{0,1}$$

- Korekcijski koeficijent dvofaznog isparavanja:

$$E_x = 1 + 3000 \cdot Bo^{0,86} + 1,12 \cdot \left(\frac{x}{1-x}\right)^{0,75} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_p}\right)^{0,41}$$

- Koeficijent prijelaza topline kapljevite faze dvofazne smjese:

$$\alpha_{k,x} = 0,023 \cdot Re_k^{0,8} \cdot Pr_k^{0,4} \cdot \left(\frac{\lambda_k}{d_{U.isp}}\right)$$

- Koeficijent prijelaza topline dvofaznog medija:

$$\alpha_{tp,x} = E_{m,x} \cdot \alpha_{k,x}$$

Prema navedenim izrazima proveden je proračun koeficijenta prijelaza topline dvofaznog medija za različite vrijednosti masenog udjela parovite faze u mokroj pari:

x_4	$Re_{k,x}$	$\alpha_{k,x}$	$X_{tt,x}$	$E_{m,x}$	$\alpha_{tp,x}$
kg _{SZP} /kg _{MP}	-	W/m ² ·K	-	-	W/m ² ·K
0,25	3064,3	263,1	0,47	4,75	1250,0
0,27	2982,6	257,4	0,43	4,96	1277,5
0,29	2900,9	251,8	0,39	5,18	1304,1
0,31	2819,2	246,1	0,36	5,40	1329,8
0,33	2737,5	240,4	0,33	5,64	1354,6
0,35	2655,7	234,6	0,31	5,88	1378,7
0,37	2574,0	228,8	0,28	6,13	1401,9
0,39	2492,3	223,0	0,26	6,39	1424,5
0,41	2410,6	217,1	0,24	6,66	1446,3
0,43	2328,9	211,2	0,23	6,95	1467,5
0,45	2247,2	205,2	0,21	7,25	1487,9
0,47	2165,5	199,3	0,19	7,57	1507,7
0,49	2083,7	193,2	0,18	7,90	1526,8
0,51	2002,0	187,1	0,17	8,26	1545,2
0,53	1920,3	181,0	0,16	8,64	1563,0
0,55	1838,6	174,8	0,15	9,04	1580,1

0,57	1756,9	168,6	0,14	9,47	1596,5
0,59	1675,2	162,3	0,13	9,94	1612,3
0,61	1593,4	155,9	0,12	10,44	1627,3
0,63	1511,7	149,5	0,11	10,98	1641,6
0,65	1430,0	143,0	0,10	11,58	1655,2
0,67	1348,3	136,4	0,09	12,23	1668,0
0,69	1266,6	129,7	0,09	12,95	1679,9
0,71	1184,9	123,0	0,08	13,75	1691,0
0,73	1103,2	116,2	0,07	14,64	1701,1
0,75	1021,4	109,2	0,07	15,66	1710,2
0,77	939,7	102,2	0,06	16,81	1718,1
0,79	858,0	95,0	0,05	18,15	1724,9
0,81	776,3	87,7	0,05	19,73	1730,2
0,83	694,6	80,2	0,04	21,61	1733,8
0,84	653,7	76,4	0,04	22,70	1735,0

Tablica 2.3 Lokalni koeficijent prijelaza topline u području $x < 0,85$

Srednja vrijednost koeficijenta prijelaza topline računa se kao prosjek lokalnih vrijednosti koeficijenata prema sljedećem izrazu:

$$\alpha_{tp} = \frac{\sum_{x=0,25}^{x=0,84} \alpha_{tp,x}}{31}$$

$$\alpha_{tp} = 1550,7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

2.3.2. Koeficijent prijelaza topline u području pregrijanja radne tvari

U području pregrijanja sva radna tvar je isparila te imamo jednofazno strujanje medija.

- Reynoldsov broj parovite faze radne tvari:

$$Re_p = \frac{G \cdot d_{U.isp}}{\mu_p}$$

$$Re_p = \frac{59,43 \cdot 0,009}{0,00000733}$$

$$Re_p = 72964$$

- Prandtlov broj parovite faze:

$$Pr_p = \frac{\mu_p \cdot c_{p,p}}{\lambda_p}$$

$$Pr_p = \frac{0,00000733 \cdot 1000 \cdot 1,704}{0,01529}$$

$$Pr_p = 0,8169$$

- Koeficijent prijelaza topline jednofaznog medija u području pregrijanja:

$$\alpha_{pr} = 0,023 \cdot Re_p^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot \left(\frac{\lambda_p}{d_{U,isp}} \right)$$

$$\alpha_{pr} = 0,023 \cdot 72964^{0,8} \cdot 0,8169^{0,4} \cdot \left(\frac{0,01529}{0,009} \right)$$

$$\alpha_{pr} = 280,06 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

2.3.3. Koeficijent prijelaza topline u području $0,85 < x < 1$

Prema modelu Domanskog, u ovom području strujanja preostala kapljevina nošena je strujom suhozasićene pare u obliku sitnih kapljica.

- Lokalni koeficijent prijelaza topline računa se prema sljedećem izrazu:

$$\alpha_{mf,x} = \frac{(1-x) \cdot \alpha_{tp,x} + (x-0,85) \cdot \alpha_{pr}}{0,15}$$

- Lokalni koeficijent prijelaza topline dvofaznog medija u području

$$0,85 \frac{kg_{szp}}{kg_{mp}} < x < 1 \frac{kg_{szp}}{kg_{mp}} \text{ prikazan je Tablicom 2.4:}$$

x_4	$Re_{K,x}$	$\alpha_{K,x}$	$X_{tt,x}$	$E_{m,x}$	$\alpha_{tp,x}$	α_{mf}
kg_{szp}/kg_{MP}	-	$W/m^2 \cdot K$	-	-	$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$
0,86	572,0	68,7	0,03	25,27	1735,6	1638,6
0,88	490,3	60,7	0,03	28,55	1733,7	1443,0
0,9	408,6	52,5	0,02	32,93	1728,4	1245,6
0,92	326,9	43,9	0,02	39,15	1718,5	1047,3
0,94	245,1	34,9	0,01	48,80	1702,0	848,8
0,96	163,4	25,2	0,01	66,39	1673,9	651,7
0,98	81,7	14,5	0,01	111,87	1620,0	458,7

Tablica 2.4 Lokalni koeficijent prijelaza topline u području $x > 0,85$

Srednja vrijednost koeficijenta prijelaza topline računa se kao prosjek lokalnih vrijednosti koeficijenata prema sljedećem izrazu:

$$\alpha_{mf} = \frac{\sum_{x=0,86}^{x=0,98} \alpha_{mf,x}}{31}$$

$$\alpha_{mf} = 1047,7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

2.4. Koeficijent prijelaza topline na strani vode

S vanjske strane cijevi isparivača nalazi se voda čije strujanje pospješuje propelerna pumpa. Isparivač je dimenzioniran za hlađenje vode prije početka stvaranja leda. Uz uvođenje pretpostavke o jednolikom nastrujavanju vode na sve cijevi, konstantnoj brzini vode te zanemarivanju utjecaja vodenih vrtloga koeficijent prijelaza topline na strani vode jednak je duž isparivača.

2.4.1. Fizikalni svojstva vode

- Početna temperatura vode: $\vartheta_{w1} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$
- Konačna temperatura vode: $\vartheta_{w2} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Promjena temperature vode: $\Delta\vartheta_w = 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Srednja temperatura vode: $\vartheta_{w,SR} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Brzina strujanja vode: $w_w = 0,25 \text{ m/s}$
- Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi:

ρ_w	kg/m^3	999,91
c_w	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	4,2122
μ_w	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	0,0016548
$\mu_{w,st}$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	0,0017915
λ_w	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	0,56543

Tablica 2.5 Fizikalna svojstva vode

- Volumen posude za vodu: $V_{\text{posuda}} = 0,04 \text{ m}^3$
- Volumen zavojnice isparivača:

$$V_{\text{zavojnica}} = L_{\text{isp}} \cdot A_{\text{v.isp}}$$

$$V_{\text{zavojnica}} = L_{\text{isp}} \cdot \frac{d_{\text{v.isp}}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$V_{\text{zavojnica}} = 15,8 \cdot \frac{0,01^2 \cdot \pi}{4}$$

$$V_{\text{zavojnica}} = 0,00124 \text{ m}^3$$

- Volumen dostupan za strujanja vode:

$$V_{\text{F}} = V_{\text{posuda}} - V_{\text{zavojnica}}$$

$$V_{\text{F}} = 0,04 - 0,00124$$

$$V_{\text{F}} = 0,03876 \text{ m}^3$$

- Ekvivalentni promjer zavojnice:

$$D_{\text{ekv}} = \frac{4 \cdot V_{\text{F}}}{\pi \cdot d_{\text{v.isp}} \cdot L_{\text{isp}}}$$

$$D_{\text{ekv}} = \frac{4 \cdot 0,03876}{\pi \cdot 0,01 \cdot 15,8}$$

$$D_{\text{ekv}} = 0,3123 \text{ m}$$

- Reynoldsov broj na strani vode:

$$\text{Re}_w = \frac{\rho_w \cdot w_w \cdot D_{\text{ekv}}}{\mu_w}$$

$$\text{Re}_w = \frac{999,91 \cdot 0,25 \cdot 0,3123}{0,0016548}$$

$$\text{Re}_w = 47177$$

- Prandtlov broj:

$$\text{Pr}_w = \frac{\mu_w \cdot c_w}{\lambda_w}$$

$$\text{Pr}_w = \frac{0,0016548 \cdot 1000 \cdot 4,2122}{0,56543}$$

$$\text{Pr}_w = 12,328$$

- Nusseltov broj (za $\text{Re}_w > 1000$):

$$\text{Nu}_w = 0,36 \cdot \text{Re}_w^{0,55} \cdot \text{Pr}_w^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_w}{\mu_{w,\text{st}}} \right)^{0,14}$$

$$\text{Nu}_w = 0,36 \cdot 47177^{0,55} \cdot 12,328^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{0,0016548}{0,0017915} \right)^{0,14}$$

$$\text{Nu}_w = 305,95$$

- Koeficijent prijelaza topline na strani vode:

$$\alpha_w = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{D_{ekv}}$$

$$\alpha_w = \frac{305,95 \cdot 0,56543}{0,03123}$$

$$\alpha_w = 553,9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

2.5. Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu

- Koeficijent prolaza topline u području $x \leq 0,85 \frac{kg_{szp}}{kg_{mp}}$:

$$k_{V,tp} = \frac{1}{\frac{r_{V.isp}}{r_{U.isp} \cdot \alpha_{tp}} + \frac{r_{V.isp}}{\lambda_{cijevi}} \cdot \ln\left(\frac{r_{V.isp}}{r_{U.isp}}\right) + \frac{1}{\alpha_w}}$$

$$k_{V,tp} = \frac{1}{\frac{0,005}{0,0045 \cdot 1550,7} + \frac{0,005}{372} \cdot \ln\left(\frac{0,005}{0,0045}\right) + \frac{1}{553,9}}$$

$$k_{V,tp} = 396,3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- Koeficijent prolaza topline u području $0,85 \frac{kg_{szp}}{kg_{mp}} < x < 1 \frac{kg_{szp}}{kg_{mp}}$:

$$k_{V,mf} = \frac{1}{\frac{r_{V.isp}}{r_{U.isp} \cdot \alpha_{mf}} + \frac{r_{V.isp}}{\lambda_{cijevi}} \cdot \ln\left(\frac{r_{V.isp}}{r_{U.isp}}\right) + \frac{1}{\alpha_w}}$$

$$k_{V,mf} = \frac{1}{\frac{0,005}{0,0045 \cdot 1047,7} + \frac{0,005}{372} \cdot \ln\left(\frac{0,005}{0,0045}\right) + \frac{1}{553,9}}$$

$$k_{V,mf} = 348,8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- Koeficijent prolaza topline u području pregrijanja:

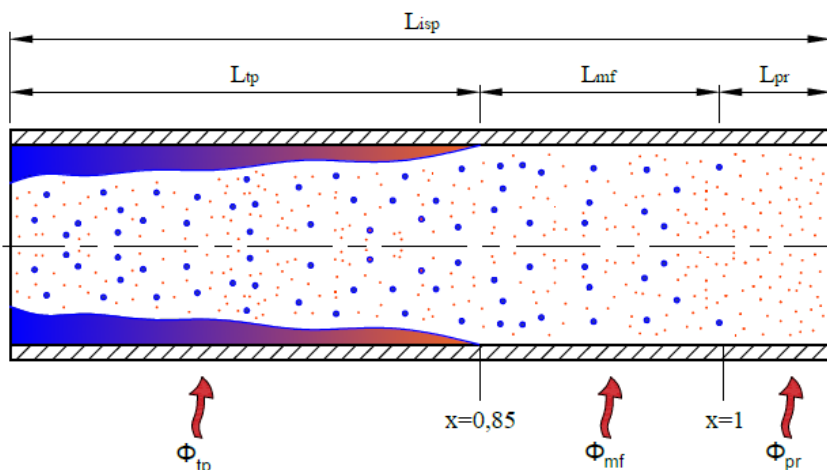
$$k_{V,pr} = \frac{1}{\frac{r_{V.isp}}{r_{U.isp} \cdot \alpha_{pr}} + \frac{r_{V.isp}}{\lambda_{cijevi}} \cdot \ln\left(\frac{r_{V.isp}}{r_{U.isp}}\right) + \frac{1}{\alpha_w}}$$

$$k_{V,pr} = \frac{1}{\frac{0,005}{0,0045 \cdot 280,06} + \frac{0,005}{372} \cdot \ln\left(\frac{0,005}{0,0045}\right) + \frac{1}{553,9}}$$

$$k_{V,pr} = 173,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

2.6. Potrebna duljina isparivača

Duljina isparivača određuje se iterativnim postupkom i najveći utjecaj ima brzina strujanja vode, odnosno koeficijent prijelaza topline na strani vode. Cijeli isparivač podijeljen je na tri dijela jer se razlikuju koeficijenti prijelaza topline tako da je ukupna duljina jednaka zbroju sve tri duljine isparivača kako je prikazano Slikom 2.2. Svaki dio isparivača izmijeni određeni toplinski tok sa vodom.



Slika 2.2 Isparavanje radne tvari

2.6.1. Izmijenjeni toplinski tokovi po segmentima isparivača

- Entalpija radne tvari za maseni udio suhozasićene pare 85%:

$$h_{x=0,85} = h' + 0,85 \cdot (h'' - h')$$

$$h_{x=0,85} = 190,05 + 0,85 \cdot (570,42 - 190,05)$$

$$h_{x=0,85} = 513,36 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Toplinski tok izmijenjen u području $x \leq 0,85 \frac{\text{kg}_{\text{szp}}}{\text{kg}_{\text{mp}}}$:

$$\Phi_{\text{tp}} = q_{\text{m,RT}} \cdot (h_{x=0,85} - h_4)$$

$$\Phi_{\text{tp}} = 0,00378 \cdot (513,36 - 285,03) \cdot 1000$$

$$\Phi_{tp} = 863,2 \text{ W}$$

- Toplinski tok izmijenjen u području $0,85 \frac{\text{kg}_{\text{szip}}}{\text{kg}_{\text{mp}}} < x < 1 \frac{\text{kg}_{\text{szip}}}{\text{kg}_{\text{mp}}}$:

$$\Phi_{mf} = q_{m,RT} \cdot (h'' - h_{x=0,85})$$

$$\Phi_{mf} = 0,00378 \cdot (570,42 - 513,36) \cdot 1000$$

$$\Phi_{mf} = 215,7 \text{ W}$$

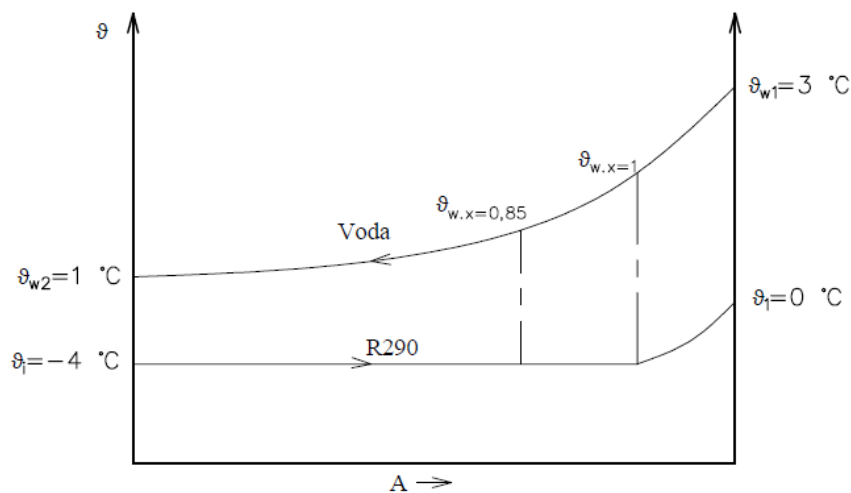
- Toplinski tok izmijenjen u području pregrijanja:

- $\Phi_{pr} = q_{m,RT} \cdot (h_1 - h'')$

$$\Phi_{pr} = 0,00378 \cdot (576 - 570,42) \cdot 1000$$

$$\Phi_{pr} = 21,1 \text{ W}$$

2.6.2. Srednja logaritamska temperaturna razlika



Slika 2.3 Θ, A -dijagram isparivača

- Maseni protok vode koja se ohladi sa 3 °C na 1 °C duž cijelog isparivača:

$$q_{m,w} = \frac{\Phi_0}{c_w \cdot (\Theta_{w1} - \Theta_{w2})}$$

$$q_{m,w} = \frac{1100}{4212,2 \cdot (3 - 1)}$$

$$q_{m,w} = 0,13057 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- Lokalna temperature vode pri $x = 0,85 \frac{\text{kg}_{\text{szip}}}{\text{kg}_{\text{mp}}}$:

$$\Phi_{tp} = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\Theta_{w,x=0,85} - \Theta_{w2})$$

$$\vartheta_{w,x=0,85} = \vartheta_{w2} + \frac{\Phi_{tp}}{q_{m,w} \cdot c_w}$$

$$\vartheta_{w,x=0,85} = 1 + \frac{863,2}{0,13057 \cdot 4212,2}$$

$$\vartheta_{w,x=0,85} = 2,57 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Lokalna temperatura vode pri $x = 1 \frac{\text{kg}_{\text{szp}}}{\text{kg}_{\text{mp}}}$:

$$\Phi_{pr} = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w1} - \vartheta_{w,x=1})$$

$$\vartheta_{w,x=1} = \vartheta_{w1} - \frac{\Phi_{pr}}{q_{m,w} \cdot c_w}$$

$$\vartheta_{w,x=1} = 3 - \frac{21,1}{0,13057 \cdot 4212,2}$$

$$\vartheta_{w,x=1} = 2,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Srednja logaritamska temperaturna razlika u području $x \leq 0,85 \frac{\text{kg}_{\text{szp}}}{\text{kg}_{\text{mp}}}$:

$$\Delta\vartheta_{m,tp} = \frac{(\vartheta_{w,x=0,85} - \vartheta_i) - (\vartheta_{w2} - \vartheta_i)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{w,x=0,85} - \vartheta_i}{\vartheta_{w2} - \vartheta_i}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_{m,tp} = \frac{(2,57 - (-4)) - (1 - (-4))}{\ln\left(\frac{2,57 - (-4)}{1 - (-4)}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_{m,tp} = 5,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Srednja logaritamska temperaturna razlika u području $0,85 \frac{\text{kg}_{\text{szp}}}{\text{kg}_{\text{mp}}} < x < 1 \frac{\text{kg}_{\text{szp}}}{\text{kg}_{\text{mp}}}$:

$$\Delta\vartheta_{m,mf} = \frac{(\vartheta_{w,x=1} - \vartheta_i) - (\vartheta_{w,x=0,85} - \vartheta_i)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{w,x=1} - \vartheta_i}{\vartheta_{w,x=0,85} - \vartheta_i}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_{m,mf} = \frac{(2,96 - (-4)) - (2,57 - (-4))}{\ln\left(\frac{2,96 - (-4)}{2,57 - (-4)}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_{m,mf} = 6,76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Srednja logaritamska temperaturna razlika u području pregrijanja:

$$\Delta\vartheta_{m,pr} = \frac{(\vartheta_{w,x=1} - \vartheta_i) - (\vartheta_{w,1} - \vartheta_i)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{w,x=1} - \vartheta_i}{\vartheta_{w,1} - \vartheta_i}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_{m,pr} = \frac{(2,96 - (-4)) - (4 - 0)}{\ln\left(\frac{2,96 - (-4)}{4 - 0}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_{m,pr} = 4,71 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.6.3. Potrebna duljina isparivača za izmjenu topline

- Duljina izmjenjivača za izmjenu topline do $x = 0,85 \frac{\text{kg}_{szp}}{\text{kg}_{mp}}$:

$$\Phi_{tp} = k_{v,tp} \cdot A_{tp} \cdot \Delta\vartheta_{m,tp}$$

$$\Phi_{tp} = k_{v,tp} \cdot d_{v,isp} \cdot \pi \cdot L_{tp} \cdot \Delta\vartheta_{m,tp}$$

$$L_{tp} = \frac{\Phi_{tp}}{k_{v,tp} \cdot d_{v,isp} \cdot \pi \cdot \Delta\vartheta_{m,tp}}$$

$$L_{tp} = \frac{863,2}{396,3 \cdot 0,01 \cdot \pi \cdot 5,75}$$

$$L_{tp} = 12,06 \text{ m}$$

- Duljina izmjenjivača potrebna za izmjenu topline u području $0,85 \frac{\text{kg}_{szp}}{\text{kg}_{mp}} < x < 1 \frac{\text{kg}_{szp}}{\text{kg}_{mp}}$:

$$\Phi_{mf} = k_{v,mf} \cdot A_{mf} \cdot \Delta\vartheta_{m,mf}$$

$$\Phi_{mf} = k_{v,mf} \cdot d_{v,isp} \cdot \pi \cdot L_{mf} \cdot \Delta\vartheta_{m,mf}$$

$$L_{mf} = \frac{\Phi_{mf}}{k_{v,mf} \cdot d_{v,isp} \cdot \pi \cdot \Delta\vartheta_{m,mf}}$$

$$L_{mf} = \frac{215,7}{348,8 \cdot 0,01 \cdot \pi \cdot 6,76}$$

$$L_{mf} = 2,91 \text{ m}$$

- Duljina izmjenjivača potrebna za pregrijanje radne tvari:

$$\Phi_{pr} = k_{v,pr} \cdot A_{pr} \cdot \Delta\vartheta_{m,pr}$$

$$\Phi_{pr} = k_{v,pr} \cdot d_{v,isp} \cdot \pi \cdot L_{pr} \cdot \Delta\vartheta_{m,pr}$$

$$L_{pr} = \frac{\Phi_{pr}}{k_{v,pr} \cdot d_{v,isp} \cdot \pi \cdot \Delta\vartheta_{m,pr}}$$

$$L_{pr} = \frac{21,1}{173,2 \cdot 0,01 \cdot \pi \cdot 4,71}$$

$$L_{pr} = 0,82 \text{ m}$$

- Ukupna duljina isparivača:

$$L_{\text{isp}} = L_{\text{tp}} + L_{\text{mf}} + L_{\text{pr}}$$

$$L_{\text{isp}} = 12,06 + 2,91 + 0,82$$

$$L_{\text{isp}} = 15,79 \text{ m}$$

3. AKUMULACIJA RASHLADNE ENERGIJE

Uređaj radi na principu akumulacije rashladne energije u obliku vodenog leda kako bi se smanjio broj uključivanja kompresora u vremenu i na taj način zaštitio elektromotor od pregaranja. Druga prednost akumulacije rashladne energije je pokrivanje vršnog opterećenja. U slučaju veće potrošnje piva potreban je veći rashladni učinak što bi značilo i veće gabarite rashladnog uređaja. Osim povećanja potrošnje energije, ovakva izvedba rezultirala bi većim dimenzijama uređaja što može stvoriti problem prilikom smještaja u barove ili restorane. Akumulacijom rashladne energije pokriva se dio toplinskog opterećenja što rezultira manjim potrebnim gabaritima uređaja.

Rashladni uređaj ima zadatak akumulirati rashladnu energiju u obliku 15 kg leda. Mjerenjem je ustanovljeno da čitav proces hlađenja vode temperature 10 °C do stvaranja 15 kg leda traje približno 2 sata i 30 minuta. Prvi sloj leda počinje se javljati nakon 20 minuta rada uređaja. Proračun stvaranja sloja leda provest će se za srednju temperaturu isparavanja od početka stvaranja leda do isključivanja uređaja koja je dobivena mjerenjem i iznosi približno -6 °C. Za temperaturu hladne vode uzima se srednja vrijednost izmjerena u istom periodu i iznosi približno 2,5 °C. Radi pojednostavljena proračuna uvodi se konstantna vrijednost koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari tijekom isparavanja. Na koeficijent prolaza topline kroz stjenku cijevi veći utjecaj ima medij sa manjim koeficijentom prijelaza topline. Koeficijent prijelaza topline na strani vode znatno je manji od koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari stoga uvedena pretpostavka neće znatno utjecati na rezultat.

- Ulazni podaci za proračun:
 - Srednja temperatura vode: $\vartheta_{w,SR} = 2,5 \text{ °C}$
 - Krajnja temperatura vode: $\vartheta_{w,2} = 0 \text{ °C}$
 - Temperatura isparavanja: $\vartheta_i = -6 \text{ °C}$
 - Temperatura pregrijanja: $\Delta\vartheta_{pr} = 4 \text{ °C}$
 - Koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{cijevi} = 372 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
 - Koeficijent toplinske vodljivosti leda: $\lambda_l = 2,21 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
 - Gustoća leda: $\rho_l = 917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 - Specifična toplina skrućivanja leda: $q_l = 334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
 - Potrebna masa leda: $m_l = 15 \text{ kg}$

- Proračunska duljina isparivača:

$$L_{isp} = 15,79 \text{ m}$$

- Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane stjenke:

$$\alpha_u = \frac{L_{tp}}{L_{isp}} \cdot \alpha_{tp} + \frac{L_{mf}}{L_{isp}} \cdot \alpha_{mf} + \frac{L_{tp}}{L_{isp}} \cdot \alpha_{mf}$$

$$\alpha_u = \frac{12,06}{15,79} \cdot 1550,7 + \frac{2,91}{15,79} \cdot 1047,7 + \frac{0,82}{15,79} \cdot 280,06$$

$$\alpha_u = 1391,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

- Srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta\theta_m = \frac{(\vartheta_{w.sr} - (\vartheta_i + \Delta\vartheta_{pr})) - (\vartheta_{w.2} - \vartheta_i)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{w.sr} - (\vartheta_i + \Delta\vartheta_{pr})}{\vartheta_{w.2} - \vartheta_i}\right)}$$

$$\Delta\theta_m = \frac{(2,5 - (-6 + 4)) - (0 - (-6))}{\ln\left(\frac{2,5 - (-6 + 4)}{0 - (-6)}\right)}$$

$$\Delta\theta_m = 5,21 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Volumen akumuliranog leda:

$$V_l = \frac{m_l}{\rho_l}$$

$$V_l = \frac{15}{917}$$

$$V_l = 0,01636 \text{ m}^3$$

- Debljina sloja leda oko cijevi:

$$V_l = L_{l.isp} \cdot \pi \cdot (d_v \cdot s + s^2)$$

$$s^2 + 0,01 \cdot s - \frac{0,01636}{15,97 \cdot \pi} = 0$$

$$s = 14,31 \text{ mm}$$

Proračun akumulacije leda proveden je na način da se za svaki stvoreni milimetar sloja leda proračunava vrijeme potrebno za zaleđivanje. Za određivanje vremena zaleđivanja korišteni su sljedeći izrazi [14]:

- Vanjska površina za izmjenu topline:

$$A_v = \pi \cdot L_{l.isp} \cdot 2 \cdot (r_v + s)$$

- Koeficijent prolaza topline:

$$k_{V,L} = \frac{1}{\frac{r_{V.isp} + s}{r_{U.isp} \cdot \alpha_u} + \frac{r_{V.isp} + s}{\lambda_{cijevi}} \cdot \ln\left(\frac{r_{V.isp}}{r_{U.isp}}\right) + \frac{r_{V.isp} + s}{\lambda_l} \cdot \ln\left(\frac{r_{V.isp} + s}{r_{V.isp}}\right) + \frac{1}{\alpha_w}}$$

- Izmijenjeni toplinski tok:

$$\Phi_0 = k_{V,L} \cdot A_V \cdot \Delta\theta_m$$

- Maseni protok vode koja se pretvori u led:

$$q_{m,l} = \frac{\Phi_0}{q_l}$$

Veličina V_L predstavlja ukupni volumen leda u određenom trenutku dok veličina ΔV_L predstavlja promjenu volumena, odnosno volumen leda nastao pri promijeni debljine leda za 1 mm. Δm_L je masa leda nastala pri promijeni debljine sloja leda za 1 mm.

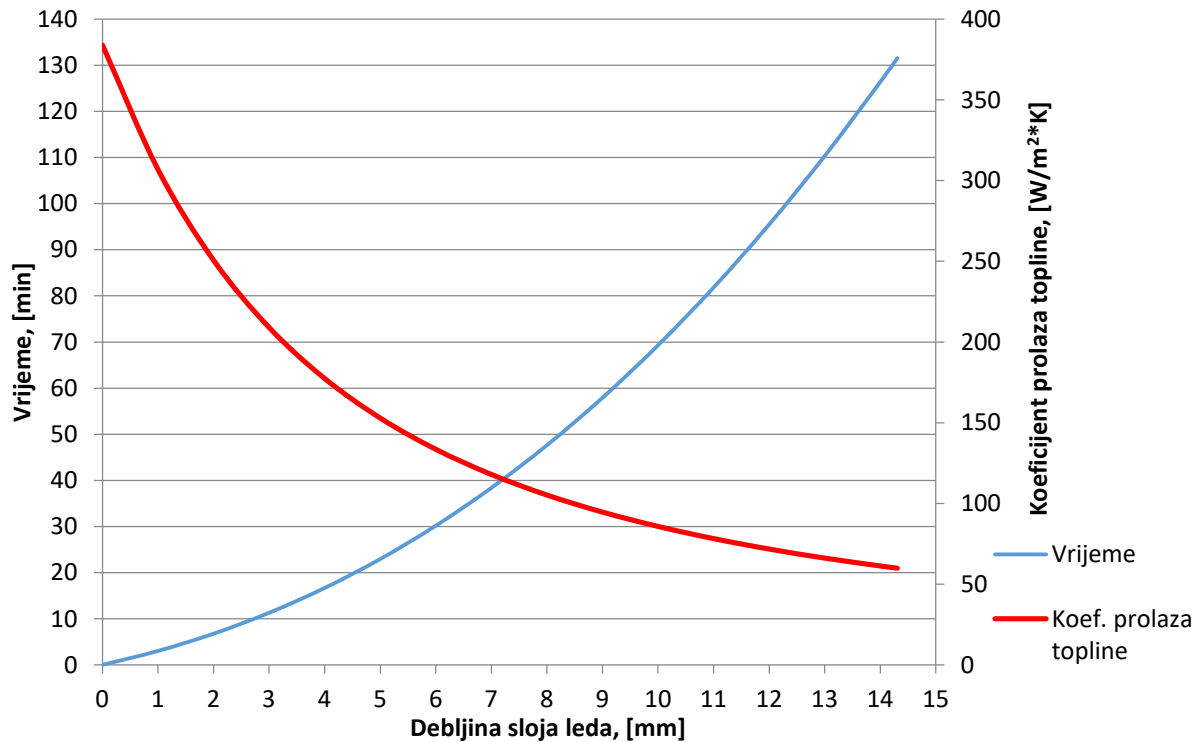
Veličina T predstavlja vrijeme potrebno za stvaranje jednog milimetra leda, dok T_{uk} predstavlja ukupno vrijeme potrebno za stvaranje leda određene debljine.

- Proračun vremena potrebnog za stvaranje 15 kg leda:

s	A_V	k_V	Φ	q_{mL}	V_L	ΔV_L	Δm_L	T	T_{uk}
mm	m ²	W/m ² ·K	W	kg/min	m ³	m ³	kg	min	min
0	0,496	383,9	993,1	0,173	0	0	0	0	0,00
1	0,595	306,8	952,3	0,166	0,0005	0,0005	0,500	3,02	3,0
2	0,695	250,6	907,6	0,158	0,0012	0,0006	0,591	3,74	6,8
3	0,794	208,9	864,8	0,151	0,0019	0,0007	0,682	4,53	11,3
4	0,893	177,4	825,8	0,144	0,0028	0,0008	0,773	5,38	16,7
5	0,992	152,9	791,0	0,138	0,0037	0,0009	0,864	6,28	22,9
6	1,092	133,5	759,9	0,132	0,0048	0,0010	0,955	7,22	30,2
7	1,191	117,9	732,3	0,128	0,0059	0,0011	1,046	8,21	38,4
8	1,290	105,2	707,6	0,123	0,0071	0,0012	1,137	9,23	47,6
9	1,389	94,6	685,5	0,119	0,0085	0,0013	1,228	10,29	57,9
10	1,488	85,8	665,5	0,116	0,0099	0,0014	1,319	11,38	69,3
11	1,588	78,2	647,5	0,113	0,0115	0,0015	1,410	12,51	81,8
12	1,687	71,7	631,1	0,110	0,0131	0,0016	1,501	13,66	95,4
13	1,786	66,1	616,1	0,107	0,0148	0,0017	1,592	14,84	110,3
14	1,885	61,3	602,3	0,105	0,0167	0,0018	1,683	16,05	126,3
14,31	1,916	59,9	598,3	0,104	0,0173	0,0006	0,540	5,19	131,5

Tablica 3.1 Proračun akumulacije leda

Provedenim proračunom ustanovljeno je da za stvaranje 15 kg leda uređaj treba više od 130 minuta rada. Testiranjem propanskog uređaja utvrđeno je vrijeme od 120 minuta potrebnih za stvaranje leda odnosno do trenutka isključivanja kompresora.



Slika 3.1 Promjena značajnih veličina sa stvaranjem leda

Slika 3.1. prikazuje promjenu potrebnog vremena i koeficijenta prolaza topline s povećanjem debljine sloja leda. Kako se stvara led, povećava se otpor izmjene topline odnosno smanjuje se koeficijent prolaza topline jer led predstavlja izolator. S većim otporom izmjene topline, odnosno sa smanjenjem toplinskog toka raste potrebno vrijeme za stvaranje iste količine leda. Jednostavno rečeno, potrebno je više vremena za promjenu debljine sloja leda sa 13 mm na 14 mm nego sa 1 mm na 2 mm.

Za prikaz pravog utjecaja smanjenja toplinskog otpora potrebno je drugačije izraziti veličine. Naime, kako su cijevi kružnog poprečnog presjeka, ne nastane jednaka količina leda pri promjeni debljine sloja, na primjer, sa 1 mm na 2 mm i pri promjeni sa 13 mm na 14 mm. Iz tog razloga pravi utjecaj povećanja otpora izmjene topline potrebno je prikazati preko mase leda koja se stvori u jednoj minuti za svaku debljinu sloja leda.

s	k_v	Φ	Δm_L	T	Δm_L/T
mm	W/m²·K	W	kg	min	kg/min
0	383,9	993,1	0	0	
1	306,8	952,3	0,500	3,02	0,166
2	250,6	907,6	0,591	3,74	0,158
3	208,9	864,8	0,682	4,53	0,151
4	177,4	825,8	0,773	5,38	0,144
5	152,9	791,0	0,864	6,28	0,138
6	133,5	759,9	0,955	7,22	0,132
7	117,9	732,3	1,046	8,21	0,128
8	105,2	707,6	1,137	9,23	0,123
9	94,6	685,5	1,228	10,29	0,119
10	85,8	665,5	1,319	11,38	0,116
11	78,2	647,5	1,410	12,51	0,113
12	71,7	631,1	1,501	13,66	0,110
13	66,1	616,1	1,592	14,84	0,107
14	61,3	602,3	1,683	16,05	0,105
14,31	59,9	598,3	0,540	5,19	0,104

Tablica 3.2 Povećanje toplinskog otpora sa stvaranjem leda

Posljednji stupac Tablice 3.2 prikazuje smanjenje stvaranja leda u istom periodu s povećanjem debljine leda. Zbog pada koeficijenta prolaza topline smanji se izmijenjeni toplinski tok što utječe na smanjenje količine stvorenog leda u vremenu, odnosno isparivač teže stvara novi led što je debljina postojećeg veća.

4. REZULTATI MJERENJA

Podaci mjerenja obrađeni na stranicama: 39, 40, 41, 42 i 43 nisu dostupni radi zaštite prava tvrtke Oprema d.d. koja je donirala uređaj.

ZAKLJUČAK

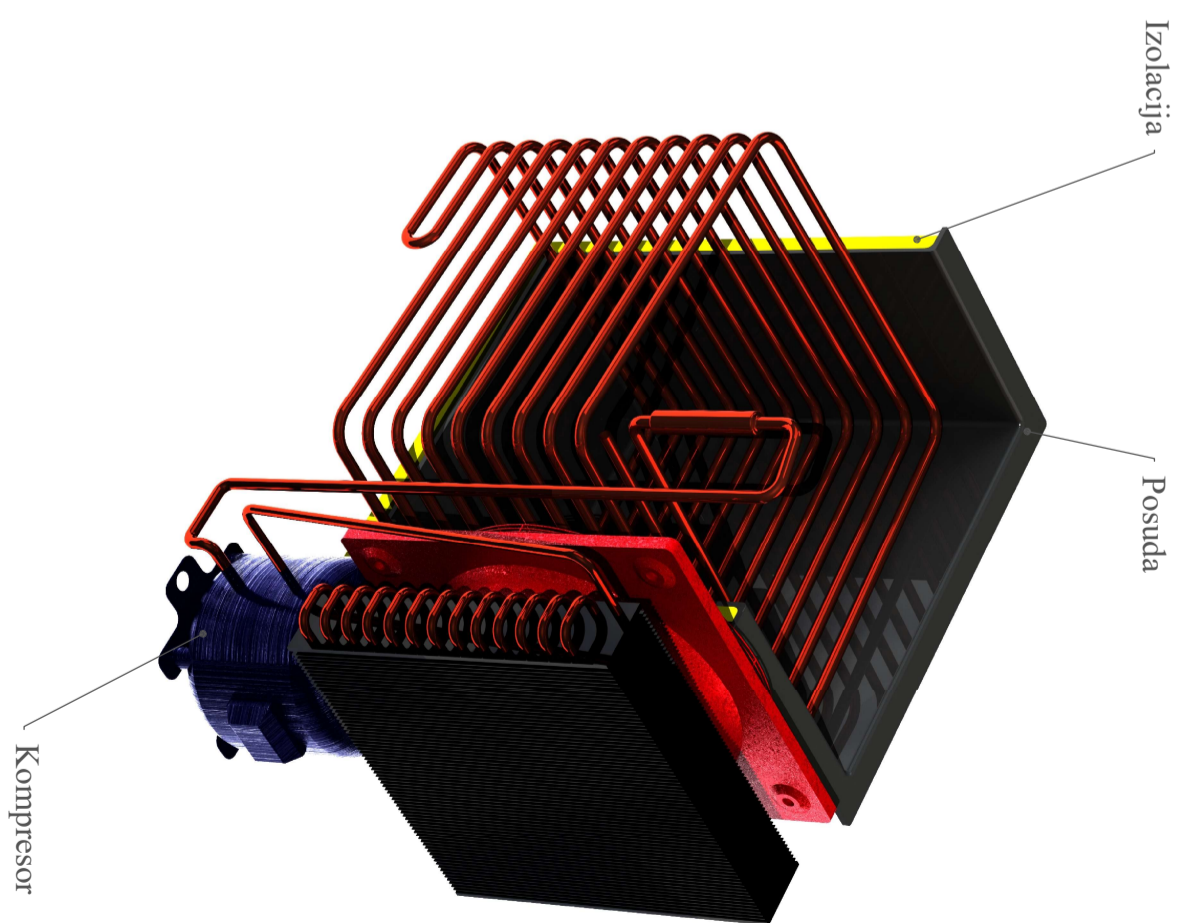
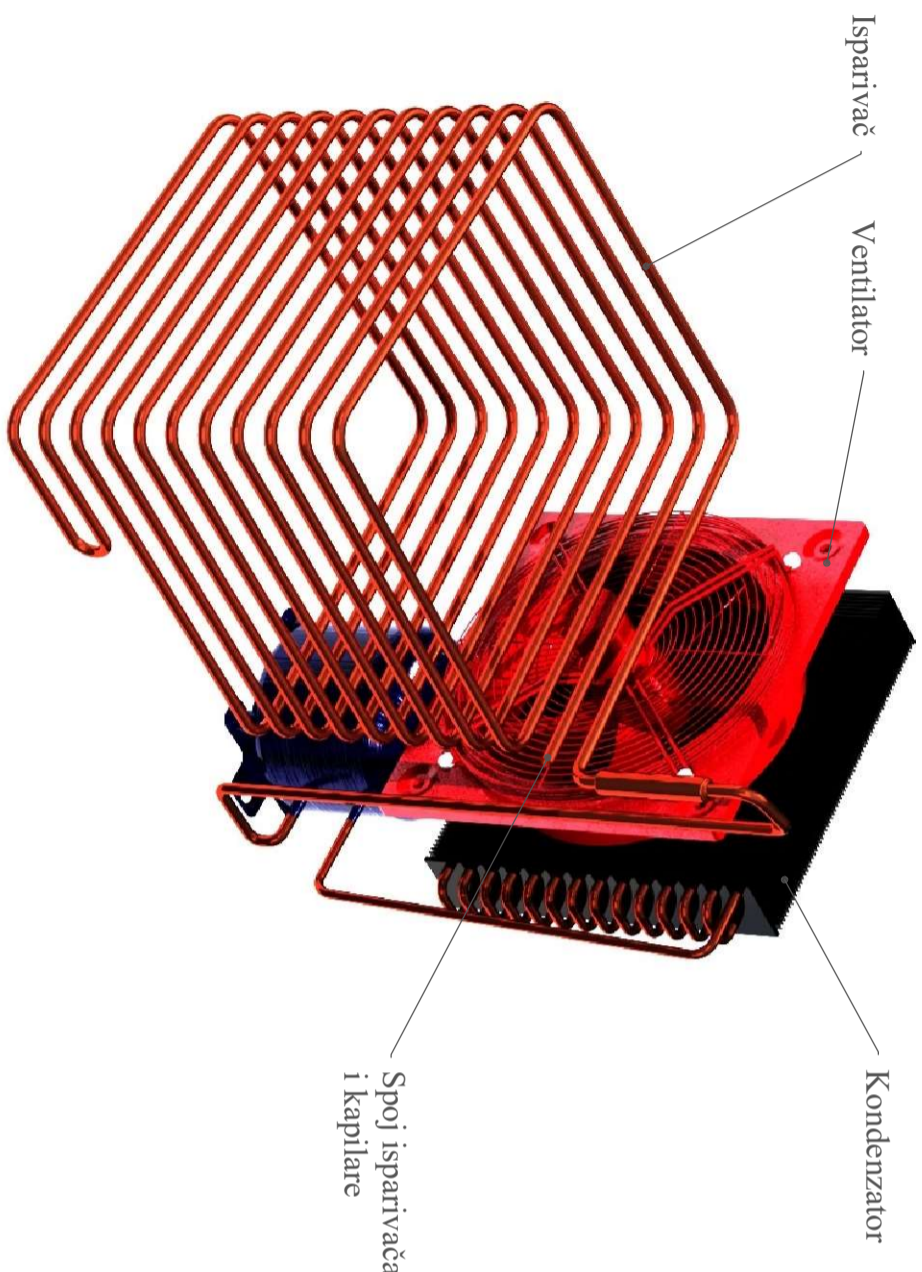
Proračun ovakvog tipa isparivača proveden uz pretpostavku potpuno spiralne geometrije može znatno utjecati na konačni ishod stoga podatke dobivene termodinamičkim proračunom treba uzeti s dozom opreza. Za kontrolu empirijskog proračuna provedena su mjerenja. Rezultati pokazuju poklapanje stvaranja leda s proračunskim izrazima stoga se model proračuna može smatrati adekvatnim. Nedostatak ovog uređaja dolazi do izražaja mjerenjem temperature na kraju kompresije koja je znatno viša od očekivanih vrijednosti. Visoka temperatura posljedica je visokog pregrijanja radne tvari koje iznosi blizu 10 °C. U svrhu boljeg rada uređaja potrebno je odabrati kondenzator većeg učinka kako bi pothlađenje radne tvari bilo veće te odabrati kapilaru u skladu s kondenzatorom i isparivačem. Visoko pregrijanje dobro je za rad kompresora sa sigurnosne strane, međutim energetski nije povoljno jer kompresor trajno troši veću energiju.


PRILOG

1. 3D model rashladnog uređaja izrađen u programu SolidWorks
2. Shema upravljanja i regulacije

LITERATURA

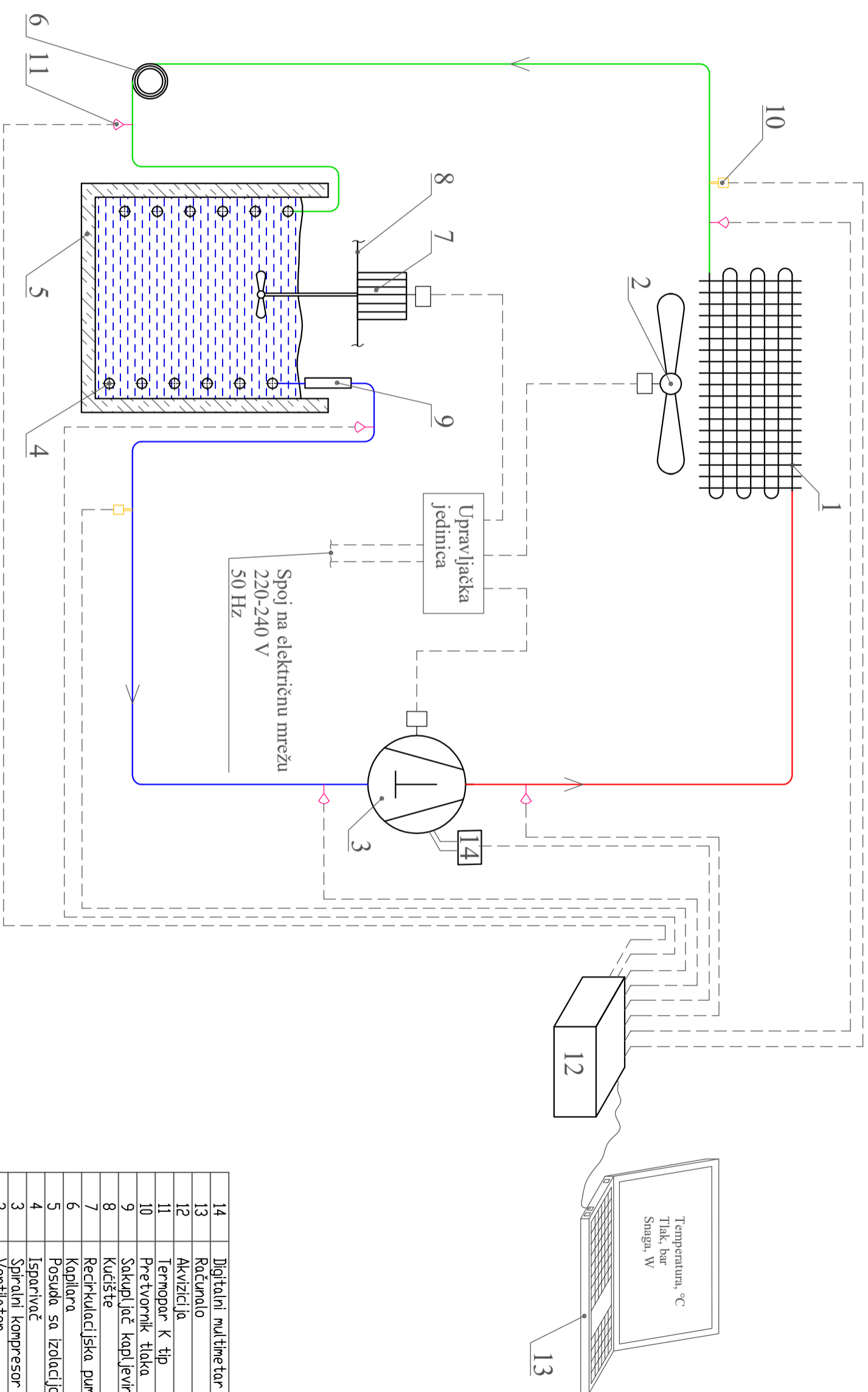
1. Uredba (EU) br. 517/2014 Europskog parlamenta i vijeća od 16. travnja 2014. o fluoriranim stakleničkim plinovima i stavljanju izvan snage Uredbe (EZ) br. 842/2006
2. V. Soldo, M. Grozdek, L. Boban: Hladnje i dizalice topline, podloge za predavanja, Zagreb, 2016.
3. ASHRAE Standard 34-2007, Designation and Safety Classification of Refrigerants, 2008.
4. HRN EN 378: Rashladni sustavi i dizalice topline-Zahtjevi s obzirom na okoliš i sigurnost, Dio 1-4, 2008.
5. Kilkenny Coolin System LTD, Ireland
6. ATMOSphere natural refrigerants, The lowest energy consumption when using R290, Vicente Guilabert
7. ASHRAE Handbook Fundamentals 2009, SI Edition, Chapter 30: Thermophysical properties of refrigerants
8. Incropera, F.P. and DeWitt, D. P., „Fundamentals of Heat and Mass transfer“, Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York, (1996)
9. Domanski, P.A., „EVSIM- an Evaporator Simulation Model Accounting for Refrigerant and One Dimensional Air Distribution“, NISTIR 89-4133, U.S. Dept. of Commerce, NIST, Maryland 20899, (1989)
10. Tables and Diagrams for the Refrigeration Industry, Thermophysical Properties R290-Propane, Institut International Du Froid, France, (2001)
11. Gungor, K.E. and Winterton, R.H.S., „A General Correlation for Flow Fluid in Tubes and Annuli“, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 29, No.3, str. 351-358, (1986)
12. Thome, J.R., „Boiling of New Refrigerants: A State-of-the-Art-Review“, Int. J. Refrig., Vol. 19, No. 7, str. 435-457, (1997)
13. Engineering Data Book III, Chapter 10: Boiling Heat Transfer Inside Plain Tubes, (2007)
14. Petar Mikulaj, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, (2016)



Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	Ivan Soldo		
Razradio			
Crtao			
Pregledao			
Mentor	Prof. Vladimir Soldo		
Objekt: 3D model hladnjaka točenog piva		Objekt broji: R. N. broji:	Soldo_završni rad



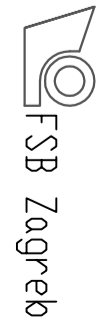
$\Phi_k = 1362 \text{ W}$
 $\Phi_i = 1100 \text{ W}$
 $P = 262 \text{ W}$
 $g_1 = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $g_k = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $g_{w,sl} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $g_{ok} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$
 Radna tvar: R290



— Tlačni vod
— Kapljevinski vod
— Usisni vod

Datum	Ime i prezime
Projektirao	Oprena d.d. Ludbreg
Razradio	Ivan Soldo
Crtao	
Pregledao	
Mentor	Prof. Vladimir Soldo
Objekt:	Shema spajanja i regulacije

14	Digitalni multimeter
13	Računalo
12	Akvizicija
11	Termopar K tip
10	Pretvornik tlaka
9	Sakupljač kapljevine
8	Kućiste
7	Recirkulacijska pumpa
6	Kapilara
5	Posuda sa izolacijom
4	Iparivač
3	Spiralni kompresor
2	Ventilator
1	Kondenzator



Objekt broji	Soldo_završni rad
R. N. broji	

