

Analiza termodinamičkog procesa s realnim radnim tvarima

Bedoić, Robert

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:600902>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Robert Bedoić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, kolovoz 2016

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidat Robert Bedoić
Predao je izrađen završni rad dana: 29. kolovoza 2016.

Povjerenstvo u sastavu:

Prof. dr. sc. Veljko Filipan, Fakultet kemijskog inženjerstva i
tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
Izv. prof. dr. sc. Igor Sutlović, Fakultet kemijskog inženjerstva i
tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
Prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 1. rujna 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Robert Bedoić

ANALIZA TERMODINAMIČKOG PROCESA S REALNIM
RADNIM TVARIMA

ANALYSIS OF A THERMODYNAMIC PROCESS WITH REAL
WORKING MEDIA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Veljko Filipan

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Veljko Filipan

izv. prof. dr. sc. Igor Sutlović

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić

Zagreb, kolovoz 2016

ZAHVALA

Zahvaljujem svome mentoru, prof. dr. sc. Veljku Filipanu na savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Vladimiru Soldi i mag. ing. Luki Bobanu s Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu na ustupljenim mjernim podacima i savjetima te pomoći tijekom izrade završnog rada.

SAŽETAK RADA

U radu se ispituje utjecaj vrste radnih tvari i promjene režima rada na karakteristične veličine procesa u dizalici topline u režimu grijanja. Koristeći eksperimentalne podatke s geotermalne dizalice topline provjerava se točnost i primjenjivost tabličnog modela proračuna uz korištenje REFPROP baze termodinamičkih parametara za realne fluide. Nadalje, iz eksperimentalnih podataka analizira se prijelaz topline s tla na sekundarni fluid u bušotinskom izmjenjivaču topline, te procesi u ostalim izmjenjivačima topline, isparivaču i kondenzatoru. Termodinamički proces prikazuje se u odgovarajućim usporedbenim termodinamičkim dijagramima kako bi se zorno vidjela razlika svojstava radnih tvari i njihov utjecaj na energetske značajke dizalice topline. Ispituje se utjecaj izabrane radne tvari na karakteristične veličine u procesu pri čemu su obuhvaćene sljedeće radne tvari: propan, izobutan, nedopušteni R-12 i njegova ekološki prihvatljiva te široko prihvaćena zamjena R-134a, i za usporedbu amonijak kao najčešće korištena rashladna tvar. U režimu grijanja promatra se utjecaj promjene temperature isparavanja radne tvari na jedinični utrošeni rad, rashladni učin, toplinu kondenzacije, temperaturu nakon kompresije i faktor grijanja dizalice topline, uz konstantnu temperaturu (tlak) kondenzacije. Ispituje se također utjecaj promjene temperaturnog režima rada u dizalici topline na karakteristične veličine u procesu.

Ključne riječi:

Dizalica topline, termodinamički proces, REFPROP, realne radne tvari, prijelaz topline, izmjenjivači topline, termodinamički dijagrami, energetske veličine

ABSTRACT

The aim of the work is to examine the influence of different refrigerants and different working conditions on specific energetic values in the heating mode of a heat pump. The possibility of applying spreadsheet calculator to a real thermodynamic process using the REFPROP base of thermodynamic parameters for real fluids is examined. Using experimental data taken from a geothermal heat pump there is also included the heat transfer from the ground to the secondary fluid in the borehole heat exchanger, and the processes in other heat exchangers, such as evaporator and condenser. Thermodynamic process is shown in the respective comparative thermodynamic diagrams in order to clearly see the different properties of refrigerants and their impact on the energy characteristics of the heat pump. Also, the energy characteristics of different refrigerants are analysed for the same temperature conditions. The following refrigerants are included: propane, isobutane, rejected R-12 and its environmentally friendly and widely accepted replacement R-134a, and for comparison ammonia as the most commonly used refrigerant. In the heating mode there is analysed how the changes in evaporation temperature of refrigerant at constant condensation temperature (pressure) influence the unit workloads, cooling capacity, heat of condensation, temperature after compression, and the heating coefficient of a heat pump. Furthermore, the influence of different temperature regime on characteristic energetic values is examined.

Keywords:

Heat pumps, thermodynamic process, REFPROP, real refrigerants, heat transfer, heat exchangers, thermodynamic diagrams, energy characteristics

Tablica sadržaja

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Uvod..... | 1 |
| 2 | Dizalice topline..... | 2 |
| 2.1 | Termodinamički proces..... | 3 |
| 2.2 | Elementi dizalice topline..... | 6 |
| 2.2.1 | Izmjenjivači topline..... | 6 |
| 2.2.2 | Kompresija i kompresori..... | 9 |
| 2.2.3 | Prigušivanje i prigušni elementi..... | 11 |
| 3 | REFPROP..... | 13 |
| 4 | Eksperimentalna geotermalna dizalica topline..... | 16 |
| 4.1 | Geotermalna dizalica topline u režimu grijanja..... | 16 |
| 4.2 | Rezultati mjerenja na geotermalnoj dizalici topline..... | 20 |
| 4.3 | Usporedba mjerenih podataka i podataka dobivenih modelom..... | 20 |
| 5 | Rezultati proračuna i rasprava..... | 22 |
| 5.1 | Izmjenjivači topline..... | 22 |
| 5.1.1 | Isparivač..... | 23 |
| 5.1.2 | Kondenzator..... | 24 |
| 5.1.3 | Bušotinski izmjenjivač topline..... | 24 |
| 5.2 | Realni proces s propanom..... | 28 |
| 5.4 | Promjena radne tvari u procesu..... | 32 |
| 5.5 | Promjena temperature isparavanja..... | 36 |
| 5.6 | Promjena temperaturnog režima i stupnja iskorištenja kompresora..... | 38 |
| 5.6.1 | Utjecaj na faktor grijanja dizalice topline..... | 39 |
| 5.6.2 | Utjecaj na temperaturu nakon kompresije..... | 42 |
| 5.6.3 | Utjecaj na jediničnu toplinu kondenzacije..... | 46 |
| 5.6.4 | Usporedba rezultata..... | 49 |
| 6 | Zaključak..... | 50 |
| 7 | Popis oznaka i indeksa..... | 51 |
| 8 | Literatura..... | 54 |
| 9 | Prilozi..... | 56 |
| | ŽIVOTOPIS..... | 61 |

1 Uvod

Dizalice topline spadaju u postrojenja koja se koriste u sustavima gdje postoji potreba za toplinskom energijom s ciljem što veće energetske učinkovitosti.

U radu se opisuje izvedba geotermalne dizalice topline tipa zemlja-voda kao i termodinamički proces koji u njoj protječe. Uspoređuju se vrijednosti proračuna dobivene pomoću tabličnog kalkulatora i baze termodinamičkih parametara za realne fluide sa stvarno mjerenim eksperimentalnim vrijednostima. Prikazuje se proračun pokretačkih sila procesa prijenosa topline, kao i ukupni koeficijent prolaza topline za izmjenjivače topline u dizalici topline kao i bušotinski izmjenjivač topline u zemlji.

Istražuje se utjecaj promjena parametara radnih tvari i vrste radnih tvari na energetske značajke procesa. Upoznaje se sa karakteristikama različitih radnih tvari i ispituje se njihova primjenjivost na stvarnom postrojenju.

Analize su potkrijepljene numeričkim rezultatima, tabličnim prikazima i odgovarajućim grafovima.

2 Dizalice topline

Dizalice topline su transformatori topline u kojima je minimalna temperatura u procesu viša ili jednaka onoj okoline, a maksimalna temperatura u procesu veća od one okoline. U procesu se toplina odvodi od tijela niže temperature i dovodi tijelu više temperature, uz utrošak rada. Za rad uređaja potreban je izvor topline (tijelo niže temperature) koje se može ohladiti na određenu temperaturu i potrošač tako dobivene topline (tijelo više temperature). Primjena dizalica topline omogućava iskorištavanje topline tijela s relativno niskom temperaturom (npr. okolni zrak, morska voda, voda nakon hlađenja hidrogeneratora, tlo) [1]. Geotermalne dizalice topline su ekološki prihvatljiva zamjena konvencionalnim sustavima grijanja i hlađenja zbog svoje visoke učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti. Ovisno o namjeni geotermalne dizalice topline tlo se može koristiti i kao izvor i kao ponor topline [2]. Raspodjela temperatura tla po dubini bušotine, kao i njihova vrijednost ovise ponajprije o geografskim i geološkim faktorima i kao takvi se trebaju eksperimentalno odrediti [3].

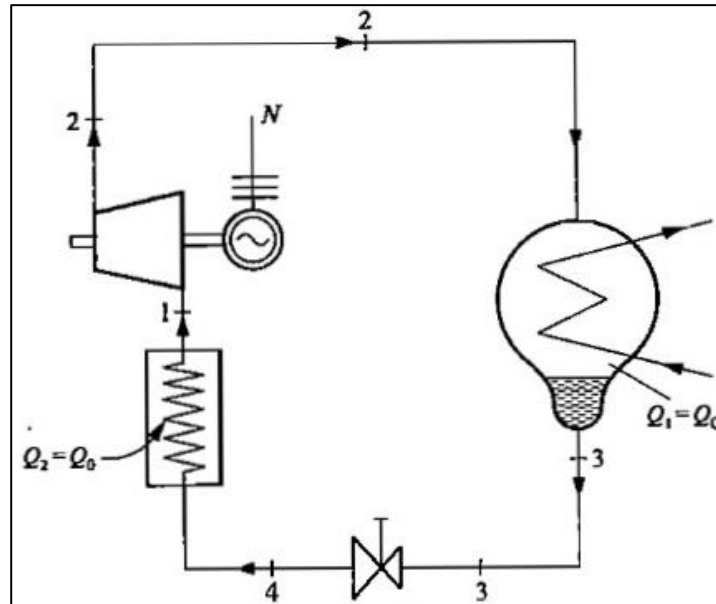
S obzirom na način rada dizalice topline dijele se na:

- mehaničke kompresijske
- apsorpcijske
- adsorpcijske
- termoakustične [4]

Mehaničke kompresijske dizalice topline zasnivaju svoj rad na kompresiji suhozasićene ili pregrijane pare, dok kod apsorpcijskih dizalica topline nakon isparavanja dolazi do apsorpcije radne tvari u apsorpcijskoj tvari (LiBr-voda ili amonijak-voda). Kod adsorpcijskih dizalica topline nakon isparavanja dolazi do adsorpcije radne tvari na krutom adsorbentu (zeolit-voda, silika gel-voda, aktivni ugljen-metanol). Termoakustične dizalice topline nisu u komercijalnoj primjeni. Kao radna tvar u dizalicama topline mogu se koristiti: amonijak, freoni, razne smjese ugljikovodika, itd. Današnja primjena dizalica topline odnosi se za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju, no sve se više raširila upotreba istih u procesima gdje je potrebno povećati energetska učinkovitost. U radu se analizira mehanička kompresijska (geotermalna) dizalica topline.

2.1 Termodinamički proces

Osnovni elementi parno-kompresijskog uređaja su: kompresor, kondenzator, prigušni ventil i isparivač.



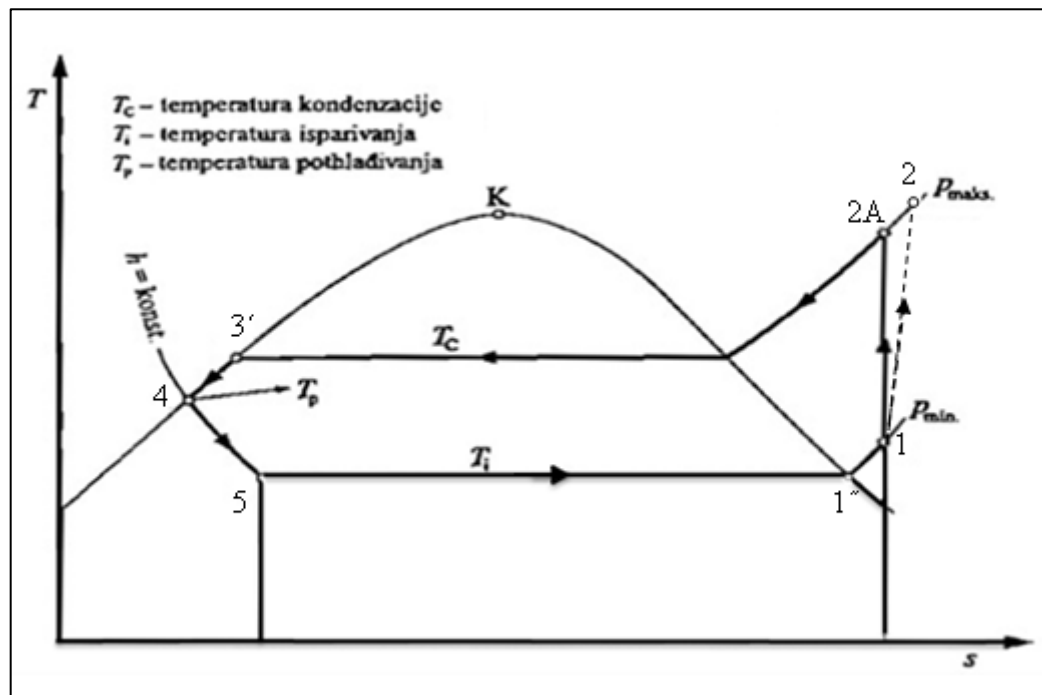
Slika 1 Shema kompresijske dizalice topline

Proces u jednostavnoj parno kompresijskoj dizalici topline prikazanoj na Slici 1 protječe na sljedeći način: radna tvar se komprimira uz potrošnju mehaničkog rada (1 do 2). Slijedi hlađenje i kondenzacija (2 do 3), pri čemu oslobođeni toplinski tok preuzima rashladna voda ili zrak kojim se kondenzator hladi. Pomoću toplinskog toka rashladne tvari, zrak ili rashladna voda zagrijavaju se do temperature na kojoj se mogu primjeniti u različite svrhe, npr. za zagrijavanje prostora, bazena i slično. Nakon kondenzacije radna tvar prigušuje se do tlaka i temperature u isparivaču (3 do 4). U isparivaču se mokroj pari (smjesa pare i kapljevine) dovodi toplinski tok (4 do 1) koji je oduzet tijelu koje se hladi.

Kako bi se postigao što veći faktor grijanja dizalice topline te uz to osigurao optimalan i siguran rad prikazani teorijski proces poboljšava se kako je prikazano na Slici 2:

- pregrijavanjem suhozasićene pare na ulazu u kompresor (suhozasićena para na ulazu u kompresor mogla bi sadržavati eventualne čestice kapljevite faze te na taj način prouzročiti hidrauličke udare); time se ujedno i povećava jedinična toplina koja se dovodi radnoj tvari, odnosno rashladni učin, ali i povisuje temperatura na izlazu iz kompresora

- pothlađivanje vrele kapljevine na izlazu iz kondenzatora (gibanjem radne tvari kroz cjevodod od kondenzatora do prigušnog ventila dolazi do pada tlaka, odnosno sniženja temperature; pojava isparavanja smanjuje propusnu moć prigušnog ventila pošto je jedinični volumen kapljevine manji od jediničnog volumena mokre pare; stoga da se izbjegne pojava pare provodi se pothlađivanje vrele kapljevine pri stalnom tlaku) proces se gotovo podudara sa lijevom graničnom krivuljom pa se često u toplinskom dijagramu takav i prikazuje



Slika 2 Termodinamički proces s pregrijavanjem suhozasićene pare, pothlađivanjem kondenzata te izentropskom i realnom kompresijom

Jedinična toplina koja se radnoj tvari odvodi na Slici 2 odgovara razlici entalpija stanja 2 i 4. Jedinična toplina koja se dovodi radnoj tvari odgovara razlici entalpija stanja 1 i 5. Kompresor vrši kompresiju radne tvari, od stanja 1 do 2A ako je kompresija izentropska (idealna) ili do stanja 2 u realnoj kompresiji pri čemu jedinični rad također odgovara razlici entalpija. Pothlađivanje vrele kapljevine pri stalnom tlaku je proces od stanja 3' do stanja 4. U nepovratnom procesu prigušivanja od 4 do 5 nema nikakve izmjene rada odnosno korisne topline pa za taj proces vrijedi $h_4 = h_5$.

Toplinski tok kondenzacije (\dot{Q}_c) dobiva se iz izraza:

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot q_c \quad (1)$$

a toplinski tok u isparivaču iz izraza:

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} \cdot q_0 \quad (2)$$

Faktor grijanja dizalice topline (koeficijent dizalice topline, COP=coefficient of performance) dan je izrazom:

$$\varepsilon_{DT} = \frac{|q_c|}{|w_{teh,K}|} = \frac{|h_4 - h_2|}{|h_1 - h_2|} \quad (3)$$

U gornjem izrazu i jedinična toplina kondenzacije i rad kompresora prema dogovoru imaju negativan predznak, pošto se toplina odvodi od radne tvari, a na radnoj tvari se vrši rad. Radi lakše usporedbe uzete su apsolutne vrijednosti obiju veličina.

Proračun stvarnog procesa uključuje gubitke koji se pojavljuju: otpori u cjevovodu, neidealnost kompresora, mehanički i električni gubitci u elektromotoru, itd. Svi ti gubitci su opisani ukupnim stupnjem djelovanja dizalice topline η_u koji je definiran izrazom:

$$\eta_u = \frac{\varepsilon_{sDT}}{\varepsilon_{DT}} \quad (4)$$

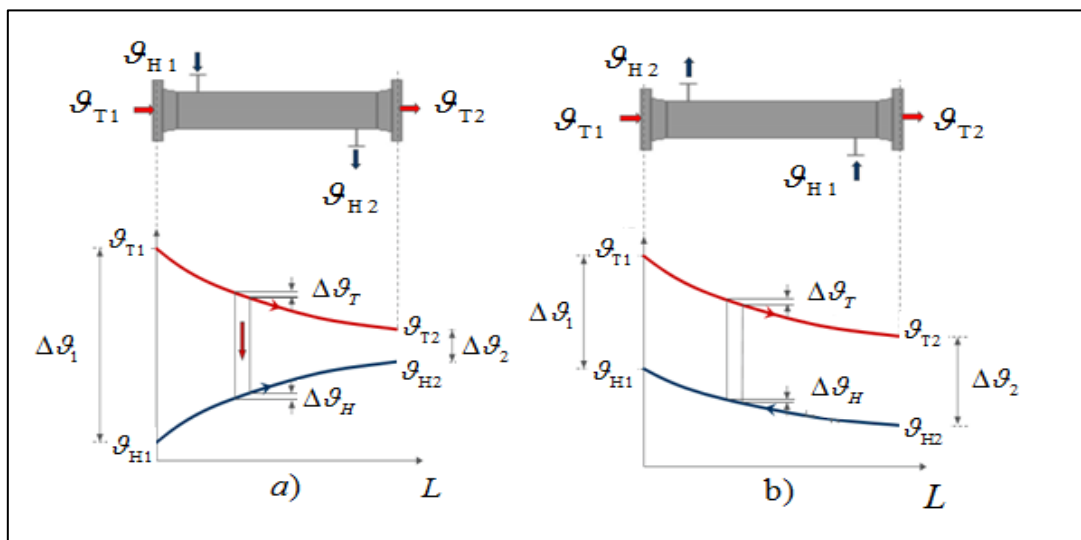
pri čemu je ε_{sDT} stvarni faktor grijanja dizalice topline.

2.2 Elementi dizalice topline

Dizalica topline sastoji se od: kompresora, dvaju izmjenjivača topline i prigušnog elementa. U daljnjem radu se na osnovi eksperimentalnih podataka opisuju izmjenjivači topline, njihova izvedba i utjecaj na proces. Određuju se pokretačke sile procesa prijenosa topline i ukupni koeficijent prolaza topline. Pomoću eksperimentalnih podataka proračunava se stupanj iskorištenja kompresora u geotermalnoj dizalici topline te udio parne faze u dvofaznom području nakon što radna tvar prođe kroz prigušni ventil.

2.2.1 Izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline predstavljaju uređaje u kojima se toplina prenosi s jednog fluida na drugi bez njihovog međusobnog kontakta. Zbog široke primjene izmjenjivača topline postoje razne klasifikacije s obzirom na: konstrukciju, smjer strujanja, mehanizam prijenosa topline, itd. Tri su osnovne konstrukcijske izvedbe izmjenjivača topline: cijevni, pločasti i spiralni. S obzirom na smjer strujanja fluida postoje: istostrujni, protustrujni i križni izmjenjivači topline. Ta tri tipa izmjenjivača topline ponajprije se razlikuju prema gradijentu temperature (lokalnoj pokretačkoj sili) duž izmjenjivača topline kako je prikazano na Slici 3 [6].



Slika 3 Usporedba a) istostrujnog i b) protustrujnog izmjenjivača topline

Osnovna jednadžba za proračun bilo kojeg izmjenjivača topline glasi:

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot \Delta \vartheta_m \quad (5)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura (pokretačka sila prijenosa topline) dana je izrazom:

$$\Delta \vartheta_m = \frac{\Delta \vartheta_1 - \Delta \vartheta_2}{\ln\left(\frac{\Delta \vartheta_1}{\Delta \vartheta_2}\right)} \quad (6)$$

gdje su $\Delta \vartheta_1$ i $\Delta \vartheta_2$ razlike temperatura „hladnog“ i „toplog“ fluida na jednoj i drugoj strani izmjenjivača.

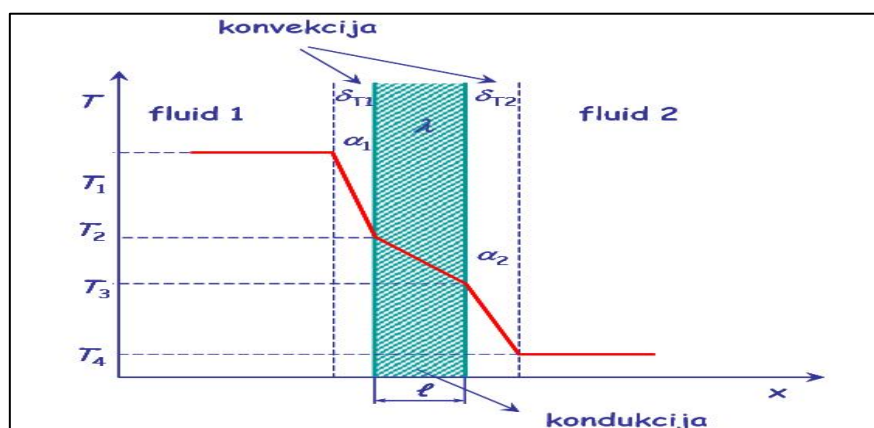
Kod izmjenjivača složene geometrije (gdje je ostvaren veći broj prolaza fluida kroz plašt ili cijevi) pokretačka sila korigira se faktorom F, koji se može proračunati na temelju poznatih temperatura fluida ili izčitati s odgovarajućeg dijagrama.

Ukupni koeficijent prolaza topline odgovara recipročnoj vrijednosti sume svih otpora koji se pojavljuju prijenosu topline, prema izrazu:

$$K = \frac{1}{\sum_i R_i} = \frac{1}{\sum_j R_{j,\text{konvekcija}} + \sum_k R_{k,\text{kondukcija}}} \quad (7)$$

Za slučaj na Slici 4 ukupni koeficijent prolaza topline je:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8)$$

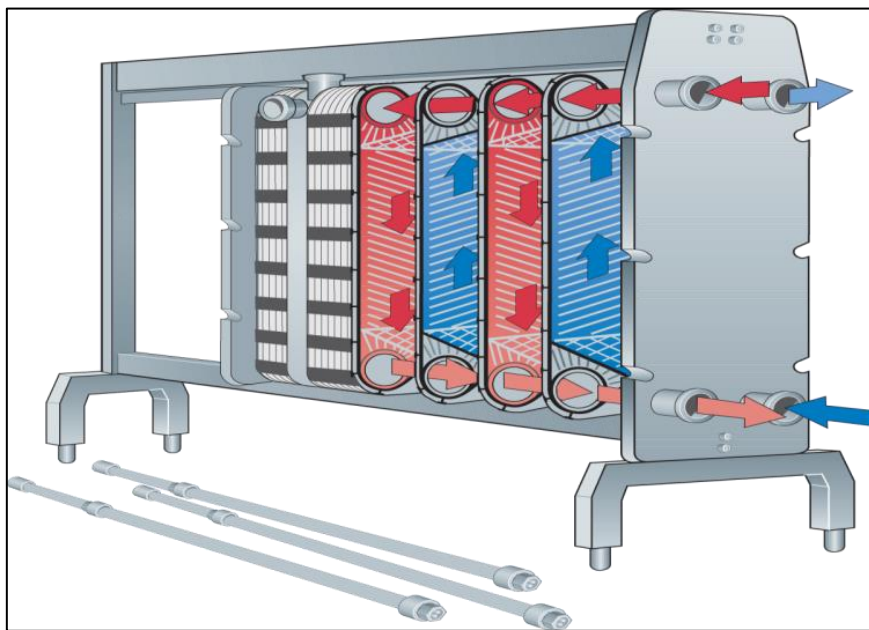


Slika 4 Izmjena topline između dva fluida odvojena čvrstom stijenkom

Ukoliko na stijenci postoje naslage zbog prisutnih nečistoća u fluidu izraz (8) se korigira na način da se uvede otpor naslaga koji se određuje eksperimentalno (Fouling faktor, R_f) pa ukupni koeficijent prolaza topline poprima izraz:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{l} + \frac{1}{\alpha_2} + R_f} \quad (9)$$

U pločastom izmjenjivaču topline prikazanom na Slici 5 uslijed orebrenosti površine dolazi do povećanja turbulencija i time raste ukupni koeficijent prolaza topline čime je za isti toplinski tok i istu pokretačku silu potrebna manja površina izmjene topline. Ovi izmjenjivači nisu pogodni za vrlo visoke tlakove te mogu biti ograničeni temperaturama ovisno o materijalu korištenom za brtvljenje ukoliko ploče nisu zalemljene ili zavarene. Također nisu prikladni za korištenje nečistih fluida jer imaju visoku tendenciju zaprljanja.



Slika 5 Pločasti izmjenjivač topline [7]

2.2.2 Kompresija i kompresori

Kompresija je proces povišenja tlaka uslijed smanjenja volumena radne tvari koji se vrši u kompresorima. HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) sustavi najčešće koriste sljedećih pet vrsti kompresora [8]:

- klipni
- spiralni
- rotirajući
- vijčani
- centrifugalni

Kod klipnih kompresora klip se pokreće pomoću motora te stišće radnu tvar u cilindar, preko stapajice ili klipnjače. Moguće su izvedbe sa više cilindara - višestupanjska kompresija. Na Slici 6 je prikazan kompresor koji se koristi u geotermalnoj dizalici topline.



Slika 6 Klipni kompresor u geotermalnoj dizalici topline [9]

Spiralni kompresori rade na način da pomična spirala stišće radnu tvar prema središtu nepomične spirale pri čemu dolazi do kompresije. Ovakav način komprimiranja je prikladniji u odnosu na klipni kompresor jer takav kompresor radi glatko i tiho. Prikaz spiralnog kompresora nalazi se na Slici 7.



Slika 7 Spiralni kompresor [10]

Kompresija realne radne tvari u dizalicama topline diže temperaturu radne tvari prije ulaska u kondenzator, kako bi se omogućila izmjena topline između radne tvari i tvari koja prima toplinu u kondenzatoru. Veličina koja opisuje uspješnost kompresije je stupanj iskorištenja (djelovanja) kompresora, η_K . Definira se kao omjer utrošenog rada izentropske kompresije i stvarno utrošenog rada prema izrazu:

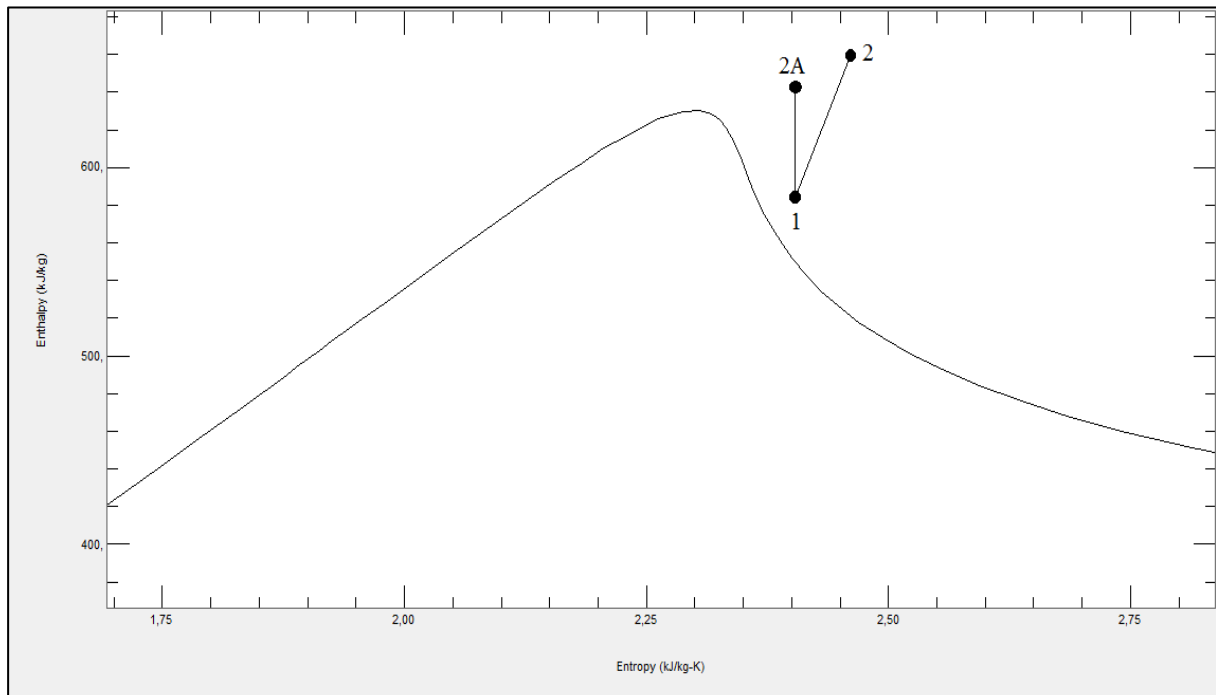
$$\eta_K = \frac{|w_{K,izentropski}|}{|w_{K,stvarni}|} \quad (10)$$

S obzirom na Sliku 8, stupanj iskorištenja kompresora se može prikazati preko razlika entalpija prema izrazu:

$$\eta_K = \frac{|h_1 - h_{2A}|}{|h_1 - h_2|} \quad (11)$$

Koristeći stupanj iskorištenja kompresora, uz poznate veličine stanja za odabrane točke u procesu kompresije moguće je odrediti temperaturu na kraju kompresije koja ima značajan utjecaj pri odabiru materijala za dijelove kompresora, kao i odvodnju topline.

Na Slici 8 prikazane su kompresije pregrijane pare propana: idealna (izentropska) kompresija (1-2A) te stvarna kompresija (1-2) sa stupnjem iskorištenja kompresora od 75% u h,s dijagramu.

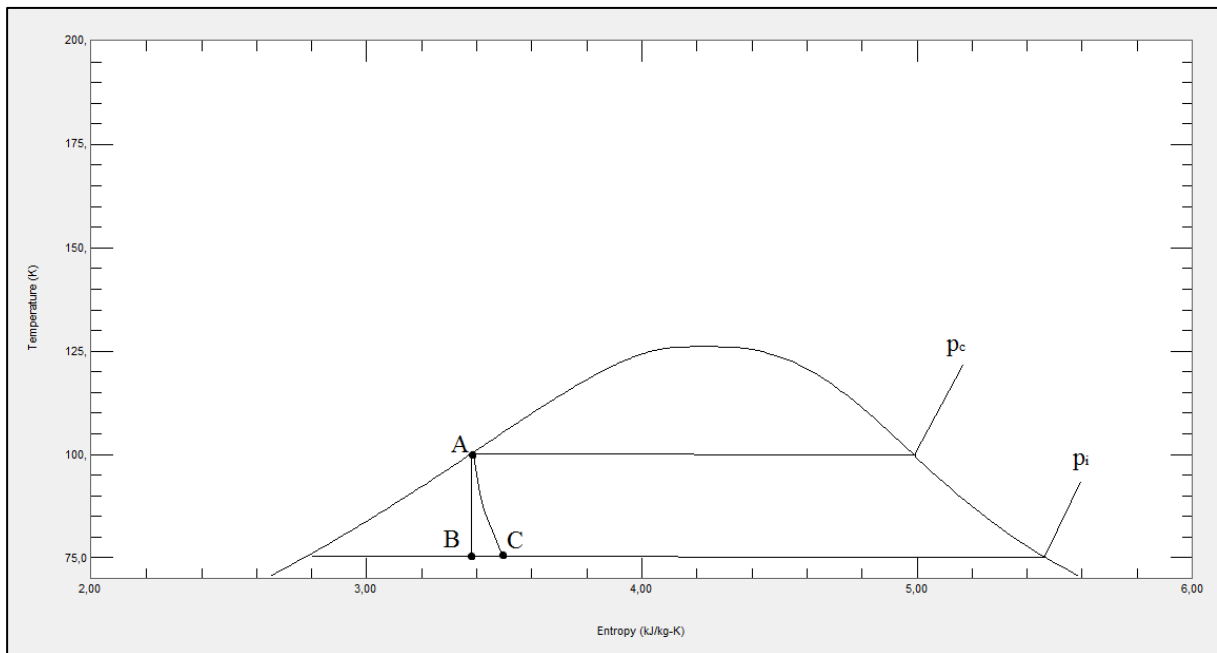


Slika 8 Idealna i stvarna kompresija pregrijane pare u h,s dijagramu

2.2.3 Prigušivanje i prigušni elementi

Prigušni (ekspanzijski) elementi u dizalicama topline služe prigušivanju radne tvari s kondenzatorskog tlaka na tlak u isparivaču. Proces protječe na način da radna tvar nailazi na naglo suženje i proširenje presjeka cijevi kroz koju struji pri čemu dolazi do nepovratnog pada tlaka i temperature te povećanja jediničnog volumena. Prigušivanje protječe pri stalnoj entalpiji te se prilikom prigušivanja ne izmjenjuju niti rad niti toplina između radne tvari i okoline, ali se može mijenjati unutrašnja energija radne tvari. Na Slici 9 su prikazani procesi prigušivanja (A-C) i izentropske ekspanzije (A-B). Zbog jednostavnije izvedbe prigušivanje je primjenjiviji proces u odnosu na ekspanziju, iako se time malo smanjuje rashladni učin. Pošto se prigušuje vrela kapljevina ili općenito stanje radne tvari blizu lijeve granične krivulje

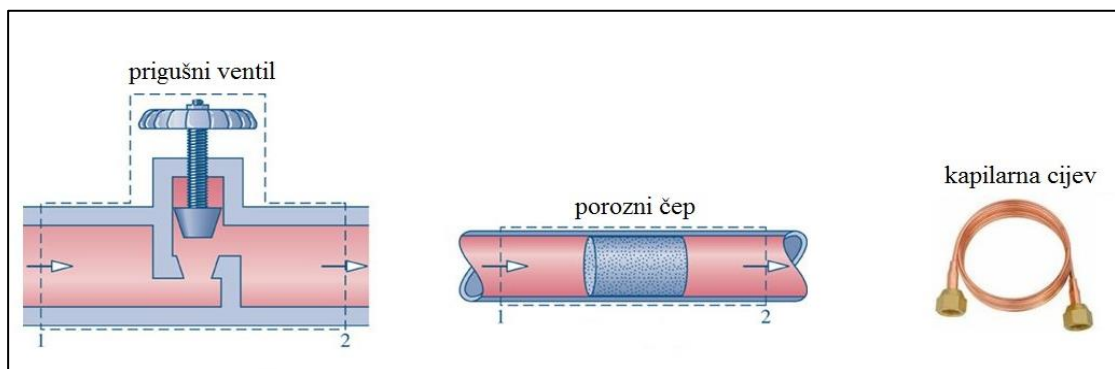
slijedi da bi ekspanzijski cilindar imao vrlo male dimenzije zbog malog jediničnog volumena radne tvari što bi bilo neprikladno.



Slika 9 Prigušivanje i izentropska ekspanzija u T,s dijagramu

Kao prigušni elementi najčešće se upotrebljavaju oni prikazani na Slici 10:

- prigušni ventil
- kapilarna cijev
- porozni čep

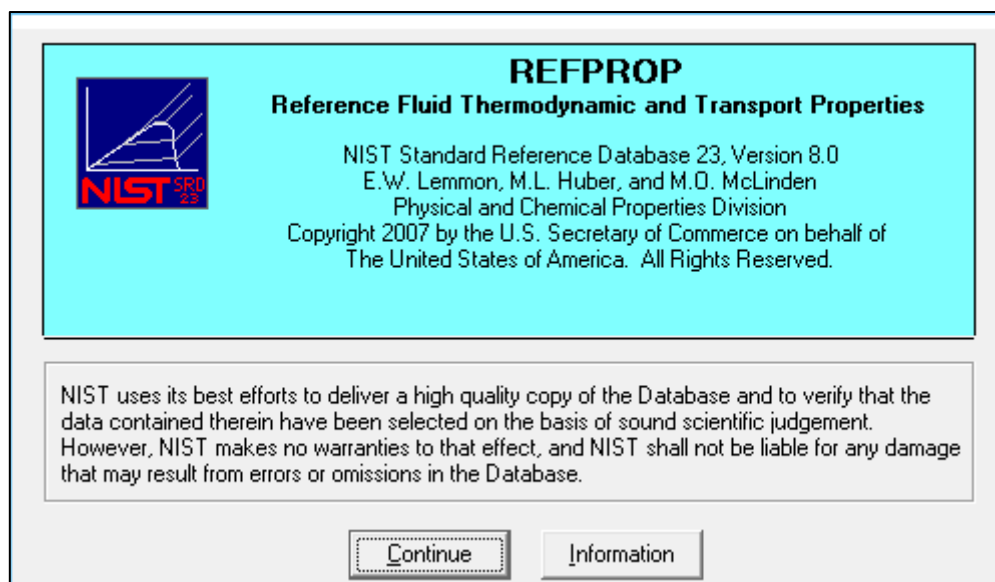


Slika 10 Prigušni elementi [11]

3 REFPROP

REFPROP je akronim za *REFerence fluid PROPerities*, program razvijen od NIST-a (National Institute of Standards and Technology) u SAD-u [12]. Omogućava uvid u termodinamičke tablice i dijagrame te prijenosna svojstva bitnih industrijskih fluida i njihovih smjesa. Naglasak se ponajprije stavlja na rashladne tvari i ugljikovodike. REFPROP se bazira na čistim fluidima i dostupnim modelima za smjese. U program su ugrađena tri modela za računanje termodinamičkih svojstva čistih fluida: eksplicitne jednadžbe Helmholtzove energije, modificirana Benedict-Webb-Rubin jednadžba stanja i prošireni model korespondentnih stanja. Proračun za smjese uključuje model koji primjenjuje pravila miješanja na Helmholtzovu energiju komponenata. REFPROP se sastoji od grafičkog sučelja i FORTRAN podprograma implementiranog u različite modele za određivanje svojstava fluida.

Dvoklikom na ikonu programa pojavljuje se zaslon koji pokazuje naslov, verziju, autore i kratak opis programa prikazan na Slici 11. Klikom na „Continue“ pokreće se program i odabire se željeni fluid.



Slika 11 REFPROP sučelje

Program sadrži traku s alatima u kojima se podešavaju potrebne stavke za određivanje termodinamičkih svojstava: izbor čistog fluida (omogućen izbor do 80 često korištenih fluida), mogućnost definiranja vlastite smjese u molnim ili masenim udjelima, izbor unaprijed

definiranih često korištenih smjesa fluida u industriji. Za svaki odabrani fluid ili smjesu fluida moguće je izčitati svojstva kao što su: tlak, temperatura i gustoća u trojnoj točki, temperatura taljenja, viskoznost, faktor acentričnosti, toplinska vodljivost, područje primjene (granični tlakovi i granične temperature) prema Slici 12. Za definiranu smjesu moguće je promijeniti također i pravilo miješanja po kojem se određuju termodinamičke veličine.

propane - CH₃CH₂CH₃ (CAS# 74-98-6)

| | | | |
|----------------|------------------|--------------------|-------------------------|
| Molar mass | Triple pt. temp. | Normal boiling pt. | Gas phase dipole at NBP |
| 44,096 kg/kmol | 85,53 K | 231,04 K | 0,084 debye |

| | | | |
|----------------|------------|--------------------------|-----------------|
| Critical Point | | | |
| Temperature | Pressure | Density | Acentric factor |
| 369,89 K | 4,2512 MPa | 220,48 kg/m ³ | 0,1521 |

| | | | |
|------------------------|---------------|------------------|--------------------------|
| Range of applicability | | | |
| Minimum temp. | Maximum temp. | Maximum pressure | Maximum density |
| 85,53 K | 625, K | 1000, MPa | 908,37 kg/m ³ |

NIST Rec: FEQ Helmholtz equation of state for propane of Lemmon et al. (2007).

LITERATURE REFERENCE
 Lemmon, E.W., McLinden, M.O., Wagner, W.
 to be submitted to J. Phys. Chem. Ref. Data, 2007.

Below 350 K, the uncertainties in density are 0.01% in the liquid phase and 0.03% in the vapor phase (including saturated states for both phases). The liquid phase value also applies at temperatures greater than 350 K (to about 500 K) at pressures greater than 10 MPa. In the extended critical region, the uncertainties increase to 0.1% in density, except very near the critical point

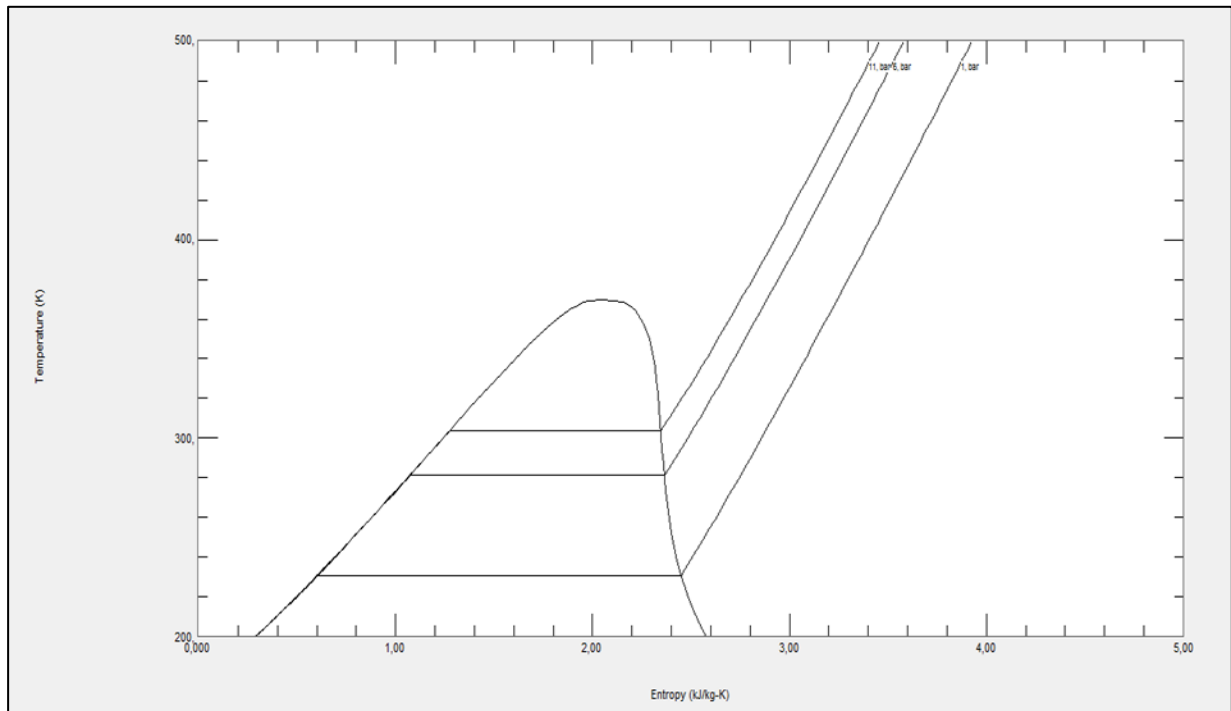
Equation of State Viscosity Thermal Conductivity

Surface tension Melting Line Sublimation Line

OK Cancel Print Copy Copy All

Slika 12 Svojstva propana

Ako se u alatnoj traci klikne na „Options“ te potom „Units“ mogu se odabrati sustavi mjernih jedinica u kojima se prikazuju odabrane veličine stanja, npr: SI, Molar SI, English, mks, itd. Ukoliko se želi nacrtati dijagram, nakon što se odabere fluid, na alatnoj traci klikne se „Plot“ i uzme neki od ponuđenih dijagrama ili se definira novi. Nakon odabira može se također definirati područje u kojem se dijagram želi nacrtati, a postoji i mogućnost crtanja određenih krivulja na danom dijagramu (npr. u T,s dijagramu mogu se prikazati linije stalnog tlaka, gustoće, entalpije te ostalih veličina) kako je prikazano na Slici 13.



Slika 13 T,s dijagram propana s linijama stalnog tlaka

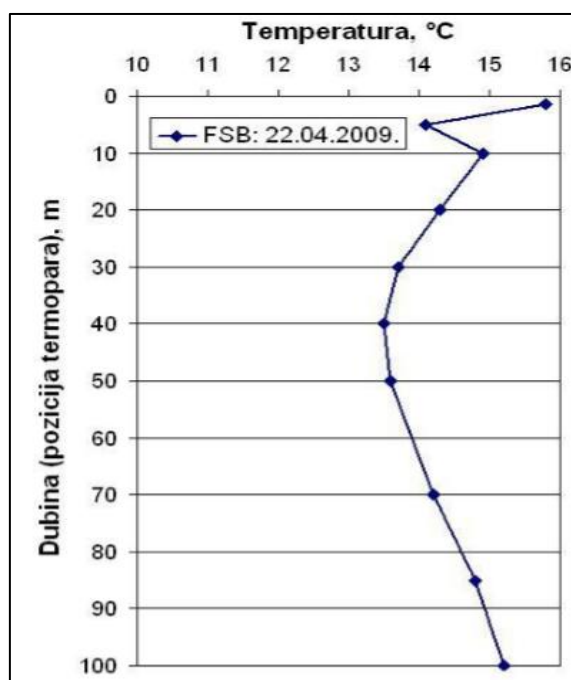
Velika prednost REFPROP baze podataka je ta što se vrijednosti termodinamičkih veličina za fluide i njihove smjese mogu „pozvati“ u programima za računanje kao što su MS Office Excel i MATLAB. Postupak „povezivanja“ programa REFPROP, odnosno njegove baze podataka sa radnim listom u programu Excel preuzet je sa služebene stranice NIST-a [13]. Prikazano je kako bi dobili gustoću argona pri danoj temperaturi T i tlaku P u SI sustavu mjernih jedinica ([K] i [MPa]) prema izrazu:

$$=Density("argon", "TP", "SI", 300, 10) \quad (12)$$

Potrebno je istaknuti da su u službenom vodiču za ovaj program napisane naredbe kojima se traži određena veličina stanja. Tako su neka od svojstava koja program može odrediti: temperatura, tlak, gustoća, faktor kompresibilnosti, entalpija, entropija, toplinski kapaciteti, brzina zvuka, viskoznost, napetost površine, dielektrična konstanta. Dobivaju se na način da se definira fluid, jedno svojstvo (ukoliko se radi o stanju vrele kapljevine (LIQ) ili suhozasićene pare (VAP)) ili dva ako je riječ o pregrijanom području ili pothlađenoj kapljevine, mjerni sustav jedinica te poznate numeričke vrijednosti stanja koje definiraju traženo stanje.

4 Eksperimentalna geotermalna dizalica topline

Eksperimentalna geotermalna dizalica topline nalazi se na adresi ul. Ivana Lučića 5, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Instalirana je u dvorištu Fakulteta u sklopu projekta „Istraživanje i promocija plitkih geotermalnih potencijala u Republici Hrvatskoj“. U sklopu projekta znanstvenici Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu u suradnji s Hrvatskim geološkim institutom proveli su istraživanje u području grijanja i hlađenja prostora korištenjem geotermalnih dizalica topline koje su pomoću bušotinskih izmjenjivača topline povezane s tlom. Bušenjem tla na različitim lokacijama i njegovom analizom utvrđen je potencijal tla kao izvora topline u procesu grijanja, odnosno ponora topline u procesu hlađenja. Zemlja je kao izvor topline povoljna jer već na malim dubinama ima prilično konstantnu temperaturu što je prikazano na Slici 14.

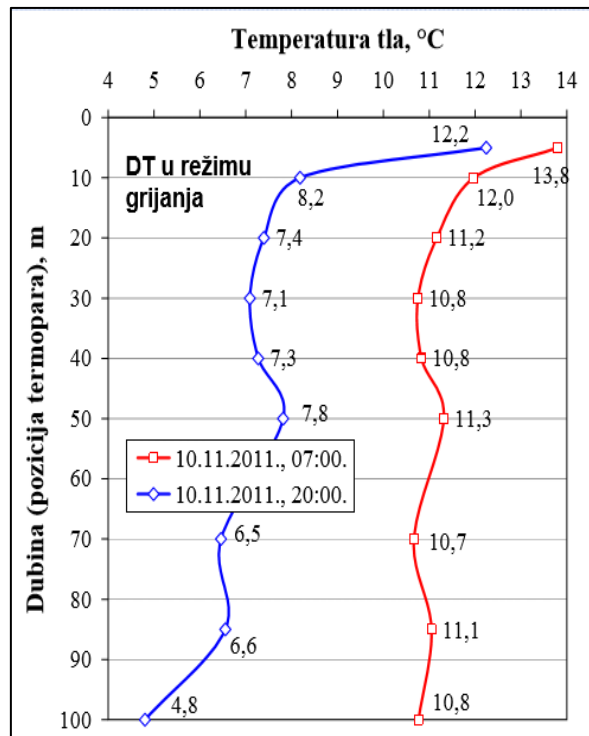


Slika 14 Nedirnuta temperatura tla po dubini bušotine, Zagreb, Ivana Lučića 5 [14]

4.1 Geotermalna dizalica topline u režimu grijanja

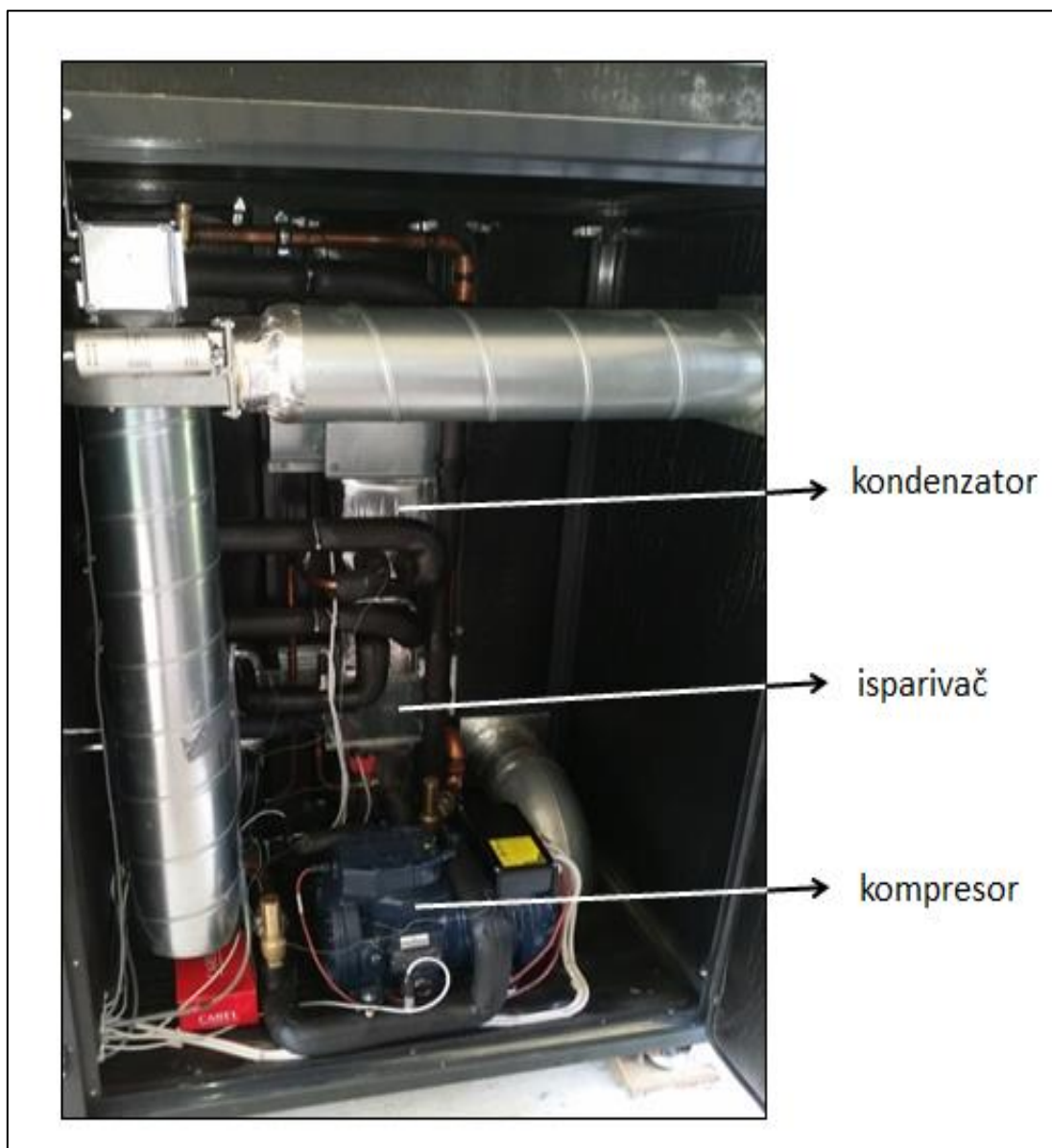
U režimu grijanja toplinu od tla prima etilen-glikol vodena smjesa (u krugu izvora topline) koja primljenu toplinu predaje radnoj tvari (propanu) u isparivaču. Prelazak topline sa tla na sekundarni fluid u bušotinskom izmjenjivaču topline rezultira hlađenjem tla. Na Slici 15

prikazana je promjena temperature tla po dubini bušotine nakon cjelodnevnog rada geotermalne dizalice topline.

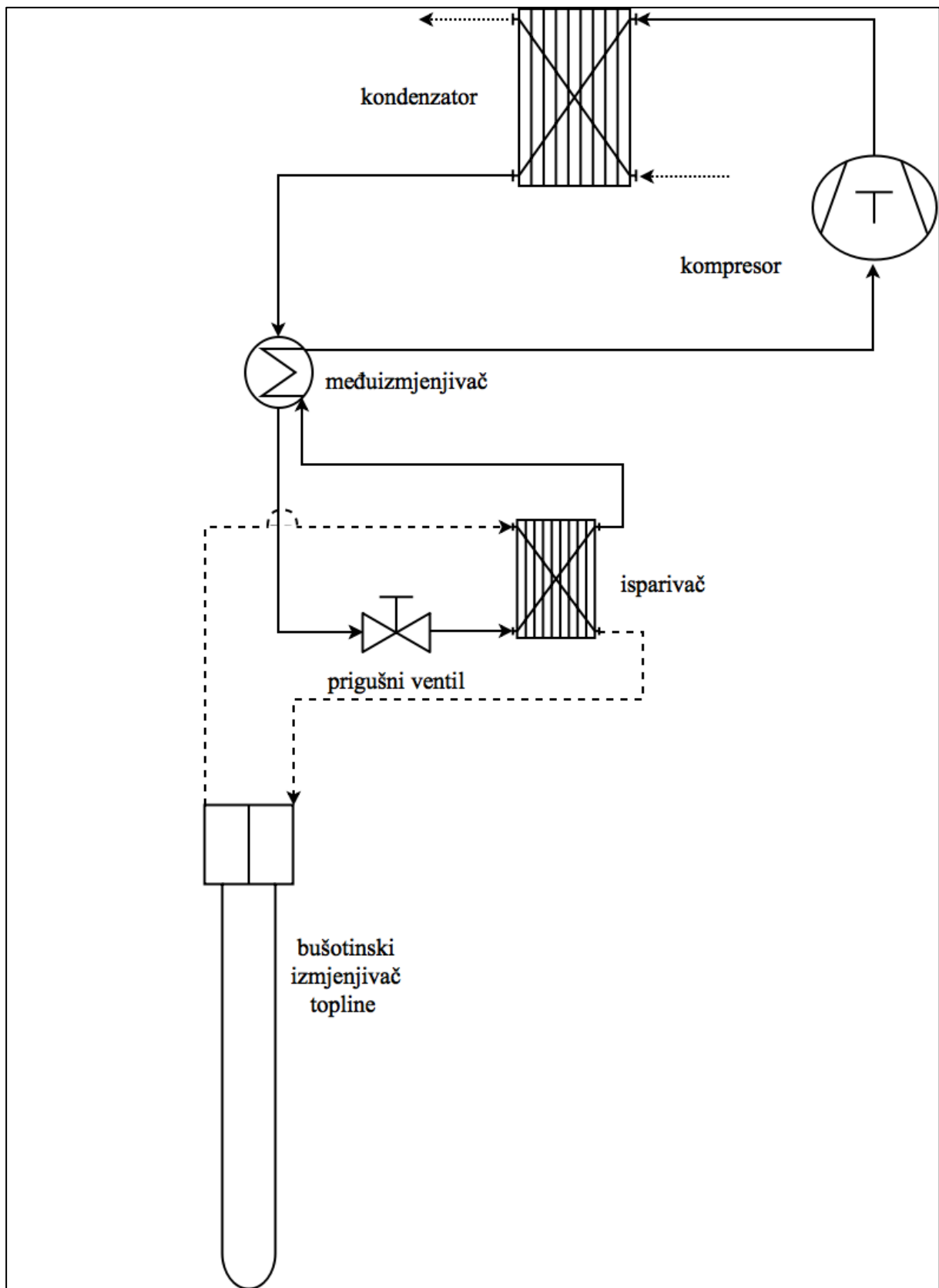


Slika 15 Promjena temperature tla po dubini bušotine prilikom rada geotermalne dizalice topline u režimu grijanja [14]

Propan u krugu radne tvari iz isparivača ulazi u kompresor te se komprimira do kondenzatorskog tlaka definiranog temperaturom kondenzacije. Nakon kompresije propan se hladi i kondenzira u kondenzatoru pri čemu predaje toplinu etilen-glikol vodenoj smjesi (u krugu ponora topline) koja se zagrije na potrebnu vrijednost. Nakon kondenzacije propana, u međuzmjenjivaču topline propan na višoj temperaturi predaje toplinu (pri čemu se pothlađuje) propanu koji izlazi iz isparivača (koji se pregrijava). Potom se pothlađeni propan prigušuje u prigušnom ventilu do tlaka u isparivaču i tako se cijeli proces ponavlja. Glikolna smjesa i voda za grijanje pogonjeni su pumpama tako da konstantno cirkuliraju kroz sustav. Dio geotermalne dizalice topline prikazan je na Slici 16. U sustavu je postavljen niz mjernih točaka gdje se mjere protoci, temperature te tlakovi propana, ali i fluida. Na Slici 17 prikazana je shema geotermalne dizalice topline u procesu grijanja. Punom linijom prikazan je krug propana, isprekidanom linijom krug izvora topline, a točkastom linijom etilen-glikol koja prima toplinu u kondenzatoru.



Slika 16 Geotermalna dizalica topline



Slika 17 Shema geotermalne dizalice topline u režimu grijanja

4.2 Rezultati mjerenja na geotermalnoj dizalici topline

Rezultati mjerenja na geotermalnoj dizalici topline dobiveni su od strane Fakulteta strojarstva i brodogradnje te su uz dopuštenje objavljeni u prilogu. Koristeći mjerene podatke provjerava se valjanost modela napravljenog pomoću tabličnog kalkulatora MS Excel i REFPROP baze podataka. Za analizu su uzeti podaci mjereni u devetnaestoj minuti rada geotermalne dizalice topline kad se u prethodnom vremenu proces dovoljno ustalio da ga se može smatrati stacionarnim.

4.3 Usporedba mjerenih podataka i podataka dobivenih modelom

Izmjerena temperatura u isparivaču u danom vremenu iznosila je $0,68^{\circ}\text{C}$, a temperatura dobivena modelom s obzirom na izmjereni tlak u isparivaču ($470,6\text{ kPa}$) iznosi $-0,27^{\circ}\text{C}$. Mjerena i proračunata temperatura razlikuju se za $0,94^{\circ}\text{C}$. Korištenjem mjerene temperature u isparivaču prema modelu određen je tlak isparavanja koji iznosi $484,3\text{ kPa}$. Odstupanje proračunatog u odnosu na mjereni tlak je manje od 3%. U radu dizalice topline mjeri se tlak kondenzacije pri čemu se korištenjem modela proračunava temperatura kondenzacije. Za tlak kondenzacije od $1553,03\text{ kPa}$ dobivena temperatura kondenzacije iznosi $45,54^{\circ}\text{C}$.

U međuizmjenjivaču topline pothlađivanjem vrele kapljevine oslobađa se jedinična toplina od $23,07\text{ kJ/kg}$ te se ta toplina koristi za pregrijanje suhozasićene pare. Jedinična toplina pregrijanja suhozasićene pare iznosi $27,11\text{ kJ/kg}$. Razlog nepodudaranja ovih dvaju brojeva može se pripisati preuzimanju dijela topline gubitaka pogonskog elektromotora.

Maseni protok propana u sustavu iznosi $0,0395\text{ kg/s}$.

U Tablici 1 prikazane su vrijednosti energetske tokova u dizalici topline dobivene eksperimentom i proračunom.

Tablica 1 Mjerene i izračunate vrijednosti energetske tokova u geotermalnoj dizalici topline

| veličina | $ \dot{Q}_c $ | \dot{Q}_0 | $ P_G $ |
|------------|---------------|-------------|---------|
| mjereno | 13,21kW | 11,40kW | 3,58kW |
| izračunato | 14,44kW | 11,03kW | 3,40kW |

Mjereni toplinski tok kondenzacije u sustavu razlikuje se od izračunatog za oko 10%. Toplinski tokovi isparavanja razlikuju se za oko 3%, dok se snage kompresora razlikuju za oko 5%.

S obzirom na mjerenu temperaturu pregrijavanja suhozasićene pare i temperaturu na kraju kompresije stupanj iskorištenja kompresora u radu iznosi oko 70%.

Izmjereni faktor grijanja dizalice topline iznosi 3,69 i niži je od teoretskog koji iznosi 4,24. Razlog nepodudaranja je negativno odstupanje mjerenog toka kondenzacije od izračunatog i pozitivno odstupanje mjerene mehaničke snage kompresora od izračunate, čime se ukupno smanjuje faktor grijanja.

5 Rezultati proračuna i rasprava

Korištenjem eksperimentalnih podataka te poznavanjem geometrijskih karakteristika izmjenjivača topline određuju su ukupni koeficijenti prolaza topline za svaki izmjenjivač i odgovarajuće tvari u njemu.

Nadalje, analizira se realni proces u dizalici topline s propanom u određenom temperaturnom režimu koji se prikazuje u adekvatnim dijagramima. U ovoj analizi međuzmjenjivač topline nije uključen, jednako kao ni u daljnim proračunima.

Ispituje se mogućnost primjene različitih radnih tvari u istom temperaturnom režimu za istu toplinu grijanja (toplinski tok kondenzacije).

Potom se ispituje utjecaj promjene temperature isparavanja uz stalnu temperaturu kondenzacije na jedinični rad kompresora, toplinske tokove kondenzacije i isparavanja, faktor grijanja dizalice topline i temperaturu na izlazu iz kompresora.

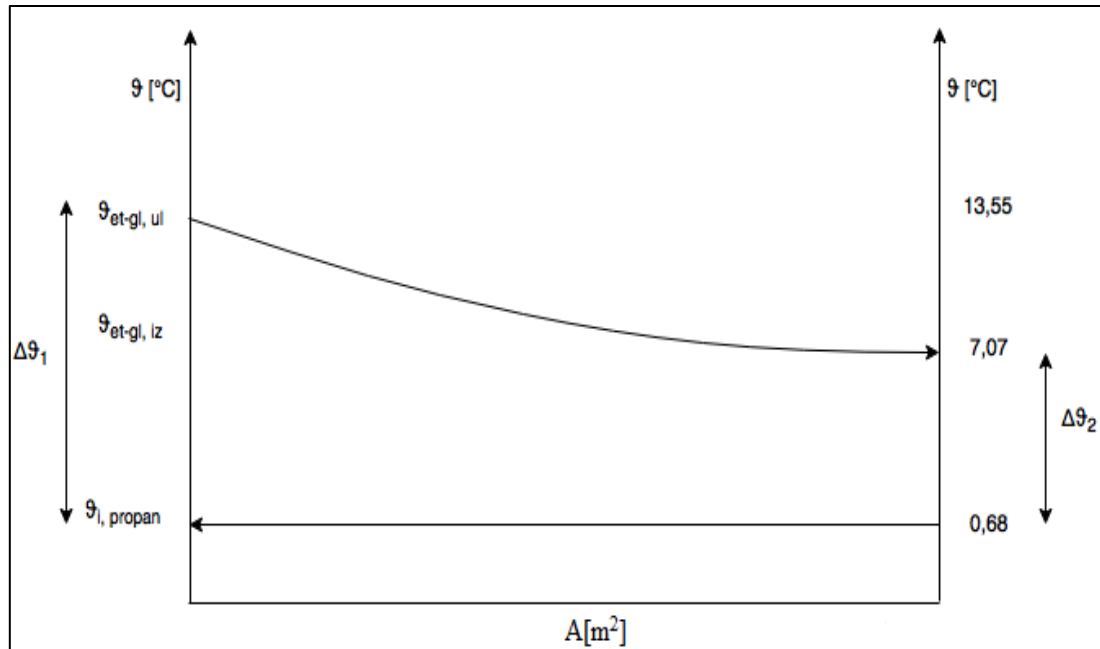
Na kraju se promatra utjecaj promjene temperaturnog režima u procesu te stupnja iskorištenja kompresora na energetske veličine.

5.1 Izmjenjivači topline

Cilj proračuna je odrediti ukupni koeficijent prolaza topline (K) za dane fluide u isparivaču, kondenzatoru i bušotinskom izmjenjivaču topline. Pločasti izmjenjivači topline analiziraju se kao protustrujni cijevni izmjenjivači topline s jednostrukim prolazom fluida. Pošto je u pločastim izmjenjivačima topline ostvaren stvarni protustrujni tok koeficijent korekcije iznosi jedan pa ga nije ni potrebno složenije analizirati. Kod bušotinskog izmjenjivača topline radi se o cijevnom izmjenjivaču, tip U-cijevi.

5.1.1 Isparivač

Određivanje pokretačke sile za proces prijenosa topline u isparivaču prikazano je na Slici 18 na ϑ , A dijagramu uz korištenje izraza (6) iz čega slijedi:



Slika 18 ϑ , A dijagram za isparivač

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_1 &= (13,55 - 0,68)^\circ\text{C} = 12,87^\circ\text{C} \\ \Delta \vartheta_2 &= (7,07 - 0,68)^\circ\text{C} = 6,39^\circ\text{C} \\ \Delta \vartheta_m &= \frac{(12,87 - 6,39)^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{12,87}{6,39}\right)} = 9,26^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (13)$$

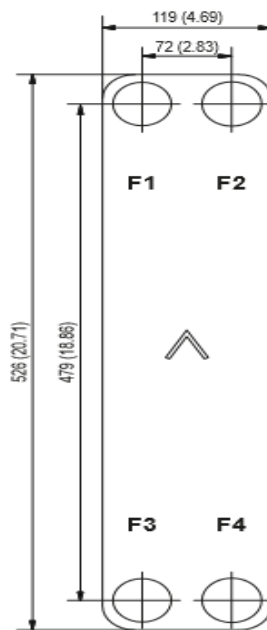
Etilen-glikolna smjesa u bušotinskom izmjenjivaču topline se prilikom prolaza kroz isparivač ohladila s $13,55^\circ\text{C}$ na $7,07^\circ\text{C}$. Izmjereni toplinski tok u isparivaču iznosi $11,40\text{ kW}$.

Uz poznatu površinu izmjene topline, $A_i = 1,76\text{ m}^2$ te korištenjem izraza (5) slijedi da je ukupni koeficijent prolaza topline jednak:

$$K = \frac{11400\text{ W}}{9,26^\circ\text{C} \cdot 1,76\text{ m}^2} = 699,5\text{ W} / \text{m}^2\text{ }^\circ\text{C} \quad (14)$$

5.1.2 Kondenzator

Određivanje pokretačke sile pokazano je na primjeru isparivača i u slučaju za kondenzator iznosi $\Delta \vartheta_m = 18,82^\circ\text{C}$. Toplinu u kondenzatoru primila je etilen-glikolna smjesa koja se zagrijala od $36,84^\circ\text{C}$ do $41,83^\circ\text{C}$. Izmjereni toplinski tok predan etilen-glikolu u kondenzatoru iznosi 13,21 kW. Površina izmjene topline u kondenzatoru dobivena je od strane proizvođača kao i površina isparivača. Dimenzije ploča isparivača i kondenzatora su iste, prikazane na Slici 19. Isparivač ima 30, a kondenzator 66 ploča i ukupnu površinu $4,02\text{ m}^2$.



Slika 19 Dimenzije ploče

Ukupni koeficijent prolaza topline iznosi:

$$K = \frac{13210\text{W}}{18,82^\circ\text{C} \cdot 4,02\text{m}^2} = 174,6\text{W} / \text{m}^2\text{C} \quad (15)$$

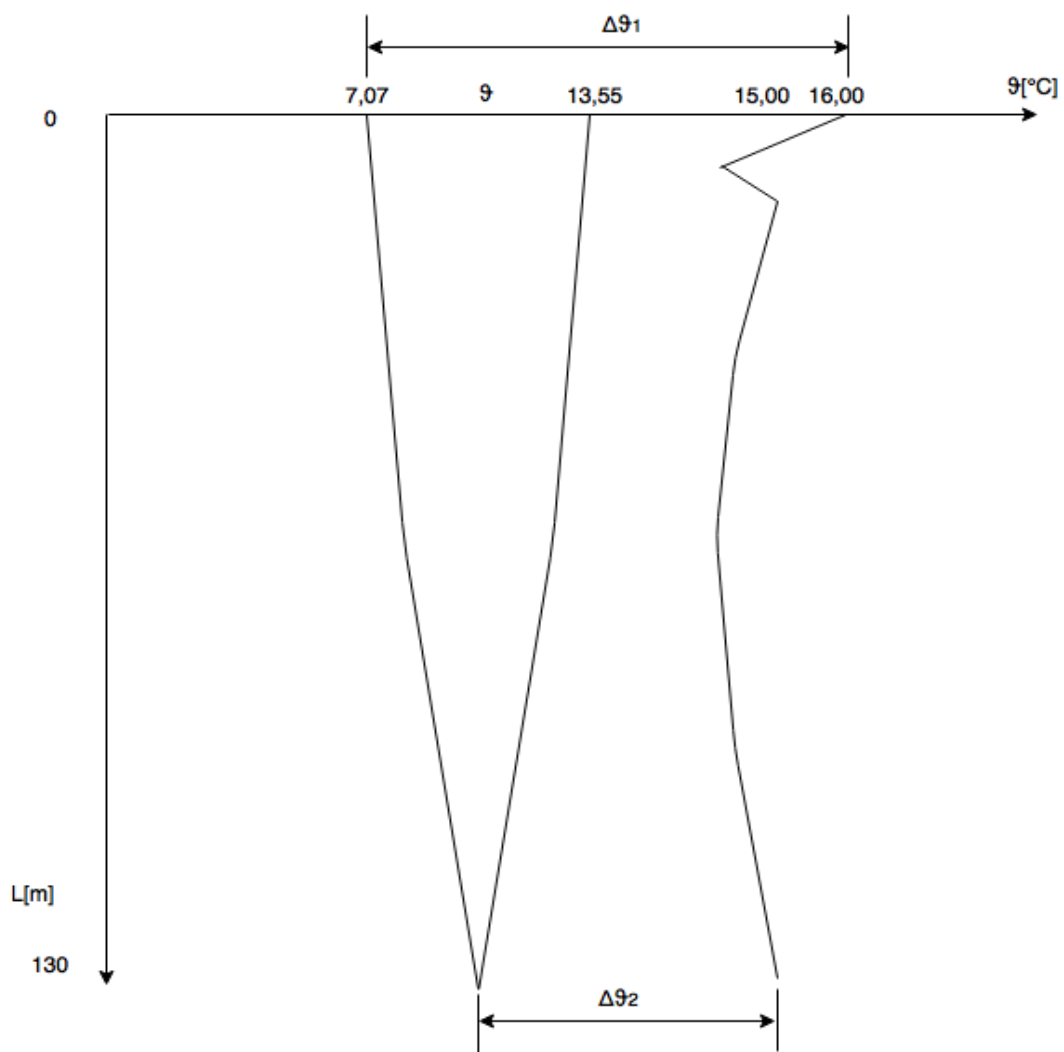
5.1.3 Bušotinski izmjenjivač topline

Bušotinski izmjenjivač topline je U-cijevni izmjenjivač topline. Kroz unutarnju cijev izmjenjivača protječe etilen-glikol vodena smjesa koja prima toplinu od zemlje preko ispune koja se nalazi između unutarnje i vanjske cijevi. Dubina bušotine iznosi $L=130\text{ m}$ i u njoj se

nalaze dvije U-cijevi, svaka promjera $d=0,032\text{m}$. Ukupna površina izmjene topline dobiva se iz izraza:

$$A = 4 \cdot d \cdot \pi \cdot L \quad (16)$$

i iznosi $52,25\text{m}^2$. U bušotinskom izmjenjivaču topline etilen-glikolna smjesa se zagrije od $7,07\text{ }^\circ\text{C}$ do $13,55\text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturni profil zemlje pokazuje da se temperature zemlje mijenjaju po dubini. Za pojednostavljeni proračun uzeta je pretpostavka da je na površini zemlje temperatura $16\text{ }^\circ\text{C}$, a na dnu bušotinskog izmjenjivača $15\text{ }^\circ\text{C}$. U ovom trenutku se ne raspolaže stvarnim podacima o temperaturama na pojedinim dubinama bušotine stoga je na temelju prijašnjih mjerenja i literaturnih podataka uzeta ova pretpostavka.



Slika 20 θ, L dijagram za BIT

Ukupni koeficijent prolaza topline u BIT-u određen je teoretski, na temelju poznavanja otpora prijenosu topline koji se javljaju:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{et-gl}}} + \frac{l}{\lambda}(\text{ispuna}) + \frac{l}{\lambda}(\text{cijev})} \quad (17)$$

pri čemu su:

$$l(\text{ispuna}) = 0,037\text{m}; \lambda(\text{ispuna}) = 2,35\text{W} / (\text{m}^\circ\text{C})$$

$$l(\text{cijev}) = 0,0029\text{m}; \lambda(\text{cijev}) = 0,2\text{W} / (\text{m}^\circ\text{C})$$

Kondukcija kroz zemlju je vrlo složena te se stoga ne ubraja u ukupni otpor, no treba imati na umu da s vremenom dolazi do pada temperature tla što utječe na prijenos topline. Koeficijent prijelaza topline na strani etilen-glikolne smjese procjenjuje se iz Dittus-Boelter relacije prema izrazu:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (18)$$

gdje su bezdimenzijske značajke definirane preko sljedećih izraza:

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{et-gl}} \cdot (d/2)}{\lambda_{\text{et-gl}}} \quad (19)$$

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho_{\text{et-gl}}}{\eta_{\text{et-gl}}} \quad (20)$$

$$Pr = \frac{\eta_{\text{et-gl}} \cdot c_{p,\text{et-gl}}}{\lambda_{\text{et-gl}}} \quad (21)$$

Za poznati sastav (33%-tna) smjesa etilen-glikola i vode iz literature [15] slijedi:

$$\lambda_{\text{et-gl}} = 0,45\text{W} / (\text{m}^\circ\text{C}); \eta_{\text{et-gl}} = 9 \cdot 10^{-3}\text{Pa s}; \rho_{\text{et-gl}} = 1015\text{kg} / \text{m}^3; c_{p,\text{et-gl}} = 3729\text{J} / (\text{kg}^\circ\text{C}).$$

Iz poznatog volumnog protoka, 1541,4L/h slijedi da je brzina protjecanja 0,533m/s, iz čega proizlazi da je vrijednost Reynoldsove značajke, $Re=1922$. Prandtlova značajka iznosi: $Pr=74,6$ a Nusseltova značajka: $Nu=54,7$. Na temelju tih vrijednosti koeficijent prijelaza topline sa strane etilen-glikolne smjese iznosi: $\alpha_{\text{et-gl}} = 1538,4\text{W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Ukupni koeficijent prolaza topline u bušotinskom izmjenjivaču topline iznosi:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{1538,4W / (m^2 \cdot ^\circ C)} + \frac{0,037m}{2,35W / (m \cdot ^\circ C)} + \frac{0,0029m}{0,2W / (m \cdot ^\circ C)}} = 32,4W / (m^2 \cdot ^\circ C) \quad (22)$$

Kako bi se proračunala temperatura fluida na dnu bušotine, izjednači se bilančna jednačba s kinetičkom jednačbom, prema izrazu:

$$\dot{m}_{et-gl} \cdot c_{p,et-gl} \cdot (\mathcal{G} - \mathcal{G}_{et-gl,ul}) = K \cdot A \cdot \Delta \mathcal{G}_m \quad (23)$$

Tako proračunata temperatura fluida na dnu bušotine iznosi: $\mathcal{G} = 11,75^\circ C$.

Iz toga slijedi da veći dio topline (oko 70%) etilen-glikol vodena smjesa primi od tla prilikom strujanja prema dnu bušotine. Nadalje može se ustanoviti da su pokretačke sile procesa prijenosa topline za strujanje prema dnu bušotine i prema površini zemlje različite.

5.2 Realni proces s propanom

Analiziran je proces s propanom kao radnom tvari i sljedećim vrijednostima: temperatura isparavanja 0 °C, temperatura kondenzacije 45 °C, pregrijavanje suhozasićene pare za 5 °C, pothlađivanje vrele kapljevine pri stalnom tlaku za 5 °C i stupanj iskorištenja kompresora od 75%. Maseni protok postavljen je na 0,050 kg/s, odnosno volumni protok na ulazu u kompresor od 0,00496 m³/s. Uz pretpostavku da je ukupni volumen kompresora 0,001 m³ slijedi da je broj okretaja kompresora za dani slučaj jednak 298 okr/min. Rezultati proračuna dani su tablično i grafički.

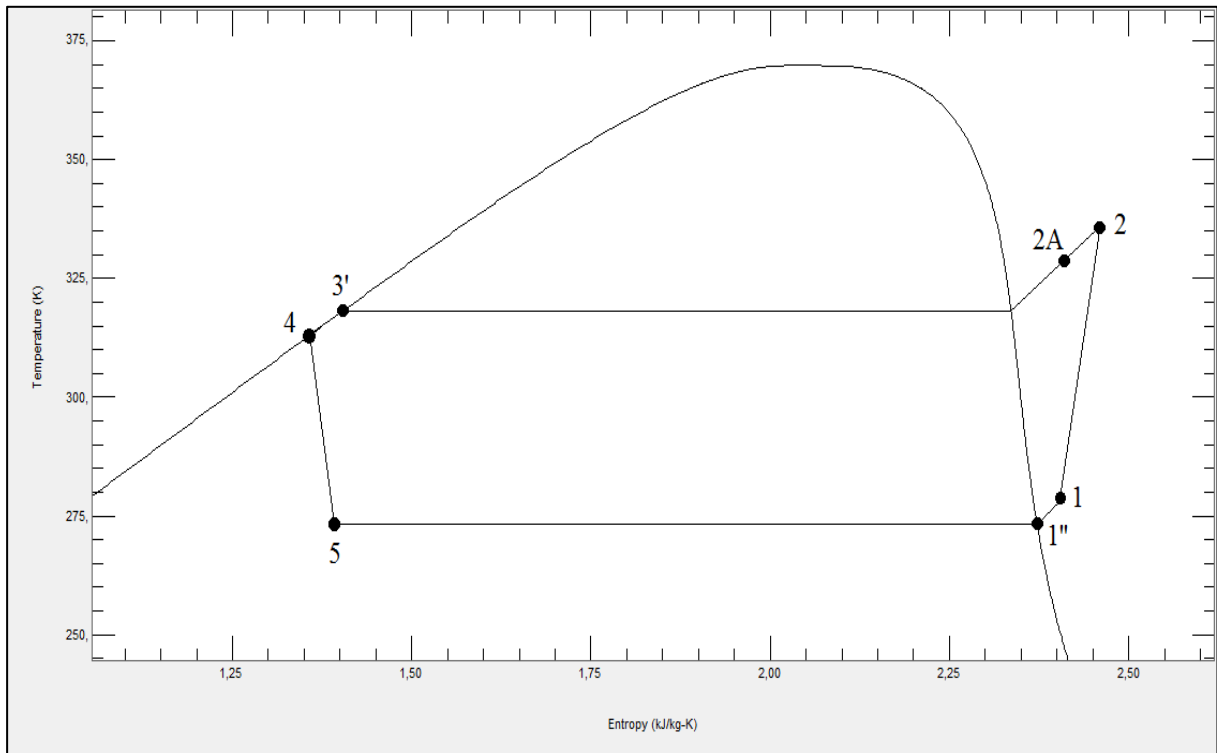
Tablica 2 Veličine stanja propana u dizalici topline za realni proces

| veličina stanja (točka procesa) | T [K] | p [kPa] | v [m ³ /kg] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] |
|------------------------------------|--------|---------|------------------------|-----------|------------|
| suhozasićena para (1'') | 273,15 | 474,46 | 0,09661 | 574,87 | 2,3724 |
| ulaz u kompresor (1) | 278,15 | 474,46 | 0,09916 | 583,57 | 2,4040 |
| idealna kompresija (2A) | 327,64 | 1534,31 | 0,03143 | 640,05 | 2,4040 |
| izlaz iz kompresora (2) | 336,03 | 1534,31 | 0,03317 | 658,88 | 2,4607 |
| vrela kapljevina (3') | 318,15 | 1534,31 | 0,00218 | 321,79 | 1,4046 |
| ulaz u prigušni ventil (4) | 313,15 | 1534,31 | 0,00214 | 307,05 | 1,3579 |
| izlaz iz prigušnog ventila (5) | 273,15 | 474,46 | 0,02894 | 307,05 | 1,3919 |

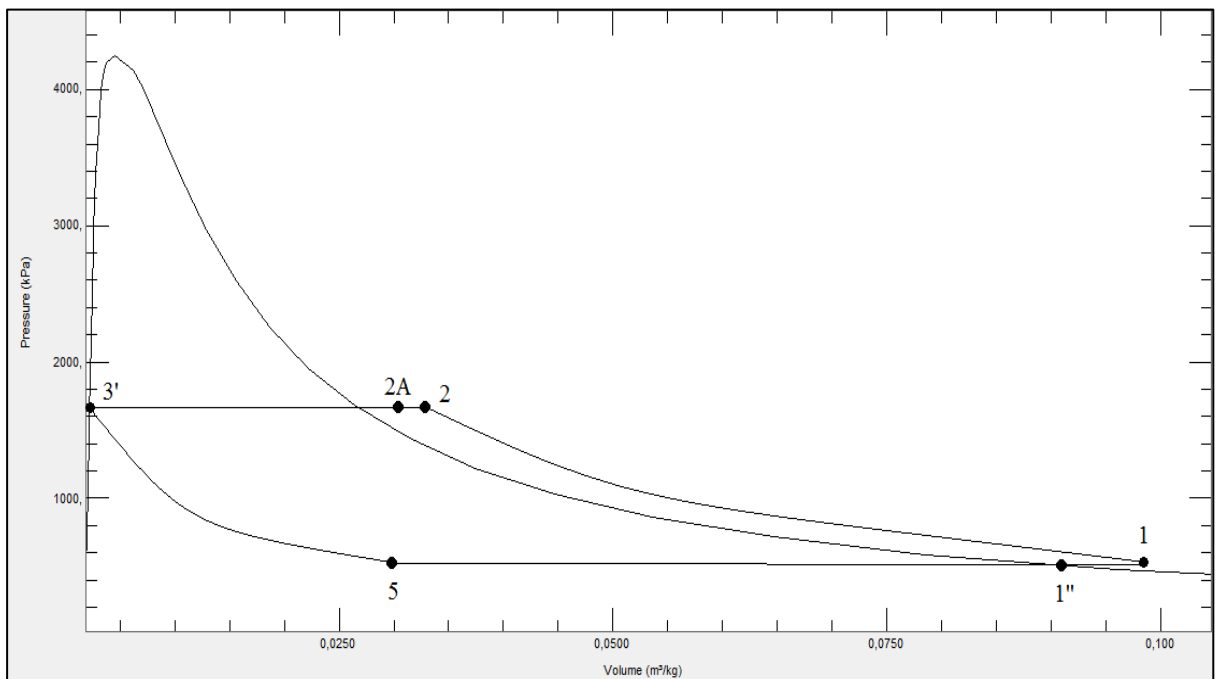
- jedinični rad i mehanička snaga kompresora: $|w_{teh,K}| = 75,31$ kJ/kg; $|P_G| = 3,77$ kW
- jedinična toplina i toplinski tok isparivača: $q_0 = 276,52$ kJ/kg; $\dot{Q}_0 = 13,83$ kW
- jedinična toplina i toplinski tok kondenzatora: $|q_c| = 351,83$ kJ/kg; $|\dot{Q}_c| = 17,60$ kW

Faktor grijanja dizalice topline u danom procesu iznosi $\varepsilon_{DT} = 4,67$.

Termodinamički proces prikazan je u T,s; p,v; h,s; T,h; p,T i p,h dijagramima na Slikama 21-26.

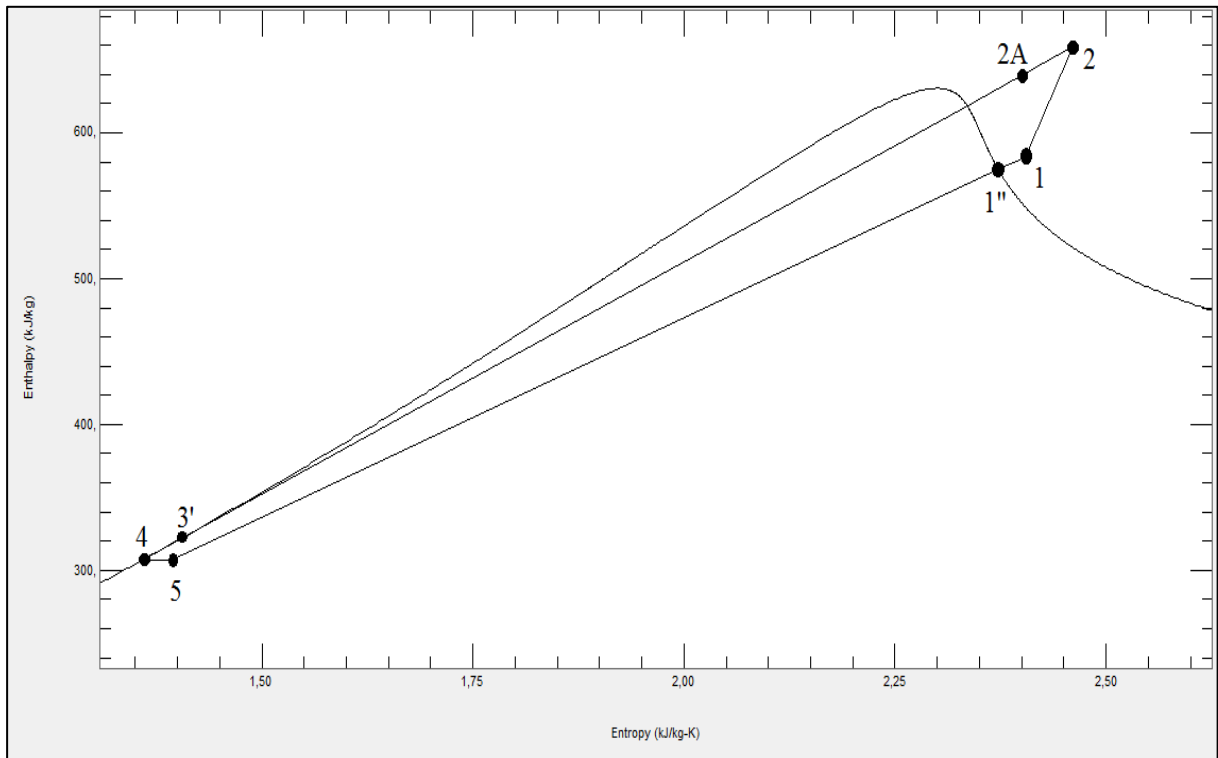


Slika 21 Realni proces u T,s dijagramu

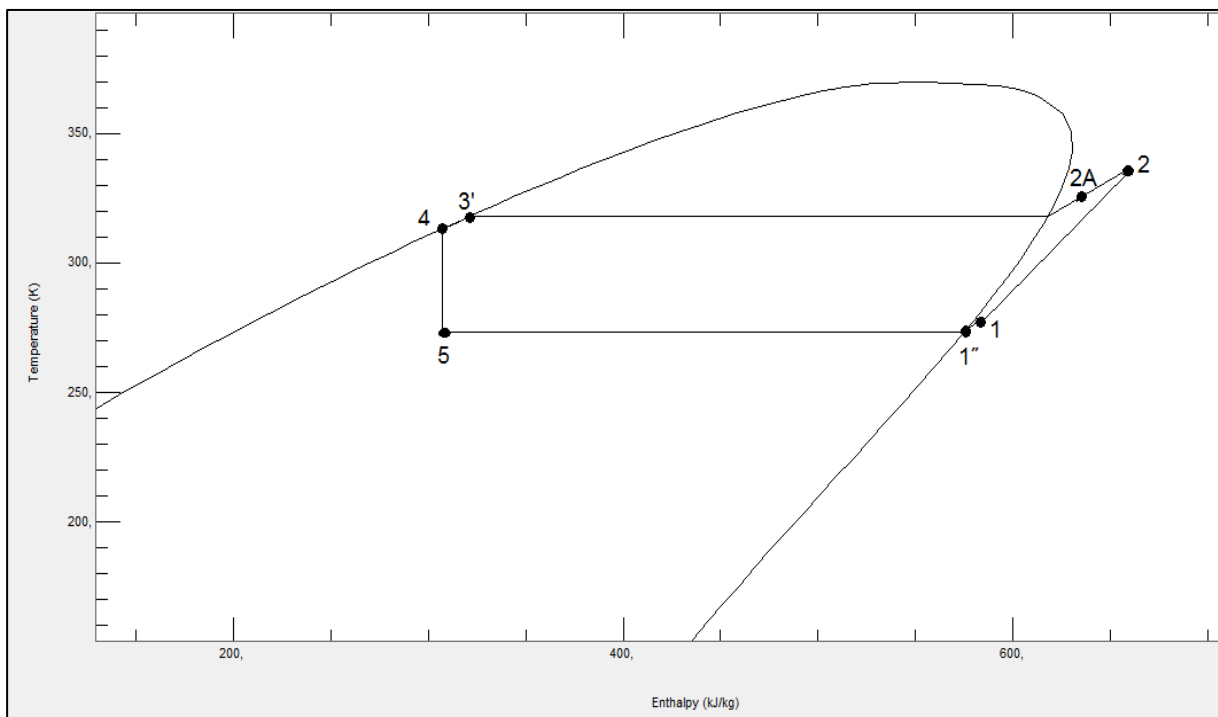


Slika 22 Realni proces u p,v dijagramu

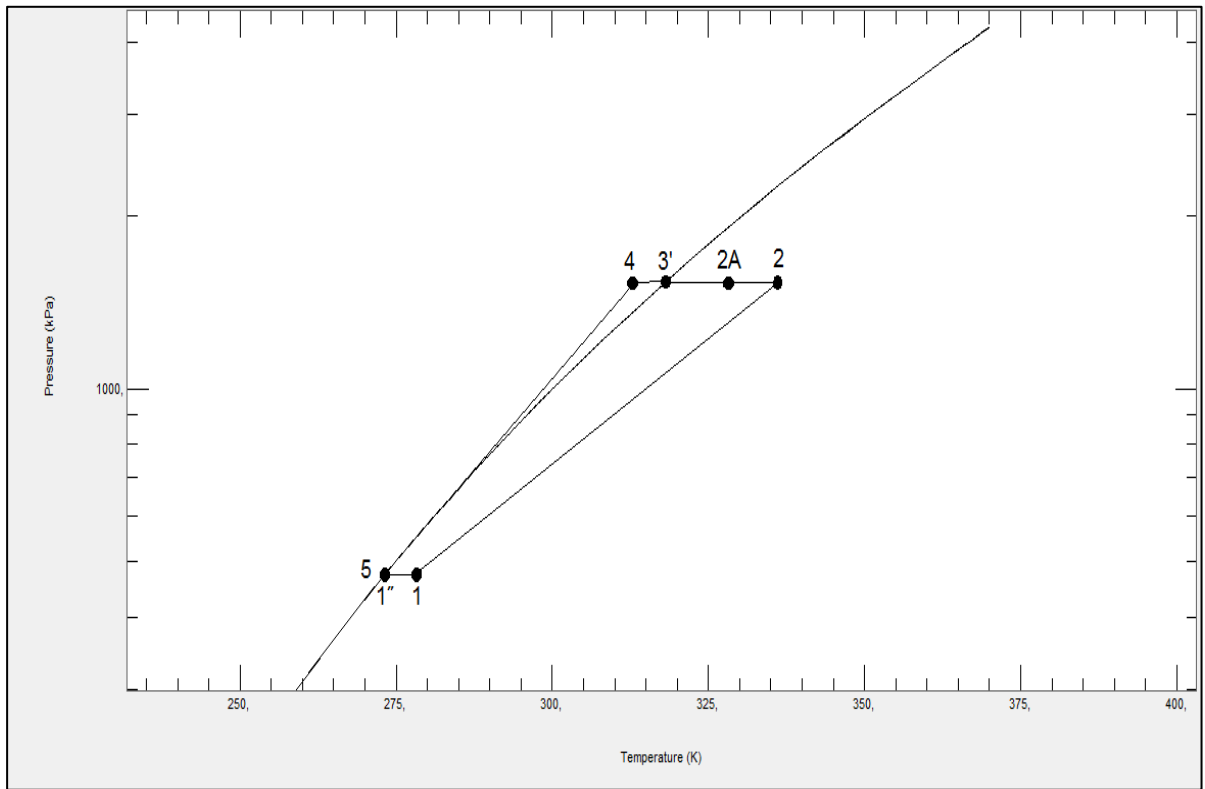
(točke 3' i 4 u p,v dijagramu su gotovo iste jer je vrlo mala razlika u specifičnim volumenima)



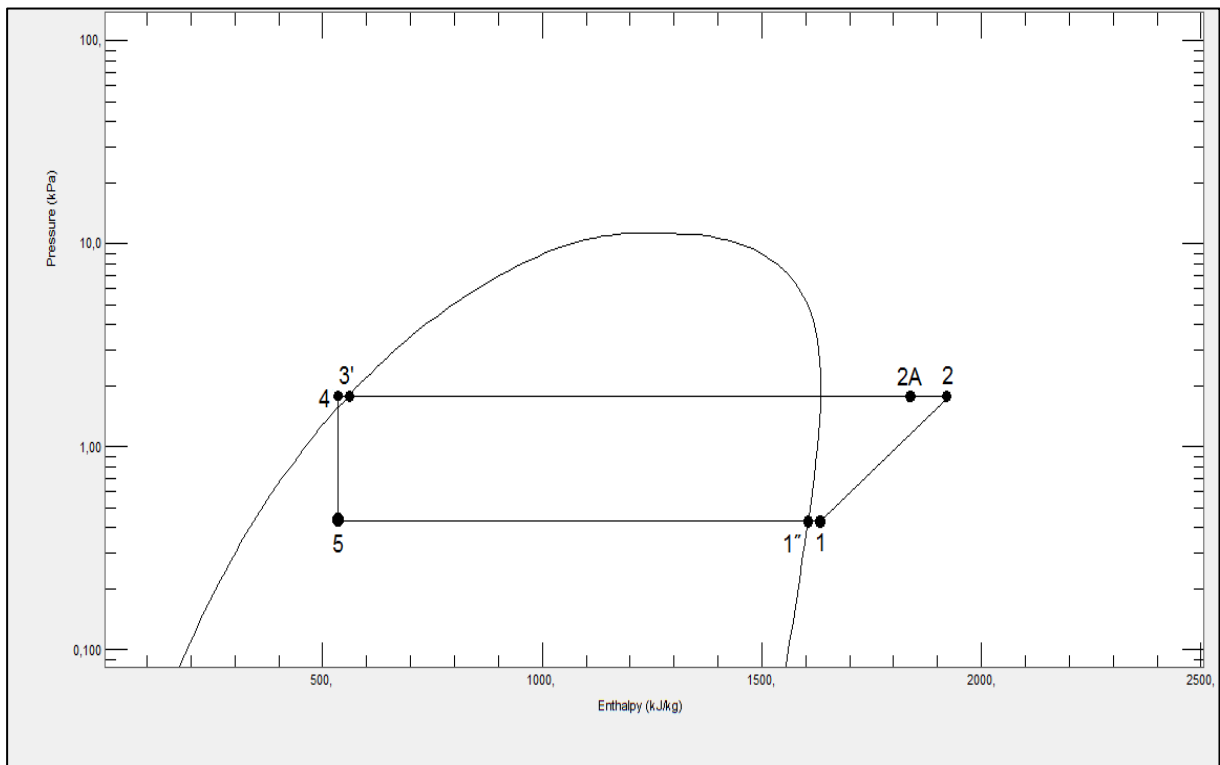
Slika 23 Realni proces u h,s dijagramu



Slika 24 Realni proces u T,h dijagramu



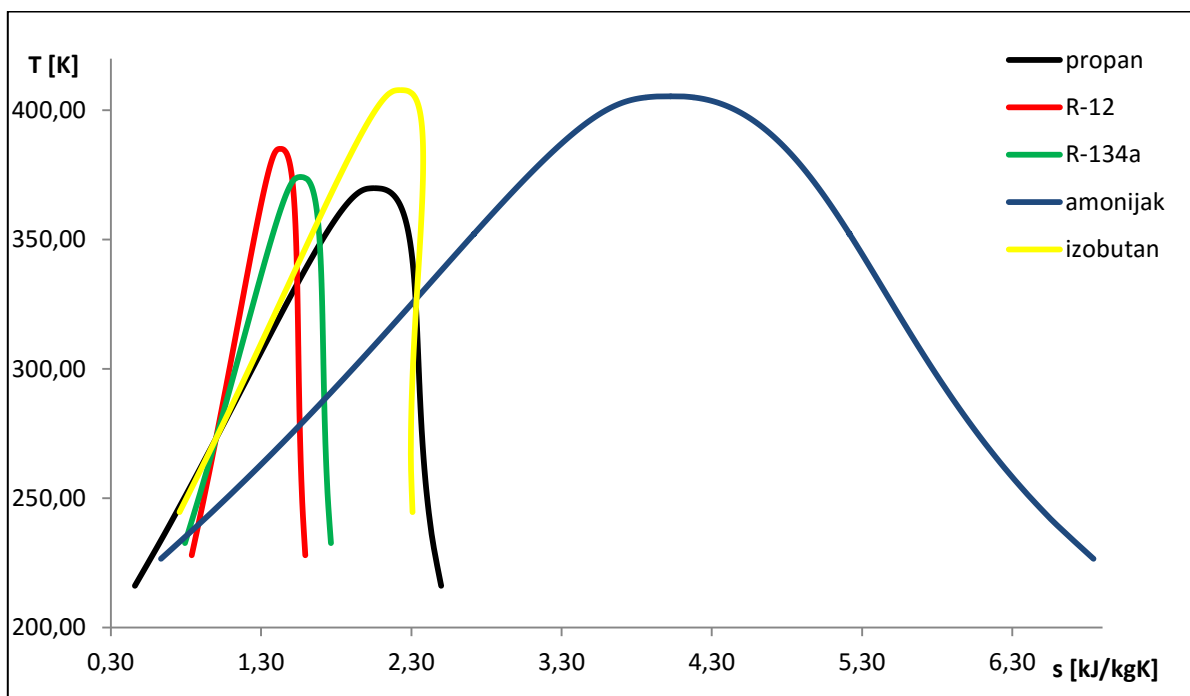
Slika 25 Realni proces u p,T dijagramu



Slika 26 Realni proces u p,h dijagramu

5.4 Promjena radne tvari u procesu

Ispituje se primjena različitih radnih tvari u dizalici topline i njihov utjecaj na vrijednosti karakterističnih veličina procesa [16,17]. Temperature isparavanja, kondenzacije, pregrijavanja i pothlađivanja su iste za sve radne tvari kao i stupanj iskorištenja kompresora. Vrijednosti tih veličina preuzete su iz analize propana. Postavlja se uvjet za istim toplinskim tokom kondenzacije kao u slučaju za propan. Radne tvari koje su obuhvaćene u ovom ispitivanju su: amonijak, R-12, izobutan i R-134a.



Slika 27 Granične krivulje u T,s dijagramu

Na Slici 27 prikazane su granične krivulje radnih tvari u T,s dijagramu. Slijedi da najšire područje, i što se tiče temperatura, i što se tiče jediničnih entropija obuhvaća amonijak. Razlog ovako širokog područja i odstupanja od preostalih leži u stvaranju jakih vodikovih veza između molekula amonijaka, što nije slučaj za preostale radne tvari. Freoni, R-12 i R-134a pokazuju sličnost u obliku graničnih krivulja kao i u položaju u T,s dijagramu. Također, krivulje propana i izobutana se gotovo preklapaju u pojedinim dijelovima što je također poveznica između njih pošto su oboje zasićeni ugljikovodici. Kritična temperatura izobutana je viša od one propana iz razloga što ima veću relativnu molekulsku masu, a time između molekula djeluju i jače privlačne sile.

Uz stalnu vrijednost toplinskog toka kondenzacije od 17,60 kW i navedene temperature, u Tablicama 3 i 4 prikazane su karakteristične veličine u procesu za različite radne tvari.

Tablica 3 Karakteristične veličine u procesu za različite radne tvari

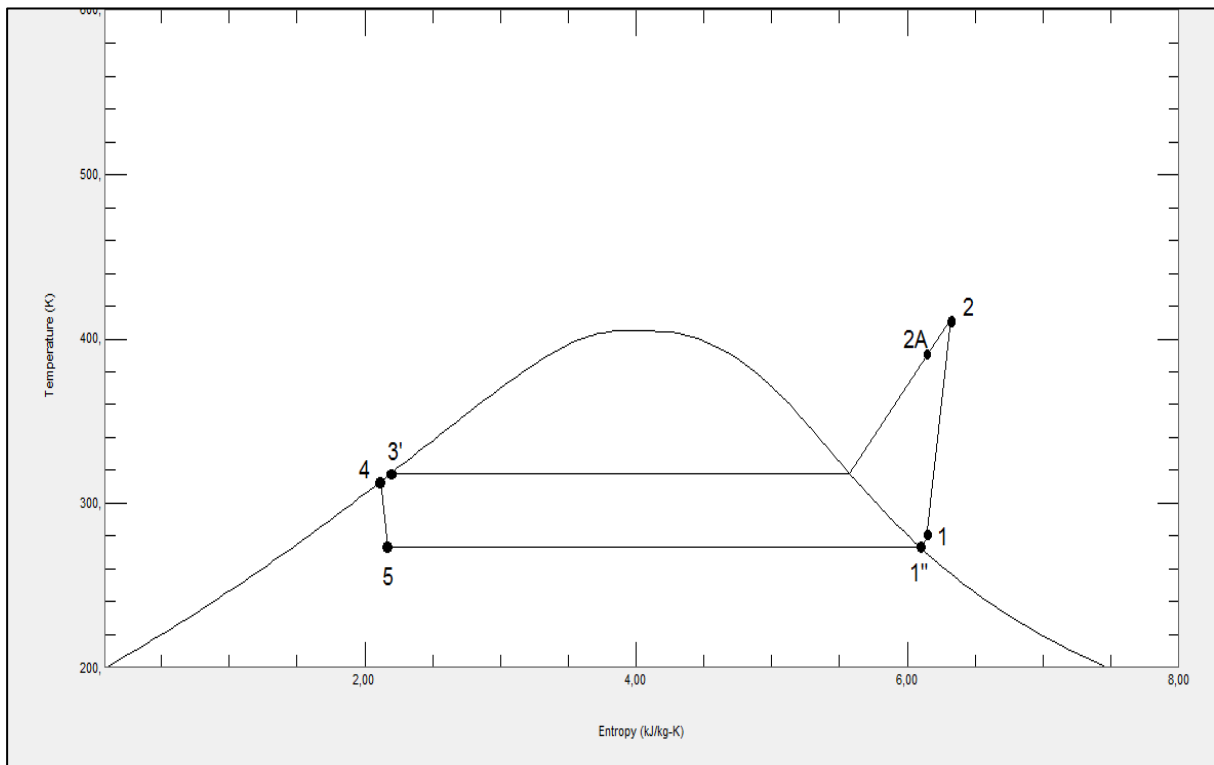
| RADNA TVAR | p_i [kPa] | p_c [kPa] | ϑ_2 [°C] | x_4 [kg/kg] | $ q_c $ [kJ/kg] | q_0 [kJ/kg] | $ w_{teh,K} $ [kJ/kg] |
|------------|----------------|----------------|-----------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------------|
| AMONIJAK | 429,38 | 1782,66 | 138,74 | 0,151 | 1368,86 | 1084,78 | 284,08 |
| R-12 | 308,15 | 1082,08 | 66,18 | 0,257 | 147,44 | 116,74 | 30,70 |
| IZOBUTAN | 156,96 | 604,45 | 53,96 | 0,272 | 335,70 | 266,17 | 69,53 |
| R-134a | 292,80 | 1159,92 | 63,44 | 0,284 | 185,95 | 146,69 | 39,26 |

Tablica 4 Karakteristične veličine u procesu za različite radne tvari

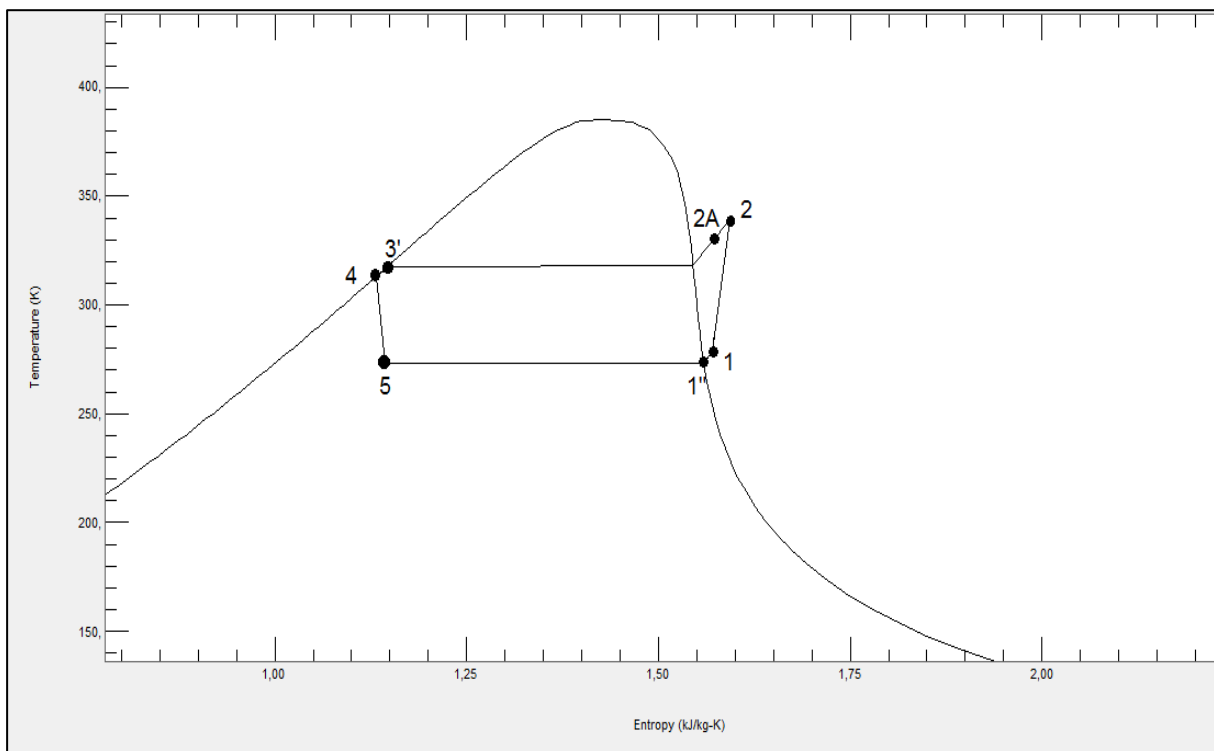
| RADNA TVAR | \dot{m} [kg/s] | \dot{V}_1 [m ³ /s] | \dot{n} [okr/min] | $ \dot{Q}_c $ [kW] | \dot{Q}_0 [kW] | $ P_G $ [kW] | ε_{DT} [-] |
|------------|---------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------------------|
| AMONIJAK | 0,013 | 0,0039 | 231 | 17,60 | 13,95 | 3,65 | 4,82 |
| R-12 | 0,119 | 0,0068 | 408 | 17,60 | 13,94 | 3,66 | 4,80 |
| IZOBUTAN | 0,052 | 0,0125 | 750 | 17,60 | 13,95 | 3,65 | 4,83 |
| R-134a | 0,095 | 0,0068 | 408 | 17,60 | 13,88 | 3,72 | 4,74 |

Iz podataka u Tablici 4 slijedi da za isti temperaturni režim i toplinski tok kondenzacije dolazi do znatnih razlika u masenim protocima radnih tvari. Različiti maseni, odnosno volumni protoci za kompresor istog volumena (0,001 m³) podešavaju se promjenom broja okretaja. Nadalje, temperatura nakon kompresije je daleko najviša za amonijak. Razlog tomu je položaj graničnih krivulja u T,s dijagramu u odnosu na druge radne tvari kao što je prikazano na Slici 27. Nadalje, udio parne faze u dvofaznoj smjesi na izlazu iz prigušnog ventila je vrlo sličan za: R-12, izobutan i R-134a. Znatno veći udio kapljevite faze sadrži mokra para amonijaka u odnosu na druge radne tvari. Vrijednosti toplinskih tokova isparavanja te snage kompresora vrlo su bliske za sve radne tvari, kao i faktor grijanja dizalice topline.

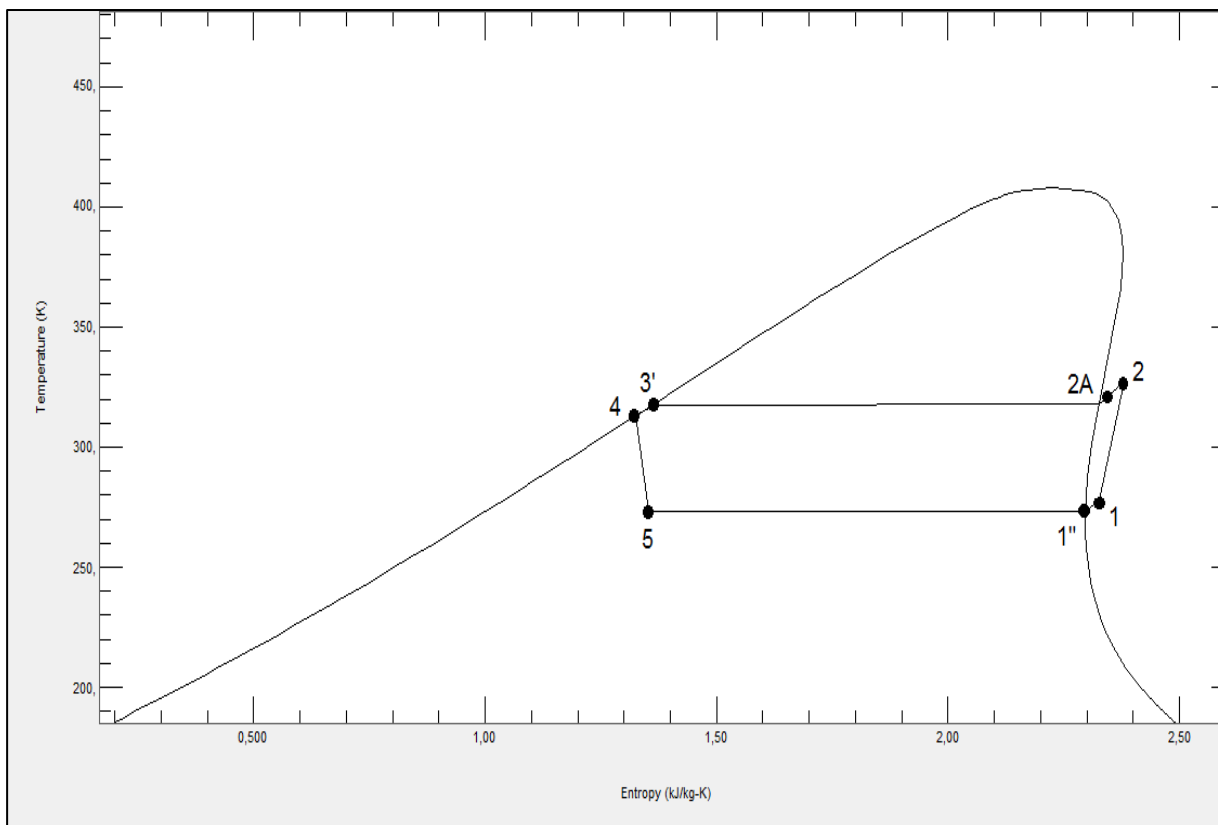
Slike 28-31 prikazuju opisani proces u T,s dijagramima za sve analizirane radne tvari iz Tablice 3 i 4.



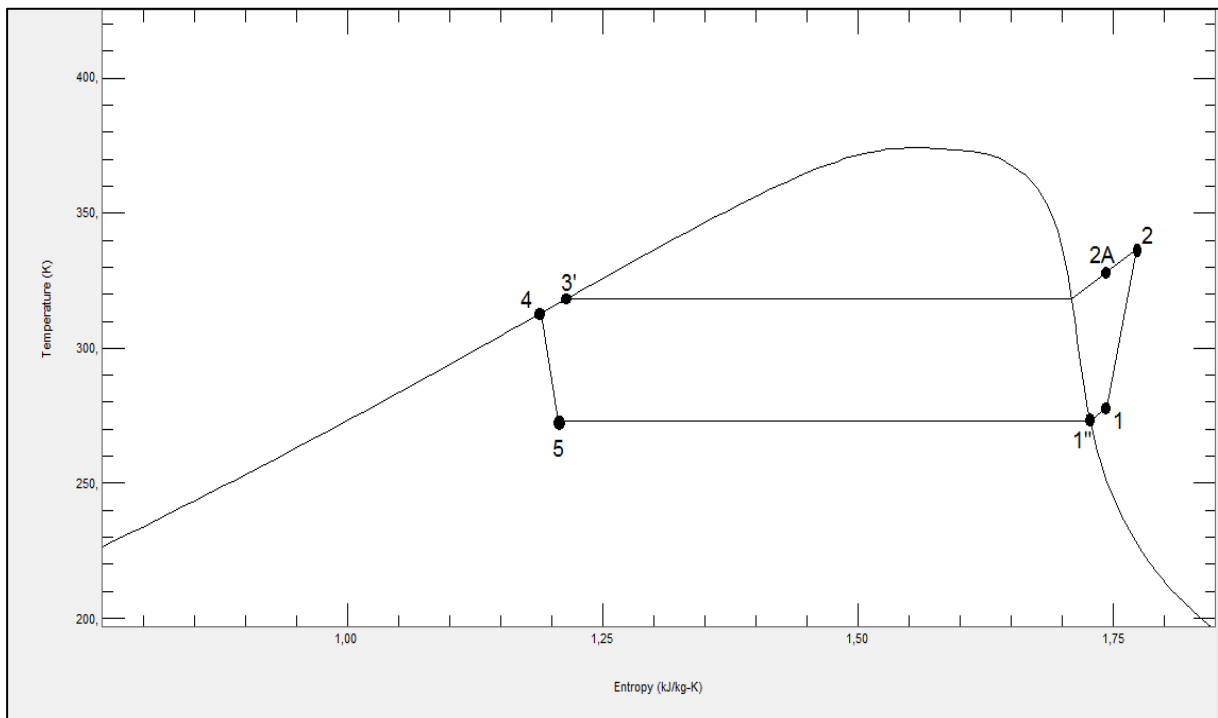
Slika 28 Realni proces za amonijak u T,s dijagramu



Slika 29 Realni proces za R-12 u T,s dijagramu



Slika 30 Realni proces za izobutan u T,s dijagramu



Slika 31 Realni proces za R-134a u T,s dijagramu

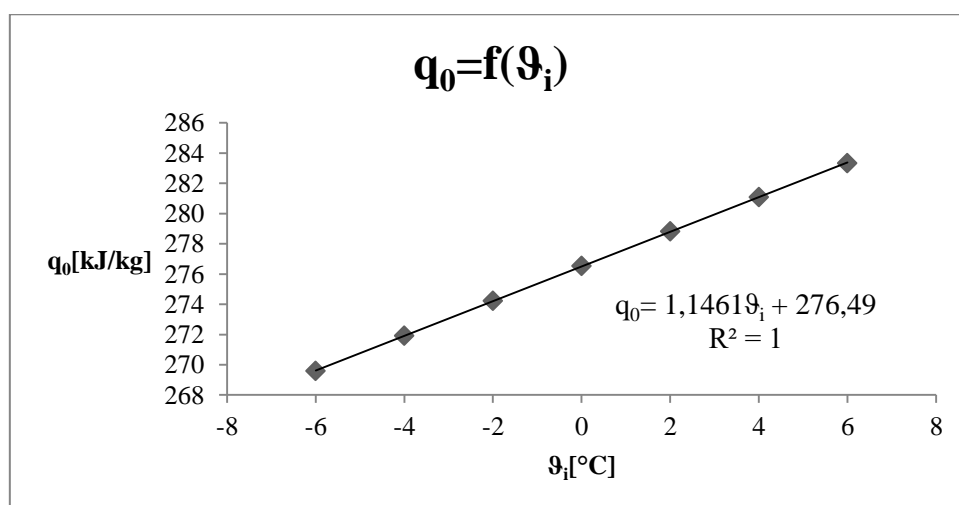
5.5 Promjena temperature isparavanja

Kako bi ispitali utjecaj promjene parametara propana u procesu grijanja temperatura kondenzacije držala se stalnom (45°C), a temperatura isparavanja mijenjala od -6°C do 6°C uz korak 2°C. Najveća temperatura isparavanja ograničena je temperaturom zemlje. U obzir je uzeto pregrijavanje suhozasićene pare za 5 °C, pothlađivanje vrele kapljevine pri stalnom tlaku za 5 °C i stupanj iskorištenja kompresora od 75%. Rezultati proračuna dani su u Tablici 5.

Tablica 5 Energetske veličine propana za dane temperature isparavanja

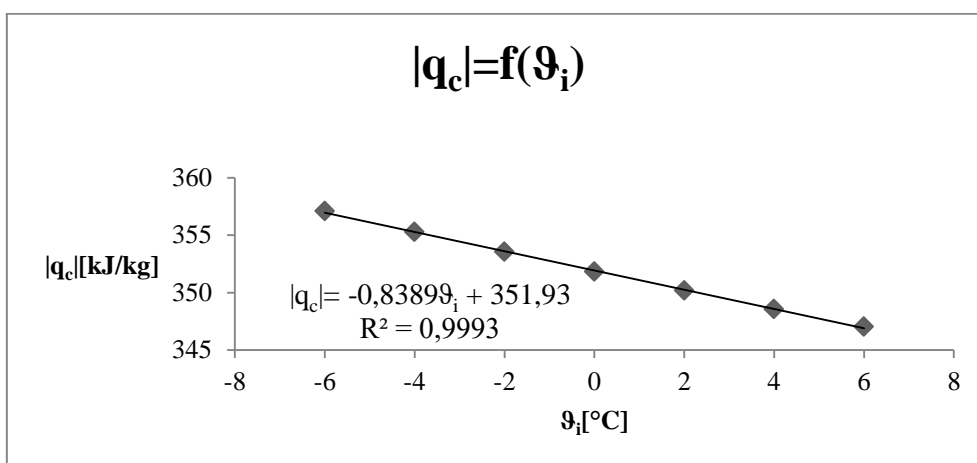
| ϑ_i [°C] | q_0 [kJ/kg] | $ q_c $ [kJ/kg] | $ w_{teh,k} $ [kJ/kg] | ϑ_2 [°C] | ε_{DT} [-] |
|--------------------|---------------|-----------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| -6 | 269,58 | 357,09 | 87,51 | 65,25 | 4,08 |
| -4 | 271,91 | 355,28 | 83,38 | 64,44 | 4,26 |
| -2 | 274,22 | 353,53 | 79,31 | 63,65 | 4,46 |
| 0 | 276,52 | 351,83 | 75,31 | 62,88 | 4,67 |
| 2 | 278,81 | 350,18 | 71,37 | 62,14 | 4,91 |
| 4 | 281,08 | 348,57 | 67,50 | 61,42 | 5,16 |
| 6 | 283,33 | 347,02 | 63,68 | 60,72 | 5,45 |

Grafički su prikazane ovisnosti energetske veličine iz Tablice 5: topline isparavanja, topline kondenzacije, rada kompresora, temperature nakon kondenzacije i faktora grijanja dizalice topline o temperaturi isparavanja.

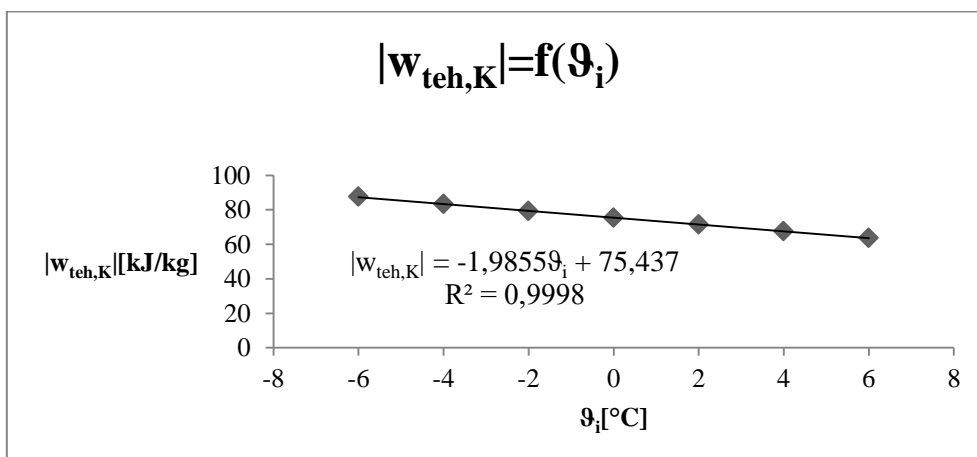


Slika 32 Ovisnost topline isparavanja o temperaturi isparavanja

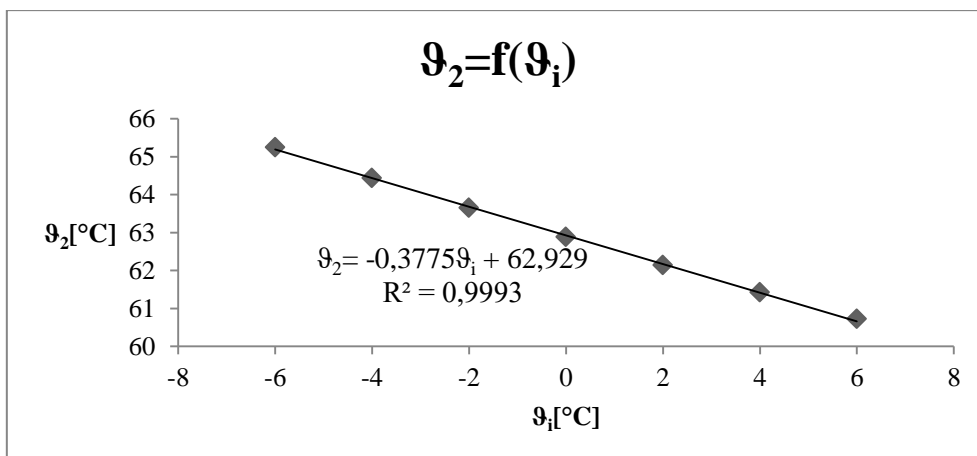
Grafički prikaz na Slici 32 pokazuje da povećanjem temperature isparavanja rashladni učin raste. Takav pristup analizi procesa vrijedi ukoliko za danu radnu tvar postoji stalan izvor topline. No, kako je u geotermalnoj dizalici topline tlo izvor topline, a s vremenom dolazi do njegovog hlađenja, nije moguće uspostaviti više temperature isparavanja radne tvari od temperature tla. Nadalje, hlađenjem tla smanjuje se i pokretačka sila prijenosa topline te se sve manji toplinski tok može prenijeti u bušotinskom izmjenjivaču topline. To bi značilo da se povećanjem temperature isparavanja rashladni učin zapravo smanjuje što nije u skladu s prikazanom slikom. Za analizu takvog utjecaja potrebno je poznavati dinamiku tla, a to se u ovom radu ne uzima u obzir.



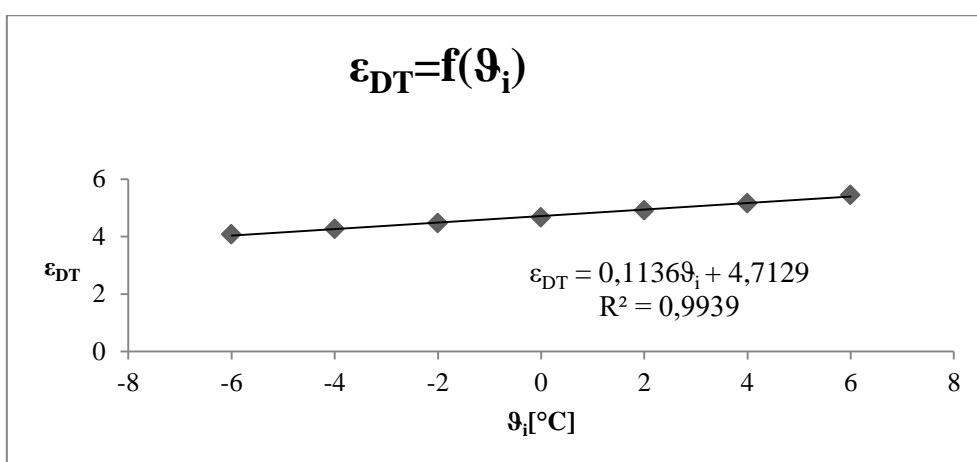
Slika 33 Ovisnost topline kondenzacije o temperaturi isparavanja



Slika 34 Ovisnost rada kompresora o temperaturi isparavanja



Slika 35 Ovisnost temperature nakon kompresije o temperaturi isparavanja



Slika 36 Ovisnost faktora dizalice topline o temperaturi isparavanja

5.6 Promjena temperaturnog režima i stupnja iskorištenja kompresora

Kako bi se analizirao utjecaj promjene temperaturnog režima i stupnja iskorištenja kompresora na faktor grijanja dizalice topline, temperaturu nakon kompresije i jediničnu toplinu kondenzacije napravljen je proračun za odgovarajuće vrijednosti u nastavku. Rezultati su dani tablično i grafički.

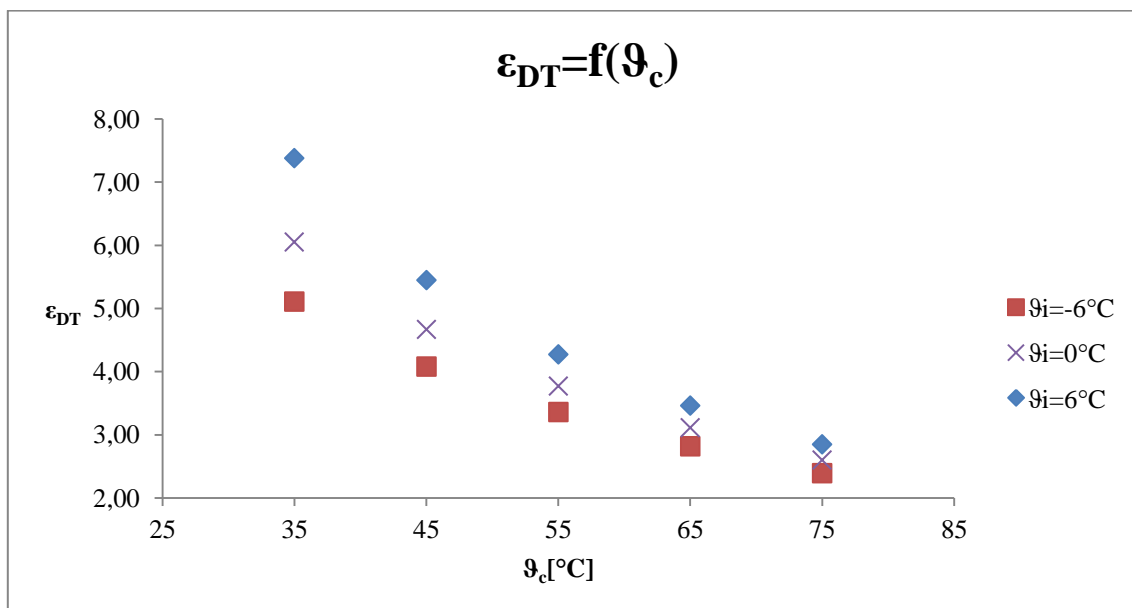
5.6.1 Utjecaj na faktor grijanja dizalice topline

U Tablici 6 nalaze se vrijednosti faktora grijanja dizalice topline za dane temperature kondenzacije i isparavanja, uz stupanj iskorištenja kompresora od 75% te pregrijanje i pothlađivanje za 5 °C.

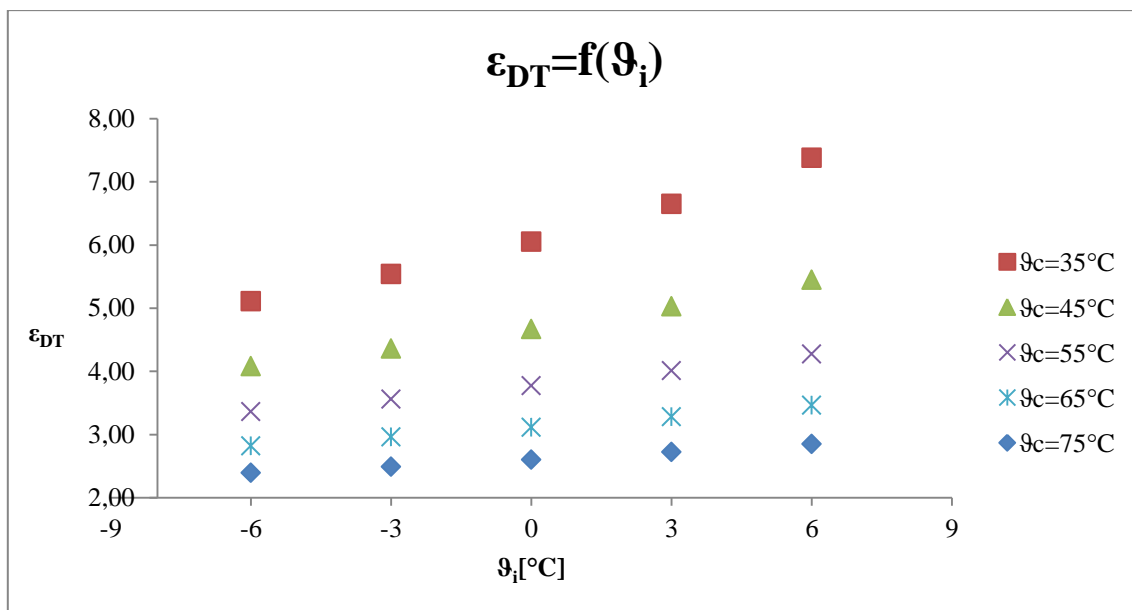
Slika 37 i Slika 38 grafički prikazuju vrijednosti iz Tablice 6.

Tablica 6 Vrijednosti faktora grijanja dizalice topline za dane temperature kondenzacije i isparavanja

| ϑ_c | ϑ_i | | | | |
|---------------|---------------|------|------|------|------|
| | 6°C | 3°C | 0°C | 3°C | 6°C |
| 35°C | 5,11 | 5,54 | 6,05 | 6,65 | 7,38 |
| 45°C | 4,08 | 4,36 | 4,67 | 5,03 | 5,45 |
| 55°C | 3,36 | 3,56 | 3,77 | 4,01 | 4,27 |
| 65°C | 2,82 | 2,96 | 3,11 | 3,28 | 3,46 |
| 75°C | 2,39 | 2,49 | 2,60 | 2,72 | 2,85 |



Slika 37 Ovisnost faktora grijanja dizalice topline o temperaturi kondenzacije za različite temperature isparavanja

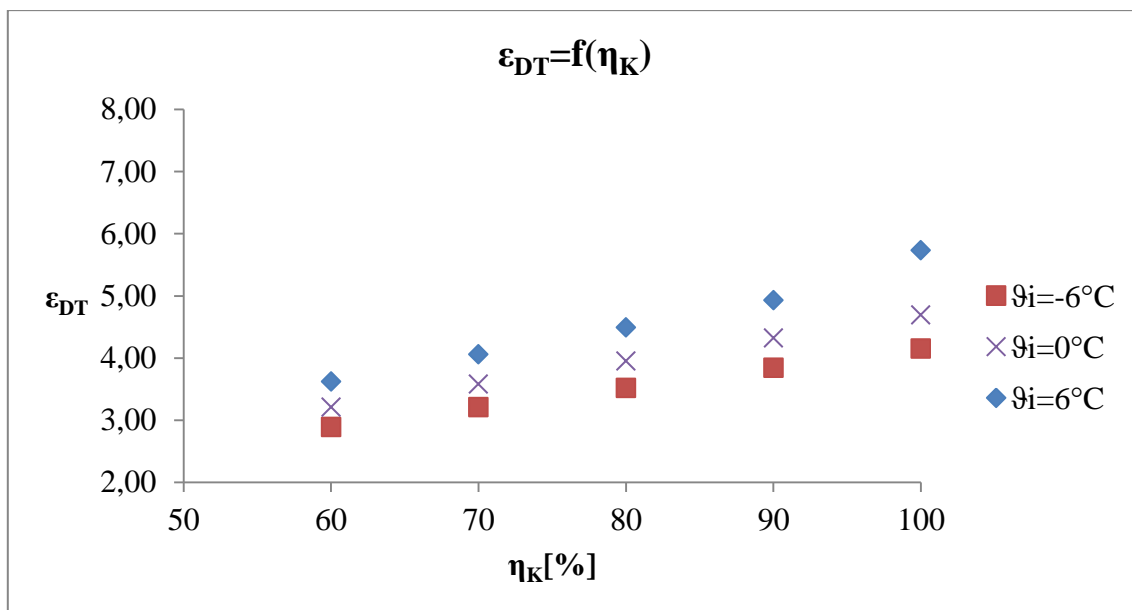


Slika 38 Ovisnost faktora grijanja dizalice topline o temperaturi isparavanja za različite temperature kondenzacije

U Tablici 7 nalaze se vrijednosti faktora grijanja dizalice topline za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature isparavanja uz istu temperaturu kondenzacije od 55°C te pregrijanje i pothlađivanje za 5 °C. Slika 39 grafički prikazuje vrijednosti iz Tablice 7.

Tablica 7 Vrijednosti faktora grijanja dizalice topline za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature isparavanja

| η_k [%] | θ_i | | | | |
|--------------|------------|------|------|------|------|
| | -6°C | -3°C | 0°C | 3°C | 6°C |
| 60 | 2,89 | 3,04 | 3,21 | 3,41 | 3,62 |
| 70 | 3,21 | 3,39 | 3,58 | 3,81 | 4,06 |
| 80 | 3,52 | 3,73 | 3,95 | 4,21 | 4,49 |
| 90 | 3,84 | 4,07 | 4,32 | 4,61 | 4,93 |
| 100 | 4,15 | 4,41 | 4,69 | 5,01 | 5,73 |

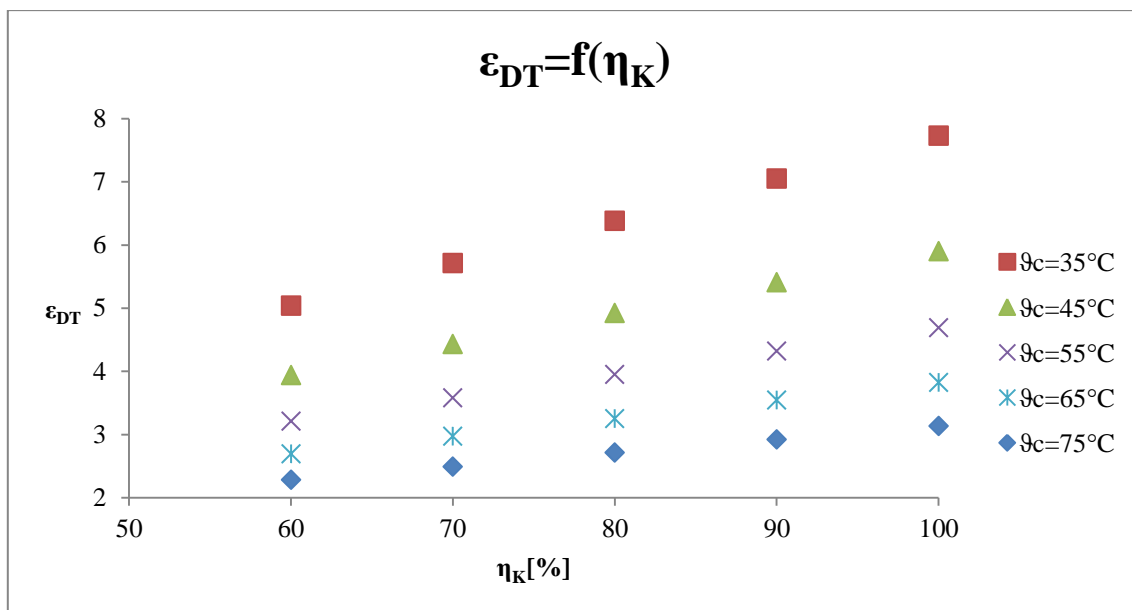


Slika 39 Ovisnost faktora grijanja dizalice topline o stupnju iskorištenja kompresora za različite temperature isparavanja

U Tablici 8 nalaze se vrijednosti faktora grijanja dizalice topline za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature kondenzacije uz istu temperaturu isparavanja od 0°C te pregrijanje i pothlađivanje za 5 °C.. Slika 40 grafički prikazuje vrijednosti iz Tablice 8.

Tablica 8 Vrijednosti faktora grijanja dizalice topline za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature kondenzacije

| η _K [%] | 9 _c | | | | |
|--------------------|----------------|------|------|------|------|
| | 35°C | 45°C | 55°C | 65°C | 75°C |
| 60 | 5,04 | 3,94 | 3,21 | 2,69 | 2,28 |
| 70 | 5,71 | 4,43 | 3,58 | 2,97 | 2,49 |
| 80 | 6,38 | 4,92 | 3,95 | 3,25 | 2,71 |
| 90 | 7,05 | 5,41 | 4,32 | 3,54 | 2,92 |
| 100 | 7,73 | 5,90 | 4,69 | 3,82 | 3,13 |



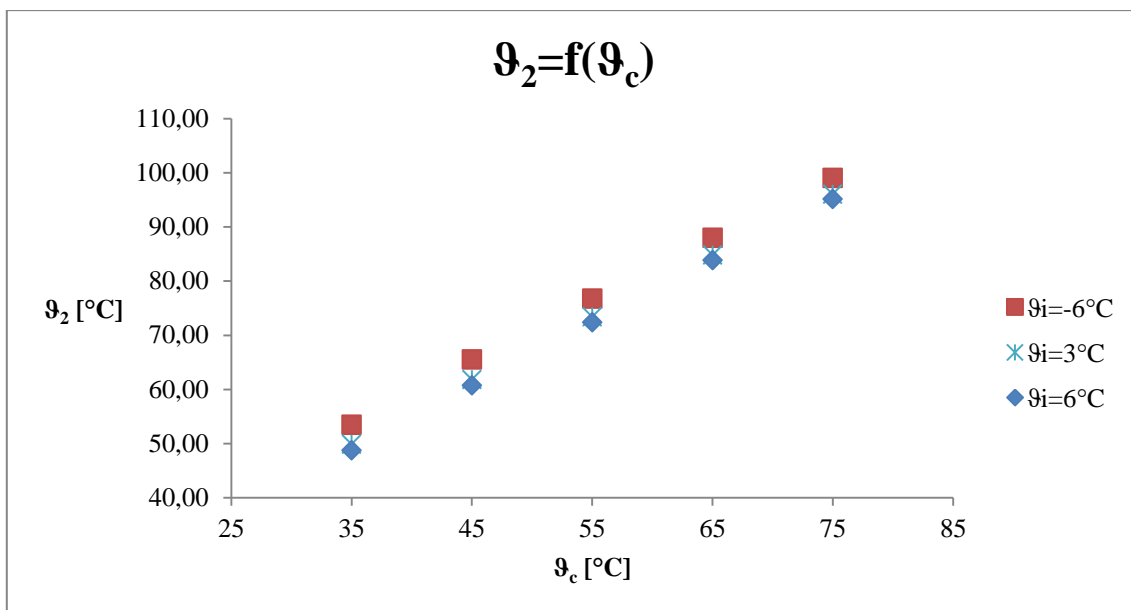
Slika 40 Ovisnost faktora grijanja dizalice topline o stupnju iskorištenja kompresora za različite temperature kondenzacije

5.6.2 Utjecaj na temperaturu nakon kompresije

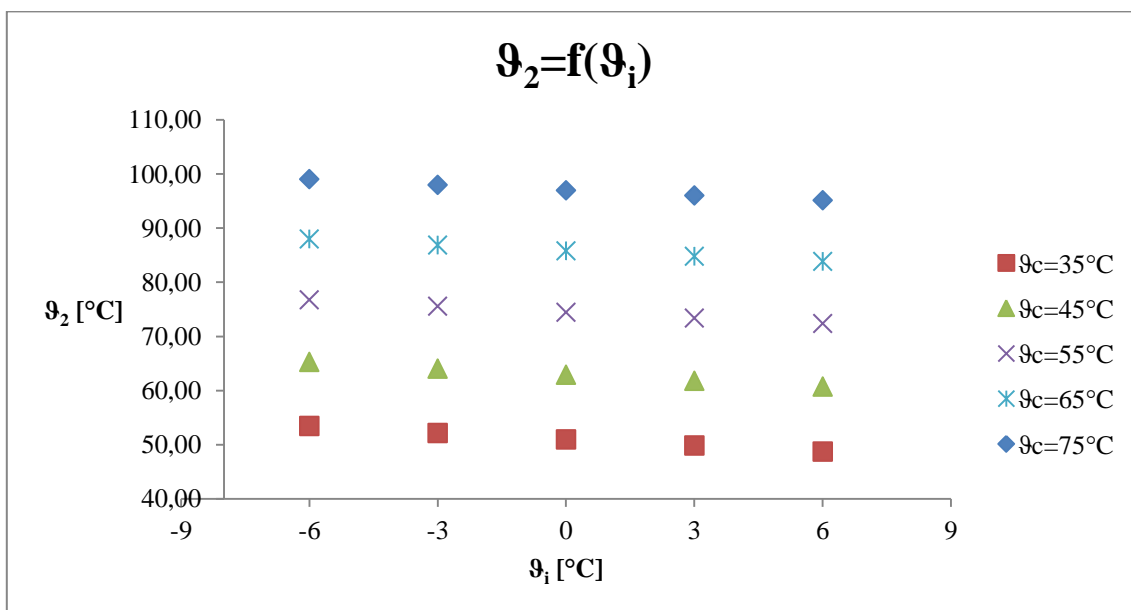
U Tablici 9 nalaze se vrijednosti temperature nakon kompresije [$^\circ\text{C}$] za dane temperature kondenzacije i isparavanja, uz stupanj iskorištenja kompresora od 75% te pregrijanje i pothlađivanje za 5°C . Slika 41 i Slika 42 grafički prikazuju vrijednosti iz Tablice 9.

Tablica 9 Vrijednosti temperature nakon kompresije [$^\circ\text{C}$] za dane temperature kondenzacije i temperature isparavanja

| θ_c | θ_i | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | -6°C | -3°C | 0°C | 3°C | 6°C |
| 35°C | 53,43 | 52,17 | 50,97 | 49,82 | 48,72 |
| 45°C | 65,52 | 64,04 | 62,88 | 61,78 | 60,72 |
| 55°C | 76,73 | 75,57 | 74,46 | 73,40 | 72,39 |
| 65°C | 87,97 | 86,85 | 85,79 | 84,78 | 83,82 |
| 75°C | 99,06 | 98,00 | 96,99 | 96,04 | 95,13 |



Slika 41 Ovisnost temperature nakon kompresije o temperaturi kondenzacije za različite temperature isparavanja

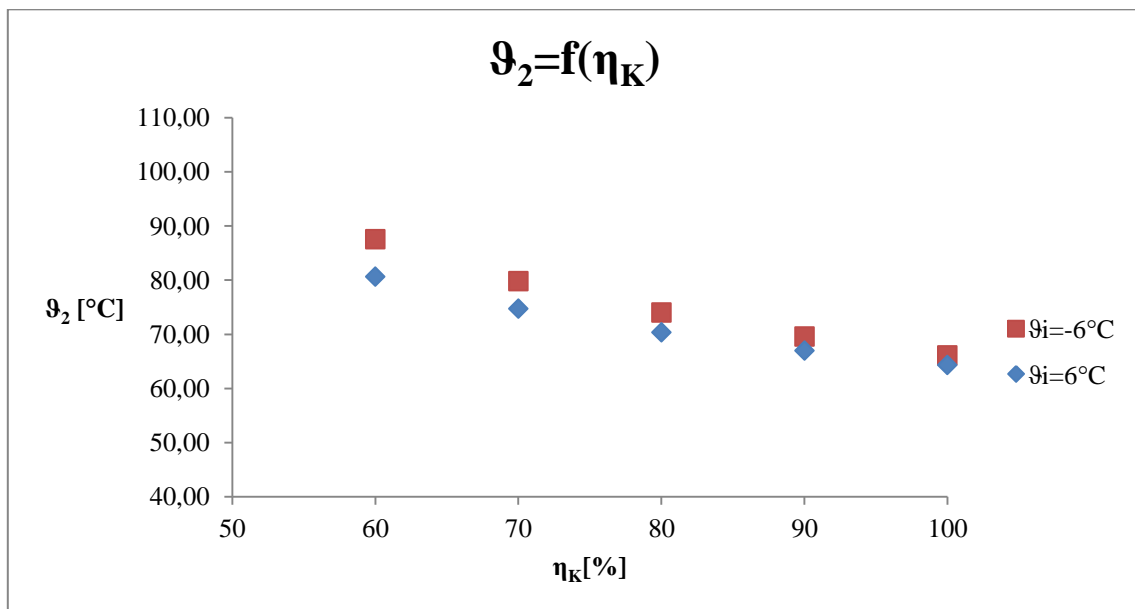


Slika 42 Ovisnost temperature nakon kompresije o temperaturi isparavanja za različite temperature kondenzacije

U Tablici 10 nalaze se vrijednosti temperature nakon kompresije [°C] za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature isparavanja uz istu temperaturu kondenzacije od 55°C te pregrijanje i pothlađivanje za 5 °C. Slika 43 grafički prikazuje vrijednosti iz Tablice 10.

Tablica 10 Vrijednosti temperature nakon kompresije [°C] za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature isparavanja

| η_K [%] | ϑ_i | | | | |
|--------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| | -6°C | -3°C | 0°C | 3°C | 6°C |
| 60 | 87,55 | 85,79 | 84,00 | 82,29 | 80,64 |
| 70 | 79,83 | 78,47 | 77,17 | 75,92 | 74,73 |
| 80 | 74,04 | 73,04 | 72,10 | 71,2 | 70,35 |
| 90 | 69,59 | 68,88 | 68,22 | 67,59 | 67,00 |
| 100 | 66,09 | 65,60 | 66,15 | 64,73 | 64,35 |

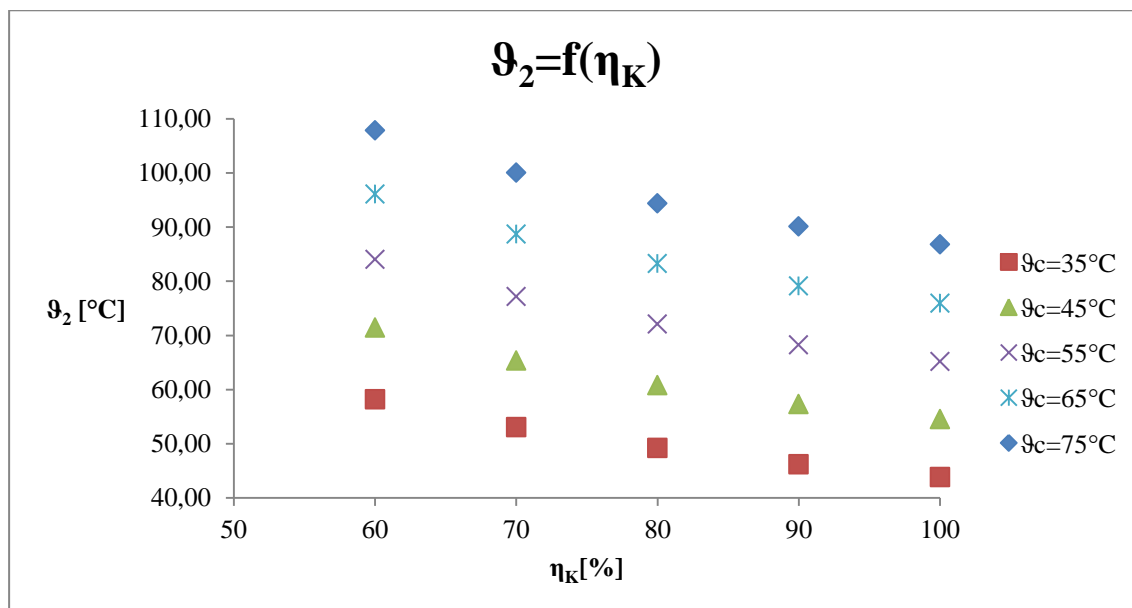


Slika 43 Ovisnost temperature nakon kompresije o stupnju iskorištenja kompresora za različite temperature isparavanja

U Tablici 11 nalaze se vrijednosti temperature nakon kompresije [°C] za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature kondenzacije uz istu temperaturu isparavanja od 0°C te pregrijanje i pothlađivanje za 5 °C. Slika 44 grafički prikazuje vrijednosti iz Tablice 11.

Tablica 11 Vrijednosti temperature nakon kompresije [°C] za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature kondenzacije

| η_K [%] | ϑ_c | | | | |
|--------------|---------------|-------|-------|-------|--------|
| | 35°C | 45°C | 55°C | 65°C | 75°C |
| 60 | 58,18 | 71,40 | 84,00 | 96,11 | 107,83 |
| 70 | 53,03 | 65,31 | 77,17 | 88,71 | 100,04 |
| 80 | 49,17 | 60,77 | 72,10 | 83,27 | 94,37 |
| 90 | 46,19 | 57,26 | 68,22 | 79,13 | 90,1 |
| 100 | 43,81 | 54,49 | 65,15 | 75,9 | 86,81 |



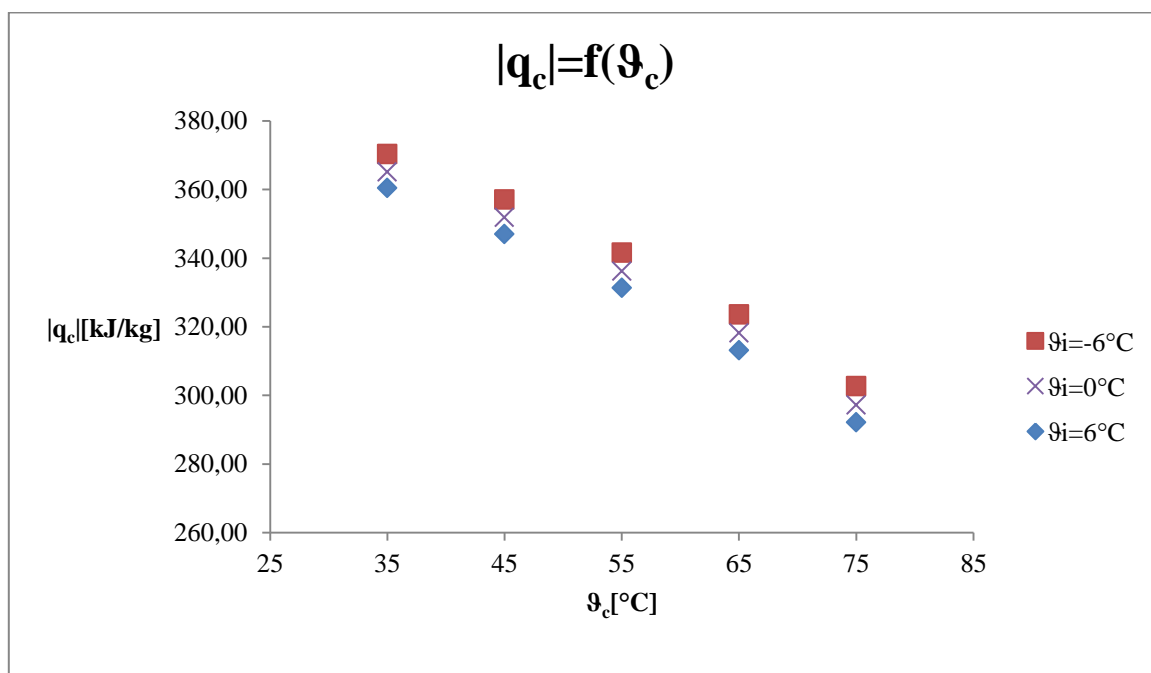
Slika 44 Ovisnost temperature nakon kompresije o stupnju iskorištenja kompresora za različite temperature kondenzacije

5.6.3 Utjecaj na jediničnu toplinu kondenzacije

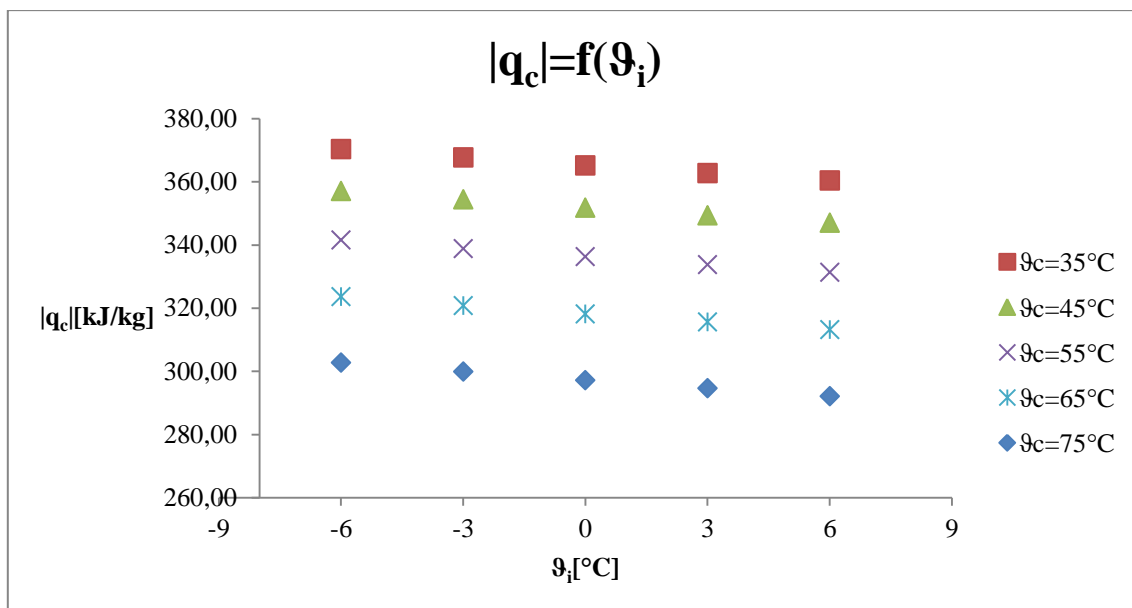
U Tablici 12 nalaze se vrijednosti jedinične topline kondenzacije [kJ/kg] za dane temperature kondenzacije i isparavanja, uz stupanj iskorištenja kompresora od 75% te pregrijanje i pothlađivanje za 5 °C. Slika 45 i Slika 46 grafički prikazuju vrijednosti iz Tablice 12.

Tablica 12 Vrijednosti jedinične topline kondenzacije [kJ/kg] za dane temperature kondenzacije i temperature isparavanja

| ϑ_c | ϑ_i | | | | |
|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | -6°C | -3°C | 0°C | 3°C | 6°C |
| 35°C | 370,33 | 367,69 | 365,16 | 362,75 | 360,43 |
| 45°C | 357,09 | 354,40 | 351,83 | 349,37 | 347,02 |
| 55°C | 341,59 | 338,85 | 336,23 | 333,73 | 331,33 |
| 65°C | 323,59 | 320,80 | 318,14 | 315,59 | 313,16 |
| 75°C | 302,72 | 299,88 | 297,17 | 294,58 | 292,10 |



Slika 45 Ovisnost jedinične topline kondenzacije o temperaturi kondenzacije za različite temperature isparavanja

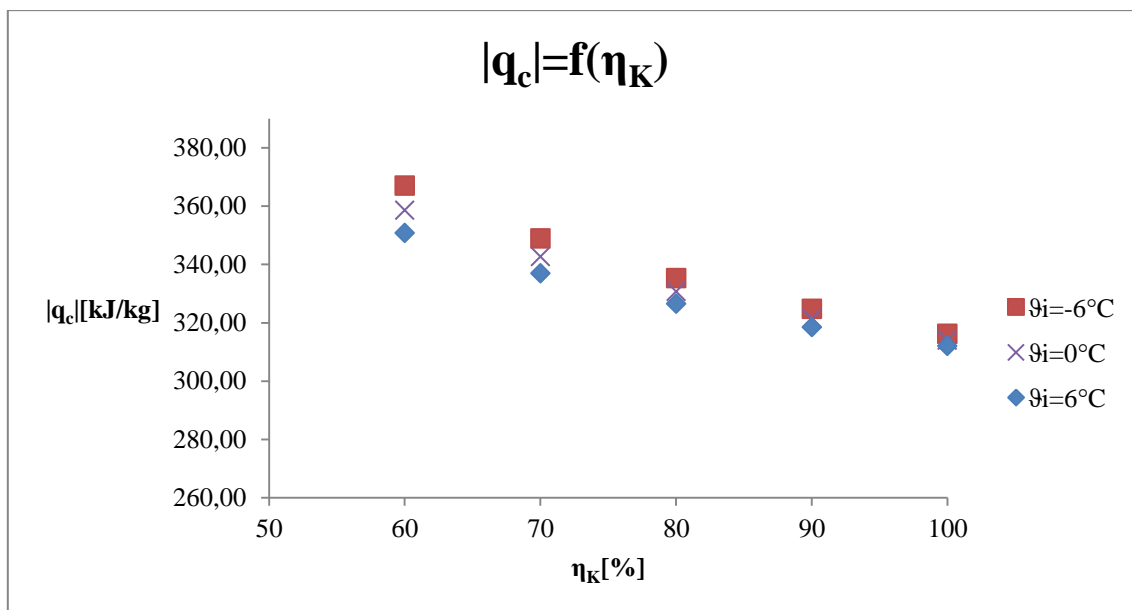


Slika 46 Ovisnost jedinične topline kondenzacije o temperaturi isparavanja za različite temperature kondenzacije

U Tablici 13 nalaze se vrijednosti jedinične topline kondenzacije [kJ/kg] za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature isparavanja uz istu temperaturu kondenzacije od 55°C te pregrijanje i pothlađivanje za 5 °C. Slika 47 grafički prikazuje vrijednosti iz Tablice 13.

Tablica 13 Vrijednosti jedinične topline kondenzacije [kJ/kg] za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature isparavanja

| η_k [%] | θ_i | | | | |
|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | -6°C | -3°C | 0°C | 3°C | 6°C |
| 60 | 366,97 | 362,67 | 358,54 | 354,55 | 350,71 |
| 70 | 348,84 | 345,65 | 342,6 | 339,68 | 336,87 |
| 80 | 335,24 | 332,89 | 330,65 | 328,52 | 326,49 |
| 90 | 324,67 | 322,97 | 321,36 | 319,85 | 318,42 |
| 100 | 316,21 | 315,02 | 313,92 | 312,9 | 311,96 |

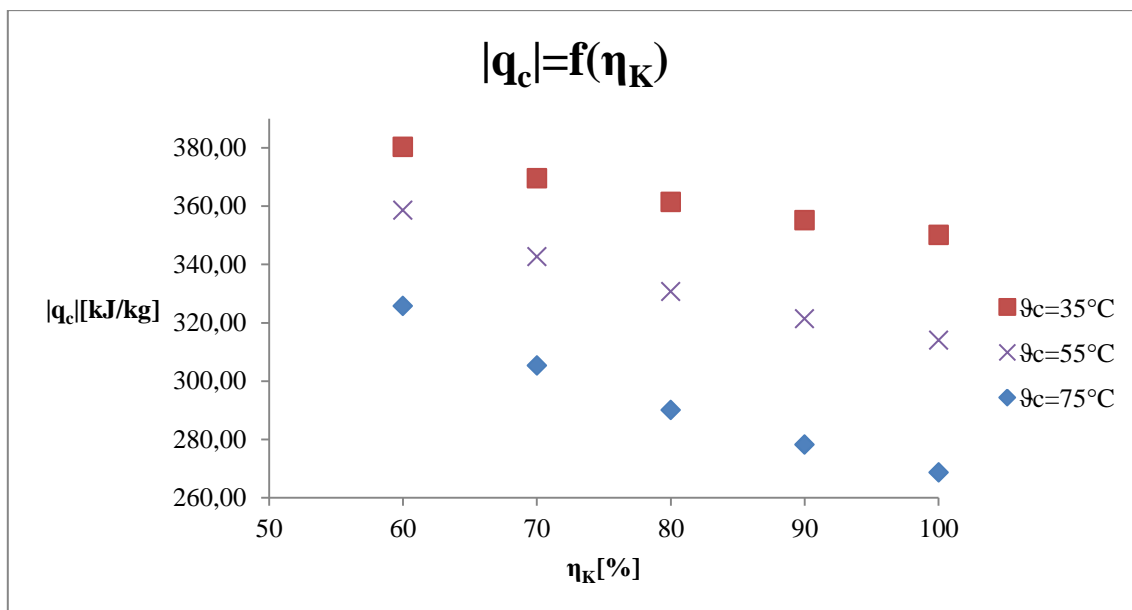


Slika 47 Ovisnost jedinične topline kondenzacije o stupnju iskorištenja kompresora za različite temperature isparavanja

U Tablici 14 nalaze se vrijednosti jedinične topline kondenzacije [kJ/kg] za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature kondenzacije uz istu temperaturu isparavanja od 0°C te pregrijanje i pothlađivanje za 5 °C. Slika 48 grafički prikazuje vrijednosti iz Tablice 14.

Tablica 14 Vrijednosti jedinične topline kondenzacije [kJ/kg] za dane stupnjeve iskorištenja kompresora i temperature kondenzacije

| η_K [%] | ϑ_c | | | | |
|--------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | 35°C | 45°C | 55°C | 65°C | 75°C |
| 60 | 380,26 | 370,65 | 358,54 | 343,68 | 325,73 |
| 70 | 369,48 | 357,21 | 342,60 | 325,43 | 305,33 |
| 80 | 361,39 | 347,12 | 330,65 | 311,75 | 290,03 |
| 90 | 355,10 | 339,28 | 321,36 | 301,10 | 278,13 |
| 100 | 350,06 | 333,00 | 313,92 | 292,59 | 268,61 |



Slika 48 Ovisnost jedinične topline kondenzacije o stupnju iskorištenja kompresora za različite temperature kondenzacije

5.6.4 Usporedba rezultata

Iz grafova se može vidjeti da povećanje temperature kondenzacije pri konstantnoj vrijednosti temperature isparavanja smanjuje faktor dizalice topline kao i jediničnu toplinu kondenzacije, a povećava temperaturu nakon kompresije.

Nadalje, povećanje temperature isparavanja pri konstantnoj vrijednosti temperature kondenzacije povećava faktor dizalice topline, a smanjuje temperaturu nakon kompresije i jediničnu toplinu kondenzacije.

Iz analize vidi se da niži stupanj iskorištenja kompresora povećava temperaturu nakon kompresije u slučajevima kada su niže temperature (tlakovi) isparavanja i više temperature (tlakovi) kondenzacije. Time se ujedno smanjuje ekonomičnost rada te povećava jedinični utrošeni rad kompresora.

Uz to, slijedi da je za veći faktor grijanja dizalice topline poželjno imati veću temperaturu isparavanja, što često u primjeni nije moguće ostvariti. Temperatura isparavanja radne tvari je ograničena temperaturom izvora topline za radnu tvar.

6 Zaključak

Analizom termodinamičkog procesa u dizalici topline u ovom radu pokazano je da su mogući detaljniji i točniji proračuni korištenjem baze podataka ovakvog tipa za razliku od klasičnog izčitavanja veličina stanja iz T,s dijagrama ili tablica. REFPROP sadrži podatke za veliki broj fluida koji se koriste u rashladnim i kriogenim procesima. Na temelju eksperimentalnih podataka i proračuna ispada da odstupanja nisu velika, odnosno da se model može koristiti uz određenu točnost. Korištenjem takve baze podataka mogu se modelirati razni procesi s ciljem preliminarnog ispitivanja njihovog vladanja, a to je vrlo poželjno jer umanjuje nepotrebne troškove provođenja eksperimenta. Vrlo jednostavno se mogu promijeniti ulazne vrijednosti parametara procesa i dobiti izlazne vrijednosti što čine ovaj model prikladnim za detaljnu analizu samog termodinamičkog procesa, kao i opis stanja i pripadnih energetske veličina različitih radnih tvari ili njihovih smjesa u procesu.

Nadalje, tlo se za geotermalnu dizalicu topline pokazuje kao vrlo složen izvor topline. Razlog tomu je raspodjela temperatura tla po dubini koja se mora ustanoviti eksperimentom kao i toplinska vodljivost tla. Slijedi također da tlo nije neograničen izvor topline za dizalicu topline jer kada se temperatura tla zbog pothlađivanja izjednači s temperaturom fluida u bušotinskom izmjenjivaču tlo gubi svoju namjenu.

Izbor radnih tvari u dizalici topline ponajprije ovisi o raspoloživim sredstvima i njihovoj dostupnosti. Slijedi da zbog svojih karakteristika amonijak može biti primjenjiv u širokom području temperatura, da daje velike toplinske tokove i pri malim protocima. Ekološki nije povoljan zbog svojeg nagrizajućeg djelovanja i utjecaja na ljude i okoliš pa ga je cilj zamijeniti nekom prikladnom tvari. Ugljikovodici su vrlo zapaljivi i to predstavlja njihov najveći problem za korištenje u dizalicama topline. Nedopušteni klorirani ugljikovodici bi se trebali u potpunosti ukloniti iz upotrebe zbog nepovoljnog utjecaja na ozonski omotač. Stoga se ne bi smjeli razmatrati kao radne tvari. Neki dopušteni haloalkani (npr. R-134a) koji nemaju gotovo nikakav utjecaj na okoliš, trebali bi se više razmatrati i ispitivati kao alternativno rješenje za štetne freone.

7 Popis oznaka i indeksa

| Oznaka | Jedinica | Značenje |
|-----------|-----------------------------|--|
| A | m^2 | površina |
| c_p | $J / kg \text{ } ^\circ C$ | specifični toplinski kapacitet tvari |
| h | J / kg | specifična (jedinična) entalpija tvari |
| K | $W / m^2 \text{ } ^\circ C$ | ukupni koeficijent prolaza topline |
| l | m | duljina puta kondukcijskog vođenja topline |
| L | m | duljinska dimenzija |
| m | kg | masa tvari |
| \dot{m} | kg / s | protočna masa tvari |
| \dot{n} | okr / min | broj okretaja kompresora |
| p | Pa | apsolutni tlak |
| P | W | mehanička snaga |
| q | J / kg | specifična (jedinična) toplina |
| \dot{Q} | $J / s, W$ | toplinski tok, toplinska snaga |
| R_i | $^\circ C m^2 / W$ | otpor prijenosu topline |
| R_f | $^\circ C m^2 / W$ | otpor naslaga prijenosu topline |
| s | J / kgK | specifična (jedinična) entropija tvari |
| t | s | vrijeme |
| T | K | apsolutna temperatura |
| v | m^3 / kg | specifični (jedinični) volumen tvari |

| | | |
|---------------------|---|---|
| \dot{V} | m^3/s | volumen struje (protoka) tvari |
| w_{teh} | J / kg | specifični (jedinični) tehnički rad |
| x | kg / kg | sadržaj parne faze |
| α | $\text{W} / \text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$ | koeficijent prijelza topline (na strani fluida) |
| δ_T | m | debljina toplinskog graničnog sloja |
| λ | $\text{W} / \text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$ | koeficijent toplinske vodljivosti |
| ε_{DT} | - | faktor grijanja dizalice topline |
| η_K | - | (izentropski) stupanj iskorištenja kompresora |
| ρ | kg / m^3 | gustoća radne tvari |
| ϑ | $^\circ\text{C}$ | Celzijeva temperatura |
| $\Delta\vartheta$ | $^\circ\text{C}$ | razlika temperatura |
| $\Delta\vartheta_m$ | $^\circ\text{C}$ | pokretačka sila prijenosa topline |

INDEKSI

| Oznaka | Značenje |
|--------|---------------------------|
| c | kondenzator, kondenzacija |
| DT | dizalica topline |
| G | grijanje |
| H | hlađenje |
| i | isparavanje |
| K | kompresija |
| R | rashladni |
| teh | tehnički (rad) |
| ' | vrela kapljevina |
| " | suhozasićena para |

8 Literatura

- [1] Budin R., Mihelić Bogdanić A., Osnove tehničke termodinamike, 3. izdanje, Školska knjiga Zagreb, 2012.
- [2] Zhai X.Q., Cheng X.W., Wang R.Z.: Heating and cooling performance of a mini type ground source heat pump system, Applied Thermal Engineering, 2016 (in press)
- [3] Galgaro A., Farina Z., Emmi G., De Carli M.: Feasibility analysis of a Borehole Heat Exchanger (BHE) array to be installed in high geothermal flux area: The case of the Euganean Thermal Basin, Italy, Renewable Energy 78 (2015) 93-104.
- [4] http://www.industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/ (pristup 5.5.2016)
- [6] Beer E., Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994.
- [7] <http://www.dairyprocessinghandbook.com/chapter/heat-exchangers> (pristup 15.6.2016.)
- [8] <http://www.airconditioning-systems.com/air-conditioner-compressor.html> (pristup 15.6.2016.)
- [9] <http://www.dorin.com/en/catalogo/SE/HEX/HEX2/HEX350CC/> (pristup 19.6.2016.)
- [10] <http://www.air-compressor-guide.com/learn/compressor-types/scroll-compressor> (pristup 1.7.2016.)
- [11] <http://www.brighthubengineering.com/hvac/58365-throttling-devices-or-expansion-valves-used-in-refrigeration-and-ac-systems/> (pristup 10.7.2016.)
- [12] Lemmon E. W., Huber M. L., McLinden M. O., Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties— REFPROP, User's Guide, Version 8.0, April, 2007
- [13] <http://www.boulder.nist.gov/div838/theory/refprop/LINKING/Linking.htm> (pristup 15.7.2016.)
- [14] Soldo V., Mogućnost suradnje između istraživačkih institucija i poduzeća u razvijanju i korištenju tehnologija s područja OIE, Radionica u okviru projekta IR-OVE, DIZALICE TOPLINE, Čakovec, 27.02.2013.

[15] http://www.meglobal.biz/media/product_guides/MEGlobal_MEG.pdf (pristup 1.8.2016.)

[16] Sagia Z., Rakopoulos C. Alternative refrigerants for the heat pump of a ground source heat pump system, *Applied Thermal Engineering* 100 (2016) 768-774.

[17] Prebeg D., Utjecaj zamjene radne tvari kod orebrenog isparivača i kondenzatora na prijelaz topline odnosno rashladni učin rashladnika/dizalice topline, *Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu* 54 (2012) 317-335.

9 Prilozi

Tablica 15 Mjerene veličine na eksperimentalnoj dizalici topline

| Vrijeme (min) | 102 <Tamb> (C) | 103 <Theat> (C) | 104 <T_hx1> (C) | 105 <T_hx2> (C) | 106 <T_storage1> (C) | 107 <T_storage2> (C) | 110 <Qgr_hx> (WAT) | 112 <pi_bar> (VDC) |
|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 13,577 | 25,908 | 30,231 | 25,493 | 25,311 | 27,548 | -7200,8142 | 4,8884598 |
| 2 | 13,612 | 25,852 | 33,428 | 27,456 | 25,406 | 30,982 | -14407,538 | 4,4829089 |
| 3 | 13,613 | 25,851 | 34,374 | 28,052 | 25,911 | 31,779 | -14707,962 | 4,869347 |
| 4 | 13,613 | 25,794 | 34,823 | 28,564 | 26,465 | 32,3 | -15008,336 | 4,7556355 |
| 5 | 13,6 | 25,738 | 35,625 | 29,215 | 26,976 | 33,08 | -15008,286 | 4,7174392 |
| 6 | 13,575 | 25,652 | 36,335 | 29,764 | 27,353 | 33,648 | -15008,37 | 4,9927976 |
| 7 | 13,593 | 25,693 | 36,611 | 30,048 | 28,01 | 33,982 | -15008,454 | 4,9620886 |
| 8 | 13,673 | 25,616 | 36,983 | 30,601 | 28,532 | 34,507 | -15008,353 | 4,7964638 |
| 9 | 13,604 | 25,633 | 37,725 | 31,406 | 29,258 | 35,301 | -15008,303 | 4,722689 |
| 10 | 13,814 | 25,597 | 38,496 | 32,047 | 30,165 | 35,951 | -15008,353 | 4,8503805 |
| 11 | 13,67 | 25,6 | 39,077 | 32,537 | 30,27 | 36,438 | -15008,336 | 5,0029024 |
| 12 | 13,771 | 25,56 | 39,303 | 32,987 | 30,888 | 36,817 | -14908,799 | 4,9632147 |
| 13 | 13,752 | 25,558 | 39,78 | 33,745 | 31,712 | 37,458 | -14543,581 | 4,84244 |

| | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|-----------|
| 14 | 13,732 | 25,58 | 40,921 | 35,182 | 33,128 | 38,721 | -13708,91 | 4,7107856 |
| 15 | 14,071 | 25,554 | 41,734 | 35,646 | 33,677 | 39,433 | -14707,895 | 4,6711999 |
| 16 | 13,751 | 25,59 | 42,339 | 36,188 | 34,201 | 39,956 | -14607,62 | 4,7603148 |
| 17 | 13,788 | 25,583 | 42,678 | 36,587 | 34,643 | 40,312 | -14306,842 | 4,9441747 |
| 18 | 13,749 | 25,503 | 42,985 | 37,054 | 35,707 | 40,744 | -14108,387 | 4,8118915 |
| 19 | 13,659 | 25,506 | 43,861 | 38,323 | 36,839 | 41,827 | -13208,621 | 4,7057844 |
| 20 | 13,712 | 25,511 | 44,926 | 38,998 | 37,389 | 42,772 | -14407,487 | 4,6901374 |
| 21 | 14,127 | 25,525 | 45,517 | 39,676 | 37,882 | 43,311 | -13708,876 | 4,7135933 |
| 22 | 13,914 | 25,505 | 45,867 | 39,923 | 37,978 | 43,604 | -14007,859 | 4,7315507 |
| 23 | 13,875 | 25,507 | 46,086 | 40,281 | 38,566 | 43,873 | -13508,56 | 4,8357279 |
| 24 | 13,726 | 25,473 | 46,48 | 40,746 | 39,001 | 44,31 | -13308,948 | 4,8302441 |
| 25 | 13,894 | 25,466 | 40,803 | 41,106 | 40,204 | 41,784 | -3998,3792 | 6,711017 |
| 26 | 13,865 | 25,508 | 29,044 | 38,221 | 40,585 | 31,619 | -4,784028 | 9,5299984 |
| 27 | 13,947 | 25,474 | 29,053 | 38,127 | 40,409 | 31,516 | -4,774989 | 9,3998942 |

Tablica 16 Mjerene veličine na eksperimentalnoj dizalici topline

| Vrijeme (min) | 113 <pk_bar> (VDC) | 114 <Tisp> (C) | 115 <Tpr1> (C) | 116 <Tpr1'> (C) | 117 <T2_komp> (C) | 118 <Tpoth3> (C) | 119 <Tbhe1> (C) | 120 <Tbhe2> (C) | 122 <qv_l_min> (LPM) |
|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | 11,731014 | 2,198 | 15,952 | 20,154 | 61,195 | 24,404 | 8,547 | 14,648 | 25,80 |
| 2 | 12,323605 | -0,544 | 12,347 | 16,622 | 65,714 | 27,073 | 7,288 | 14,371 | 25,87 |
| 3 | 12,60598 | 1,743 | 11,231 | 18,422 | 66,571 | 27,812 | 7,312 | 14,567 | 25,91 |
| 4 | 12,71441 | 0,76 | 13,715 | 17,754 | 67,868 | 28,231 | 7,677 | 14,899 | 25,85 |
| 5 | 12,907595 | 0,859 | 8,49 | 15,802 | 67,319 | 28,943 | 7,827 | 15,206 | 25,87 |
| 6 | 13,17215 | 2,699 | 2,261 | 17,217 | 67,467 | 29,725 | 8,271 | 15,276 | 25,94 |
| 7 | 13,232482 | 2,043 | 13,79 | 18,199 | 68,667 | 29,919 | 8,055 | 15,205 | 25,93 |
| 8 | 13,329784 | 1,106 | 12,443 | 16,646 | 68,994 | 30,37 | 7,936 | 15,067 | 25,93 |
| 9 | 13,527403 | 1,087 | 8,086 | 15,483 | 68,944 | 31,106 | 7,844 | 14,959 | 25,85 |
| 10 | 13,773162 | 1,895 | 2,852 | 15,693 | 69,16 | 31,909 | 8,02 | 14,919 | 25,88 |
| 11 | 13,993212 | 2,682 | 2,347 | 17,652 | 70,333 | 32,554 | 8,121 | 14,983 | 25,86 |
| 12 | 14,054253 | 2,224 | 12,522 | 18,365 | 71,34 | 32,767 | 7,962 | 14,875 | 25,81 |
| 13 | 14,208119 | 1,486 | 12,692 | 17,496 | 71,99 | 33,315 | 7,724 | 14,594 | 25,78 |
| 14 | 14,598923 | 0,899 | 10,601 | 16,355 | 72,753 | 34,635 | 7,541 | 14,283 | 25,81 |
| 15 | 14,790247 | 0,69 | 8,719 | 16,495 | 73,562 | 35,352 | 7,329 | 14,016 | 25,73 |
| 16 | 14,996155 | 1,499 | 2,738 | 16,184 | 73,72 | 35,932 | 7,377 | 13,855 | 25,73 |
| 17 | 15,156849 | 2,315 | 2,152 | 18,129 | 74,851 | 36,339 | 7,306 | 13,737 | 25,72 |

| | | | | | | | | | |
|----|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 18 | 15,230923 | 1,354 | 12,427 | 18,145 | 76,014 | 36,709 | 7,184 | 13,608 | 25,71 |
| 19 | 15,53032 | 0,676 | 10,338 | 16,81 | 76,711 | 37,675 | 7,054 | 13,552 | 25,69 |
| 20 | 15,818858 | 0,986 | 6,698 | 16,432 | 77,248 | 38,62 | 7,105 | 13,454 | 25,72 |
| 21 | 16,057305 | 1,07 | 5,302 | 17,17 | 78,13 | 39,276 | 7,142 | 13,385 | 25,72 |
| 22 | 16,17052 | 1,349 | 3,495 | 17,581 | 78,641 | 39,571 | 7,16 | 13,314 | 25,76 |
| 23 | 16,287327 | 1,688 | 1,32 | 18,285 | 79,408 | 39,862 | 7,243 | 13,266 | 25,71 |
| 24 | 16,438268 | 1,522 | 10,945 | 19,08 | 80,544 | 40,34 | 7,082 | 13,176 | 25,73 |
| 25 | 14,333481 | 9,096 | 11,847 | 18,178 | 79,066 | 40,447 | 12,558 | 13,12 | 25,22 |
| 26 | 9,9219478 | 14,971 | 25,358 | 25,33 | 74,691 | 24,898 | 28,727 | 13,108 | 1,41 |
| 27 | 9,7759285 | 19,115 | 24,921 | 26,23 | 71,024 | 24,004 | 27,58 | 13,101 | 0,00 |

Oznake mjernih senzora:

104 i 105=temperature polaza i povrata od dizalice topline prema međuizmjenjivaču

106 i 107=temperature polaza i povrata od međuizmjenjivača prema spremniku

108 i 109= temperature polaza i povrata od spremnika prema prostoru/potrošaču

110=toplinski tok grijanja

112=tlak isparavanja

113=tlak kondenzacije

114=temperatura isparavanja

115=temperatura nakon prvog pregrijanja

116= temperatura nakon drugog pregrijanja

117=temperatura na kraju kompresije

118= temperatura pothlađene kapljevine

119 i 120=temperature polaza i povrata od bušotinskog izmjenjivača topline prema izmjenjivaču

ŽIVOTOPIS

Rođen sam 27.03.1995. godine u Zagrebu. Osnovnu školu Vladimira Nazora pohađao sam od 2001. do 2009.godine u Križevcima. 2009. godine upisao sam Prirodoslovnu školu Vladimira Preloga u Zagrebu, smjer prirodoslovna gimnazija. 2013. godine maturirao sam i iste godine upisao Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer kemijsko inženjerstvo. Trenutno sam student 3. godine preddiplomskog studija.