

# PRELIMINARNI PRORAČUN ORC POSTROJENJA SA RADNIM FLUIDOM U NADKRITIČNIM UVIJETIMA

---

Krnić, Mihael

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:631235>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MIHAEL KRNIĆ

**PRELIMINARNI PRORAČUN ORC  
POSTROJENJA SA RADNIM FLUIDOM U  
NADKRITIČNIM UVJETIMA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MIHAEL KRNIĆ

**PRELIMINARNI PRORAČUN ORC  
POSTROJENJA SA RADNIM FLUIDOM U  
NADKRITIČNIM UVJETIMA**

ZAVRŠNI RAD

dr.sc. Nenad Mustapić, prof. v.š.

KARLOVAC, 2021.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
Karlovac University of Applied Sciences

## ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

# VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Preddiplomski stručni studij strojarstva

Usmjerenje: Strojarske konstrukcije

Karlovac, 01.07.2021.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Mihael Krnić

Matični broj: 0110613039

Naslov: **Preliminarni proračun ORC postrojenja sa radnim fluidom u nadkritičnim uvjetima**

Opis zadatka: U završnom radu potrebno je provesti analizu mogućnosti upotrebe rankinovog ciklusa s organskim fluidom (ORC-Organic Rankine Cycle) u nadkritičnom stanju za proizvodnju električne energije iz suviška toplinskog toka sustava daljinskog grijanja. Potrebno je proanalizirati promjenu fizikalnih karakteristika radnog fluida u blizini kritičnih uvjeta. Analizirati će se naredne fizikalne karakteristike radnog fluida: specifični toplinski kapacitet, koeficijent dinamičke viskoznosti, gustoća i koeficijent toplinske vodljivosti. Zadani radni fluidi su: R134a, R32, R124, R125, R142b, R143a, R152a, R600, R290 i R236fa. Sve navedene analize provesti upotrebom programskog

paketa EES (Engineering Equation Solver). Na osnovu provedenih simulacija regresijskom analizom za svaki radni fluid odrediti izraze za izračun pseudokritične temperature radnog fluida u ovisnosti o radnom tlaku. Navedene izračunate vrijednosti pseudokritične temperature koriste se u Jackson-ovom izrazu za izračun koeficijenta prijelaza topline za radni fluid u nadkritičnom stanju. Izraditi proračun segmentiranog protustrujnog izmjenjivača topline s nadkritičnim radnim fluidom, te analizirati dobivene vrijednosti koeficijenta prolaza topline i koeficijenta prijelaza topline. Izvor topline je suvišak toplinskog toka sustava daljinskog grijanja s narednim karakteristikama: početna i krajnja temperatura iznosi 180°C, odnosno 140°C, tlak podhlađane kapljevine (voda) je 20 bara, a protok iznosi 100 kg/s.

Zadatak zadan:

10.01.2020.

Rok predaje rada:

01.07.2021.

Predviđeni datum obrade:

08.07.2021.

---

Mentor:

---

Predsjednik ispitnog povjerenstva:

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Nenadu Musapiću, prof. v.š. na pomoći, prijedlozima, savjetima i strpljenju prilikom izrade završnog rada.

## **SADRŽAJ:**

POPIS OZNAKA

POPIS TABLICA

POPIS SLIKA

1. UVOD.....	1
2. TEORETSKE OSNOVE.....	3
2.1 Definiranje pojmova i izraza koji se odnose na kritično i nadkritično stanje fluida.....	3
2.2 Termofizikalna svojstva radnih fluida pri kritičnim i nadkritičnim tlakovima.....	5
2.3 Specifičnosti procesa prijenosa topline kod prisilne kovekcije pri nadkritičnom tlaku.....	12
2.4 Osnove nadkritičnog prijenosa topline.....	13
2.5 Pseudo-ključanje i pseudo-filmsko ključanje.....	19
2.6 Strujanje fluida u horizontalnim cijevima.....	20
2.7 Metode poboljšanja prijenosa topline.....	20
2.8 Praktične metode predviđanja prijenosa topline kod prisilne konvekcije pri nadkritičnim tlakovima.....	21
3. POSTAVKA ZADATKA.....	29
4. RAZRADA ZADATKA I ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA.....	31
4.1. Termofizikalna svojstva radnih fluida u blizini nadkritične točke i određivanje vrijednosti pseudokritične temperature.....	31
4.1.1 Radni fluid R134a.....	31
4.1.2. Prikaz dobivenih korelacijskih izraza.....	36
4.2. Izračun koeficijenta prijelaza topline pri nadkritičnim parametrima.....	37
4. 2.1 Radni fluid R134a.....	38

5. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	44
PRIVITAK	
1.Privitak.....	48
2.Privitak.....	75



## SAŽETAK

U završnom radu provesti će se analiza nekih mogućnosti upotrebe rankinovog ciklusa s organskim fluidom (ORC-Organic Rankine Cycle) s nadkritičnim parametrima za proizvodnju električne energije iz suviška toplinskog toka sustava daljinskog grijanja.

Suvišni toplinski tok ima kapacitet (maseni protok)  $q_m=00$  kg/s, a tlak vode iznosi 10 bara dok je temperatura  $180^{\circ}\text{C}$  ( $T_{H,in}$ ). Izlazna temperatura je ograničena na  $140^{\circ}\text{C}$ , jer je projektom predviđeno da se s tim tokom zagrijava voda u daljinskom grijanju. Temperatura na ulazu u turbina ne smije biti veća od  $170^{\circ}\text{C}$ , dok je temperatura fluida tijekom kondenzacije u kondenzatoru  $30^{\circ}\text{C}$ . Predviđeno je da ORC ciklus radi u nadkritičnom području. Sve potrebne proračune provesti upotrebom programskog paketa EES (Engineering Equation Solver).

U prvom dijelu rada provesti će se analiza promjene termofizikalnih svojstava radnog fluida u blizini kritične točke i u nadkritičnim uvjetima. Analizirati će se naredna termofizikalna svojstva radnih fluida: specifični toplinski kapacitet, koeficijent dinamičke viskoznosti, gustoća i koeficijent toplinske vodljivosti. Zadani radni fluidi su: R134a, R32, R124, R125, R142b, R143a, R152a, R600, R290 i R236fa. Na osnovu dobivenih rezultata o promjeni vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta o tlaku, za svaki radni fluid regresijskom analizom odredit će se korelacija za izračun pseudokritične temperature radnog fluida u ovisnosti o radnom nadkritičnom tlaku. Navedene korelacije za izračun vrijednosti pseudokritične temperature koristiti će se u Jackson-ovoj korelaciji za izračun koeficijenata prijelaza topline za strujanje radnog fluida u cijevima pri nadkritičnim uvjetima. Prikazati promjene termofizikalnih karakteristika radnih fluida kod pseudokritičnih temperatura u odgovarajućim dijagramima.

U drugom dijelu rada prvo će se provesti određivanje nadkritičnog područja rada ORC ciklusa s određenim radnom fluidom. Nadkritično područje rada omeđeno je maksimalnim  $P_{max}$  i minimalnim  $P_{min}$  nadkritičnim tlakom, maksimalnom entropijom  $s_{max}$ , te maksimalnom tempertaturom u ciklusu  $T_{max}$ . Odabrano je da za sve radne fluide maksimalni tlak bude 80 bara, dok se vrijednost minimalnog tlaka određuje putem izraza  $P_{min}=1,1 P_{cr}$ . Maksimalna temperatura određuje se izrazom  $T_{max}=T_{H,in}-10$ , što u ovom slučaju iznosi  $170^{\circ}\text{C}$ . Maksimalna entropija  $s_{max}$  predstavlja najveću vrijednost enropije na liniji zasićenja (stanje suhozasićene pare) od kritičnog tlaka do

tlaka kondenzacije za određeni radni fluid. Mokri radni fluidi imaju vrijednost  $s_{max}$  upravo kod tlaka kondenzacije, dok se kod suhih i izentropskih fluida  $s_{max}$  javlja kod tlakova koji su bliže vrijednosti kritičnog tlaka  $P_{cr}$  nego tlaku kondenzacije. Uvođenjem ograničenja  $s_{max}$  kao jedne od granica nadkritičnog područja osigurava se da je ekspanziona linija u turbini uvijek u području pregrijane pare. Nadkritično područje predstavlja domenu svih potencijalnih toplinskih stanja radnog fluida na ulasku u turbinu. Navedeno područje omeđeno je karakterističnim točkama. Najčešće je nadkritično područje omeđeno sa četiri točke:  $A(P_{max}, T_{max})$ ,  $B(P_{min}, T_{max})$ ,  $C(P_{max}, S_{max})$  i  $D(P_{min}, S_{max})$ . U nekim slučajevima je nadkritično područje omeđeno sa tri točke:  $A(P=P_{max}<80 \text{ bar}, T_{max})$ ,  $B(P_{min}, T_{max})$ ,  $C(P_{max}, S_{max})$ .

Matematički model segmentiranog protustrujnog izmjenjivača topline s nadkritičnim radnim fluidom u cijevima koristi Jackson-ovu korelaciju za izračun koeficijenta prijelaza topline, dok je izvan cijevi (u plaštu) korištena Kernova metoda proračuna koeficijenta prijelaza topline. Duž izmjenjivača topline analizira se promjena vrijednosti koeficijenta prijelaza topline sa strane cijevi za svaku od karakterističnih točaka nadkritičnog područja. Dobiveni rezultati prikazuju se u odgovarajućim dijagramima.

Ključne riječi: ORC, EES, nadkritično stanje, korelacija, prijelaz topline

## SUMMARY

The final paper analyses some possibilities of using the Organic Rankine Cycle (ORC) with supercritical parameters for the production of electricity from excess heat flow of the district heating system. Excess heat flow has a capacity (mass flow)  $q_m=100$  kg/s, and water pressure is 10 bar while the temperature is  $180^\circ\text{C}$  ( $T_{H, in}$ ). The outlet temperature is limited to  $140^\circ\text{C}$ , because the project envisages heating the water in the district heating during this time. The temperature at the inlet to the turbine must not exceed  $170^\circ\text{C}$ , while the temperature of the fluid is  $30^\circ\text{C}$  during condensation in the condenser. The ORC cycle is predicted to operate in the supercritical area. All the necessary calculations will be carried out using the software package EES (Engineering Equation Solver).

The first part of this paper will analyze the change in the thermophysical properties of the working fluid near the critical point and in supercritical conditions. The following thermophysical properties of working fluids are analysed: specific heat capacity, dynamic viscosity coefficient, density and thermal conductivity coefficient. Default working fluids are: R134a, R32, R124, R125, R142b, R143a, R152a, R600, R290 and R236fa. Based on the obtained results on change values of specific heat capacity under pressure, for each working fluid by regression analysis, it is determined a for the calculation of the pseudocritical temperature of the working fluid depending on the working supercritical pressure. The mentioned correlations for the calculation of pseudocritical temperature values will be used in the Jackson correlation for the calculation of heat transfer coefficients of the flow of working fluid in pipes under supercritical conditions. The changes in thermophysical characteristics of working fluids will be showed at pseudocritical temperatures in the corresponding diagrams.

The second part of the final paper will firstly discuss the determination of the supercritical operating range of the ORC cycle with a specific working fluid. The supercritical operating range is marked by the maximum  $P_{max}$  and the minimum  $P_{min}$  supercritical pressure, the maximum entropy  $s_{max}$ , and the maximum temperature in the  $T_{max}$  cycle. It was chosen that for all working fluids the maximum pressure is 80 bar, while the value of the minimum pressure is determined by the expression  $P_{min} = 1,1 P_{cr}$ . The maximum temperature is determined by the expression  $T_{max} = T_{H, in} - 10$ , which in this case is  $170^\circ\text{C}$ . The maximum entropy  $S_{max}$  represents the highest value of entropy on the saturation line (dry saturated vapor state) from the critical pressure

to the condensing pressure for a given working fluid. The wet working fluids have a value of  $S_{max}$  at the condensing pressure, while in dry and isentropic fluids,  $S_{max}$  occurs at pressures that are closer to the value of the critical pressure  $P_{cr}$  than the value of condensing pressure. The introduction of the  $S_{max}$  constraint as one of the limits of the supercritical region ensures that the expansion line in the turbine is always in the superheated steam region. The supercritical area represents the domain of all potential thermal states of the working fluid at the turbine inlet. This area is bounded by characteristic points. The supercritical area is most often marked by four points: A ( $P_{max}, T_{max}$ ), B ( $P_{min}, T_{max}$ ), C ( $P_{max}, S_{max}$ ) and D ( $P_{min}, S_{max}$ ). In some cases, the supercritical area is marked by three points: A ( $P = P_{max} < 80 \text{ bar}, T_{max}$ ), B ( $P_{min}, T_{max}$ ), C ( $P_{max}, S_{max}$ ).

A mathematical model of a segmented countercurrent heat exchanger with the supercritical working fluid in pipes uses Jackson's correlation to calculate heat transfer coefficients, while outside the pipes (in the shell) the Kern method of heat transfer coefficient calculation is used. Along with the heat exchanger, the change in the value of the heat transfer coefficients on the pipe side for each of the characteristic points of the supercritical region is analyzed. The obtained results are shown in the corresponding diagrams.

Keywords: ORC, EES, supercritical state, correlation, heat transfer

## **Popis oznaka:**

$P_{cr}$  - kritični tlak fluida [kPa]

$q_m$  - maseni protok [kg/s]

$T$  – temperatura [°C]

$c_p$  - toplinski kapacitet pri stalnom tlaku [J/kgK]

$\mu$  - koeficijent viskoznosti [kg/ms]

$\rho$  – gustoću [kg/m<sup>3</sup>]

$k$  – koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

$s$  – entalpija [kJ/kg]

$KPT$  – koeficijent prijelaza topline [kW/m<sup>2</sup>]

## Popis tablica:

**Tablica 1:** Vrijednosti kritičnog tlaka, kritične temperature i kritične gustoće za radne fluide ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), R134a, helij (He) i vodu (H<sub>2</sub>O)

**Tablica 2:** Ukupni ponderirani prosjek i RMS pogreške unutar tri nadkritična područja

**Tablica 3:** Ukupni ponderirani prosjek i RMS pogreške unutar podkritičnog područja

**Tablica 4.** Korelacije dobivene linearnom regresijom za svaki razmatrani radni fluid.

## Popis slika:

**Slika 2-1:** Dijagrami tlak- temperature za (a) vodu i (b) ugljikov dioksid. [2]

**Slika 2-2:** Promjena vrijednosti temperature i koeficijenta prijelaza topline duž grijane okomite cijevi kružnog oblika (radni fluid je voda, promjer cijevi  $D=10$  mm, duljina cijevi  $L=4$  m) [3]

**Slika 2-3:** Promjena termofizičkih svojstava vode (H<sub>2</sub>O) kod nadkritičkih tlakova s temperaturom: (a) gustoća, (b) dinamička viskoznost, (c) volumenska ekspanzivnost, (d) kinematička viskoznost, (e) specifična toplina, (f) toplinska vodljivost, g) specifična entalpija, (h) Prandtlov broj [1]

**Slika 2-4:** Promjena termofizičkih svojstava ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) kod nadkritičkih tlakova s temperaturom: (a) gustoća, (b) dinamička viskoznost, (c) volumenska ekspanzivnost, (d) kinematička viskoznost, (e) specifična toplina, (f) toplinska vodljivost, g) specifična entalpija, (h) Prandtlov broj [1].

**Slika 2-5:** Varijacije vrijednosti odabranih termofizičkih svojstva za (a) vode i (b) ugljični dioksid u blizini pseudokritičnih točaka (područje u blizini kritične točke je +/-25 °C oko pseudokritične točke)[4]

**Slika 2-6:** Prikaz promjene vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta, volumenske ekspanzivnosti i toplinske vodljivosti s obzirom na temperaturu za (a) vodu pri tlaku od  $P=24,5$  MPa i (b) ugljični dioksid pri tlaku od  $P=8,3$  MPa [5]

**Slika 2-7:** Prikaz promjene vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta kod različitih temperaturnih odnosa  $T/T_{CR}$  i različitih nadkritičnih tlakova za (a) vodu i (b) ugljični dioksid [5]

**Slika 2-8:** Promjena vrijednosti gustoće vode (vodene pare) pri različitim podkritičnim pritiscima [5]

**Slika 2-9:** Profili temperature i koeficijenta prijenosa topline duž grijane vertikalne cijevi kružnog presjeka [3], radni fluid voda, promjer cijevi  $D=10$  mm i duljina cijevi  $L_h=4$  m: (a) promjena temperature radnog fluida u cijevi od početne temperature niže do pseudokritične temperature do krajnje temperature jednake pseudokritičnoj temperaturi, (b) promjena temperature radnog fluida u cijevi od početne temperature niže do pseudokritične temperature do krajnje temperature koja je malo iznad pseudokritične.

**Slika 2-10:** Promjene vrijednosti temperatura i koeficijenta prijelaza topline duž grijane vertikalne cijevi kružnog poprečnog presjeka od Inconel-600 [8], radni fluid je ugljični dioksid, promjer cijevi  $D=8$  mm i duljina cijevi  $L_h=2,4$  m, (a) pri manjoj vrijednosti specifičnog masenog protoka ( $907$  kg/m<sup>2</sup>s), (b) pri srednjoj vrijednosti specifičnog masenog protoka ( $1569$  kg/m<sup>2</sup>s), (c) pri većoj vrijednosti specifičnog masenog protoka ( $1994$  kg/m<sup>2</sup>s).

**Slika 2-11:** Profil promjena vrijednosti temperatura i termofizička svojstva duž grijane vertikalne cijevi kružnog poprečnog presjeka (radni uvjeti odgovaraju onima na slici 2-9 (c)) za vodu kao radni fluid, promjer cijevi  $D=10$  mm i duljinu cijevi  $L_h=4$  m (termofizička svojstva su izračunata na temelju temperature radnog fluida u glavnom toku) [3].

**Slika 2-12:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline s obzirom na promjenu vrijednosti entalpije glavnog toka radnog fluida (voda) u vertikalnoj cijevi s protokom prema gore pod različitim tlakovima: (a)  $P=22,6$  MPa; (b)  $P=24,5$  MPa; i (c)  $P=29,4$  MPa [14]

**Slika 2-13:** Promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline od voda koja teče u cijevima [15]

**Slika 2-14:** Prikaz profila promjene vrijednosti temperatura (a) i (c) i promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline (b) i (d) duž grijane okomite cijevi [16]

**Slika 2-15:** Redovni i prosječni Prandtllov broj i profili specifične topline za vodu duž grijane cijevi [37]

**Slika 2-16:** Profili promjene vrijednosti temperature i koeficijenta prijelaza topline (eksperimentalne i izračunate vrijednosti) duž grijane duljine glatke okomite cijevi:  $G = 1500 \text{ kg/m}^2\text{s}$  i  $q = 884 \text{ kW/m}^2$ . [26]

**Slika 2-17:** Usporedba izračunatih vrijednosti pomoću jednadžbu (2) i eksperimentalnih podataka: (a) za koeficijent prijelaza topline i (b) za temperaturu stijenke cijevi [3].

**Slika 2-18:** Profili promjene vrijednosti temperature i koeficijenta prijelaza topline pri različitim toplinskim tokovima duž cijevi  $L=4\text{m}$ ,  $D=10 \text{ mm}$  [3]:  $P_{in}=24,1 \text{ MPa}$  i  $G=500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ; korelacija (2): (a)  $q_{ave}=141 \text{ W/m}^2$  i (b)  $q_{ave}=334 \text{ W/m}^2$

**Slika 2-19:** Profili promjene vrijednosti temperature i koeficijenta prijelaza topline duž kružne cijevi pri različitim toplinskim tokovima: nominalni radni uvjeti  $P_{in} = 24,5 \text{ MPa}$ ,  $G = 1260 \text{ kg/m}^2\text{s}$  i  $D=7,5 \text{ mm}$ ; korelacija (2): (a)  $q_{ave}=233 \text{ W/m}^2$  i (b)  $q_{ave}=465 \text{ W/m}^2$  [3]

**Slika 2-20:** Usporedba vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i temperature stijenke cijevi izračunatih korelacijom (2) i CFD-računalnim paketom FLUENT s eksperimentalnim podacima duž 4 m duge kružne cijevi promjera  $D=10 \text{ mm}$ :  $P_{in} = 23,9 \text{ MPa}$  i  $G=1002 \text{ kg/m}^2$  [28]

**Slika 4-1:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ )

**Slika 4-2:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R134

**Slika 4-3:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R134a

**Slika 4-4:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni

**Slika 4-5:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za



**Slika 4-6:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a

**Slika 4-7:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a

**Slika 4-8:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a

**Slika 4-9:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R32

**Slika 4-10:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R32

**Slika 4-11:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R32

**Slika 4-12:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R32

**Slika 4-13:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R32

**Slika 4-14:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R32

**Slika 4-15:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R32

**Slika 4-16:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R32

**Slika 4-17:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R124

**Slika 4-18:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R124

**Slika 4-19:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R124

**Slika 4-20:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R124a

**Slika 4-21:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R124

**Slika 4-22:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi

**Slika 4-23:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R124

**Slika 4-24:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R124

**Slika 4-25:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R125 usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R124

**Slika 4-26:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R125

**Slika 4-27:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R125

**Slika 4-28:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R125

**Slika 4-29:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R125

**Slika 4-30:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R125

**Slika 4-31:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R125

**Slika 4-32:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R142b

**Slika 4-33:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R142b

**Slika 4-34:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R142b

**Slika 4-35:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R142b

**Slika 4-36:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R142b

**Slika 4-37:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R142b

**Slika 4-38:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R142b

**Slika 4-39:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R142b

**Slika 4-40:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R143a

**Slika 4-41:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R143a

**Slika 4-42:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R143a

**Slika 4-43:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R143a

**Slika 4-44:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R143a

**Slika 4-45:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R143a

**Slika 4-46:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R143a

**Slika 4-47:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R143a

**Slika 4-48:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R152a

**Slika 4-49:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R152a

**Slika 4-50:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R152a

**Slika 4-51:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R152a

**Slika 4-52:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R152a

**Slika 4-53:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R152a

**Slika 4-54:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R152a

**Slika 4-55:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R152a

**Slika 4-56:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R600

**Slika 4-57:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R600

**Slika 4-58:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R600

**Slika 4-59:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R600

**Slika 4-60:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R600

**Slika 4-61:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R600

**Slika 4-62:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R600

**Slika 4-63:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R600

**Slika 4-64:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R290

**Slika 4-65:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R290

**Slika 4-66:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R290

**Slika 4-67:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R290

**Slika 4-68:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R290

**Slika 4-69:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R290

**Slika 4-70:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R290

**Slika 4-71:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R290

**Slika 4-72:** Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R236fa

**Slika 4-73:** Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  ( $T_i$ ) za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R236fa

**Slika 4-74:** Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R236fa

**Slika 4-75:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R236fa

**Slika 4-76:** Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R236fa

**Slika 4-77:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R236fa

**Slika 4-78:** Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R236fa

**Slika 4-79:** Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R236fa

**Slika 4-80:** Prikaz rezultata proračuna ORC ciklusa i izmjenjivača topline za karakterističnu točku B

**Slika 4-81:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R134a

**Slika 4-82:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijena prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijena prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R134a

**Slika 4-83:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R32

**Slika 4-84:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijena prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijena prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R32

**Slika 4-85:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R124

**Slika 4-86:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijena prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijena prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R124

**Slika 4-87:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R125

**Slika 4-88:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijena prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijena prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R125

**Slika 4-89:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R142b

**Slika 4-90:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijena prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijena prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R142b

**Slika 4-91:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R143a

**Slika 4-92:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijena prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijena prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R143a

**Slika 4-93:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R152a

**Slika 4-94:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R152a

**Slika 4-95:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R600

**Slika 4-96:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R600

**Slika 4-97:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R290

**Slika 4-98:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R290

**Slika 4-99:** Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R236fa

**Slika 4-100:** Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H, h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R236fa



## 1.UVOD

Postrojenja koja rade po principu rankineovog ciklusa s organskim fluidom (ORC-Organic Rankine Cycle) prikladna su za proizvodnju električne energije iz niskotemperaturnih i srednjetemperaturnih izvora toplinske energije, zato jer koriste organske radne fluide koji isparavaju kod relativno niskih temperatura, ali kod umjereno visokih tlakova isparavanja. ORC postrojenja su relativno jednostavne konfiguracije, zbog čega je održavanje postrojenja relativno jednostavno, te ostvaruju dobra radna svojstva pri promjenjivim radnim uvjetima. Karakteristike ORC postrojenja se mogu poboljšati na različite načine, na primjer upotrebom rekuperatora, upotrebom različitih mješavina radnih fluida, ili koristeći nadkritične radne uvjete, čime se smanjuju gubici eksergije u postrojenju. Jedan od ciljeva ovog diplomskog rada je analizirati ponašanje radnog fluida u nadkritičnim uvjetima. ORC postrojenja se koriste za proizvodnju električne energije, kao i za istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije (kogeneracija). ORC postrojenja se koriste za:

1. proizvodnje električne i toplinske energije od biomase,
2. proizvodnju električne i toplinske energije u solarnim elektranama s paraboličnim zrcalima,
3. proizvodnju električne i toplinske energije iz geotermalnih izvora,
4. proizvodnju električne i toplinske energije iz otpadne toplinskih tokova iz industrijskih procesa.

Biomasa se dobiva iz nekoliko industrijskih procesa kao što su pilane i drvoprerađivačka industrija, te od ostataka iz poljoprivrede i šumarstva. Biomasa se pretvara u toplinsku energiju izgaranjem u ložištima gdje se gorivo pretvara u dimne plinove. U postrojenju sa biomasom uobičajena je praksa da se termičko ulje koristi kao prijenosnik toplinske energije između dimnih plinova u ložištu i radnog fluida u ORC ciklusu. ORC postrojenja koja koriste biomasu kao gorivo uglavnom su male ili srednje snage. Ložište za izgaranje biomase predstavlja značajan izdatak zbog visokih troškova izgradnje, ali su troškovi izgradnje ostalih izmjenjivači topline u ORC postrojenju relativno niski zbog niskih vrijednosti radnih tlakova i temperatura u postrojenju.

Solarna energija spada u najizdašnije obnovljive izvore energije. Solarna energija se može direktno pretvarati u električnu energiju u fotonaponskim panelima, ili se može indirektno pretvarati u električnu energiju u solarnim elektranama. U solarnim

elektranama se koriste solarni kolektori gdje se solarno zračenje koncentrira u fokalnu liniju (parabolična zrcala) ili u lokalnu točku (solarni tornjevi). Tako koncentrirana solarna energija se predaje prenosnicima toplinske energije (termičko ulje ili rastopljene soli) koji ju transferiraju do glavnog postrojenja (ciklus parne turbine ili ORC ciklus). Uobičajeno se ORC postrojenje koristiti zajedno sa paraboličnim zrcalima, ili s cijevnim vakumskim solarnim kolektorima, u postrojenjima manje i srednje snage.

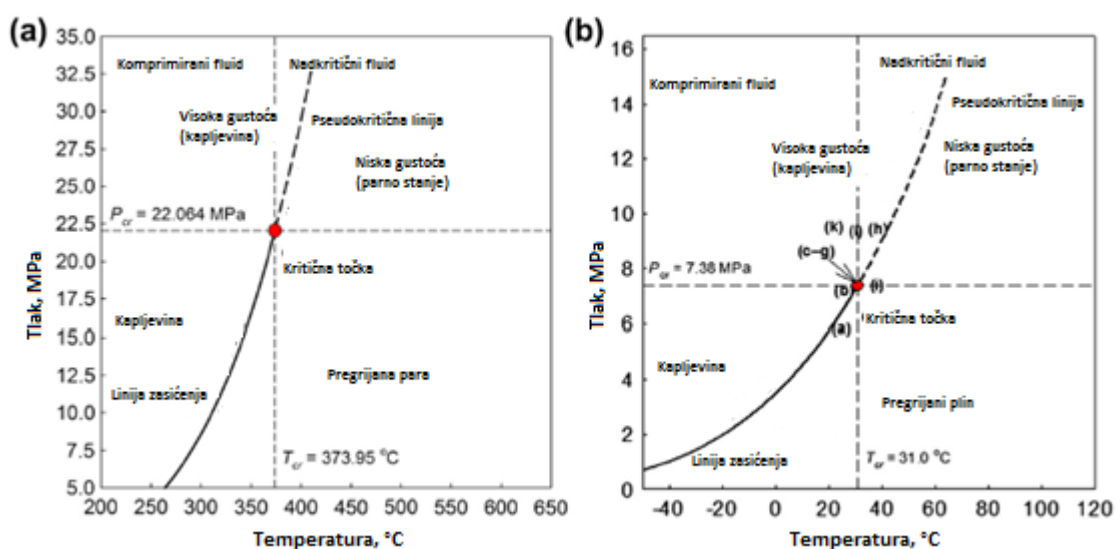
Veliki broj geotermalnih izvora imaju temperature geotermalne vode od 80°C do 200°C. Za ovakve niskotemperaturne i srednjetemperaturne izvore toplinske energija ORC postrojenje je jedna od najboljih tehnologija za proizvodnju električne energije.

Tipični izvori otpadne topline iz industrijskih procesa uključuju tokove vrućeg zraka, otpadnih dimnih plinova, kapljevite vode pod visokim pritiskom, te otpadne vode i vodene pare. Otpadna toplina iz industrije ima širok raspon temperatura. Postupci proizvodnje čelika, stakla, obojenih metala i keramike imaju tokove otpadne topline s temperaturama od 300 °C do 400 °C. Izvori topline s temperaturom od oko 150 °C mogu se pronaći u prehrambenoj industriji, rafinerijama nafte i industriji proizvodnje građevinskih materijala.

## 2. TEORETSKE OSNOVE

### 2.1 Definiranje pojmova i izraza koji se odnose na kritično i nadkritično stanje fluida

U pedesetim godinama prošlog stoljeća nastala je ideja o korištenju vodene pare u nadkritičnom stanju u termoelektranama na ugljen, čime bi se povećao termodinamički stupanj korisnosti takvih postrojenja. Pri nadkritičnom tlaku nema heterogenog faznog prijelaza vrele kapljevina – suhozasićena para, te nema ni fenomena kao što su kritični toplinski tok ili isušivanja pare (dryout). Prije rasprave o specifičnostima termofizičkih svojstava fluida i prijenosu topline kod prisilne konvekcije pri kritičnom i nadkritičnom tlaku, nužno je definirati posebne pojmove i izraze. Radi boljeg razumijevanja ovih pojmova i izraza, njihove su definicije navedene u nastavku ovog rada, te su prikazani na slikama 2-1 i 2-2 [1].



Slika 2-1: Dijagrami tlak- temperature za (a) vodu i (b) ugljikov dioksid [2].

Komprimirani fluid (compressed fluid) je fluid koji se nalazi pod tlakom iznad kritičnog tlaka, ali na temperaturi koja je niža od kritične temperature.

Kritična točka (koja se naziva i kritičnim stanjem) je točka u kojoj nestaje razlika između faza vrele kapljevine i suhozasićene pare, jer obje faze imaju istu vrijednost temperature, tlaka i specifičnog volumena. Kritičnu točku karakteriziraju parametri  $T_{cr}$ ,  $P_{cr}$  i  $v_{cr}$  koji imaju jedinstvene vrijednosti za svaku čistu tvar.

Pogoršani prijenos topline  $PogPT$  (*DHT*- deteriorated heat transfer) kojeg karakteriziraju niže vrijednosti koeficijent prijelaza topline  $KPT$  (*HTC*-heat transfer coefficient) u

usporedbi s onima kod normalnog prijenosa topline *NPT* (*NHT*-normal heat transfer) što ima za posljedicu veće vrijednosti temperature stijenke cijevi.

Poboljšani prijenos topline *PobPT* (*IHT*-Improved Heat Transfer) karakterizira veće vrijednosti *KPT*-a (koeficijenta prijelaza topline) u usporedbi s onima za *NPT* (normalni prijenos topline) zbog čega se javljaju niže vrijednosti temperature stijenke. Režim *PobPT* (poboljšani prijenos topline) javlja se u blizu kritičnih ili pseudokritičnih točaka.

Područje u blizini kritične točke je usko područje oko kritične točke gdje sva termofizička svojstva svake čiste tvari pokazuju naglu promjenu vrijednosti.

Normalni prijenos topline *NPT* (*NHT*-normal heat transfer) je okarakteriziran s vrijednostima koeficijenta prijelaza topline (*KPT*) koji su identične vrijednostima *KPT* daleko od kritičnog ili pseudokritičnog područja kod subkritičnog konvektivnog prijenosa topline, a izračunavaju se pomoću korelacija za jednofazni fluid kao što je to Dittuse-Boelter-ov izraz ( $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$ ), dok u kritičnom ili pseudokritičnom području *KPT* imaju niže vrijednosti (slika 2-2).

Pseudo-ključanje je fizikalni fenomen sličan mjehuričastom ključanju kod podkritičnog tlaka, a koji se može pojaviti pri nadkritičnim tlakovima. Tijekom zagrijavanja nadkritičnog fluida koji ima temperaturu toka nižu od pseudokritične temperature neki slojevi fluida u blizini površine cijevi mogu postići temperature višu od pseudokritične temperature te nastaju mjehurići pare. Tijekom pseudo-ključanja vrijednost koeficijenta prijelaza topline raste (*PobPT* - poboljšani prijenos topline).

Pseudokritična linija je linija koja se dobije spajanjem pseudokritičnih točaka.

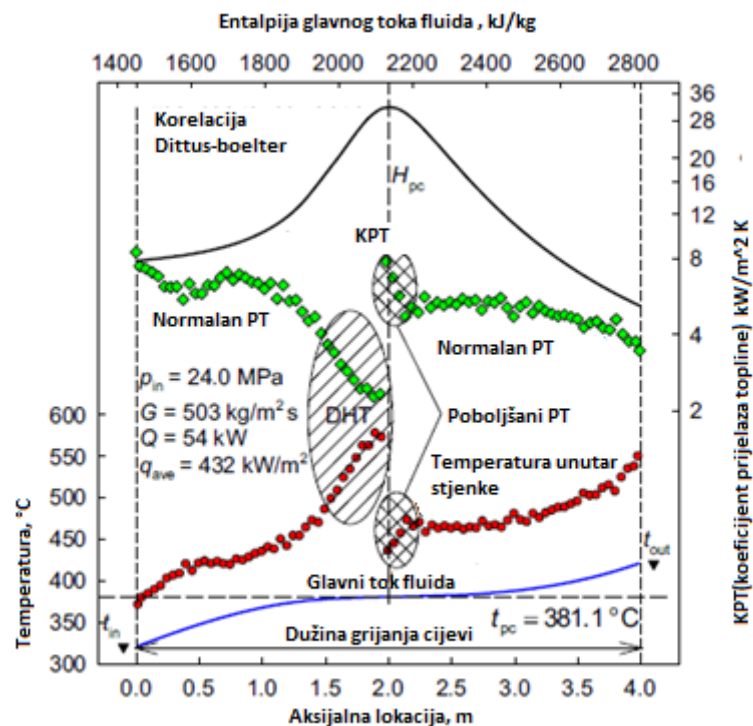
Pseudokritična točka je stanje fluida okarakterizirano s pseudokritičnim tlakom  $P_{pc}$  i pseudokritičnom temperaturom  $T_{pc}$ . Pseudokritična točka ima vrijednost tlaka čija vrijednost je iznad vrijednosti kritičnog tlaka, a pseudokritična temperatura  $T_{pc}$  ima nešto višu vrijednost od kritične temperature  $T_{cr}$ . U pseudokritičnoj točki specifični toplinski kapacitet fluida ima maksimalnu vrijednost pri određenom tlaku.

Pseudo-filmsko ključanje je fizikalni fenomen, sličan filmskom ključanju koji se javlja pri podkritičnom tlaku, a koji se može pojaviti pri nadkritičnom tlaku. Pri pseudo-filmskom ključanju ključanje uz površinu cijevi dosegne intenzitet da nastaje tanki film pare (koja je na temperaturama iznad pseudokritične temperature), koji onemogućuje kontakt toka fluida (kapljevina koja je na temperaturama ispod pseudokritične temperature) s površinom cijevi. Tada toplinski otpor prijelazu topline sa stijenke cijevi na fluid naglo

raste, jer taj sloj pare (film) uz površinu cijevi djeluje kao toplinski izolator. Zbog toga govorimo da se javlja režim pogoršanog prijenosa topline (*PogPT*).

Nadkritični fluid je fluid koji se nalazi pri tlakovima i temperaturama višim od kritičnog tlaka, odnosno kritične temperature.

Superpregrijana para je para pod tlakom ispod kritičnog tlaka, ali na temperaturi iznad kritične temperature.

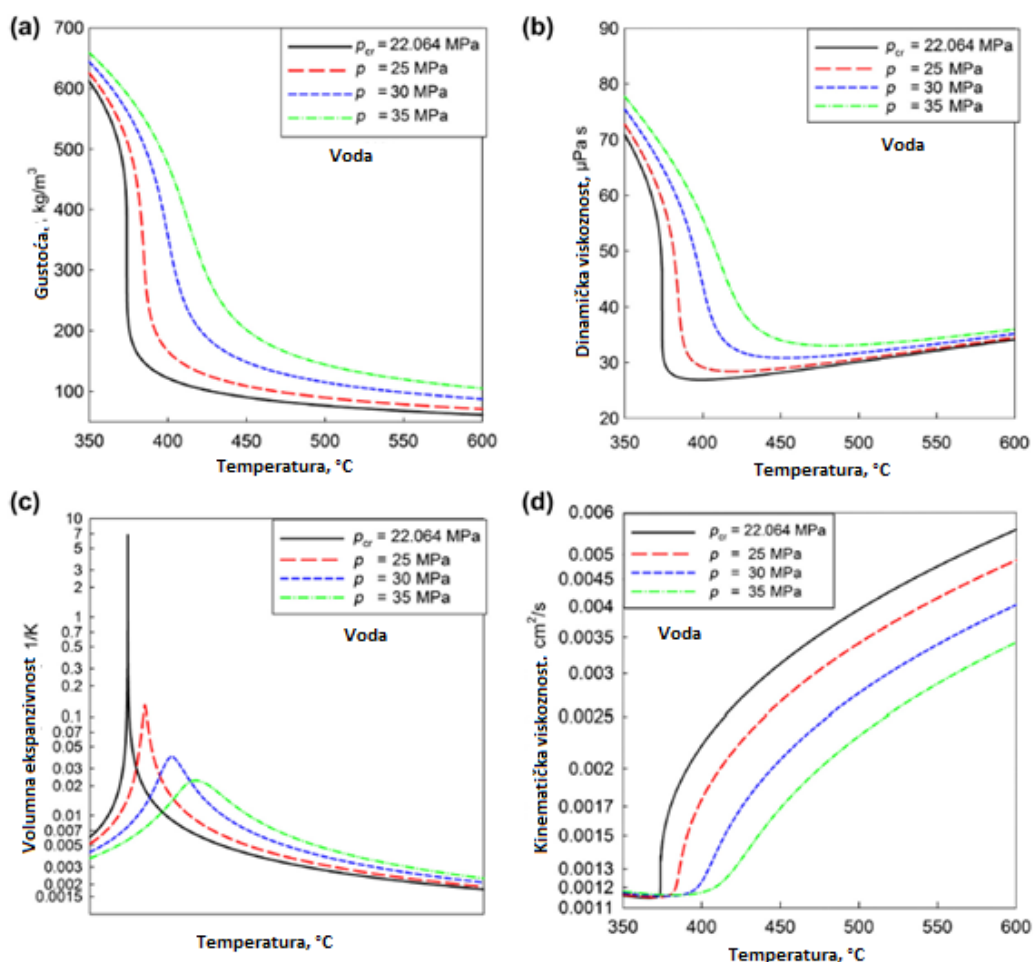


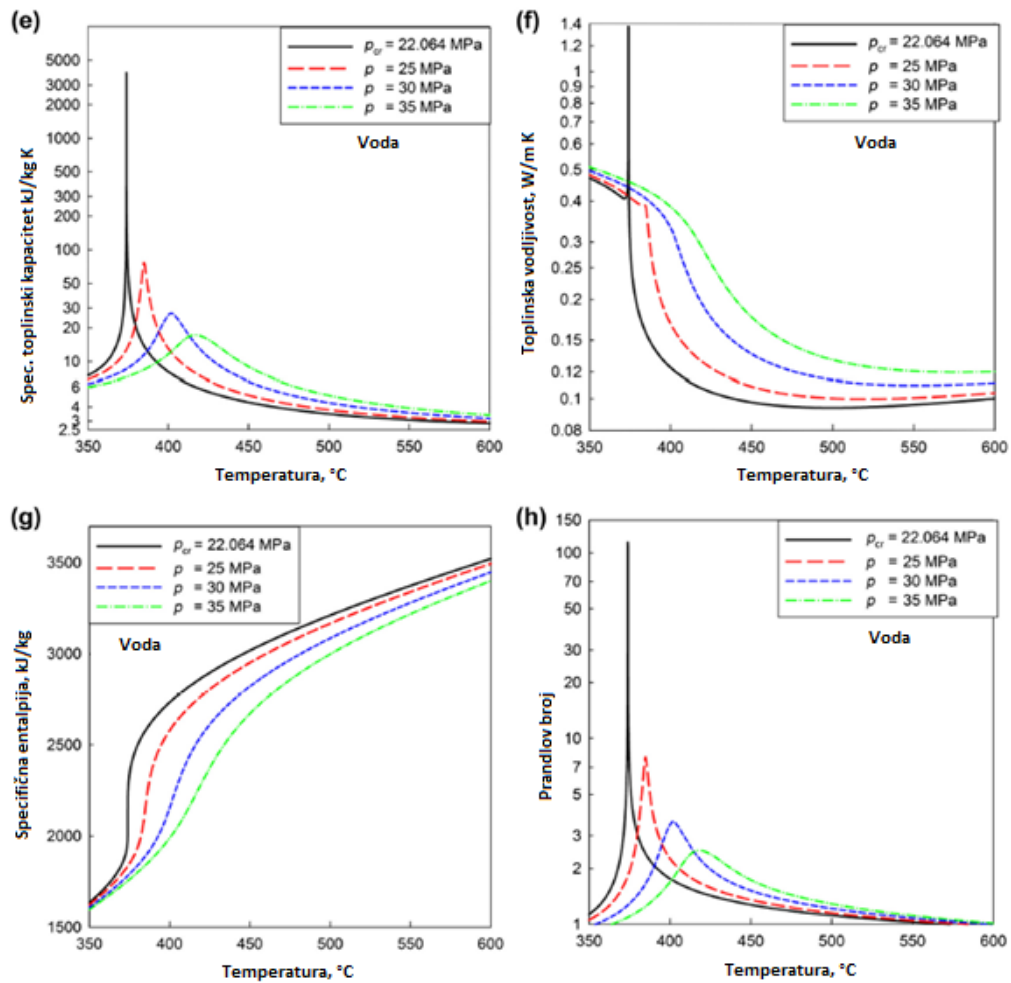
Slika 2-2: Promjena vrijednosti temperature i koeficijenta prijelaza topline duž grijane okomite cijevi kružnog oblika [3](radni fluid je voda, promjer cijevi  $D=10\text{ mm}$ , duljina cijevi  $L= 4\text{ m}$ .)

## 2.2 Termofizikalna svojstva radnih fluida pri kritičnim i nadkritičnim tlakovima

Opći trendovi ponašanja različitih fluida u blizini kritičnih i pseudokritičnih točaka [1,4,5] mogu se ilustrirati na temelju prikaza trendova ponašanja vode i ugljičnog dioksida (slike 2-3 do 2-7). Opći trendovi ponašanja helija i R-134a kod nadkritičnih uvjeta također su detaljno obrađena u znanstvenoj literaturi [1]. Na slikama 2-3 i 2-4 prikazane su razlike u osnovnim termofizičkim svojstvima za vodu pri kritičnom ( $P_{cr} = 22,064\text{ MPa}$ ) i tri

nadkritična tlaka ( $P = 25,0 \text{ MPa}$ ,  $30,0 \text{ MPa}$  i  $35,0 \text{ MPa}$ ) (vidi sliku 2-5) i za ugljični dioksid pri ekvivalentnim tlakovima (iste relativne vrijednosti tlakova ( $(P/P_{cr})_{\text{H}_2\text{O}} = (P/P_{cr})_{\text{CO}_2}$ ). Termofizička svojstva 105 čistih fluida, uključujući vodu, ugljični dioksid, helij, rashladne fluide itd., zatim 5 pseudo-čistih fluida (npr. zrak), te za smjese s do 20 komponenata pri različitim tlakovima i temperaturama, uključujući kritična i nadkritična područja, mogu se izračunati pomoću programa REFPROP kojeg je izradio Nacionalni institut za standarde i tehnologiju (NIST) (SAD) [6]. Osim navedenog softverskog paketa koji se koriste za proračuna termofizičkih svojstava različitih radnih fluida, postoje i drugi softverski paketi sa sličnim karakteristikama, kao što su to EES [7] i CoolProp [8]. Vrijednosti kritičnog tlaka, kritične temperature i kritične gustoće [6] za radne fluide ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ), R134a, helij (He) i vodu ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dane su u tablici 1.

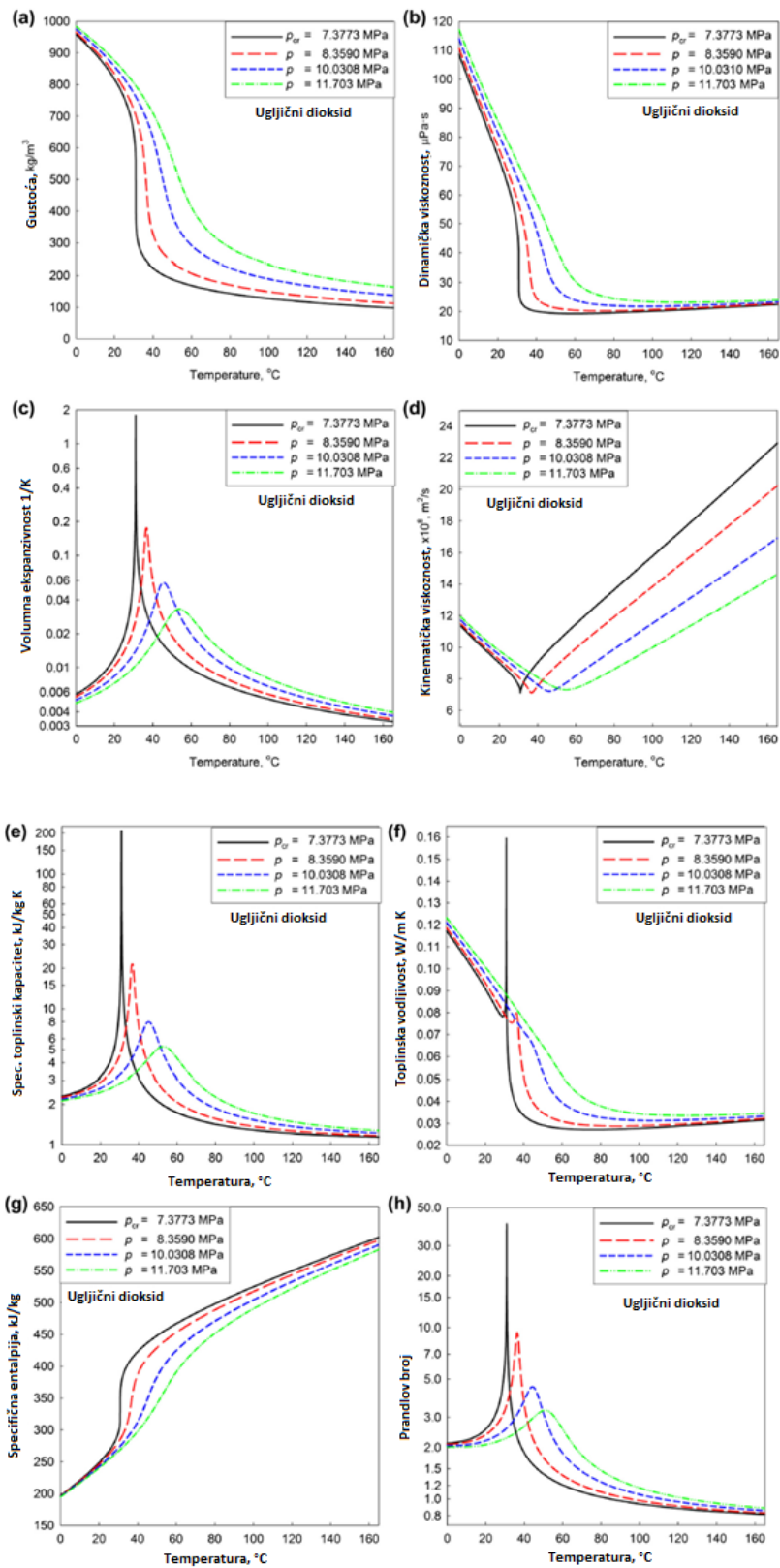




Slika 2-3: Promjena termofizičkih svojstava vode (H<sub>2</sub>O) kod nadkritičkih tlakova s temperaturom: (a) gustoća, (b) dinamička viskoznost, (c) volumenska ekspanzivnost, (d) kinematička viskoznost, (e) specifična toplina, (f) toplinska vodljivost, (g) specifična entalpija, (h) Prandtlov broj. [1]

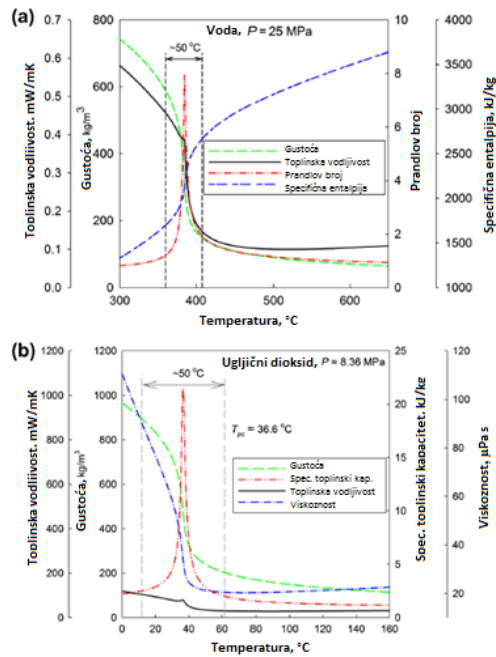
Fluid	$P_{cr}$ , MPa	$T_{cr}$ , °C	$\rho_{cr}$ , kg/m <sup>3</sup>
Ugljični dioksid (CO <sub>2</sub> )	7,3773	30,98	467,6
Freon-134a (Tetraflor-etan, CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> )	4,0593	101,06	511,9
Helij (He)	0,2276	-267,95	72,567
Voda (H <sub>2</sub> O)	22,064	373,95	322,0

Tablica 1: Vrijednosti kritičnog tlaka, kritične temperature i kritične gustoće za radne fluide ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), R134a, helij (He) i vodu (H<sub>2</sub>O) [6]

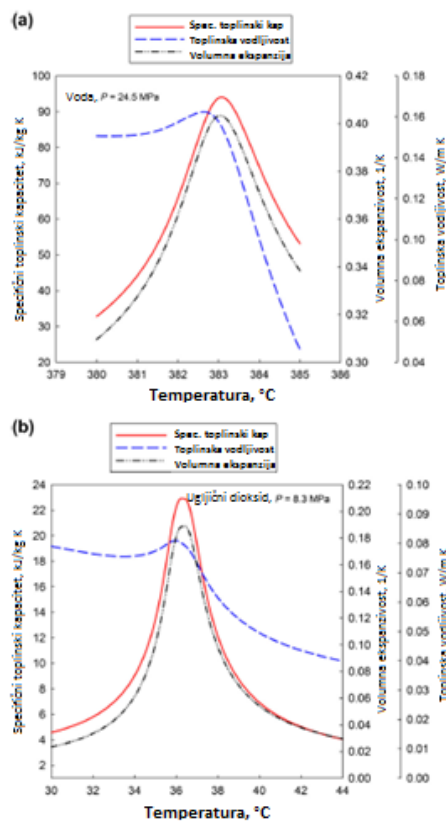


Slika 2-4: Promjena termofizičkih svojstava ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) kod nadkritičkih tlakova s temperaturom: (a) gustoća, (b) dinamička viskoznost, (c) volumenska ekspanzivnost, (d) kinematička viskoznost, (e) specifična toplina, (f) toplinska vodljivost, g) specifična entalpija, (h) Prandtllov broj. [1]

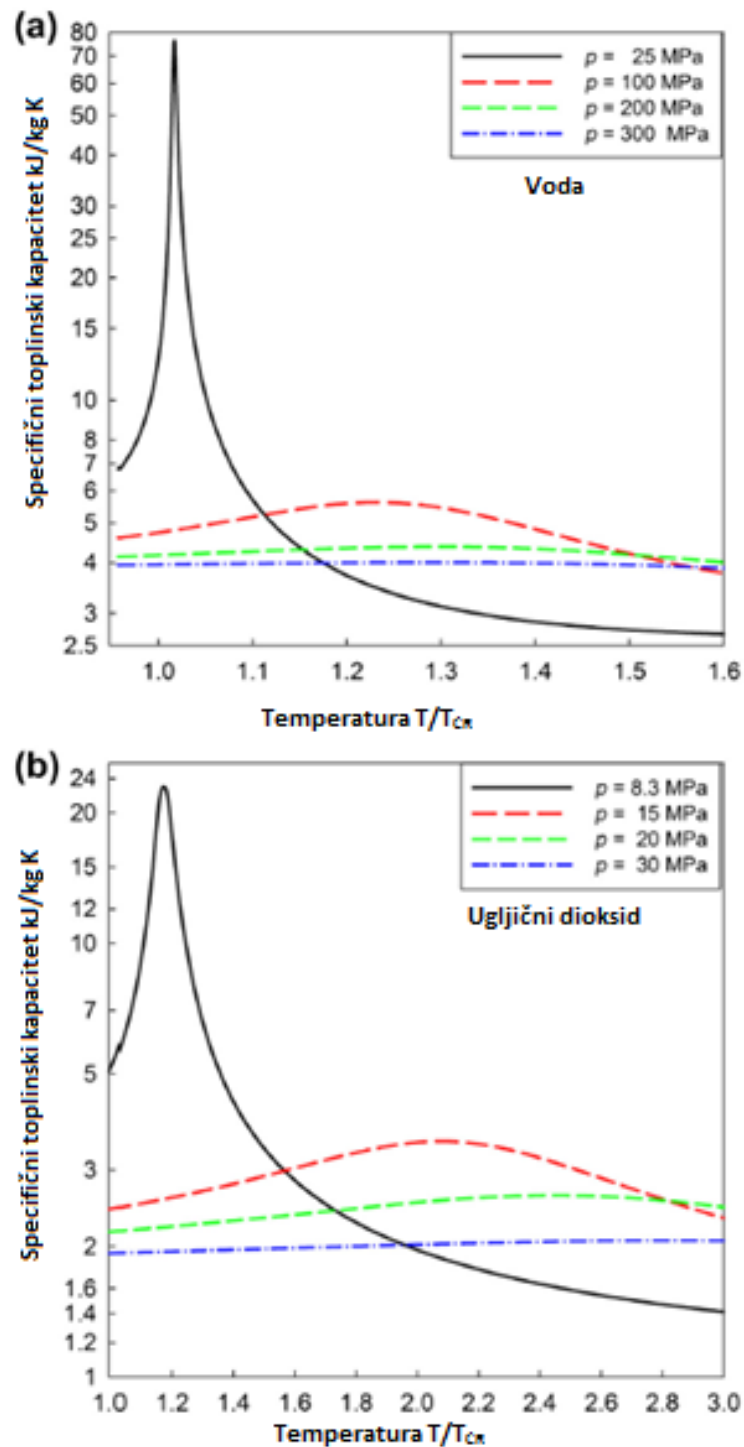




Slika 2-5: Varijacije vrijednosti odabranih termofizičkih svojstva za (a) vode i (b) ugljični dioksid u blizini pseudokritičnih točaka (područje u blizini kritične točke je +/-25 °C oko pseudokritične točke) [4]



Slika 2-6: Prikaz promjene vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta, volumenske ekspanzivnosti i toplinske vodljivosti s obzirom na temperaturu za (a) vodu pri tlaku od  $P = 24,5 \text{ MPa}$  i (b) ugljični dioksid pri tlaku od  $P = 8,3 \text{ MPa}$  [5]



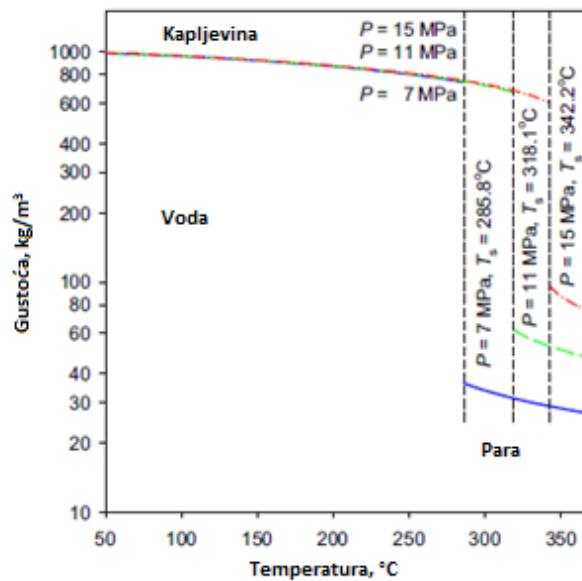
Slika 2-7: Prikaz promjene vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta kod različitim temperaturnih odnosa  $T/T_{CR}$  i različitim nadkritičnih tlakova za (a) vodu i (b) ugljični dioksid [5]

Pri kritičnim i nadkritičnim tlakovima smatra se da je tekućina jednofazna usprkos činjenici da sva termofizička svojstva fluida ostvaruju značajne promjene vrijednosti u području u

blizini kritične točke. Kako se može vidjeti na slikama 2-3, 2-4 i 2-5 u blizini kritične točke promjene vrijednost termofizičkih svojstava dramatično se mijenjaju. Međutim, s porastom tlaka, ovakve skokovite promjene vrijednosti termofizičkih svojstava postaju manje izražene (slike 2-3, 2-4 i 2-7).

Termofizička svojstva fluida poput gustoće i dinamičke viskoznosti ostvaruju nagli pad vrijednosti (u blizini kritične točke taj pad je gotovo okomit) u vrlo uskom temperaturnom intervalu (slike 2-3 (a, b), 2-4 (a, b) i 2-5), dok se vrijednosti kinematičke viskoznosti i specifične entalpije naglo povećavaju (slike 2-3 (d, g), 2-4 (d, g) i 2-5 (a)). Vrijednosti volumenske ekspanzivnosti, specifičnog toplinskog kapaciteta, toplinske vodljivosti i Prandtlovog broja ostvaruju vrhove (odnosno maksimalne vrijednosti kod skokovitih promjena) u blizini kritičnih odnosno pseudokritičnih točaka (slike 2-3 (c, e, f, h), 2-4 (c, e, f, h), 2-5 i 2-6). Veličine vrijednosti vrhova značajno se smanjuju s porastom tlaka (slika 2-7), a što je nadkritični tlak veće vrijednosti, to "vrhovi" imaju blaži nagib stranica. Valja napomenuti da vrijednosti dinamičke viskoznosti, kinematičke viskoznosti i toplinske vodljivosti ostvaruju svoj minimum odmah nakon kritične temperature, odnosno pri pseudokritičnoj temperaturi (slike 2-3 (b, d, f) i 2-4 (b, d, f)). Specifični toplinski kapacitet vode (slika 2-4 (e)) i ugljičnog dioksida (slika 2-5 (e)) ima maksimalnu vrijednost malo iznad kritične temperature. Temperatura kod koje fluidi ostvaruju maksimalnu vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta pri nadkritičnom tlaku naziva se **pseudokritična temperatura**. Analizom podataka na slici 2-7 se može zaključiti (na primjeru vode i ugljičnog dioksida) da se s porastom nadkritičnog tlaka povećava vrijednost pseudokritične temperature, a pripadajuća vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta postaje sve manja sa sve slabije izraženom skokovitim promjenom vrijednosti. Za vodu kad tlak postaje veći od 300 MPa i za ugljični dioksid kada tlak premaši vrijednost od 30 MPa (slika 2-7), nemože se odrediti lokacija maksimalne vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta, pa se može zaključiti da pseudokritične točke više ne postoje.

Glavna razlika između procesa isparavanja pri podkritičnom tlaku i pri nadkritičnom tlaku je u tome što su sve promjene (čak i drastične varijacije) termofizikih svojstava fluida pri nadkritičnim tlakovima kontinuirane i postupne i odvijaju se u određenom temperaturnom rasponu (slika 2-6). Suprotno tome, kod podkritičnih tlakova postoje diskontinuiteti termofizičkih svojstava fluida tijekom isparavanja, gdje istovremeno egzistiraju različite vrijednosti za vrelu kapljevina i suhozasićenu paru. (slika 2-8). Stoga se može zaključiti da se nadkritične tekućine ponašaju kao jednofazne tvari.



Slika 2-8: Promjena vrijednosti gustoće vode (vodene pare) pri različitim podkritičnim tlakovima [5]

### 2.3 Specifičnosti procesa prijenosa topline kod prisilne konvekcije pri nadkritičnom tlaku

U praksi se najčešće pri nadkritičnim tlakovima koristi voda kao radna tvar. Najšira primjena vode u nadkritičnim uvjetima je u nadkritičnim generatorima pare i turbinama, koji su sastavni dijelovi termoenergetskih postrojenja širom svijeta. Trenutno su maksimalne vrijednosti tlakova i temperatura koji se koriste u termoenergetskim postrojenjima oko 30 do 38 MPa, odnosno 600 °C do 625°C. Ugljični dioksid u nadkritičnom stanju, zbog svojih znatno nižih vrijednosti kritičnih parametara, ima značajan potencijal upotrebe, te se razmatraju nova područja korištenja nadkritičnog ugljičnog dioksida kao rashladne tekućine ili kao radne tvari. Treća radna tvar koja se koristi u nekim posebnim tehničkim primjenama u nadkritičnom stanju je helij. Nadkritični helij koristi se u rashladnim zavojnicama superprovodničkih elektromagneta, u superprovodničkoj elektronici i u opremi za prijenos snage. Sve su opsežnija teoretska razmatranja upotrebe rashladnih sredstava i drugih radnih tvari s nadkritičnim parametrima za proizvodnju električne energije iz niskotemperaturnih izvora topline.

Eksperimenti pod nadkričnim tlakovima vrlo su skupi i zahtijevaju sofisticiranu opremu i mjernu tehniku. Neke od studija (na primjer, prijenos topline u snopovima šipki goriva) privatno su vlasništvo kompanija koje su naručile mjerenja pa stoga nisu objavljene u otvorenoj znanstvenoj literaturi. Većina objavljenih znanstvenih studija bavi se prijenosom topline i hidrauličkim otporom kroz glatke cijevi kružnog oblika [1,9,10], dok su korištene radne tvari uglavnom voda, ugljični dioksid i helij. Pored navedenih tekućina, eksperimenti prijenosa topline s prisilnom i slobodnom konvekcijom provedeni su pri nadkričnim tlakovima, upotrebom ukapljenih plinova (poput zraka, argona, vodika, dušika, dušikovog tetraoksida, kisika i sumpor heksafluorida), alkohola (poput etanola i metanola), ugljikovodika (kao što su n-heptan, n-heksan, di-izopropil-cikloheksan, n-oktan, izo-butan, izo-pentan i n-pentan), aromatskih ugljikovodika (poput benzena, toluena i polimetil-fenilsiloksana), ugljikovodični rashladni fluidi (poput kerozina, TS-1 i RG-1 i goriva za mlazni pogon RT i T-6), te raznih rashladnih fluida. Određeni broj studija bio je posvećen prijenosu topline i padu tlaka u prstenastim kanalima, pravokutnim kanalima i cijevnim snopovima [11-13].

Uzimajući u obzir da su nadkrična voda i ugljični dioksid najčešće korištene radne tvari i da je većina eksperimenata izvedena u kružnim cijevima, specifičnosti prijenosa topline i pada tlaka, uključujući generalizirane korelacije razmotrene u ovom poglavlju odnositi će se na navedene uvijete. Specifičnosti prijenosa topline i pada tlaka pod drugim uvjetima i/ili za druge tekućine dane su u odgovarajućoj znanstvenoj literaturi [1].

#### **2.4.Osnove nadkričnog prijenosa topline**

Općenito se u blizini kritičnog tlaka i pri nadkričnim tlakovima mogu odvijati tri režima prijenosa topline (njihove definicije dane su u prethodnom odjeljku), kako je to prikazano na slikama 2-2, 2-9 i 2-10:

1. normalni prijenos topline *NPT* (NHT-normal heat transfer),
2. poboljšani prijenos topline *PobPT* (IHT-Improved Heat Transfer),
3. pogoršani prijenos topline *PogPT* (DHT- deteriorated heat transfer).

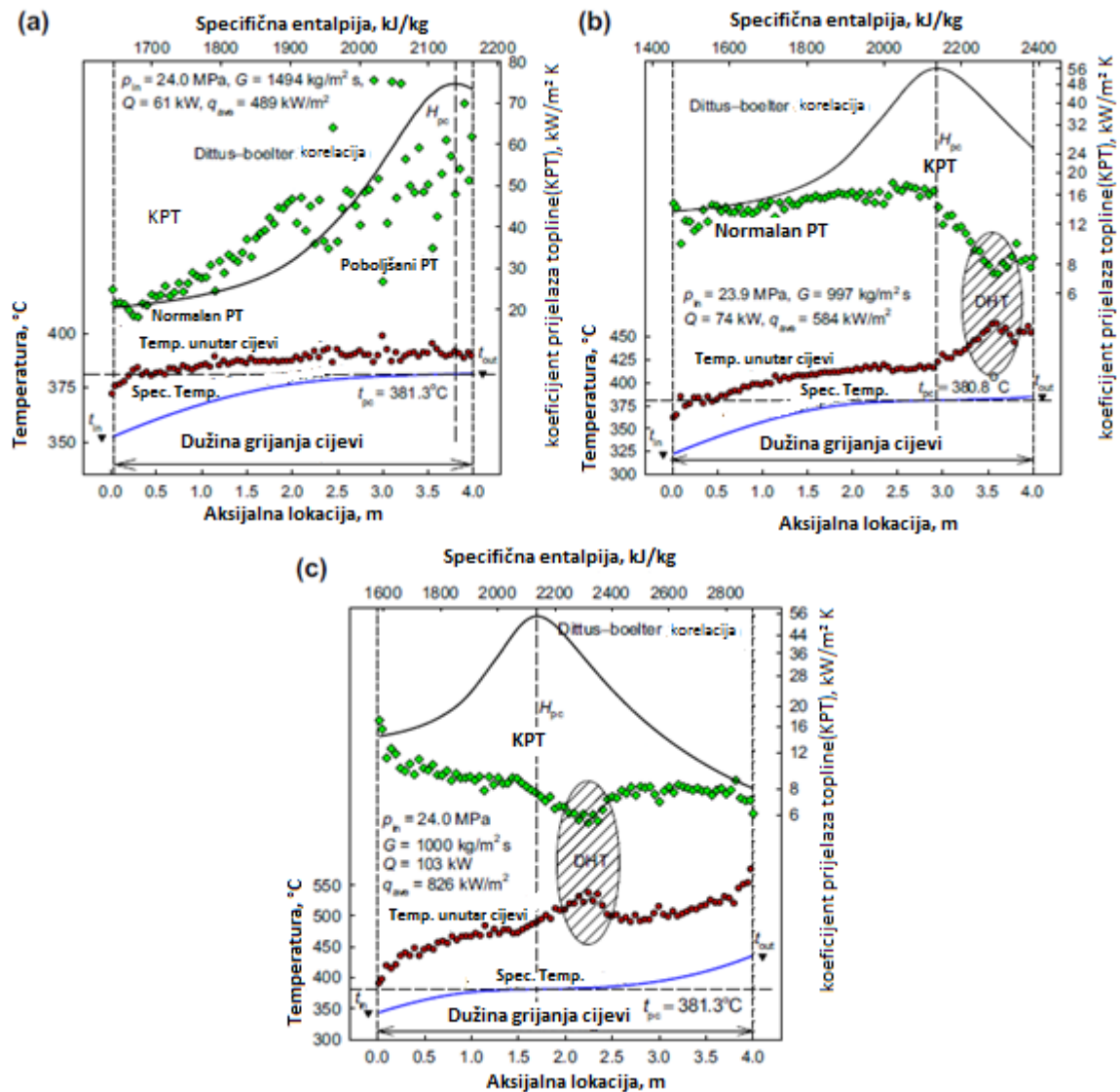
Pri navedenim uvjetima duž zagrijane površine cijevi mogu se pojaviti dva posebna fenomena: (1) pseudo-ključanje i (2) pseudo-filmsko ključanje. Može se zaključiti da je

pojava navedenih režimi prijenosa topline i posebnih fenomena posljedica značajnih varijacija vrijednosti termofizičkih svojstava u blizini kritične točke i posebice kod pseudokritične točke (slike 2-3, 2-4 i 2-1) i posebnih uvjeta. Kod kritičnih i nadkritičnih tlakova mogu postojati sljedeći uvjeti (prikazani na slikama 2-2, 2-9 i 2-10):

1. Temperature stijenke cijevi i radnog fluida imaju nižu vrijednost od pseudokritične temperature unutar dijela cijevi ili cijelom duljinom grijane cijevi.
2. Temperatura stijenke cijevi ima višu vrijednost, a temperatura radnog fluida ima nižu vrijednost od pseudokritične temperature unutar dijela cijevi ili cijelom duljinom grijane cijevi.
3. Temperatura stijenke cijevi i temperatura radnog fluida imaju veću vrijednost od pseudokritične temperature unutar dijela ili cijelom duljinom grijane cijevi.
4. Veličina toplinskih tokova.
5. Ulazno područje cijevi.
6. Smjer strujanja radnog fluida u vertikalnoj cijevi.
7. Horizontalna cijev.
8. Učinak gravitacijskih sila pri masenom toku manje vrijednosti, itd..

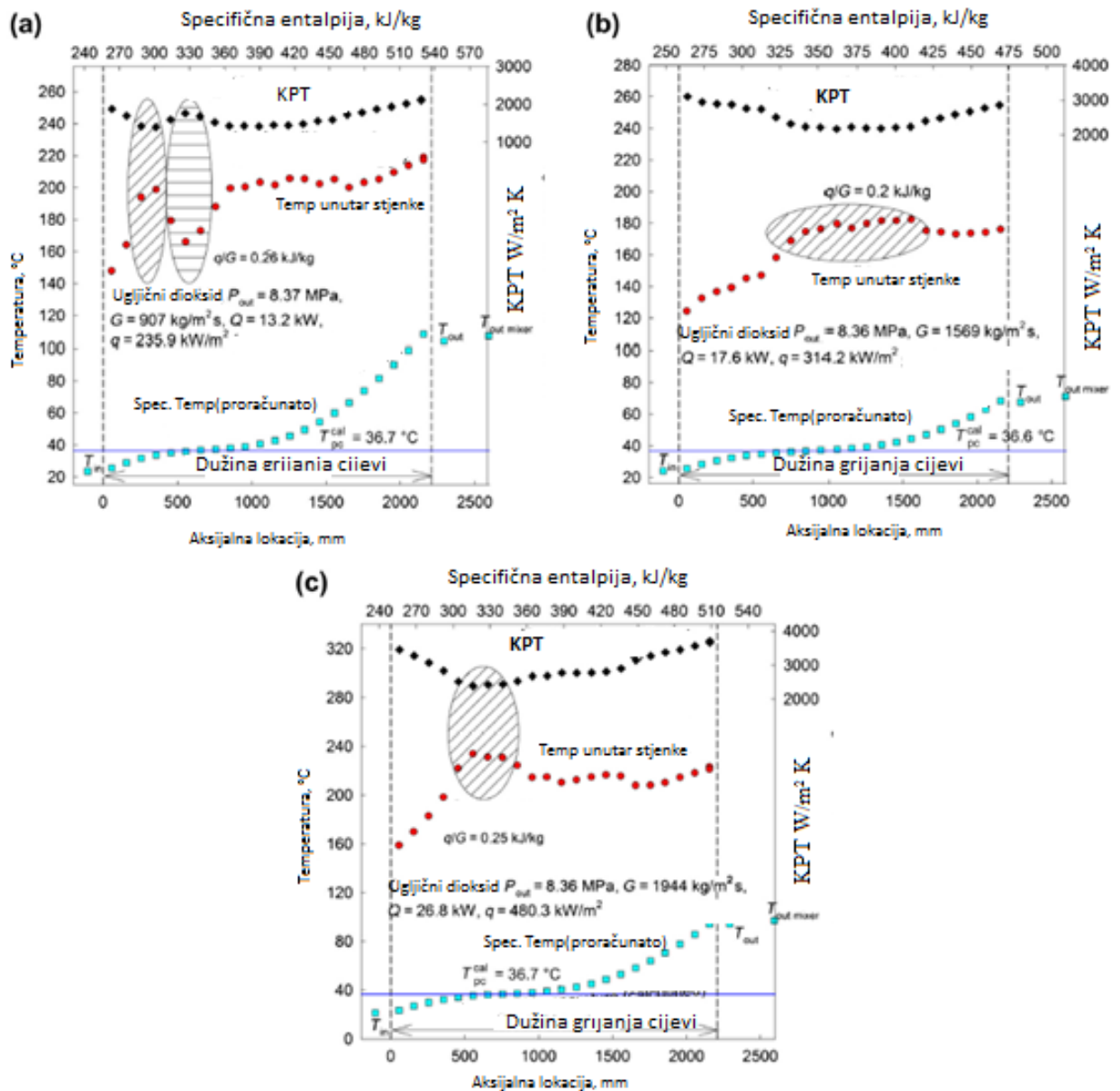
Svi ovi uvjeti mogu utjecati na prijenos topline u nadkritičnim uvjetima. Rezultati istraživanja [14] sugeriraju da varijacije vrijednosti termofizičkih svojstva radnih fluida u blizu kritičnih i pseudokritičnih točaka rezultiraju maksimalnom vrijednošću koeficijenta prijelaza topline, kako je to prikazano na slici 2-12. Analizom podataka na slici 2-12 može se zaključiti da se maksimalna vrijednost skokovite promjene koeficijenta prijelaza topline smanjuje s povećanjem vrijednosti toplinskog toka i tlaka. Maksimalne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline javljaju se kao vrijednosti entalpije glavnog toka radnog fluida koja je nešto manje vrijednosti od pseudokritične entalpije. Eksperimentalni rezultati Styrikovich-a i suradnika [15] prikazani su na slici 2-13, koja prikazuje pojavu režima pepoboljšanog prijenosa topline *PobPT* i režima pogoršanog prijenos topline *PogPT* u blizu pseudokritične točke, u ovisnosti od veličine toplinskog toka. Kod nižih vrijednosti toplinskih tokova (348 i 523 kW/m<sup>2</sup>) u blizini pseudokritične točke se pojavljuje režim pepoboljšanog prijenosa topline *PobPT*, te se postižu najviše vrijednosti koeficijenta prijelaza topline. Kod viših vrijednosti toplinskih tokova (od 640 kW/m<sup>2</sup>) istovremeno egzistiraju režim pogoršanog prijenos topline *PogPT* (kod temperatura malo nižih od

pseudokritične točke) i režim poboljšanog prijenosa topline *PobPT* (kod temperatura malo viših od pseudokritične točke), uz pojavu značajno nižih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline.



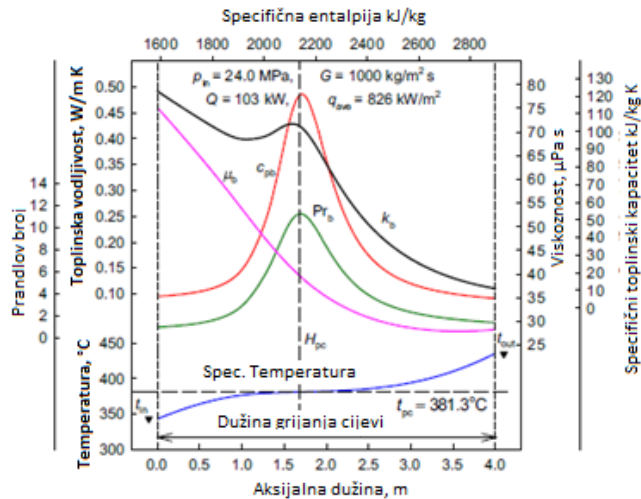
Slika 2-9: Profili temperature i koeficijenta prijenosa topline duž grijane vertikalne cijevi kružnog presjeka [3], radni fluid voda, promjer cijevi  $D = 10 \text{ mm}$  i duljina cijevi  $L_h = 4 \text{ m}$ :

- (a) promjena temperature radnog fluida u cijevi od početne temperature niže do pseudokritične temperature do krajnje temperature jednake pseudokritičnoj temperaturi,
- (b) promjena temperature radnog fluida u cijevi od početne temperature niže do pseudokritične temperature do krajnje temperature koja je malo iznad pseudokritične temperature,
- (c) radni fluid postiže pseudokritičnu temperaturu negdje blizu sredine cijevi

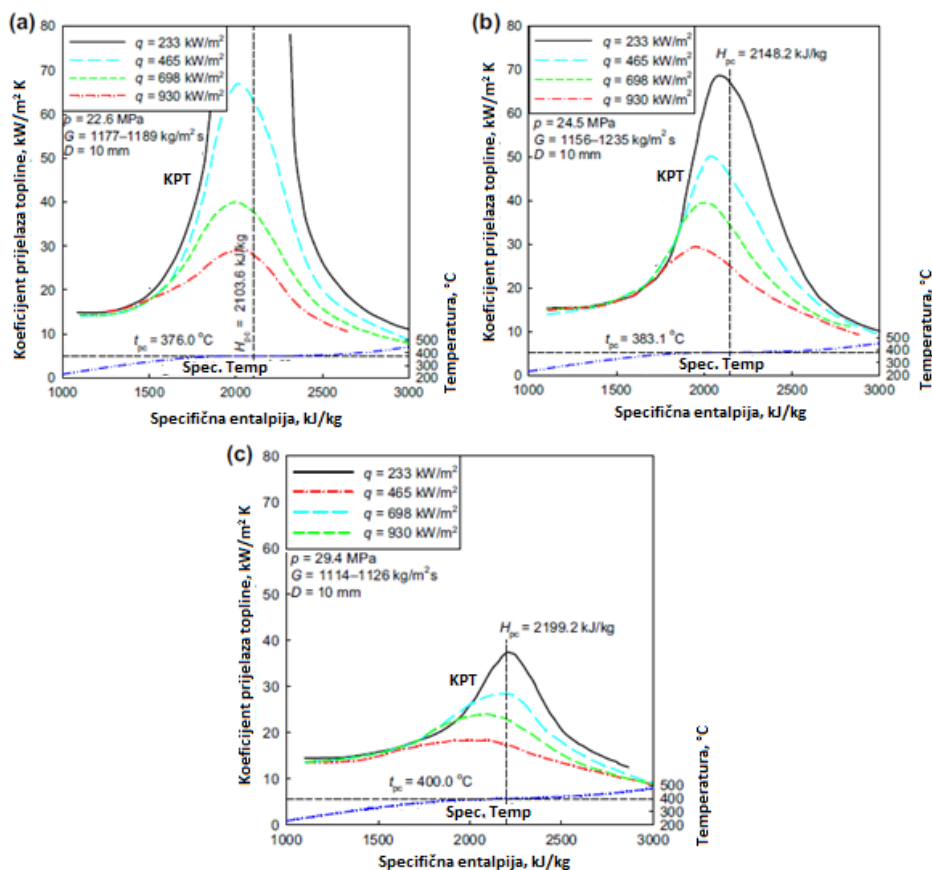


Slika 2-10: Promjene vrijednosti temperatura i koeficijenta prijelaza topline duž grijane vertikalne cijevi kružnog poprečnog presjeka od Inconel-600 [8], radni fluid je ugljični dioksid, promjer cijevi  $D=8$  mm i duljina cijevi  $L_h = 2,4$  m, (a) pri manjoj vrijednosti specifičnog masenog protoka ( $907$  kg/m<sup>2</sup>s), (b) pri srednjoj vrijednosti specifičnog masenog protoka ( $1569$  kg / m<sup>2</sup> s), (c) pri većoj vrijednosti specifičnog masenog protoka ( $1994$  kg/m<sup>2</sup>s).

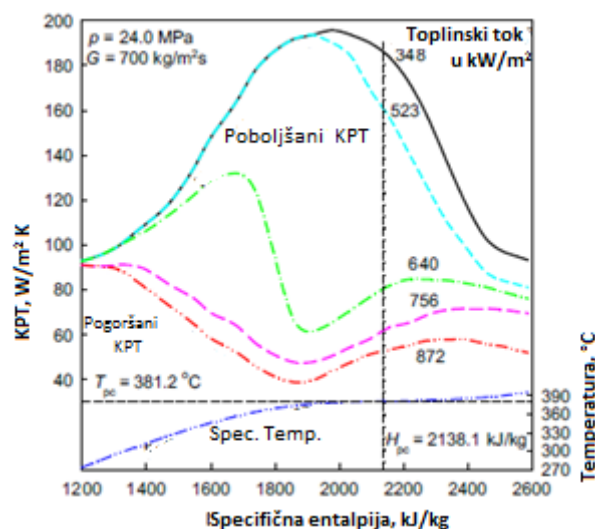




Slika 2-11: Profil promjena vrijednosti temperatura i termofizička svojstva duž grijane vertikale cijev kružnog poprečnog presjeka (radni uvjeti odgovaraju onima na slici 2-9 (c)) za vodu kao radni fluid, promjer cijevi  $D=10$  mm i duljinu cijevi  $L_h=4$  m (termofizička svojstva su izračunata na temelju temperature radnog fluida u glavnom toku) [3]



Slika 2-12: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline s obzirom na promjenu vrijednosti entalpije glavnog toka radnog fluida (voda) u vertikalnoj cijevi s protokom prema gore pod različitim tlakovima [14]: (a)  $P=22,6$  MPa; (b)  $P=24,5$  MPa; i (c)  $P=29,4$  MPa



Slika 2-13: Promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline od voda koja teče u cijevima [15].

Vikhrev i suradnici [16,17] su eksperimentalno utvrdili da pri specifičnom masenom protoku vode od  $495 \text{ kg/m}^2\text{s}$  postoje dvije vrste režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* (slika 2-14): (1) prvi se tip javlja u ulaznom području cijevi gdje je  $L/D < 40-60$ , (2) dok se drugi tip može pojaviti u bilo kojem dijelu cijevi, ali samo pri određenom opsegu vrijednosti entalpije radnog fluida. Uočeno je da se oba režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* javljaju pri višim vrijednostima toplinskih tokovima (iznad  $500 \text{ kW/m}^2$ ), dok pri nižim vrijednostima toplinskih tokova takvih pojava nema.

Kako je ranije spomenuto, prvi tip režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* javlja se u ulaznom području cijevi. Ovakav tip režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* javljala se uglavnom samo pri manjim vrijednostima specifičnog masenog protoka i pri višim vrijednostima toplinskog toka (slika 2-14 (a) i (b)), dok pri visokim vrijednostima specifičnog masenog protoka ta pojava izčezava (slika 2-14 (c) i (d)).

Drugi tip režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* pojavljuje se kada temperatura stijenke cijevi ima višu vrijednost od pseudokritične temperature (slika 2-4). Eksperimentalno je utvrđeno [16], da se režim pogoršanog prijenosa topline *PogPT* pojavljuje kada je  $q/G > 0,4 \text{ kJ/kg}$  (gdje je  $q$  u  $\text{kW/m}^2$  specifični toplinski tok, dok je  $G$  je u  $\text{kg/m}^2\text{s}$  specifični maseni protok radnog fluida). Ova vrijednost je vrlo blizu vrijednosti koju su predložili Styrikovich i suradnici [15] koji su utvrdili da odnos  $q/G > 0,49 \text{ kJ/kg}$ .

Navedene definicije dviju tipova režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* nisu dovoljne za njihovu jasnu identifikaciju.

## **2.5.Pseudo-ključanje i pseudo-filmsko ključanje**

Ackerman [18] je eksperimentalno istraživao prijenos topline u vodu pri nadkritičnim tlakovima u glatkim okomitim cijevima, sa i bez unutarnjih rebara i to unutar širokog raspona tlakova, masenih protoka, toplinskih tokova i promjera cijevi. Otkrio je da se fenomen pseudo-ključanja može dogoditi pri nadkritičnim pritiscima. Pretpostavlja se da fenomen pseudo-ključanja nastaje zbog velikih razlika u vrijednosti gustoće tekućine ispod pseudokritične točke i iznad pseudokritične točke. Na ovaj fenomen kod prijenosa topline utječu tlak, temperatura fluida, maseni protok, toplinski tok i promjer cijevi. Proces pseudo-filmskog ključanja (gdje tekućina niske gustoće sprječava tekućinu velike gustoće da "ovlaži" grijanu površinu cijevi) sličan je filmskom ključanju, koji se pojavljuje kod podkritičnih tlakova u cijevima.

Pseudo filmsko-ključanje dovodi do pojave pogoršanog prijenosa topline *PogPT*. Međutim, fenomen pseudo filmskog-ključanja nije jedini razlog za pojavu pogoršanog prijenosa topline *PogPT*. Ackerman [18] je zabilježio da su ponekad opažane nepredvidive pojave pri prijenosu topline u situacijama kada je vrijednost pseudokritične temperature fluida bila između vrijednosti temperature fluida i temperature zagrijane stijenke cijevi. Analizom rezultata mjerenja s raznim fluidima (voda, etilni i metilni alkoholi, heptan itd.) [19,20], došlo se je do zaključka da je moguće definirati mehanizam „pseudo-ključanja“ koji se javlja pri prijelazu topline u tekućinama koje teku u cijevima malog promjera pri nadkritičnim tlakovima. Pretpostavlja se da je pojava pseudo-ključanja povezana s razgradnjom sloja fluida niske gustoće uz stijenkiju cijevi koji ima temperaturu iznad pseudokritične vrijednosti. Takva pojava se manifestira na takav način da se određene količine fluida iz sloja uz stijenkiju cijevi miješaju s fluidom iz glavnog toka koji je hladniji, jer mu je temperatura niža od pseudokritične vrijednosti (ima veću vrijednost gustoće), gdje fluid manje gustoće kolabira uz generiranje tlačnih impulsa. Pod određenim uvjetima, frekvencija tih tlačnih impulsa može se podudarati s frekvencijom variranja tlaka tekućine u cijevi, što rezultira pojavom rezonancije i brzim porastom amplitude kolebanja tlaka u cijevi. Ova je teorija potkrijepljena eksperimentalnim rezultatima.

## 2.6. Strujanje fluida u horizontalnim cijevima

Od 1950. godine do početka 2006. godine evidentirano je 650 značajnih znanstvenih radova [1] koji objavljuju rezultate eksperimentalnih istraživanja prijenosa topline u vodoravnim grijanim cijevima, gdje se kao fluid koristi voda ili ugljični dioksid.

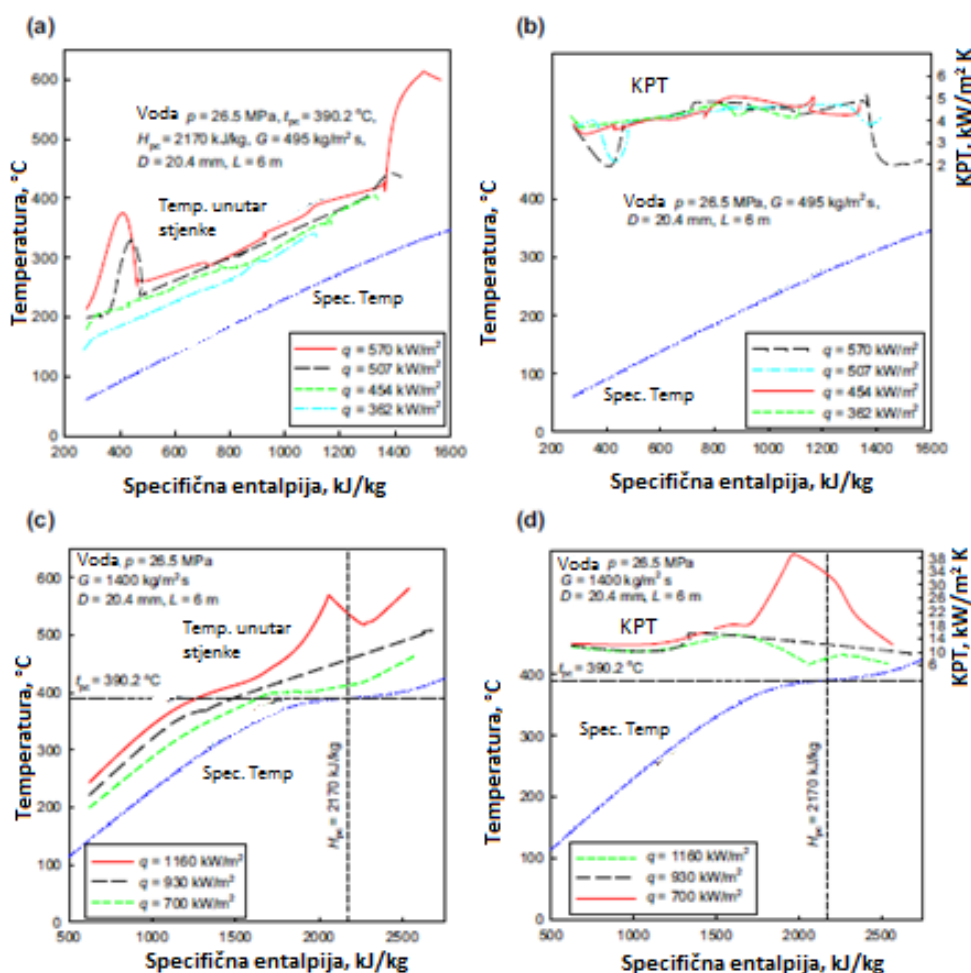
Eksperimentalno je potvrđeno [21] da je kod vodoravnih cijevi, osim pojave neizoternog protoka koji se također javlja kod toka fluida u vertikalnim cijevima, važan utjecaj gravitacijskih sila. Zbog navedenog utjecaja dolazi do temperaturnih razlika između donjeg i gornjeg dijela cijevi. Veličina temperaturnih razlika kod cijevi ovise o vrijednosti entalpije fluida, masenom protoku i toplinskom toku. Utvrđena je temperaturna razlika u presjeku cijevi pri specifičnom masenom protoku  $G=300-1000 \text{ kg/m}^2\text{s}$  i unutar raspona vrijednosti entalpija  $H_b= 840-2520 \text{ kJ/kg}$ . Temperatura razlika proporcionalna je porastu vrijednosti toplinskog toka, dok je učinak masnog protoka na temperaturnu razliku suprotan, jer s porastom masenog protoka razlika temperature se smanjuje. Pojava režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* također je primijećena u vodoravnim cijevima. Međutim, temperaturni profil za vodoravnu cijev na mjestima pojave režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* razlikuje se od profila kod vertikalnih cijevi, jer je kod vodoravnih cijevi manje izražen u odnosu na temperaturni profil kod vertikalne cijevi, gdje je temperatura na gornjem dijelu cijevi veća nego na donjem dijelu cijevi.

## 2.7. Metode poboljšanja prijenosa topline

Slično kao kod podkritičnih tlakova, pri nadkritičnim tlakovima povećanje intenziteta turbulencije toka fluida dovodi do pouspješavanja prijelaza topline [1]. Određena su ograničenja za siguran rad izmjenjivača topline i to teoretski (za vodu pod nadkritičnim tlakom) i eksperimentalno (za ugljični dioksid pod nadkritičnim tlakom) [22], u smislu maksimalnog toplinskog toka kod određenog masenog protoka. Eksperimentalno je dokazano da upotreba uvijene metalne trake umetnute u cijev povećava intenzitet prijenosa topline. Pri visokim vrijednostima toplinskih tokova pojava režima pogoršanog prijenosa topline *PogPT* javlja se kad temperatura glavnog toka fluida ima nižu vrijednost temperature od pseudokritične vrijednosti, dok je temperatura stijenke cijevi viša od pseudokritične temperature. Također je utvrđeno da su toplinski tok i promjer cijevi [23]

važni parametri koji utječu na veličinu minimalnog masenog protok kod kojeg ne nastaje pojava pseudo-filmskog ključanja, te da su rebraste cijevi učinkovite u sprečavanju nastanka pseudo-filmskog ključanja.

as



Slika 2-14: Prikaz profila promjene vrijednosti temperatura (a) i (c) i promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline (b) i (d) duž grijane okomite cijevi [16]

## 2.8. Praktične metode predviđanja prijenosa topline kod prisilne konveksijske pri nadkritičnim tlakovima

Nažalost, zadovoljavajuće analitičke metode za praktično predviđanje prijenosa topline kod prisilne konvekcije pri nadkritičnim tlakovima još nisu razvijene zbog poteškoća koje nastaju pri rješavanju naglih varijacija svojstava fluida, posebice kod turbulentnih protoka i pri visokim toplinskim tokovima. Stoga se za izračun koeficijenata prijelaza topline pri

nadkritičnim tlakovima koriste generalizirane korelacije dobivene obradom eksperimentalnih podataka. Postoji veliki broj korelacija za konvektivni prijenos topline u kružnim cijevima pri nadkritičnim tlakovima [1]. Analiza navedenih korelacija pokazala je da su one manje ili više točne samo unutar određenog skupa mjernih podataka, koji se je koristio za izvođenje dotične korelacije, ali zato pokazuju značajno odstupanje kod ostalih eksperimentalnih podataka.

Mnoge od spomenutih korelacija temelje se na konvencionalnoj korelaciji tipa Dittuse-Boelter (jednadžba (1)), samo što se vrijednost srednjeg specifičnog toplinskog kapaciteta fluida zamjenjuje sa vrijednošću prosječnog specifičnog toplinskog kapaciteta po presjeku cijevi gdje je raspon temperatura između temperature stijenke cijevi i temperature glavnog toka fluida ( $T_w - T_b$ ), odnosno  $\left(\frac{H_w - H_b}{T_w - T_b}\right)$  ( $J/kgK$ ), kao je to prikazano na slici 2-15. Dodatni članovi u korelacijama, kao što  $\left(\frac{k_b}{k_w}\right)^k$ ,  $\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^m$ ,  $\left(\frac{\rho_b}{\rho_w}\right)^n$  itd. (indeks b označava glavni tok fluida, a indeks w označava fluid uz stijenku cijevi), dodaju se kako bi se uzele u obzir značajne varijacije termofizičkim svojstvima fluida unutar presjeka toka zbog nejednolikog temperaturnog profila.

Najčešće korištena korelacija za prijenos topline kod prisilne konvekcije pri podkritičnom pritisku je ranije spomenuta Dittuse-Boelterova korelacija [24]. 1942. godine je McAdams [35] predložio upotrebu Dittuse-Boelterove korelacije za prijenos topline kod prisilne konvekcije i turbulentnog strujanja pri podkritičnim tlakovima koja glasi:

$$N_{ub} = 0.0243 \times Re_b^{0.8} \times Pr_b^{0.4} \quad (1)$$

Izraz (1) može davati nerealne rezultate kod nekih uvjeta toka fluida (slike 2-2, 2-9 i 2-16), posebice u blizini kritične i pseudokritične točke, zato jer je navedeni izraz vrlo osjetljiv na skokovite promjene termofizikalnih svojstava fluida. Eksperimentalno je utvrđeno da u pseudokritičnom području dolazi do umjerenog porasta vrijednosti koeficijenta prijelaza topline. Veličina porasta vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ovisi o uvjetima toka fluida i o veličini toplinskog toka, s time što je veća vrijednost toplinskog toka to je manji porasta vrijednosti koeficijenta prijelaza topline.

Dakle, na osnovu ranije navedenog može se zaključiti da temperatura glavnog toka fluida nije najpogodnija karakteristična temperatura kod koje određujemo termofizička svojstva

fluida. Zbog toga se u velikom broju korelacija koje opisuju proces prijelaza topline kod nadkritičnih uvjeta koristi Prandtlov broj (slika 2-15) koji se određuje kod srednje temperature čitavog presjeka toka fluida. Međutim, korelacija dana izrazom (1) je često korištena kao osnova za veliki broj korelacija koja se koriste za opisivanje nadkritičnog prijenos topline u cijevima [1].

Treba naglasiti da je većina predloženih empirijskih korelacija nastala 1960-ih i 1970-ih godina [1,26] kada eksperimentalne tehnike nisu bile dovoljno napredne u usporedbi sa današnjim stanjem.

Termofizička svojstva voda su u međuvremenu ažurirana. Tako na primjer, tek se sredinom 1990-ih godina točno odredila točna promjena vrijednosti toplinske vodljivosti vode u kritičnom i pseudokritičnom području unutar raspona pritiska od 22,1 do 25 MPa, kako je to prikazano na slici 2-3 (f).

Nedavno je predložena nova korelacija, temeljena na najnovijim eksperimentalnim podacima koju je predložio Mokry i suradnici [27]:

$$N_{ub}=0.0061xRe_b^{0.904} xPr_b^{0.684} (\rho_w/\rho_b) \quad (2)$$

Na slici 2-17 je prikazano raspršenje vrijednosti eksperimentalnih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline naspram izračunatih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prema izrazu (2), te izračunate i eksperimentalne vrijednosti za temperature stijenke cijevi. Točke u dijagramima leže uzduž ravne linije pod 45 ° u rasponu +/- 25% za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i +/- 15% za vrijednosti temperature stijenke cijevi.

Korelacija (2) je određena kod narednih radnih uvjeta: radni fluid je voda, uzlazni tok u glatkim cijevima s unutarnjim promjerom od 3mm do 38 mm, tlakom od 22,8-29,4 MPa, maseni protok od 200 kg/m<sup>2</sup>s do 3000 kg/m<sup>2</sup>s, i specifičnim toplotnim tokom od 70 kW/m<sup>2</sup> do 1250 kW/m<sup>2</sup>. Ova korelacija može se koristiti za određivanje vrijednosti kod nadkritičnih uvjeta ugljičnog dioksida i drugo tekućine. Međutim, točnost izraza (2) može biti nešto manja kod drugačijih radnih uvjeta i kod različitih fluida.

Slike 2-18 i 2-19 pokazuju usporedbu rezultata dobivenim pomoću korelacije (2) s eksperimentalnim podacima [14]. Slika 2-20 prikazuje usporedbu eksperimentalno dobivenih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i temperature stijenke cijevi, te

vrijednosti izračunatih programskim paketom FLUENT (CFD-computer fluid dynamics) i jednadžbom (2). Vrijedno je napomenuti da u programskim paketima kao što je FLUENT, nisu svi turbulentni modeli primjenjivi na prijenos topline pri nadkričnim tlakovima. Navedeni modeli turbulencije trebaju biti podešeni na temelju eksperimentalnih podataka prije njihova uporaba u sličnim uvjetima [29].

Slike od 2-18 do 2-20 pokazuju da rezultati korelacije (izraz (2)) prilično točno prate eksperimentalne podatke čak i unutar pseudokritične domene. Treba napomenuti da su sve korelacije prijenosa topline predstavljene namijenjene samo za režime normalnog i poboljšanog prijenosa topline. Naredna empirijska korelacija je predložena za izračunavanje minimalnog toplinskog toka pri kojem se pojavljuje režim pogoršanog prijenosa topline:

$$q_{dnt} = -58.97 + 0.745xG, \text{ kW/m}^2 \quad (3)$$

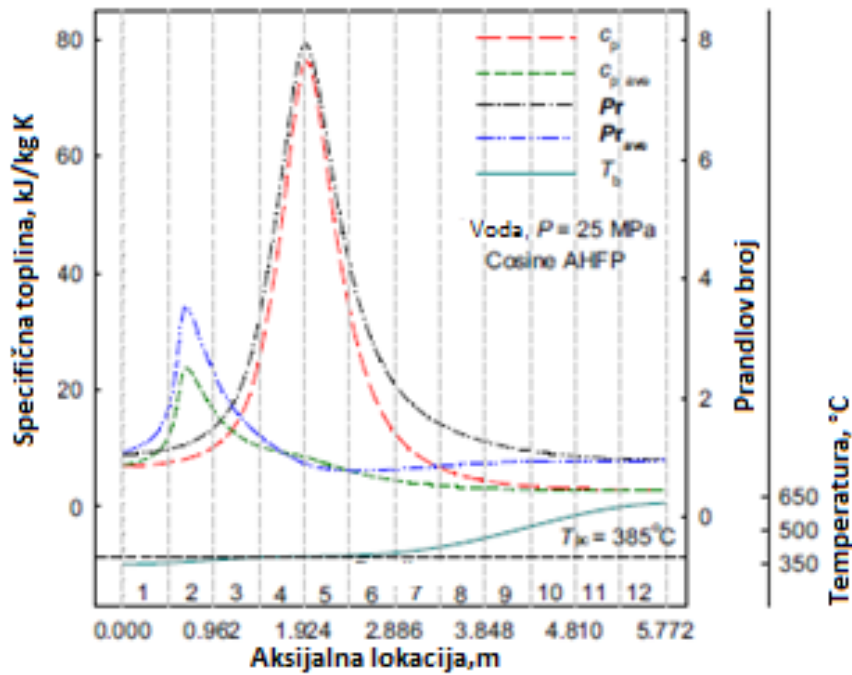
Nedavno je Zahlan sa suradnicima [30,31] proveo opsežnu analizu objavljenih korelacija s ciljem da se izradi pregledna tablica točnosti izraza za prijenos topline kod kritičnih / nadkričnih pritisaka. Proveden je opsežan pregled znanstvene literature koji je obuhvaćao 28 baza mjernih podataka i 6663 transkričnih mjernih podataka o prijenosu topline. U tablicama 2 i 3 navedeni su dobiveni rezultati navedene studije u obliku usporedbe ukupnih ponderiranih pogrešaka i standardnih pogrešaka srednjeg kvadrata i to za:

(1) tri nadkrična područja i

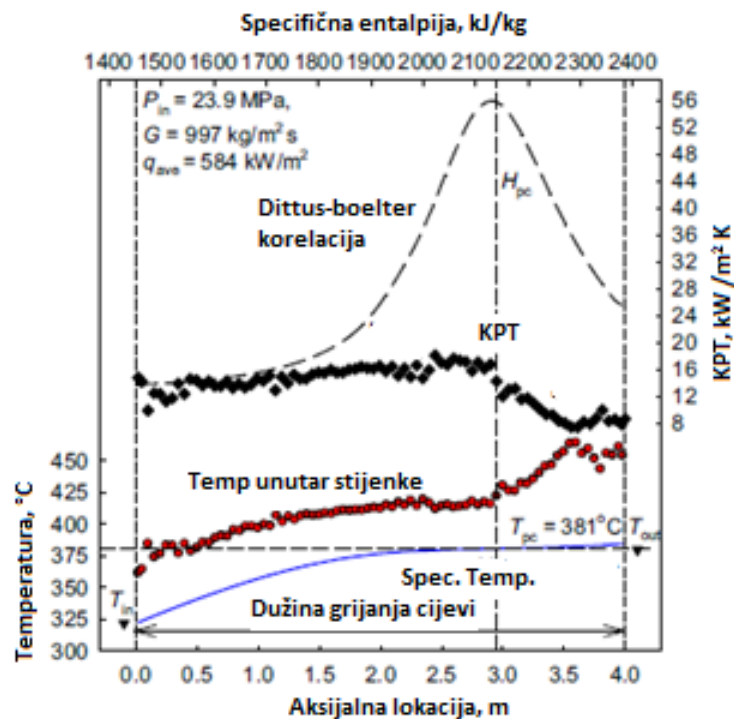
(2) za podkričnu pothlađenu kapljevinu i pregrijanu paru.

Više detalja o korelacijama navedenim u tablicama može se naći u odgovarajućoj znanstvenoj literaturi [8] [32]. Zahlan sa suradnicima [30,31] je utvrdio da unutar nadkričnih uvijeta korelacija definirana od strane Mokrya i suradnika [27] (izraza (2)) pokazuje najbolje poklapanje s mjernim podacima u sva tri nadkrična područja. Također, Mokry i sur. korelacija [27] pokazao je prilično dobra predviđanja za kritičnu tekućinu i pregrijana para u usporedbi s ostalih nekoliko korelacije.

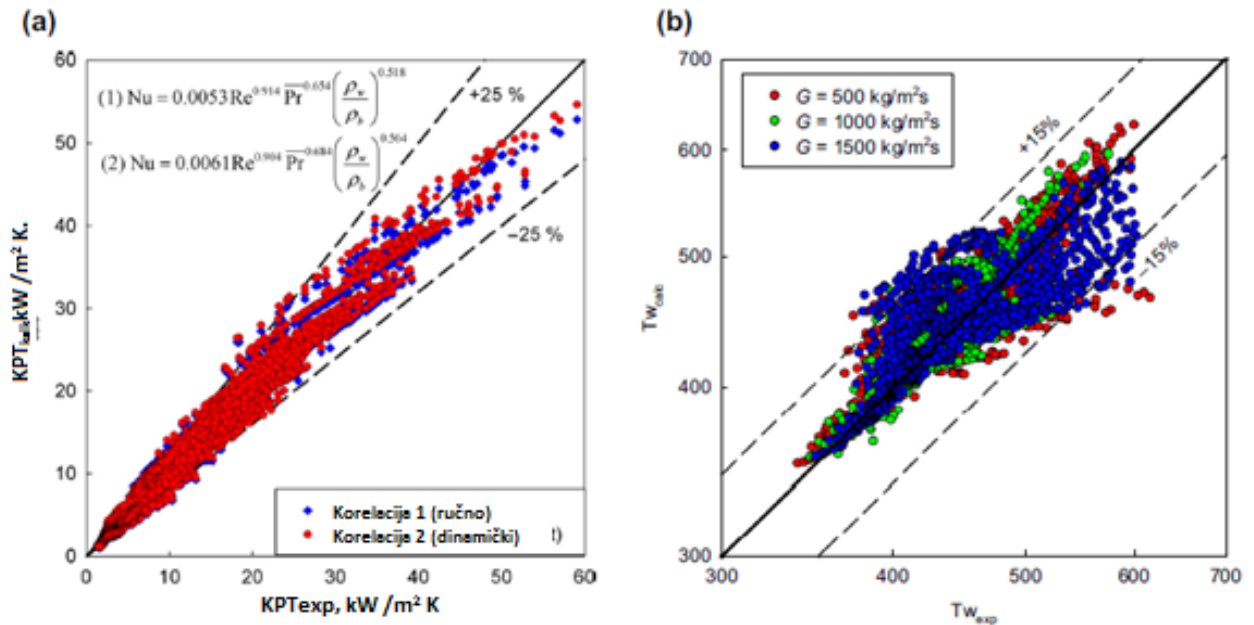




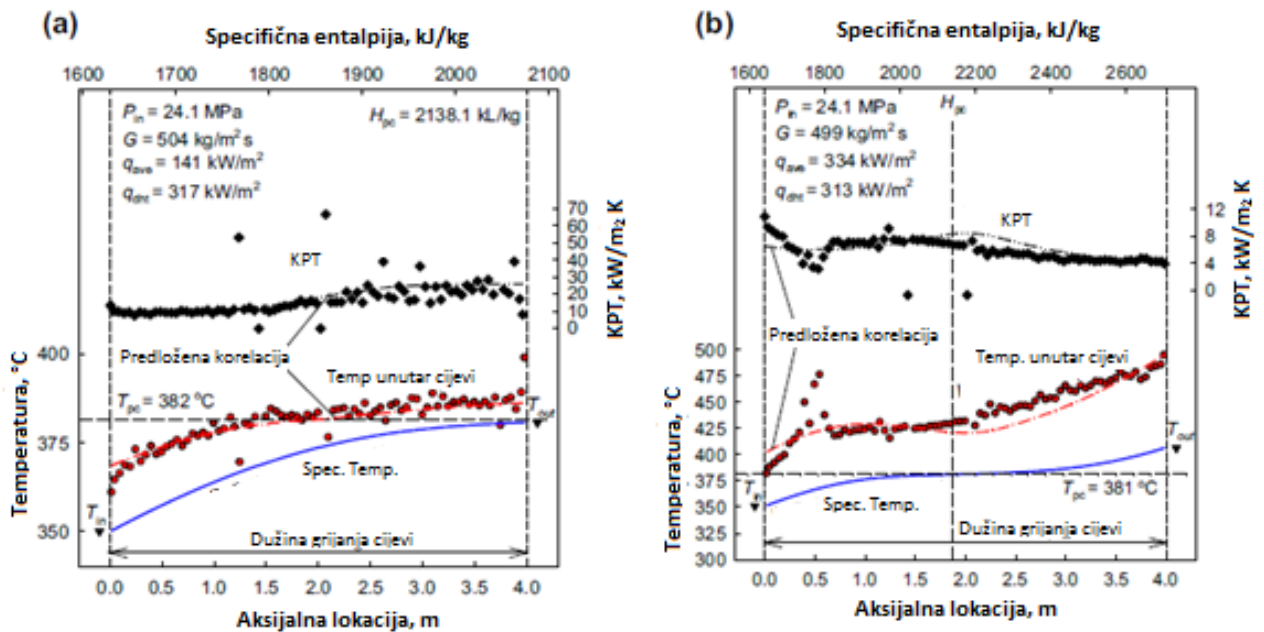
Slika 2-15: Redovni i prosječni Prandtllov broj i profili specifične topline za vodu duž grijane cijevi [37]



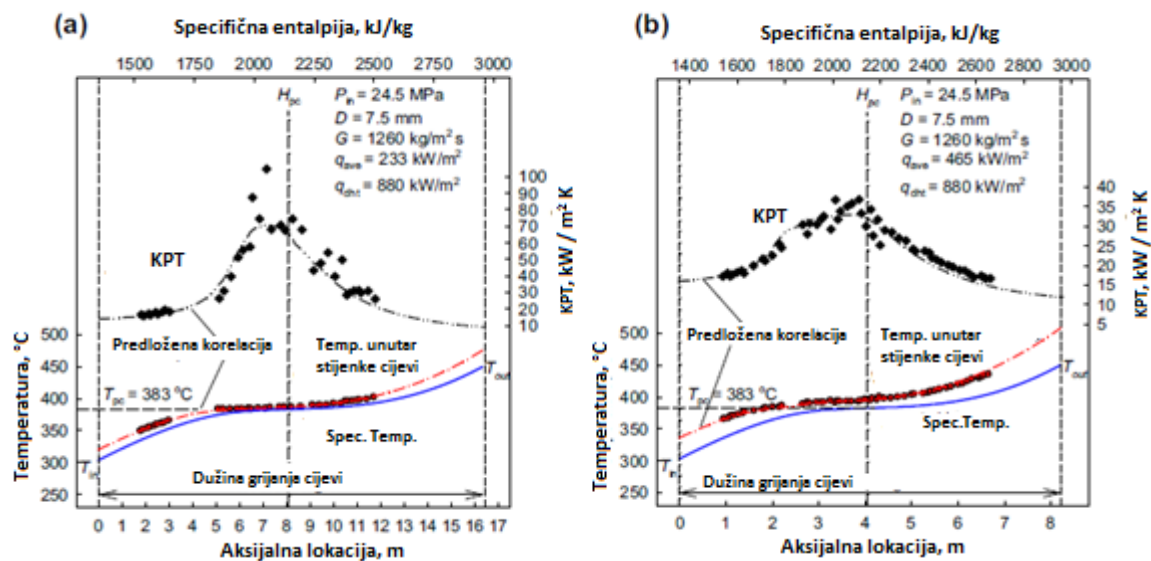
Slika 2-16: Profili promjene vrijednosti temperature i koeficijenta prijelaza topline (eksperimentalne i izračunate vrijednosti) duž grijane duljine glatke okomite cijevi [26]:  $G=1500 \text{ kg/m}^2\text{s}$  i  $q=884 \text{ kW/m}^2$ .



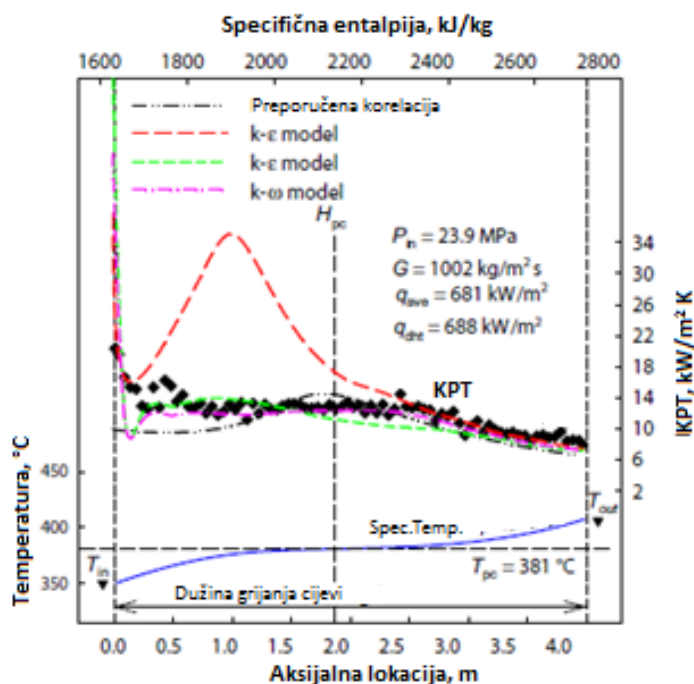
Slika 2-17: Usporedba izračunatih vrijednosti pomoću jednadžbu (2) i eksperimentalnih podataka [3]: (a) za koeficijent prijelaza topline i (b) za temperaturu stijenke cijevi.



Slika 2-18: Profili promjene vrijednosti temperature i koeficijenta prijelaza topline pri različitim toplinskim tokovima duž cijevi  $L=4\text{m}$ ,  $D=10\text{mm}$  [3]:  $P_{in}=24,1 \text{ MPa}$  i  $G=500 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ ; korelacija (2): (a)  $q_{ave}=141 \text{ W}/\text{m}^2$  i (b)  $q_{ave}=334 \text{ W}/\text{m}^2$



Slika 2-19: Profili promjene vrijednosti temperature i koeficijenta prijelaza topline duĹ kruĹne cijevi pri razliĉitim toplinskim tokovima [3]: nominalni radni uvjeti  $P_{in}=24,5 \text{ MPa}$ ,  $G=1260 \text{ kg/m}^2\text{s}$  i  $D=7,5 \text{ mm}$  [14]; korelacija (2): (a)  $q_{ave}=233 \text{ W/m}^2$  i (b)  $q_{ave}=465 \text{ W/m}^2$



Slika 2-20: Usporedba vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i temperature stijenske cijevi izraĉunatih korelacijom (2) i CFD-raĉunalnim paketom FLUENT [28] s eksperimentalnim podacima duĹ 4 m duge kruĹne cijevi promjera  $D=10\text{mm}$ :  $P_{in} = 23,9 \text{ MPa}$  i  $G=1002 \text{ kg/m}^2$

Korelacija	Nadkritično područje				Područje	
	Pseudokapljevin a		Pseudopara		Kritično ili pseudokritično	
	Greške, %					
	Prosjek	RMS	Prosjek	RMS	Prosjek	RMS
Bishop et al.[46]	6,3	24,2	5,2	18,4	20,9	28,9
Swenson et al. [47]	1,5	25,2	-15,9	20,4	5,1	23,0
Krasnoschchekov et al. [48]	15,2	33,7	-33,6	35,8	25,2	61,6
Walts and Chou [49]	4,0	25,0	-9,7	20,8	5,5	24
Griem [50]	1,7	23,2	4,1	22,8	2,7	31,1
Jackson [51]	13,5	30,1	11,5	28,7	22,0	40,6
Mokry et al. [52]	-3,9	<b>21,3</b>	-8,5	<b>16,5</b>	<b>-2,3</b>	<b>17,0</b>
Kuang et al. [53]	-6,6	23,7	<b>2,9</b>	19,2	-9,0	24,1
Cheng et al. [54]	<b>1,3</b>	25,6	<b>2,9</b>	28,8	14,9	90,6
Hadaller and Benerjee [55]	7,6	30,5	10,7	20,5	-	-
Sieder and Tale [56]	20,8	37,3	93,2	133,6	-	-
Dittus and Boelter [24]	32,5	46,7	87,7	131,0	-	-
Gnielinski [57]	42,5	57,6	106,3	153,3	-	-

Tablica 2: Ukupni ponderirani prosjek i RMS pogreške unutar tri nadkritična područja [30,31]

Korelacija	Pothlađena kapljevina		Pregrijana para	
	Greške, %			
	Prosjek	RMS	Prosjek	RMS
Sieder and Tale [56]	27,6	37,4	83,8	137,8
Gnielinski [57]	-4,3	<b>18,3</b>	80,3	130,2
Hadaller and Benerjee [58]	27,3	35,9	19,1	34,4
Dittus and Boelter [24]	10,4	22,5	75,3	127,3
Mokry et al. [50]	<b>-1,1</b>	19,2	<b>-4,8</b>	<b>19,6</b>

Tablica 3: Ukupni ponderirani prosjek i RMS pogreške unutar podkritičnog područja [30,31]

### 3. POSTAVKA ZADATKA

U završnom radu provesti će se analiza nekih mogućnosti upotrebe rankinovog ciklusa s organskim fluidom (ORC-Organic Rankine Cycle) s nadkritičnim parametrima za proizvodnju električne energije iz suviška toplinskog toka sustava daljinskog grijanja.

Suvišni toplinski tok ima kapacitet (maseni protok)  $q_m=100$  kg/s, a tlak vode iznosi 10 bara dok je temperatura  $180^{\circ}\text{C}$  ( $T_{H,in}$ ). Izlazna temperatura je ograničena na  $140^{\circ}\text{C}$ , jer je projektom predviđeno da se s tim tokom zagrijava voda u daljinskom grijanju. Temperatura na ulazu u turbina ne smije biti veća od  $170^{\circ}\text{C}$ , dok je temperatura fluida tijekom kondenzacije u kondenzatoru  $30^{\circ}\text{C}$ . Predviđeno je da ORC ciklus radi u nadkritičnom području. Sve potrebne proračune provesti upotrebom programskog paketa EES (Engineering Equation Solver).

U prvom dijelu rada provesti će se analiza promjene termofizikalnih svojstava radnog fluida u blizini kritične točke i u nadkritičnim uvjetima. Analizirati će se naredna termofizikalna svojstva radnih fluida: specifični toplinski kapacitet, koeficijent dinamičke viskoznosti, gustoća i koeficijent toplinske vodljivosti. Zadani radni fluidi su: R134a, R32, R124, R125, R142b, R143a, R152a, R600, R290 i R236fa. Na osnovu dobivenih rezultata o promjeni vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta o tlaku, za svaki radni fluid regresijskom analizom odredit će se korelacija za izračun pseudokritične temperature radnog fluida u ovisnosti o radnom nadkritičnom tlaku. Navedene korelacije za izračun vrijednosti pseudokritične temperature koristiti će se u Jackson-ovoj korelaciji za izračun koeficijenata prijelaza topline za strujanje radnog fluida u cijevima pri nadkritičnim uvjetima. Prikazati promjene termofizikalnih karakteristika radnih fluida kod pseudokritičnih temperatura u odgovarajućim dijagramima.

U drugom dijelu rada prvo će se provesti određivanje nadkritičnog područja rada ORC ciklusa s određenim radnom fluidom. Nadkritično područje rada omeđeno je maksimalnim  $P_{max}$  i minimalnim  $P_{min}$  nadkritičnim tlakom, maksimalnom entropijom  $s_{max}$ , te maksimalnom temperaturom u ciklusu  $T_{max}$ . Odabrano je da za sve radne fluide maksimalni tlak bude 80 bara, dok se vrijednost minimalnog tlaka određuje putem izraza  $P_{min}=1,1 P_{cr}$ . Maksimalna temperatura određuje se izrazom  $T_{max}=T_{H,in}-10$ , što u ovom slučaju iznosi  $170^{\circ}\text{C}$ . Maksimalna entropija  $s_{max}$  predstavlja najveću vrijednost entropije na liniji zasićenja (stanje suhozasićene pare) od kritičnog tlaka do tlaka kondenzacije za određeni radni fluid. Mokri radni fluidi imaju vrijednost  $s_{max}$  upravo kod tlaka kondenzacije, dok se kod suhih i izentropskih fluida  $s_{max}$  javlja kod tlakova koji su bliže vrijednosti

kritičnog tlaka  $P_{cr}$  nego tlaku kondenzacije. Uvođenjem ograničenja  $s_{max}$  kao jedne od granica nadkritičnog područja osigurava se da je ekspanziona linija u turbini uvijek u području pregrijane pare. Nadkritično područje predstavlja domenu svih potencijalnih toplinskih stanja radnog fluida na ulasku u turbinu. Navedeno područje omeđeno je karakterističnim točkama. Najčešće je nadkritično područje omeđeno sa četiri točke:  $A(P_{max}, T_{max})$ ,  $B(P_{min}, T_{max})$ ,  $C(P_{max}, S_{max})$  i  $D(P_{min}, S_{max})$ . U nekim slučajevima je nadkritično područje omeđeno sa tri točke:  $A (P=P_{max}<80 \text{ bar}, T_{max})$ ,  $B (P_{min}, T_{max})$ ,  $C (P_{max}, S_{max})$ .

Matematički model segmentiranog protustrujnog izmjenjivača topline s nadkritičnim radnim fluidom u cijevima koristi Jackson-ovu korelaciju za izračun koeficijenta prijelaza topline, dok je izvan cijevi (u plaštu) korištena Kernova metoda proračuna koeficijenta prijelaza topline. Duž izmjenjivača topline analizira se promjena vrijednosti koeficijenta prijelaza topline sa strane cijevi za svaku od karakterističnih točaka nadkritičnog područja. Dobiveni rezultati prikazuju se u odgovarajućim dijagramima.

## 4. RAZRADA ZADATKA I ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

### 4.1 Termofizikalna svojstva radnih fluida u blizini nadkritične točke i određivanje vrijednosti pseudokritične temperature

Zadatak je provesti analizu promjene termofizikalnih svojstava radnih fluida u blizini kritične točke i u nadkritičnim uvjetima. Analizirati će se promjene vrijednosti s promjenom tlaka i temperature za naredna termofizikalna svojstva radnih fluida: specifični toplinski kapacitet, koeficijent dinamičke viskoznosti, gustoća i koeficijent toplinske vodljivosti. Zadani radni fluidi koji će se analizirati su: R134a, R32, R124, R125, R142b, R143a, R152a, R600, R290 i R236fa. Dobiveni rezultati o promjeni vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta o tlaku i temperaturi za svaki radni fluid poslužiti će u regresijskoj analizi, pomoću koje će se definirati korelacija za izračun vrijednosti pseudokritične temperature radnog fluida u ovisnosti o veličini nadkritičnog tlaka. Detaljan opis postupaka u okviru razrade prvog dijela zadatka provodi se za radni fluid R134a, dok su za ostale radne fluide prikazati samo krajnji rezultati u obliku tablica i dijagrama, te su dani u Pravitku 1 ovog završnog rada.

#### 4.1.1. Radni fluid R134a

Vrijednost kritičnog tlaka i temperature za radni fluid R134a je  $P_{cr}=4059$  kPa i  $T_{cr}=101^{\circ}\text{C}$ . Analiza promjene vrijednosti odabranih termofizikalnih svojstava radnih fluida provesti će se u temperaturnom području od  $T_{min}=T_{cr}-50$  do  $T_{max}=T_{cr}+40$ . Navedeno temperaturno područje je podijeljeno u 300 jednakih dijelova (intervala) s ciljem da se dobiju što precizniji podatci o promjeni vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_p$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu$ ), gustoće ( $\rho$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k$ ). Područje tlakova prostire se od minimalnog tlaka  $P_{min}=P_{cr}$  do maksimalnog tlaka  $P_{max}=2P_{cr}$  i podijeljeno je u 11 dijelova ( $1,0P_{cr}$ ,  $1,1P_{cr}$ ,  $1,2P_{cr}$ ,  $1,3P_{cr}$ ... $2xP_{cr}$ ). Na takav način se je za svako termofizikalno svojstvo izračunato 3300 vrijednosti što je omogućilo precizno određivanje promjena vrijednosti odabranog termofizikalnog svojstva u definiranom području tlakova i temperatura. Dobiveni rezultati prikazani su za svaki radni fluid odgovarajućim dijagramima.

Na slici 4-1. dan tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odabrani temperaturni interval (od  $97,36^{\circ}\text{C}$  za  $170$ . temperaturni interval do  $105,70^{\circ}\text{C}$  za  $195$ . temperaturni interval) pri tlaku od  $P=P_{cr}$ . Iz

tablice na slici 4-1 može se očitati da je najveća vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_p$ ) 77.01 (kJ/kgK) kod temperature 101 °C. Maksimalna vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta se s pripadajućom temperaturom i tlakom unosi se u tablicu prikazanu na slici 4-2. Opisani postupak se provodi za sve ostale tlakove ( $1,1xP_{cr}$ ,  $1,2xP_{cr}$ ,  $1,3xP_{cr}...2xP_{cr}$ ), te se maksimalne vrijednosti  $c_p$  unose u tablicu koja je prikazana na slici 4-2. Ranije je definirano da u pseudokritičnoj točki specifični toplinski kapacitet fluida ima maksimalnu vrijednost pri određenom tlaku, što znači da su u tablici na slici 4-2 dane vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova.

Sort	1 $c_{pi}$ [kJ/kg-K]	2 $T_i$	3 $k_i$ [W/m-K]	4 $\mu$ [kg/m-s]	5 $\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]
[170]	3,163	97,36	0,05234	0,00006402	784
[171]	3,293	97,7	0,05186	0,000063	777
[172]	3,447	98,03	0,05135	0,00006193	769,5
[173]	3,634	98,36	0,05081	0,0000608	761,5
[174]	3,865	98,7	0,05022	0,0000596	752,7
[175]	4,162	99,03	0,04958	0,00005831	743
[176]	4,559	99,36	0,04887	0,0000569	732,2
[177]	5,123	99,7	0,04806	0,00005532	719,8
[178]	6,001	100	0,04711	0,0000535	705,1
[179]	7,599	100,4	0,04594	0,00005129	686,3
[180]	11,66	100,7	0,04428	0,00004824	659,2
[181]	77,01	101	0,04011	0,00004101	587,1
[182]	17,76	101,4	0,02999	0,00002567	377,2
[183]	10,61	101,7	0,02902	0,00002437	353
[184]	8,014	102	0,02843	0,00002362	337,9
[185]	6,623	102,4	0,02801	0,00002308	326,8
[186]	5,741	102,7	0,02768	0,00002267	317,9
[187]	5,125	103	0,02741	0,00002233	310,4
[188]	4,668	103,4	0,02718	0,00002205	304
[189]	4,313	103,7	0,02698	0,00002181	298,3
[190]	4,028	104	0,0268	0,0000216	293,2
[191]	3,794	104,4	0,02665	0,00002141	288,6
[192]	3,597	104,7	0,02651	0,00002124	284,4
[193]	3,43	105	0,02638	0,00002109	280,5
[194]	3,285	105,4	0,02627	0,00002095	276,9
[195]	3,158	105,7	0,02616	0,00002083	273,5

Slika 4-1: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ )

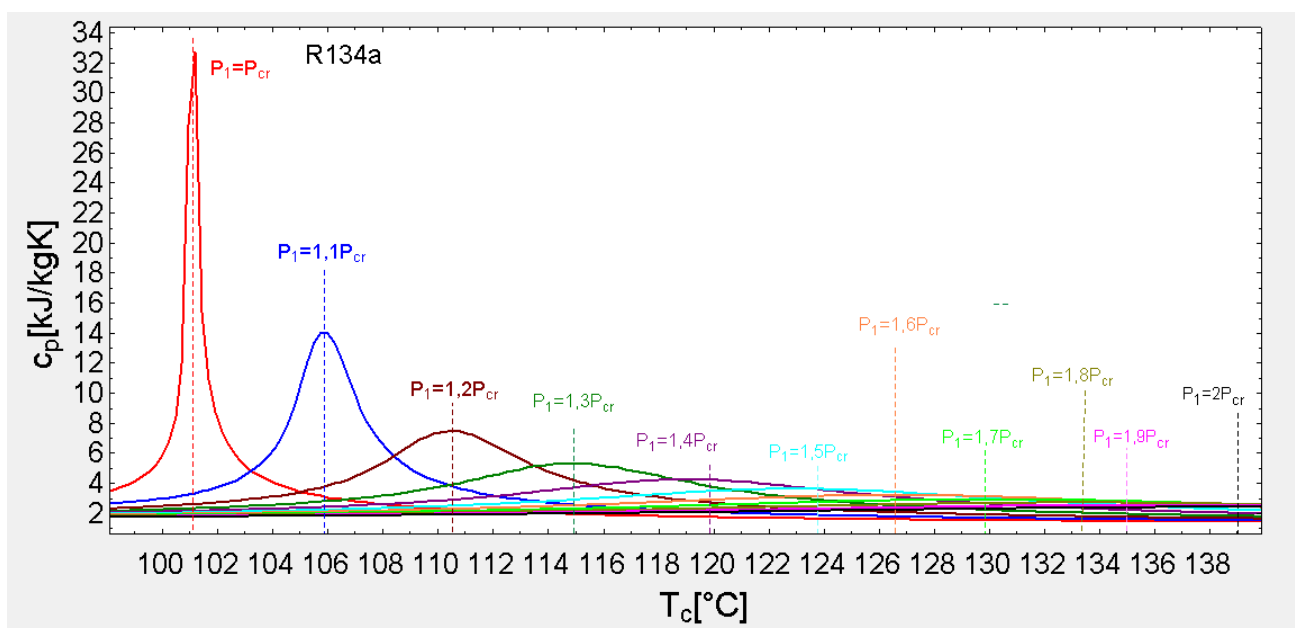
Na slici 4-3 dan je grafički prikazan je promjena vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R134a. Može



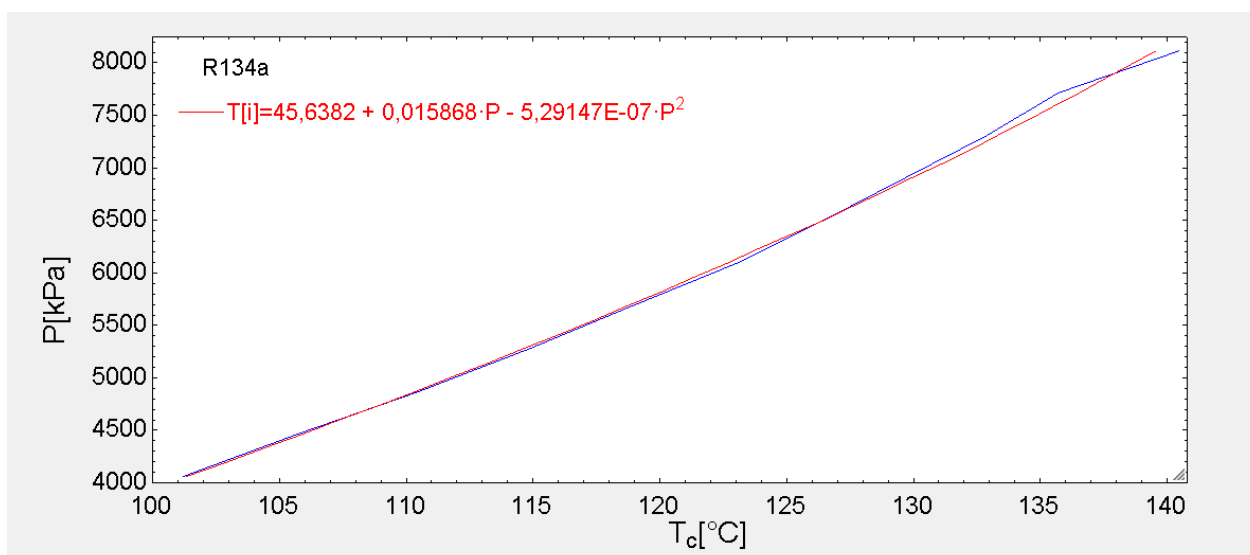
se zamijetiti da maksimalna vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_p$ ) značajno opada s porastom nadkritičnog tlaka. Ponašanje radnog fluida R134a kvalitativno je istovjetno ponašanju vode i CO<sub>2</sub>, kako je to potanko opisano u teoretskim osnovama.

	1	2	3
	$T_i$	$c_{p,i}$	P
<b>Row 1</b>	101	77,01	4059,00
Row 2	105,7	14,03	4464,90
Row 3	110,5	7,481	4870,80
Row 4	114,9	5,311	5276,70
Row 5	118,9	4,242	5682,60
Row 6	123	3,612	6088,50
Row 7	126,4	3,199	6494,40
Row 8	129,7	2,909	6900,30
Row 9	132,9	2,695	7306,20
Row 10	135,7	2,531	7712,10
Row 11	140,5	2,4	8118,00

Slika 4-2: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R134



Slika 4-3: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R134a



Slika 4-4: Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R134a

Na osnovu podataka iz tablice prikazane na slici 4-2: nacrtana je krivulja koja je označena plavom bojom na slici 4-4. Crvena krivulja nastala je postupkom linearne regresije, te je dobiven matematički izraz za izračun pseudokritične temperature ovisno o zadanom nadkritičnom tlaku za radni fluid R134a:

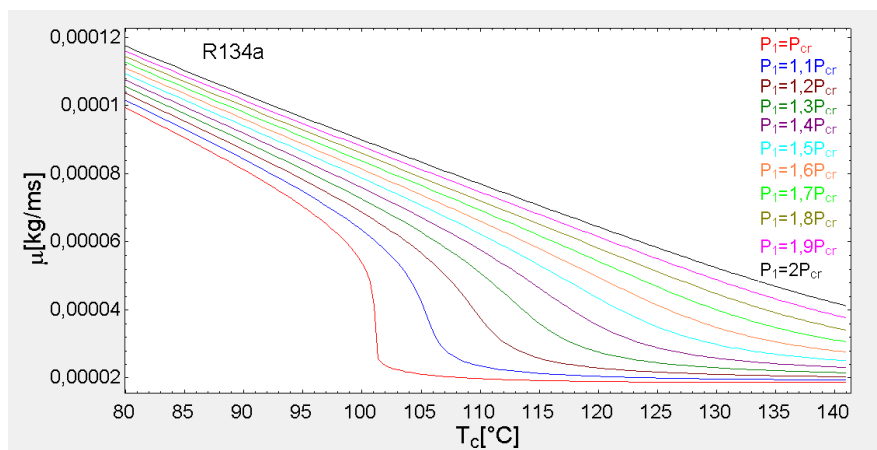
$$T_{pc} = 45,6382 + 0,015868 \times P_{cr} - 5,29147 \cdot 10^{-7} \times P_{cr}^2 \quad (4)$$

Može se vidjeti da se spomenute krivulje (crvena i plava) vrlo dobro podudaraju (slika 4-4), što je potvrđeno rezultatima izračuna standardne pogreške prikazanim na slici 4-5, gdje točnost iznosi  $R^2=99,87\%$ .

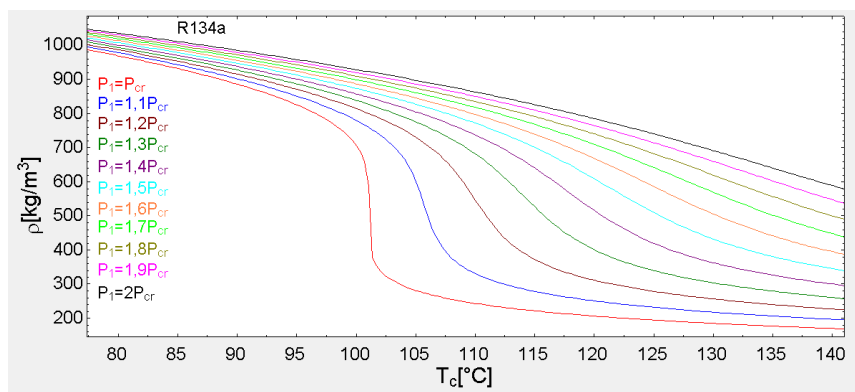
Curve Fit Statistics			No. points = 11	
	Value	Std. Error	rms = 4,5969E-01	
a0	4,563823E+01	3,440369E+00	bias = 2,0817E-17	
a1	1,586804E-02	1,164926E-03	$R^2 = 99,87\%$	
a2	-5,291468E-07	9,525418E-08	<input type="checkbox"/> Copy to Clipboard	
a3				
a4				
a5				
a6				

OK

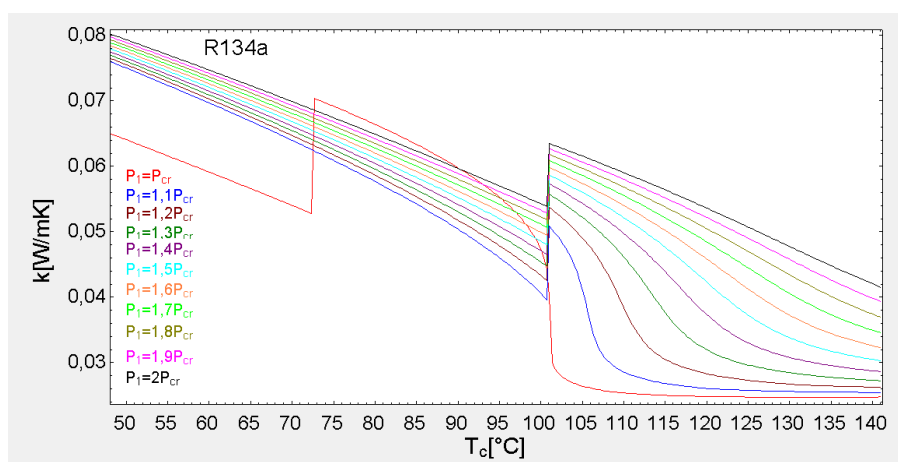
Slika 4-5: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednačbe za radni fluid R134a



Slika 4-6: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a



Slika 4-7: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a



Slika 4-8: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a

Na slici 4-6: prikazana je promjena vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a. Može se uočiti da vrijednost koeficijenta dinamičke viskoznosti naglo opada u blizini kritične temperatura. Intenzitet pada vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti je više izražen kod nižih vrijednosti nadkritičnog tlaka. Na slici 4-7: dan je prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a. Vrijednost gustoće naglo opada u blizini kritične temperatura. Intenzitet pada vrijednosti gustoće je više izražen kod nižih vrijednosti nadkritičnog tlaka. Na slici 4-8: dan je prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R134a. Kod temperatura nižih od kritične temperature vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti općenito opada, ali kod nadkritične temperature slijedi nagli skokoviti porast vrijednosti, nakon čega slijedi nagli pad vrijednosti. Kod temperatura iznad vrijednosti kritične temperature vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti ima približno konstantnu vrijednost. Opisani trend ponašanja je izraženiji kod nižih nadkritičnih tlakova.

#### 4.1.2. Prikaz dobivenih korelacijskih izraza

U tablici 1. dane su korelacije dobivene linearnom regresijom za svaki razmatrani radni fluid. Korelacije iz tablice 1. koriste se za izračun vrijednosti pseudokritične temperature za dani nadkritični tlak.

Fluid	$T_{pc}$	$T_{cr}[^{\circ}\text{C}]$	$P_{cr}[\text{kPa}]$
R134a	$T_{pc}=45,6382+0,015868* P_{cr} -5,29147*10^{-7}*P_{cr}^2$	101	4059
R32	$T_{pc}=23,2834+0,0110724* P_{cr} -2,69065*10^{-7}*P_{cr}^2$	78,43	5784
R124	$T_{pc}=55,0182+0,022291* P_{cr} -10,3017*10^{-7}*P_{cr}^2$	122,3	3624
R125	$T_{pc}=9,57804+0,01871297* P_{cr} -8,63313*10^{-7}*P_{cr}^2$	65,86	3618
R142b	$T_{pc}=68,4487+0,0200283* P_{cr} -7,61973*10^{-7}*P_{cr}^2$	137,2	4055
R143a	$T_{pc}=13,0734+0,0189598* P_{cr} -8,25608*10^{-7}*P_{cr}^2$	72,9	3761
R152a	$T_{pc}=46,2394+0,0177072* P_{cr} -6,3779*10^{-7}*P_{cr}^2$	113,2	4972
R600	$T_{pc}=87,2119+0,0199382* P_{cr} -7,18246*10^{-7}*P_{cr}^2$	152,3	3796
R290	$T_{pc}=34,4342+0,0171084* P_{cr} -5,73155*10^{-7}*P_{cr}^2$	96,52	4247
R236fa	$T_{pc}=63,0399+0,022901* P_{cr} -10,8582823*10^{-7}*P_{cr}^2$	125,2	3200

Tablica 4. Korelacije dobivene linearnom regresijom za svaki razmatrani radni fluid.

## 4.2. Izračun koeficijenta prijelaza topline pri nadkričnim parametrima

U ovom poglavlju diplomskog rada provesti će se određivanje nadkričnog područja rada ORC ciklusa za zadane uvijete za svaki od razmatranih radnih fluida. Nadkrično područje rada omeđeno je maksimalnim  $P_{max}$  i minimalnim  $P_{min}$  nadkričnim radnim tlakom, maksimalnom entropijom  $s_{max}$ , te maksimalnom temperaturom u ciklusu  $T_{max}$ . Odabrano je da za sve radne fluide maksimalni tlak bude najviše 80 bara, dok je vrijednost minimalnog tlaka  $P_{min}=1,1 P_{cr}$ . Maksimalna temperatura određuje se izrazom  $T_{max}=T_{H,in}-10$  ( $T_{H,in}$  je ulazna temperatura fluida nosioca topline), što u ovom slučaju iznosi  $170^{\circ}\text{C}$ . Maksimalna entropija  $s_{max}$  predstavlja najveću vrijednost entropije na liniji zasićenja (stanje suhozasićene pare) od kritičnog tlaka do tlaka kondenzacije za određeni radni fluid. Mokri radni fluide imaju vrijednost  $s_{max}$  kod tlaka kondenzacije (suhozasićena para), dok se kod suhih i izentropskih fluida  $s_{max}$  javlja na liniji zasićenja (suhozasićena para) kod tlakova koji su bliže vrijednosti kritičnog tlaka  $P_{cr}$ . Uvođenjem ograničenja  $s_{max}$  kao jedne od granica nadkričnog područja osigurava se da je ekspanziona linija u turbini uvijek u području pregrijane pare. Nadkrično područje predstavlja domenu svih potencijalnih toplinskih stanja radnog fluida na izlasku iz izmjenjivača topline s nadkričnim parametrima, odnosno to je toplinsko stanje na ulasku u turbinu. Navedeno područje omeđeno je sa četiri karakteristične točke:  $A(P_{max}, T_{max})$ ,  $B(P_{min}, T_{max})$ ,  $C(P_{min}, s_{max})$  i  $D(P_{max}, s_{max})$ . Navedeno nadkrično radno područje, s četiri karakteristične točke, prikazati će se u Ts-dijagramu za svaki radni fluid.

U danom primjeru toplinski izvor je voda tlaka 10 bara, koja predaje toplinsku energiju radnom fluidu u izmjenjivaču topline s nadkričnim parametrima, te se pri tome hladi od  $180^{\circ}\text{C}$  na  $140^{\circ}\text{C}$ . Protok toplinskog izvora (vode) iznosi  $100\text{ kg/s}$ . Izmjenjivač topline s nadkričnim parametrima je tipa cijevnog protustrujnog izmjenjivača topline u plaštu, s jednim prolazom fluida u cijevi i jednim prolazom fluida u plaštu. Pretpostavljeno je da se u plaštu nalazi voda (toplinski izvor), dok se u cijevima nalazi odgovarajući radni fluid pod nadkričnim vrijednostima tlaka.

Na Veleučilištu u Karlovcu je razvijen matematički model cijevnog protustrujnog izmjenjivača topline u plaštu. Navedeni matematički model je definiran tako da je izmjenjivač topline podijeljen na segmente ( $N=100$ ) u kojima se izmjenjuje ista vrijednost toplinskog toka. Na takav način se izračunavaju temperature oba fluida na krajevima intervala. Matematički model segmentiranog protustrujnog izmjenjivača topline gdje u

cijevima struji radni fluid pod nadkritičnim vrijednostima tlaka koristi Jackson-ovu korelaciju za izračun koeficijenta prijelaza topline sa strane cijevi, dok se za izračun koeficijenta topline u plaštu koristi Kernova metoda proračuna. Pomoću koeficijenta prijelaza topline sa strane cijevi i plašta izračunava se vrijednost ukupnog koeficijenta prilaza topline, a pomoću njih se određuje veličina površine svakog segmenta u izmjenjivaču topline. Suma površina svih segmenata u izmjenjivaču topline predstavlja ukupnu površinu.

U znanstvenoj literaturi najčešće se koristi Jackson-ova korelacija [38] za izračun koeficijenta prijelaza topline u cijevima pri natkritičnim uvjetima. Matematički zapis Jackson-ove korelacije glasi:

$$Nu = 0,0183 Re_b^{0,82} (Pr_b)^{0,5} \left( \frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0,3} \left( \frac{c_p}{c_{pb}} \right)^n \quad (5)$$

gdje indeks  $b$  označava glavni tok fluida u cijevi, dok indeks  $w$  označava tok graničnog sloja uz stijenku cijevi. Srednja vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta  $c_p$  iz izraza (5) proračunava se pomoću narednog izraza:

$$C_p = \frac{h_w - h_b}{T_w - T_b} \quad (6)$$

Eksponent  $n$  proračunava se pomoću narednih izraza ( $T_{pc}$ -pseudokritična temperatura):

$$n = 0,4 \text{ za } T_b < T_w < T_{pc} \text{ i za } 1,2 T_{pc} < T_b < T_w \quad (7)$$

$$n = 0,4 + 0,2 \left( \frac{T_w}{T_{pc}} - 1 \right) \text{ za } T_b < T_{pc} < T_w \quad (8)$$

$$n = 0,4 + 0,2 \left( \frac{T_w}{T_{pc}} - 1 \right) \left[ 1 - 5 \left( \frac{T_b}{T_{pc}} - 1 \right) \right] \text{ za } T_{pc} < T_b < 1,2 T_{pc} \text{ i } T_b < T_w \quad (9)$$

Za proračun pseudokritične temperature  $T_{pc}$  za dani radni fluid koriste se ranije definirani korelacijski izrazi.

Zadatak je izračunati promjenu vrijednosti koeficijenta prijelaza topline, ukupnih koeficijenta prolaza topline i površina za sve segmente izmjenjivača topline, korištenjem opisanog matematičkog modela izmjenjivača topline. Navedene proračune provesti za sve karakteristične točke (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja. Dobivene rezultate prikazati u odgovarajućem dijagramu. Detaljno je opisan postupak na primjeru radnog

fluida R134a, dok su za ostale radne fluide prikazani dobiveni rezultati u odgovarajućim dijagramima u privitku 2.

#### 4.2.1. Radni fluid R134a

Na slici 4-81. prikazan je T,s-dijagram danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R134a. Odabrana je temperatura u kondenzatoru od 30°C, čime je određen i tlak u kondenzatoru. Toplinski tok se radnom fluidu u ciklusu dovodi u izmjenjivaču topline izvedenom kao cijevni izmjenjivač s plaštem. U plaštu se nalazi voda koja predaje toplinski tok radnom fluidu u cijevima. Temperatura vode se mijenja od ulazne vrijednosti  $T_{hf,in}=180^{\circ}\text{C}$  (toplinsko stanje 8) do izlazne vrijednosti  $T_{hf,out}=140^{\circ}\text{C}$  (toplinsko stanje 6), pri čemu se radni fluid zagrijava od ulazne temperature  $T_2$  (slika 4-81.) do izlazne temperature  $T_4$ . Tlak radnog fluida u cijevima je nadkritičan i kreće se u rasponu od  $P_{min}=1,1*P_{cr}$  do  $P_{max}=80$  bar. Izlazna temperatura iz izmjenjivača topline  $T_4$  može poprimiti bilo koju vrijednost unutar nadkritičnog radnog područja, koje je omeđeno karakterističnim točkama A, B, C i D. Određivanje veličine stanja 4 (ulazno stanje radnog fluida u turbinu) jedan je od ciljeva postupaka energetske, eksergetske, tehno-ekonomske i eksergo-ekonomske analize i optimiranja. U ovom radu cilj je izračunavanje vrijednosti koeficijenata prijelaza topline ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenata prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za dani radni fluid. Veličina stanja na ulasku radnog fluida u izmjenjivač topline određena je veličinom tlaka. Ako je radni tlak 80 bara, onda je temperatura  $T_2=38,6^{\circ}\text{C}$ . Za radni fluid R134a nadkritično radno područje omeđeno je narednim karakterističnim točkama:

A = temperatura 170°C i tlak 80 bar,

B = temperatura 170°C i tlak 48,71 bar,

C = temperatura 122,5°C i tlak 48,71 bar,

D = temperatura 151°C i tlak 80 bar.

Na slici 4-80. su prikazani rezultati proračuna ORC ciklusa i izmjenjivača topline za karakterističnu točku B.

Na slici 4-82. Dan je prikaz promjene vrijednosti koeficijenata prijelaza topline ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenata prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R134a. Vrijednosti

koeficijenta prijelaza topline radnog fluida  $h_C$ , kao i vrijednosti površina segmenata izmjenjivača topline  $A_{HPHX}$  duž izmjenjivača topline označene su različitim bojama. Za svaku karakterističnu točku upotrijebljene su različite boje i oznake. Na primjer za karakterističnu točku A koeficijenta prijelaza topline radnog fluida nosi oznaku  $h_{CA}$ , a površina segmenata izmjenjivača topline nosi oznaku  $A_{HPHXA}$ , te su krivulje označene zelenom bojom.

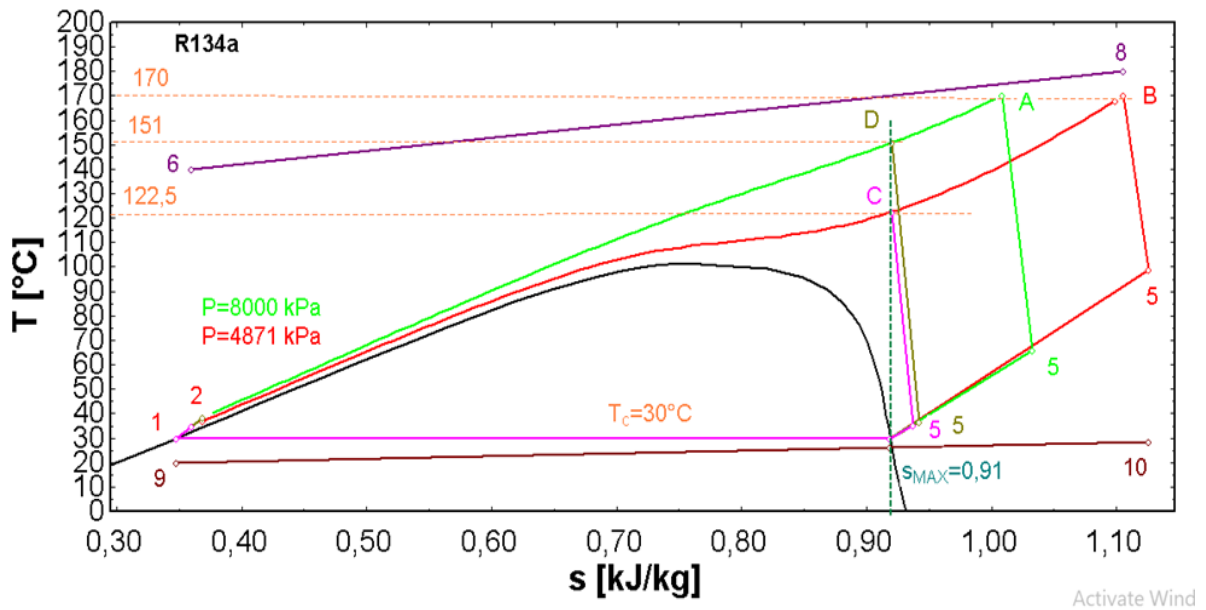
Za karakterističnu točku B korištena je crvena boja, za karakterističnu točku C korištena je ciklama boja, dok se je za karakterističnu točku D koristila sivo-maslinasta boja. Analizom rezultata prikazanih na slici 4-82. može se zaključiti da vrijednosti koeficijenta prijelaza topline radnog fluida  $h_C$  blago padaju kako se temperatura radnog fluida približava vrijednosti kritične temperature. Istovremeno vrijednosti površina segmenata izmjenjivača topline  $A_{HPHX}$  blago rastu.

U blizini kritične temperature vrijednosti koeficijenta prijelaza topline radnog fluida  $h_C$  imaju nagli skok vrijednosti, da bi nakon toga uslijedio značajan pad vrijednosti. Kako temperatura radnog fluida ima veću vrijednost s obzirom na kritičnu temperaturu tako raste vrijednosti površina segmenata izmjenjivača topline  $A_{HPHX}$ . Vrijednosti ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) do vrijednosti kritične temperature imaju konstantnu vrijednost, dok u nadkritičnom području bilježe postepen pad vrijednosti.

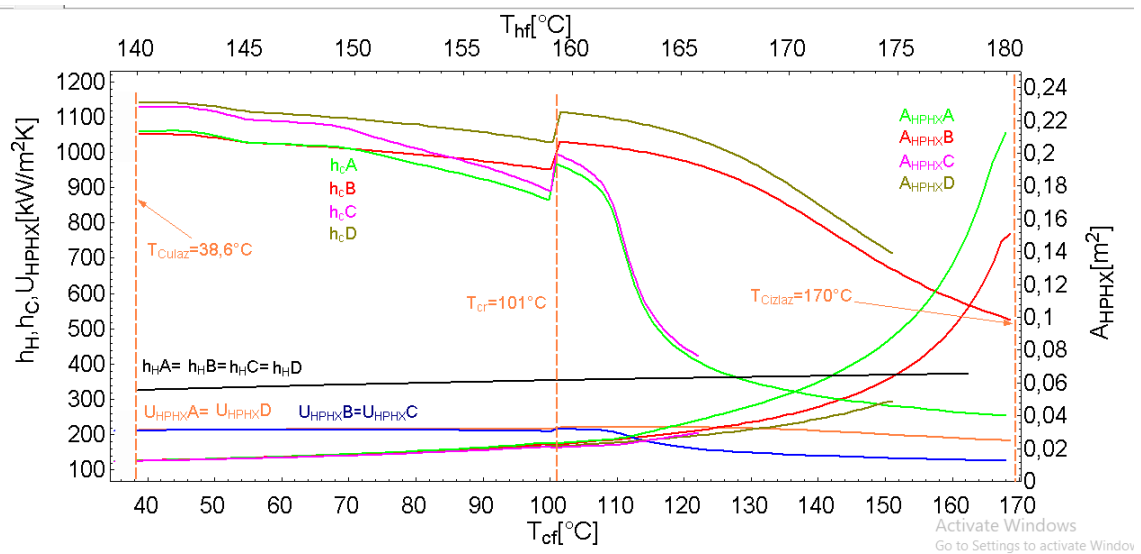
AREA <sub>HPHX</sub> = 2391 [m <sup>2</sup> ]	A <sub>HPHX</sub> ci <sub>geo</sub> = 3.871 [m <sup>2</sup> ]	A <sub>HPHX</sub> = 0.000285 [m <sup>2</sup> ]	A <sub>HPHX</sub> = 0.2653 [m <sup>2</sup> ]	β = 0.6893 [s/kg]	BWE = 0.2716
B <sub>HPHX</sub> = 0.798 [m]	C\$ = 'R134a'	CL <sub>HPHX</sub> = 1	CP <sub>ow</sub> = 1.005 [kJ/kg-K]	CP <sub>geo</sub> = 4.183 [kJ/kg-K]	CTP <sub>HPHX</sub> = 0.93
cow\$ = 'Air'	C <sub>o</sub> = 0.12 [E/kwh]	CH <sub>HPHX</sub> = 0.01143 [m]	ΔH <sub>ig</sub> = 53.81 [kJ/kg]	ΔT <sub>cond</sub> = 4 [C]	δT <sub>HP</sub> = 9.536 [C]
δT <sub>HPHX</sub> = 5 [C]	ΔTL <sub>MTO,c</sub> = 21.12 [C]	ΔTL <sub>MTO,HPHX</sub> = 39.46 [C]	d <sub>HPHX</sub> = 17764 [Pa]	d <sub>HPHX</sub> = 25733 [Pa]	D <sub>HPHX</sub> = 0.04263 [m]
D <sub>h,c</sub> = 0.01905 [m]	d <sub>HPHX</sub> = 0.01905 [m]	d <sub>HPHX</sub> = 0.02286 [m]	D <sub>HPHX</sub> = 0.9975 [m]	efectiveness <sub>EN,PLANT</sub> = 0.25	efectiveness <sub>EX,PLANT</sub> = 0.3862
ε <sub>CON</sub> = 0.2316	ε <sub>HPHX</sub> = 0.6799 [s/kg]	ε <sub>P</sub> = 0.5114	ε <sub>T</sub> = 0.8662	ε <sub>tot</sub> = 0.1548 [s/kg]	ε <sub>1</sub> = 27.62 [kJ/kg]
É <sub>10</sub> = 174.3 [kJ/kg]	É <sub>2</sub> = 465.6 [kJ/kg]	É <sub>4</sub> = 4276 [kJ/kg]	É <sub>5</sub> = 635.8 [kJ/kg]	É <sub>6</sub> = 13901 [kJ/s]	É <sub>8</sub> = 8296 [kJ/s]
É <sub>g</sub> = 0 [kJ/kg]	É <sub>DL,tot</sub> = 11748	É <sub>D,CON</sub> = 578.2 [kJ/kg]	É <sub>D,HPHX</sub> = 1794 [kJ/kg]	É <sub>D,p</sub> = 418.5 [kJ/kg]	É <sub>D,realHPHX</sub> = 1794 [kJ/kg]
É <sub>D,T</sub> = 487.2 [kJ/kg]	É <sub>D,tot</sub> = 3278 [kJ/kg]	É <sub>F,CON</sub> = 752.5 [kJ/kg]	É <sub>F,HPHX</sub> = 5605 [kJ/s]	É <sub>F,p</sub> = 856.5 [kJ/kg]	É <sub>F,T</sub> = 3640 [kJ/kg]
É <sub>F,tot</sub> = 13901 [kJ/s]	É <sub>in</sub> = 13901 [kJ/s]	É <sub>L,CON</sub> = 174.3 [kJ/kg]	É <sub>L,HPHX</sub> = 8296 [kJ/s]	É <sub>L,p</sub> = 0	É <sub>L,T</sub> = 0
É <sub>L,tot</sub> = 8470	É <sub>P,CON</sub> = 174.3 [kJ/kg]	É <sub>P,HPHX</sub> = 3811 [kJ/kg]	É <sub>P,p</sub> = 438 [kJ/kg]	É <sub>P,T</sub> = 3153 [kJ/kg]	É <sub>P,tot</sub> = 2152 [kJ/s]
F = 1	f <sub>c</sub> = 0.01	f <sub>CSr</sub> = 0.01841	f <sub>HPHX</sub> = 0.202	γ = 28.72 [s/kg]	geo\$ = 'water'
G <sub>HPHX</sub> = 376.9 [kg/s-m <sup>2</sup> ]	G <sub>HPHX</sub> = 391.5 [kg/m <sup>2</sup> -s]	H\$ = 'water'	h <sub>1</sub> = 93.58 [kJ/kg]	h <sub>10</sub> = 300.8 [kJ/kg]	h <sub>2</sub> = 106 [kJ/kg]
h <sub>2s</sub> = 102.3 [kJ/kg]	h <sub>4</sub> = 348.7 [kJ/kg]	h <sub>5</sub> = 303 [kJ/kg]	h <sub>5s</sub> = 294.9 [kJ/kg]	h <sub>6</sub> = 763.2 [kJ/kg]	h <sub>8</sub> = 589.7 [kJ/kg]
h <sub>g</sub> = 293.5 [kJ/kg]	h <sub>c</sub> = 266.7 [kJ/kg]	h <sub>cw</sub> = 299.6 [kJ/kg]	h <sub>o</sub> = 79.32 [kJ/kg]	h <sub>o,cw</sub> = 293.5 [kJ/kg]	h <sub>o,geo</sub> = 83.84 [kJ/kg]
i <sub>C,in</sub> = 106 [kJ/kg]	i <sub>C,out</sub> = 348.7 [kJ/kg]	İ <sub>c</sub> = 578.2 [kJ/s]	İ <sub>CA</sub> = 174.3 [kJ/s]	İ <sub>cycle</sub> = 3278 [kJ/s]	İ <sub>HPHX</sub> = 1794 [kJ/s]
İ <sub>p</sub> = 418.5 [kJ/kg]	İ <sub>plant</sub> = 11748 [kJ/s]	İ <sub>planta</sub> = 11748 [kJ/s]	İ <sub>rej</sub> = 8296 [kJ/s]	İ <sub>t</sub> = 487.2 [kJ/kg]	İ <sub>H,in</sub> = 763.2 [kJ/kg]
İ <sub>H,out</sub> = 589.7 [kJ/kg]	Length <sub>HPHX1</sub> = 53.9 [m]	Length <sub>HPHX2</sub> = 53.9 [m]	İ <sub>owHPHX</sub> = 0.0001721 [kg/m-s]	İ <sub>owHPHX</sub> = 0.0002129 [kg/m-s]	İ <sub>C</sub> = 68.93 [kg/s]
m <sub>cw</sub> = 1980	m <sub>geo</sub> = 100 [kg/s]	m <sub>H</sub> = 100 [kg/s]	m <sub>wf</sub> = 68.93 [kg/s]	N = 100	N <sub>HPHX</sub> = 66.54
n <sub>cycle,EN</sub> = 12.86	n <sub>cycle,EX</sub> = 43.23	N <sub>HPHX</sub> = 100	n <sub>12a</sub> = 12.86 [kg/s]	n <sub>III</sub> = 56.48 [kg/s]	n <sub>p</sub> = 0.7
N <sub>HPHX</sub> = 1	n <sub>plant,EN</sub> = 3.216	n <sub>plant,EX</sub> = 16.7	n <sub>t</sub> = 0.85	n <sub>HPHX</sub> = 617.8	n <sub>turbine</sub> = 14515
P <sub>1</sub> = 770.6 [kPa]	P <sub>10</sub> = 101.3 [kPa]	P <sub>2</sub> = 8000 [kPa]	P <sub>2s</sub> = 8000 [kPa]	P <sub>4</sub> = 8000 [kPa]	P <sub>5</sub> = 770.6 [kPa]
P <sub>6</sub> = 1000 [kPa]	P <sub>8</sub> = 1000 [kPa]	P <sub>9</sub> = 101.3 [kPa]	P <sub>c</sub> = 770.6 [kPa]	P <sub>cw</sub> = 101.3 [kPa]	P <sub>C,in</sub> = 8000 [kPa]
P <sub>geo</sub> = 1000 [kPa]	P <sub>geo,sr</sub> = 1000 [kPa]	P <sub>H,in</sub> = 1000 [kPa]	P <sub>loss</sub> = 0 [kPa]	P <sub>o</sub> = 101.3 [kPa]	P <sub>HPHX</sub> = 0.03429 [m]

Slika 4-80: Prikaz rezultata proračuna ORC ciklusa i izmjenjivača topline za karakterističnu točku B





Slika 4-81: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R134a



Slika 4-82: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R134a

## 5. ZAKLJUČAK

U završnom radu provedena je analiza promjena vrijednosti bitnih termofizikalnih veličina danih radnih fluida u nadkritičnom području. U analizi su korišteni matematički modeli za proračun termofizikalnih veličina upotrebom programskog paketa EES (Engineering Equation Solver). Nakon definiranja korelacija za izračun pseudokritične temperature proveden je proračun koeficijenta prijelaza topline u nadkritičnim uvjetima za sve karakteristične točke nadkritičnog radnog područja. Analiza je provedena na primjeru ORC postrojenja za iskorištavanje otpadne topline iz industrijskih procesa.

U blizini kritične točke vrijednosti termofizikalnih svojstava mijenjaju se skokovito. S porastom radnog tlaka, ovakve skokovite promjene vrijednosti termofizikalnih svojstava postaju manje izražene. Termofizikalna svojstva radnog fluida poput gustoće i dinamičke viskoznosti ostvaruju nagli pad vrijednosti (u blizini kritične točke taj pad je gotovo okomit) u vrlo uskom temperaturnom intervalu blizu kritične temperature. Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinske vodljivosti radnog fluida u blizini kritične temperature ostvaruju skokoviti porast vrijednosti nakon čega slijedi (jednako) nagli pad vrijednosti. Što je nadkritični tlak veće vrijednosti, to je ovakva pojava manje intenzivna. Vrijednosti dinamičke viskoznosti i toplinske vodljivosti radnog fluida ostvaruju svoj minimum odmah nakon kritične temperature, odnosno pri pseudokritičnoj temperaturi. Specifični toplinski kapacitet radnog fluida ostvaruje maksimalnu vrijednost kod pseudokritične temperature. S porastom nadkritičnog tlaka povećava se vrijednost pseudokritične temperature, dok pripadajuća maksimalna vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta postaje sve manja, te skokovita promjena vrijednosti postaje sve slabije izražena.

Glavni doprinos ovog završnog rada je definiranje korelacija za izračun vrijednosti pseudokritične temperature  $T_{pc}$  u ovisnosti o kritičnom tlaku  $P_{cr}$  za 10 danih radnih fluida. U znanstvenoj literaturi nisu objavljene korelacije ovakvog tipa. Navedene korelacije koriste se zajedno s Jackson-ovim izrazom za izračun nadkritičnog koeficijenta prijelaza topline u nadkritičnim uvjetima.

Pri nadkritičnim tlakovima vrijednosti koeficijenta prijelaza topline radnog fluida blago padaju kako se temperatura radnog fluida približava vrijednosti kritične temperature. Ta pojava ima za posljedicu da vrijednosti površina segmenata izmjenjivača topline blago

rastu. U blizini kritične temperature koeficijent prijelaza topline radnog fluida (sa strane cijevi) ostvaruje nagli skok vrijednosti, da bi nakon toga uslijedio jednako nagli pad vrijednosti. Kako temperatura radnog fluida ima veću vrijednost s obzirom na kritičnu temperaturu, tako se značajno smanjuje vrijednost koeficijenta prijelaza topline, zbog čega značajno rastu vrijednosti površina segmenata izmjenjivača topline.

Kako bi se izbjegle navedene pojave skokovite promjene termofizikalnih svojstava radnog fluida u blizini kritične točke preporuka je da najveći podkritični tlak u ORC postrojenju ima vrijednost devedeset posto od vrijednosti kritičnog tlaka, ili da najniži nadkritični tlak bude barem za deset posto veće vrijednosti od kritičnog tlaka.

Kod radnih fluida čija je vrijednost kritične temperature nešto niže vrijednosti od temperature izvora topline u izmjenjivaču topline biti će relativno malo područje s nadkritičnim parametrima radnog fluida, tako da će se uvelike izbjeći pojava značajnog povećanja površine.

## LITERATURA

- [1] Piro I., Duffey R.: "Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications", ASME Press; 328 p., 2007
- [2] Gupta S., Saltanov E., Mokry S.J, Piro I., Trevani L., McGillivray D.: " Developing empirical heat-transfer correlations for supercritical CO<sub>2</sub> flowing in vertical bare tubes", Nucl. Eng.Des. 2013, 261, 116-31
- [3] Kirillov P., Lozhkin V., Smirnov A.: " Investigation of borders of deteriorated regimes of a channel at supercritical pressures", (in Russian), State Scientific Center of Russian Federation Institute of Physics and Power Engineering A.I. Leypunskiy, FEI-2988, 2003., 20 p., Obninsk, Russia
- [4] Piro I.: " Thermophysical properties at critical and supercritical pressures", Section 5.5.16 in „Heat exchanger design handbook“, Begell House, 14 p., 2008., New York, NY, USA
- [5] Piro I. " Heat transfer to supercritical fluids", Section 2.2.10 in „Heat exchanger design handbook“, Begell House, 14 p., 2008., New York, NY, USA
- [6] National Institute of Standards and Technology: " NIST reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP", NIST Standard Reference Database 23, Ver. 9.0., 2010, Boulder, CO, U.S.
- [7] EES–Engineering Equation Solver, Version 03.012,2016, F-Chart Software, <http://fchartsoftware.com>
- [8] Bell I., Wronski J., Quoilin S., Lemort V.: "Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp", Industrial & engineering chemistry research, 53 (6), 2498-2508, 2014.
- [9] Piro I, Duffey R.: "Experimental heat transfer to supercritical water flowing inside channels (Survey)", Nucl. Eng. Des., 2005, 235(22), 2407-2430
- [10] Duffey R., Piro I.: "Experimental heat transfer of supercritical carbon dioxide flowing inside channels (Survey)", Nucl. Eng. Des., 2005, 235(8), 913-924.
- [11] Richards G., Harvel G., Piro I., Shelegov A., Kirillov P.: "Heat transfer profiles of a vertical, bare, 7-element bundle cooled with supercritical freon R-12", Nucl. Eng. Des., 2013, 264: 246-256
- [12] Richards G., Piro I., Harvel G., Shelegov A., Kirillov P.: " Temperature profiles of a vertical, 7-element bundle cooled with supercritical freon-12", Journal of Energy Power. Eng. 2013, 7(2), 207-218

- [13] Razumovskiy V., Pis'menny E., Koloskov A., Pirol I.: "Heat transfer to supercritical water in vertical 7-rod bundle", In: Proceedings of the 16th international conference on nuclear engineering (ICONE-16), Orlando, Florida, USA, May 11-15, Paper #48954, 6 p. 2008.
- [14] Yamagata K., Nishikawa K., Hasegawa S.: "Forced convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1972, 15(12):2575-2593.
- [15] Styrikovich M., Margulova T., Miropol'skii Z.: "Problems in the development of designs of supercritical boilers", *Thermal Engineering (in Russian)*, 1967, 14(6), 5-9.
- [16] Vikhrev Y., Barulin Y., Kon'kov A.: "A study of heat transfer in vertical tubes at supercritical pressures", *Thermal Engineering (Teploenergetika str 80-82)* 1967, 14(9), 116-119
- [17] Vikhrev Y., Kon'kov A., Lokshin V.: "Temperature regime of steam generating tubes at supercritical pressure", (in Russian), *Transactions of the IVth all-union conference on heat transfer and hydraulics at movement of two-phase flow inside elements of power engineering machines and apparatuses*, Leningrad, Russia, 1971. p. 21-40
- [18] Ackerman J.: "Pseudoboiling heat transfer to supercritical pressure water in smooth and ribbed tubes", *Journal of Heat Transfer, Transactions ASME* 1970, 92(3), 490-498 (Paper No. 69-WA/HT-2, p. 1-8).
- [19] Kafengaus L.: "About some peculiarities in fluid behaviour at supercritical pressure in conditions of intensive heat transfer", *Appl. Thermal Sci.*, 1986, 8(5), 26-28
- [20] Kafengaus L.: "The mechanism of pseudoboiling", *Heat Transfer-Sov. Res.*, 1975, 7(4), 94-100
- [21] Krasnyakova L.Y., Raykin Y.M., Belyakov I.: "Investigation of temperature regime of heated tubes at supercritical pressure", (in Russian), *Sov. Energy Technology*, 1967, 1, 1-4.
- [22] Shiralkar B., Griffith P.: "The effect of swirl, inlet conditions, flow direction, and tube diameter on the heat transfer to fluids at supercritical pressure", *Journal for Heat Transfer, Trans ASME* August 1970, 92(3) 465-474
- [23] Lee R., Haller K.: "Supercritical water heat transfer developments and applications". In: *Proc. 5th Int. Heat transfer Conference (IHTC)*, Tokyo, Japan, September 3-7, vol. IV, 1974., Paper No. B7,7, p. 335-339.

- [24] Dittus F., Boelter L.: "Heat transfer in automobile radiators of the tubular type", University of California, Berkeley, Publications in engineering, vol. 2, No. 13, 1930. p. 443-461 (or Int. Commun. Heat Mass Transfer 1985, 12, 3-22)
- [25] McAdams W. „Heat transmission“, 2nd ed., New York, NY, USA, McGraw-Hill, 1942, p. 459
- [26] Piroo I., Kirillov P., Mokry S., Gospodinov Y.: " Supercritical water heat transfer in a vertical bare tube: normal, improved and deteriorated regimes", In: Proc. 2008 international congress on advances in nuclear power plants (ICAPP'08), Anaheim, CA, USA, June 8-12, Paper #8333, 10 p., 2008.
- [27] Mokry S., Piroo I., Farah A., King K., Gupta S., Peiman W.: "Development of supercritical water heat-transfer correlation for vertical bare tubes", Nuclear Eng. Des., 2011, 241, 1126-1136
- [28] Vanyukova G., Kuznetsov Y., Loninov A., Papandin M., Smirnov V., Piroo I.: " Application of CFD-code to calculations of heat transfer in a fuel bundle of SCW pressure-channel reactor", In: Proc. 4th Int. Symp. on supercritical watercooled reactors, March 8-11, Heidelberg, Germany, Paper No. 28, 9 p., 2009.
- [29] Farah A., Kinakin M., Harvel G., Piroo I.: " Study of selected turbulent models for supercritical water heat transfer in vertical bare tubes using CFD code FLUENT-12", In: Proceedings of the 19th international conference on nuclear engineering (ICONE-19), Makuhari, Japan, May 16-19, Paper 43492, 9 p., 2011.
- [30] Zahlan H., Groeneveld D., Tavoularis S.: " Look-up table for transcritical heat transfer", Proc. 2nd Canada-China joint workshop on supercritical water-cooled reactors (CCSC-2010), Toronto, Ontario, Canada: Canadian Nuclear Society (CNS), April 25-28, 2010.
- [31] Zahlan H., Groeneveld D., Tavoularis S., Mokry S., Piroo I.: " Assessment of supercritical heat transfer prediction methods", In: Proc. 5th Int. Symp. on SCWR (ISSCWR-5), Vancouver, BC, Canada, March 13-16, Paper P08, 20 p. 2011.
- [32] Piroo I., Khartabil H., Duffey R.: "Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels - empirical correlations", Nucl. Eng. Des. 2004, 230(1-3), 69-91.
- [33] Bishop A., Sandberg R., Tong L.: "Forced convection heat transfer to water at near-critical temperatures and supercritical pressures", AIChE I. Chem. E. Symp. Series 1965, 2, 77-85.

- [34] Swenson H., Carver J., Kakarala C.: "Heat transfer to supercritical water in smooth-bore tubes", *J. Heat Transfer, Trans. ASME, Series C* 1965, 87(4), 477-484
- [35] Krasnoshchekov E., Protopopov V., Van F., Kuraeva I.: "Experimental investigation of heat transfer for carbon dioxide in the supercritical region", In: Gazley C., Hartnett J., Ecker E. (editors): *Proc. 2nd All-Soviet Union Conf. on heat and mass transfer*, Minsk, Belarus, May, 1964, vol. 1. Published as Rand Report R-451-PR, 1967., p. 26-35
- [36] Watts M., Chou C.: "Mixed convection heat transfer to supercritical pressure water", In: *Proc. 7th int. heat transfer conference (IHTC)*, Munich, Germany 1982, 495-500
- [37] Griem H.: "A new Procedure for the at near- and supercritical prediction pressure of forced convection heat transfer", *Heat and Mass Transfer*, 1996, 3, 301-305
- [38] Jackson J.: "Consideration of the heat transfer properties of supercritical pressure water in connection with the cooling of advanced nuclear reactors", In: *Proc. 13th Pacific Basin nuclear conference*, Shenzhen City, China, October 21-25, 2002
- [39] Mokry S., Farah A., King K., Gupta S., Pioro I., Kirillov P.: "Development of supercritical water heat-transfer correlation for vertical bare tubes", In: *Proc. int. conf. Nuclear energy for New Europe*, Bled, Slovenia, September 14-17, Paper #210, 13 p., 2009
- [40] Kuang B., Zhang Y., Cheng X.: "A new, wide-ranged heat transfer correlation of water at supercritical pressures in vertical upward ducts", *NUTHOS-7*, Seoul, Korea, October 5-9, 2008
- [41] Cheng X., Yang Y., Huang S.: "A simple heat transfer correlation for SC fluid flow in circular tubes", *NURETH-13*, Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, September 27-October 2, 2009
- [42] Hadaller G., Banerjee S.: "Heat transfer to superheated steam in round tubes", *AECL Report*, 1969.
- [43] Seider N., Tate G.: "Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes", *Ind. Eng. Chem.* 1936, 28(12), 1429-1435
- [44] Gnielinski V.: "New equation for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", *Int. Chem. Eng.*, 1976, 16(2), 359-366

# PRIVITAK

## 1.Privitak

### Termofizikalna svojstva radnih fluida u blizini nadkritične točke i određivanje vrijednosti pseudokritične temperature

#### 1.1. Radni fluid R32

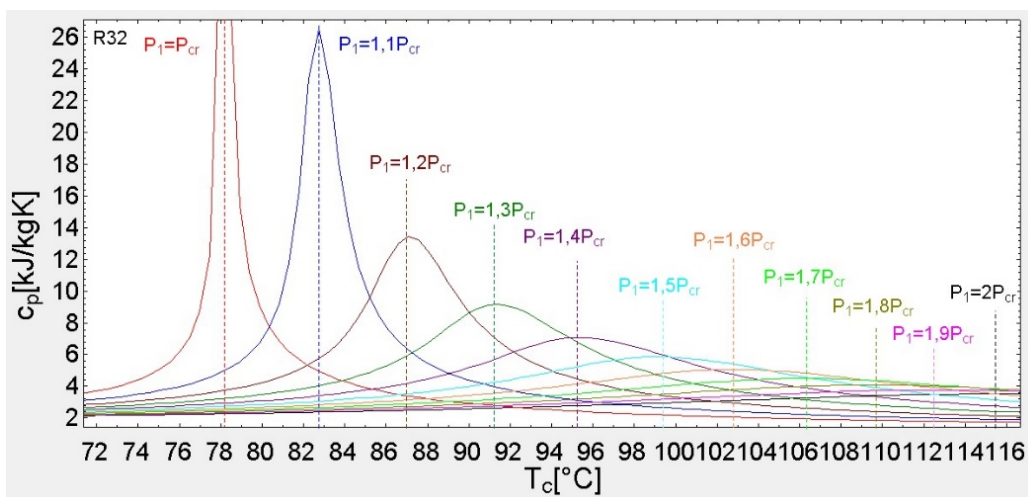
Sort	$c_{pi}$ [kJ/kg·K]	$k_i$ [W/m·K]	$\mu_i$ [kg/m·s]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T_i$
[72]	3,742	0,1162	0,0001683	700,3	72,19
[73]	3,883	0,1146	0,0001674	693,7	72,67
[74]	4,045	0,113	0,0001665	686,7	73,15
[75]	4,236	0,1113	0,0001655	679,2	73,63
[76]	4,464	0,1095	0,0001644	671,2	74,11
[77]	4,742	0,1075	0,0001632	662,6	74,59
[78]	5,092	0,1054	0,0001619	653,2	75,07
[79]	5,55	0,1032	0,0001605	642,8	75,55
[80]	6,181	0,1006	0,0001588	631,1	76,03
[81]	7,123	0,09775	0,0001568	617,4	76,51
[82]	8,727	0,0943	0,0001543	600,7	76,99
[83]	12,28	0,08975	0,0001508	578,1	77,47
[84]	31,3	0,08171	0,0001441	536,1	77,95
[85]	29,69	0,04598	0,00002174	307,1	78,43
[86]	15,42	0,04272	0,00002077	281,2	78,91
[87]	11,2	0,04094	0,00002025	266,4	79,39
[88]	9,068	0,0397	0,00001989	255,8	79,87
[89]	7,757	0,03874	0,00001962	247,4	80,35
[90]	6,857	0,03796	0,0000194	240,4	80,83
[91]	6,194	0,0373	0,00001922	234,5	81,31
[92]	5,682	0,03674	0,00001907	229,3	81,79
[93]	5,274	0,03625	0,00001894	224,6	82,27
[94]	4,939	0,03581	0,00001882	220,4	82,75
[95]	4,659	0,03541	0,00001872	216,6	83,23
[96]	4,42	0,03506	0,00001863	213,1	83,71
[97]	4,214	0,03472	0,00001855	209,9	84,19

Slika 4-9: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R32

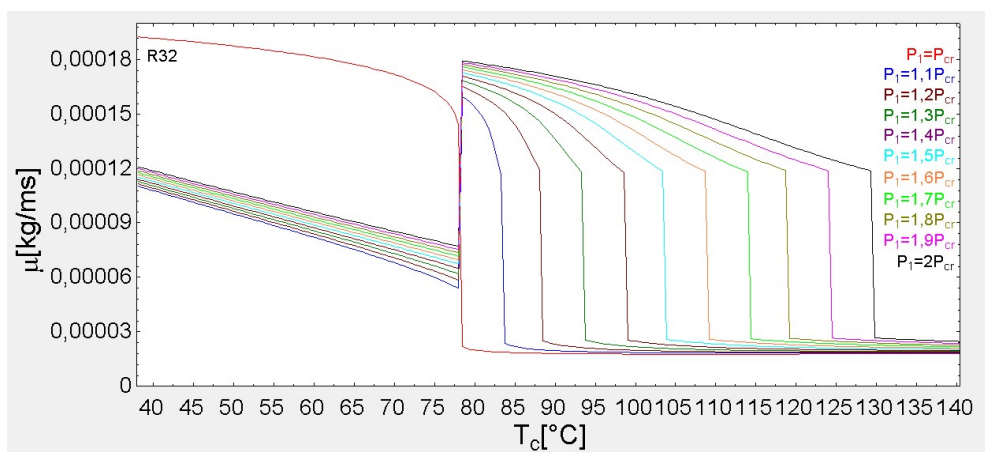
Lookup 1	T	Cp	P
Row 1	78,43	29,69	5784
Row 2	82,75	26,57	6362
Row 3	87,07	13,44	6941
Row 4	91,39	9,166	7519
Row 5	95,23	7,076	8098
Row 6	99,07	5,854	8676
Row 7	102,9	5,055	9254
Row 8	106,3	4,496	9833
Row 9	109,1	4,083	10411
Row 10	112,5	3,768	10990
Row 11	115,4	3,519	11568

Slika 4-10: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R32

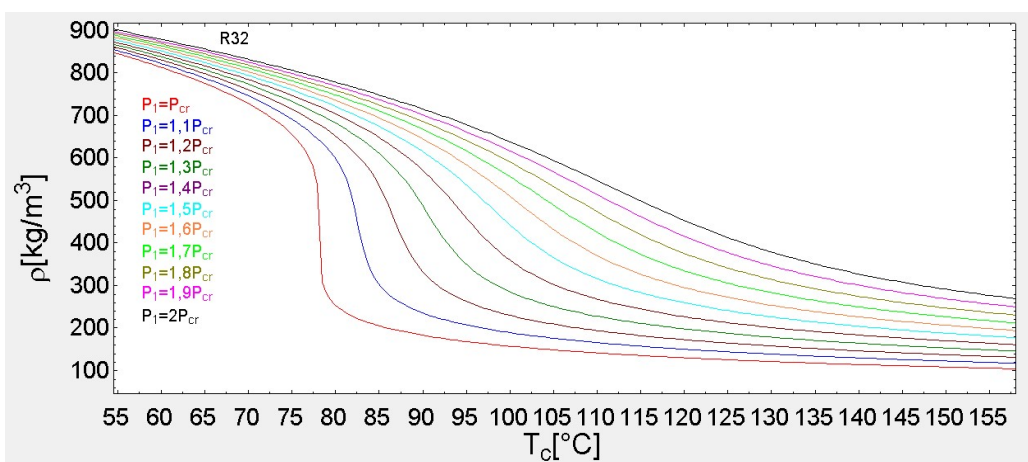




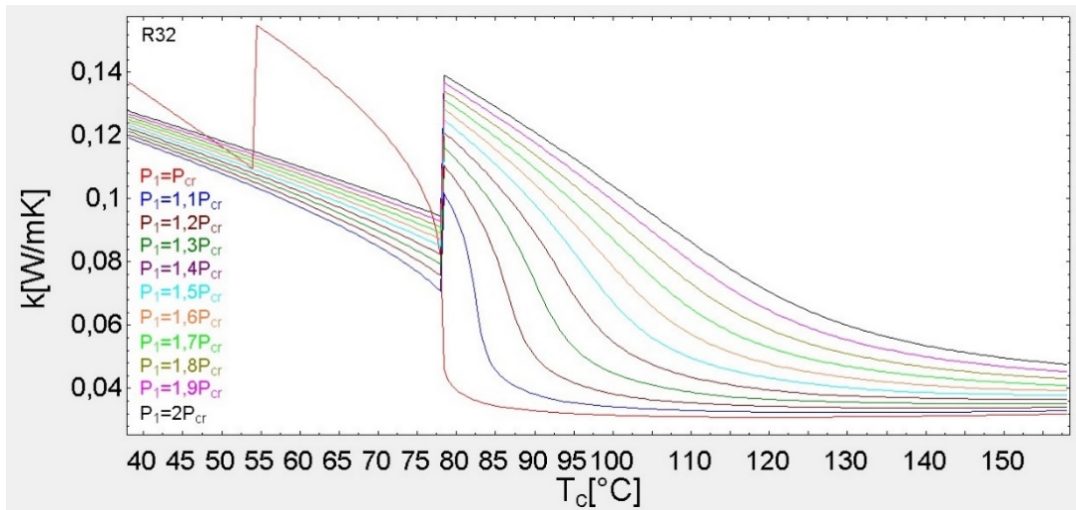
Slika 4-11: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R32



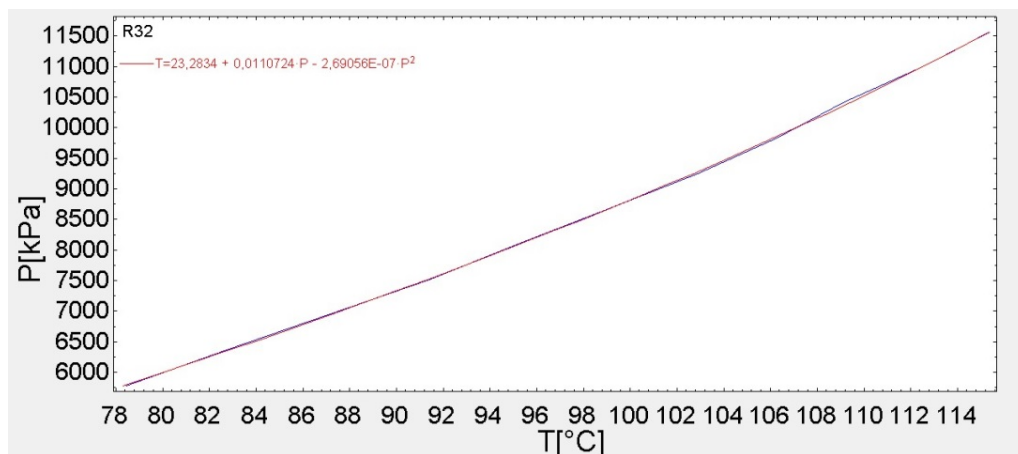
Slika 4-12: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R32



Slika 4-13: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R32



Slika 4-14: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R32



Slika 4-15: Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R32

Linear Regression Coefficients

	Value	Std. Error
a0	2,328340E+01	9,851330E-01
a1	1,107237E-02	2,340878E-04
a2	-2,690557E-07	1,343246E-08

No. points = 11  
rms = 1,3163E-01  
bias = 6,3081E-18  
R<sup>2</sup> = 99,99%

Copy to Clipboard

OK

Slika 4-16: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R32

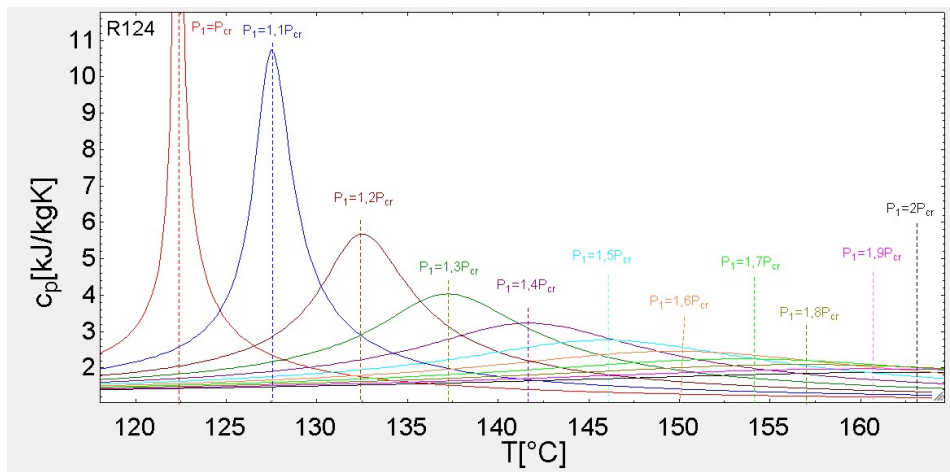
## 1.2. Radni fluid R124

Sort	1 $c_{p_i}$	2 $k_i$	3 $\mu_i$	4 $\rho_i$	5 $T_i$
[76]	2,46	0,04169	0,0001856	850,3	118,3
[77]	2,514	0,04151	0,000185	845,9	118,5
[78]	2,572	0,04133	0,0001844	841,3	118,7
[79]	2,638	0,04114	0,0001838	836,5	118,9
[80]	2,71	0,04093	0,0001832	831,6	119,1
[81]	2,792	0,04073	0,0001826	826,4	119,3
[82]	2,884	0,04051	0,0001819	821	119,6
[83]	2,99	0,04028	0,0001811	815,2	119,8
[84]	3,112	0,04003	0,0001803	809,2	120
[85]	3,256	0,03978	0,0001795	802,7	120,2
[86]	3,428	0,0395	0,0001786	795,8	120,4
[87]	3,638	0,0392	0,0001776	788,3	120,6
[88]	3,902	0,03888	0,0001764	780,1	120,8
[89]	4,245	0,03853	0,0001752	771	121
[90]	4,713	0,03813	0,0001738	760,7	121,3
[91]	5,396	0,03767	0,0001722	748,7	121,5
[92]	6,51	0,03711	0,0001701	734,2	121,7
[93]	8,719	0,03639	0,0001674	715,1	121,9
[94]	15,84	0,03527	0,000163	684,6	122,1
[95]	47,98	0,02825	0,00002636	467,5	122,3
[96]	14,97	0,02703	0,00002473	422,7	122,5
[97]	9,937	0,02652	0,00002404	402,9	122,8
[98]	7,749	0,02619	0,00002359	389,5	123
[99]	6,493	0,02595	0,00002326	379,2	123,2
[100]	5,667	0,02575	0,00002299	370,8	123,4
[101]	5,077	0,02559	0,00002277	363,7	123,6

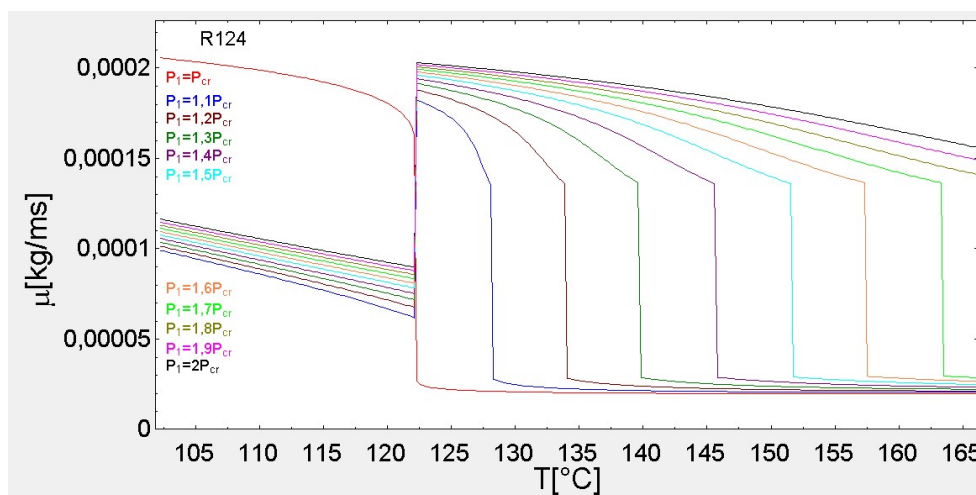
Slika 4-17: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{p_i}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R124

	1 $c_p$	2 $T$	3 $P$
<b>Row 1</b>	47,98	122,3	3624
Row 2	10,75	127,4	3987
Row 3	5,678	132,6	4349
Row 4	4,03	137,3	4712
Row 5	3,228	141,5	5074
Row 6	2,76	145,6	5436
Row 7	2,457	149,6	5798
Row 8	2,246	153,3	6161
Row 9	2,091	156,5	6524
Row 10	1,974	160,1	6886
Row 11	1,881	162,2	7248

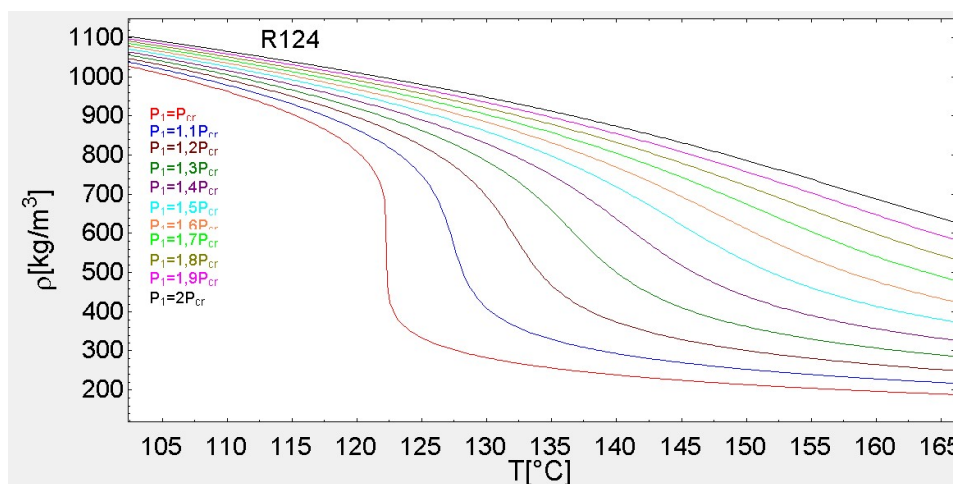
Slika 4-18: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R124



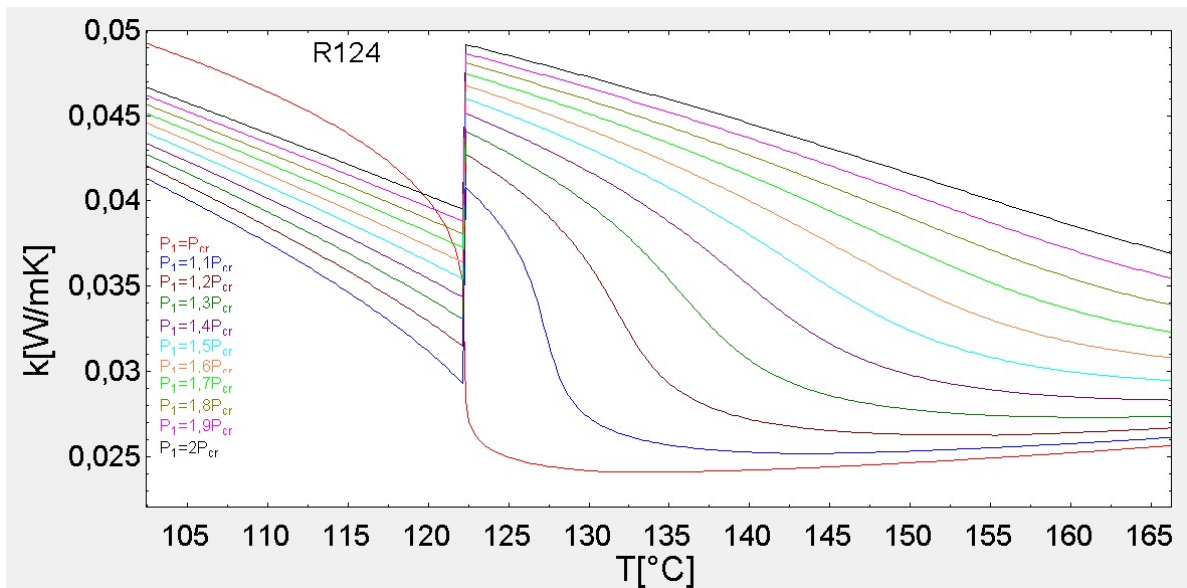
Slika 4-19: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R124



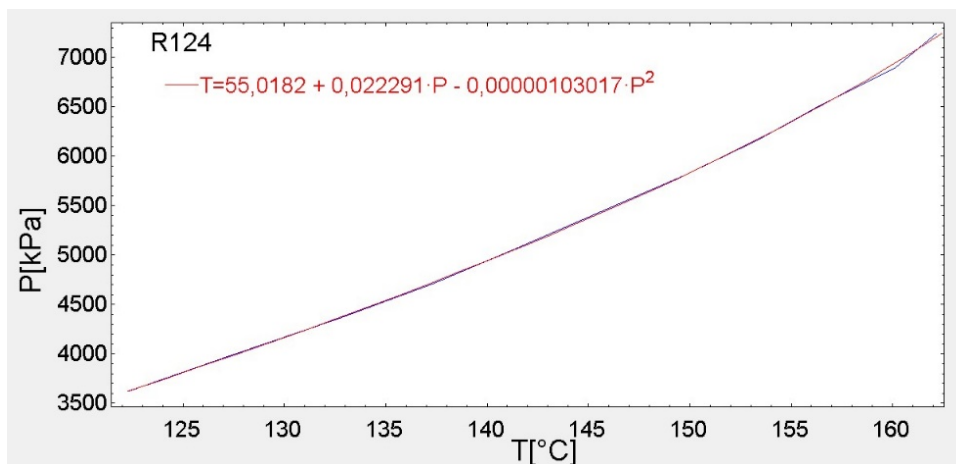
Slika 4-20: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R124a



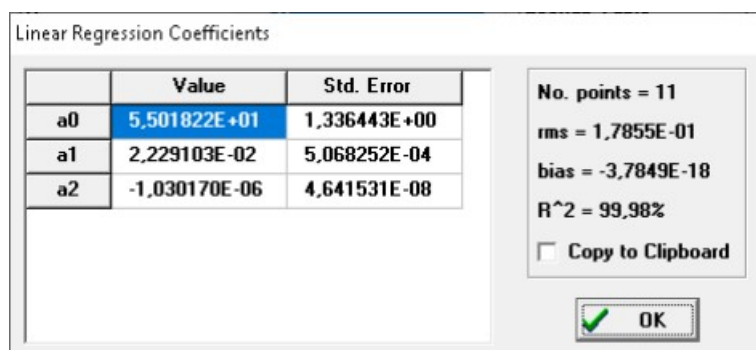
Slika 4-21: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R124



Slika 4-22: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkričnog tlaka za radni fluid R124



Slika 4-23: Prikaz ovisnosti pseudokrične temperature o nadkričnom tlaku za radni fluid R124



Slika 4-24: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R124

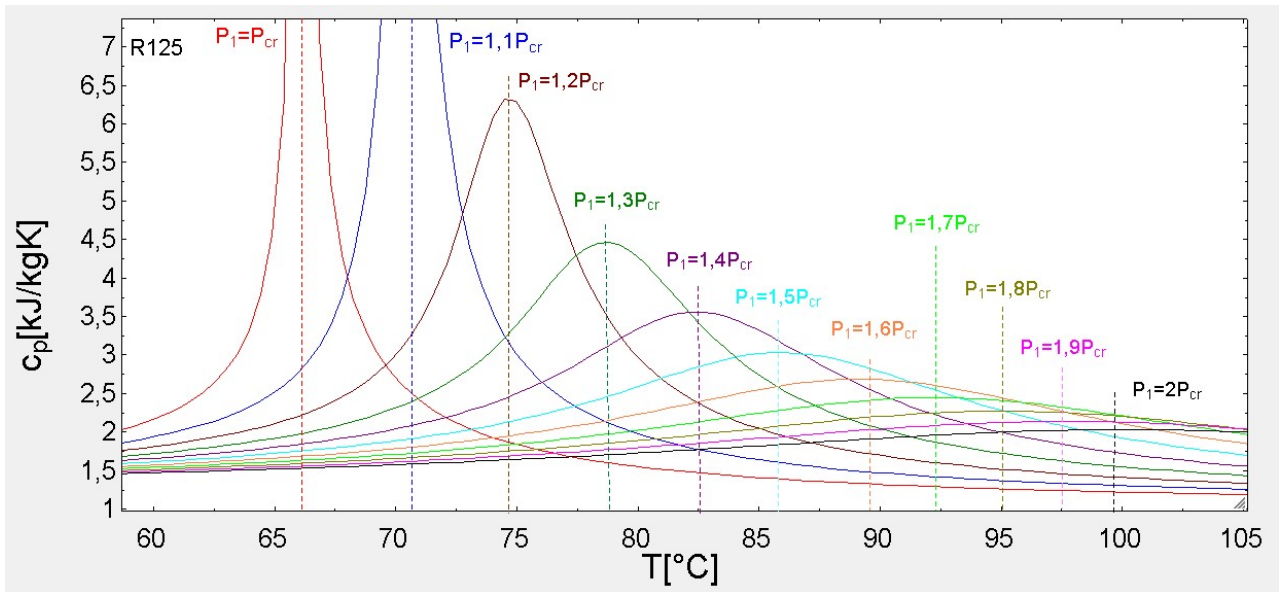
### 1.3. Radni fluid R125

Sort	1 $c_{p_i}$ [kJ/kg-K]	2 $k_i$ [W/m-K]	3 $\mu_i$ [kg/m-s]	4 $\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	5 $T_i$
[69]	2,028	0,04618	0,00007633	948,4	58,66
[70]	2,072	0,04584	0,00007507	941,1	59,14
[71]	2,122	0,04548	0,00007377	933,5	59,62
[72]	2,179	0,04512	0,00007243	925,5	60,1
[73]	2,243	0,04474	0,00007106	917,1	60,58
[74]	2,318	0,04434	0,00006964	908,2	61,06
[75]	2,406	0,04393	0,00006816	898,8	61,54
[76]	2,512	0,04349	0,00006661	888,7	62,02
[77]	2,642	0,04302	0,00006499	877,7	62,5
[78]	2,806	0,04251	0,00006326	865,7	62,98
[79]	3,023	0,04196	0,0000614	852,4	63,46
[80]	3,323	0,04135	0,00005936	837,3	63,94
[81]	3,777	0,04064	0,00005706	819,6	64,42
[82]	4,562	0,03978	0,00005436	797,6	64,9
[83]	6,336	0,03864	0,00005088	767,5	65,38
[84]	16,45	0,03651	0,00004487	709,1	65,86
[85]	13,39	0,02708	0,00002553	419	66,34
[86]	7,119	0,02608	0,00002412	385	66,82
[87]	5,242	0,02553	0,00002338	365,5	67,3
[88]	4,299	0,02515	0,00002288	351,6	67,78
[89]	3,72	0,02487	0,00002251	340,6	68,26
[90]	3,325	0,02464	0,00002221	331,5	68,74
[91]	3,035	0,02445	0,00002197	323,7	69,22
[92]	2,813	0,02429	0,00002176	316,9	69,7
[93]	2,636	0,02415	0,00002158	310,8	70,18
[94]	2,492	0,02403	0,00002142	305,4	70,66

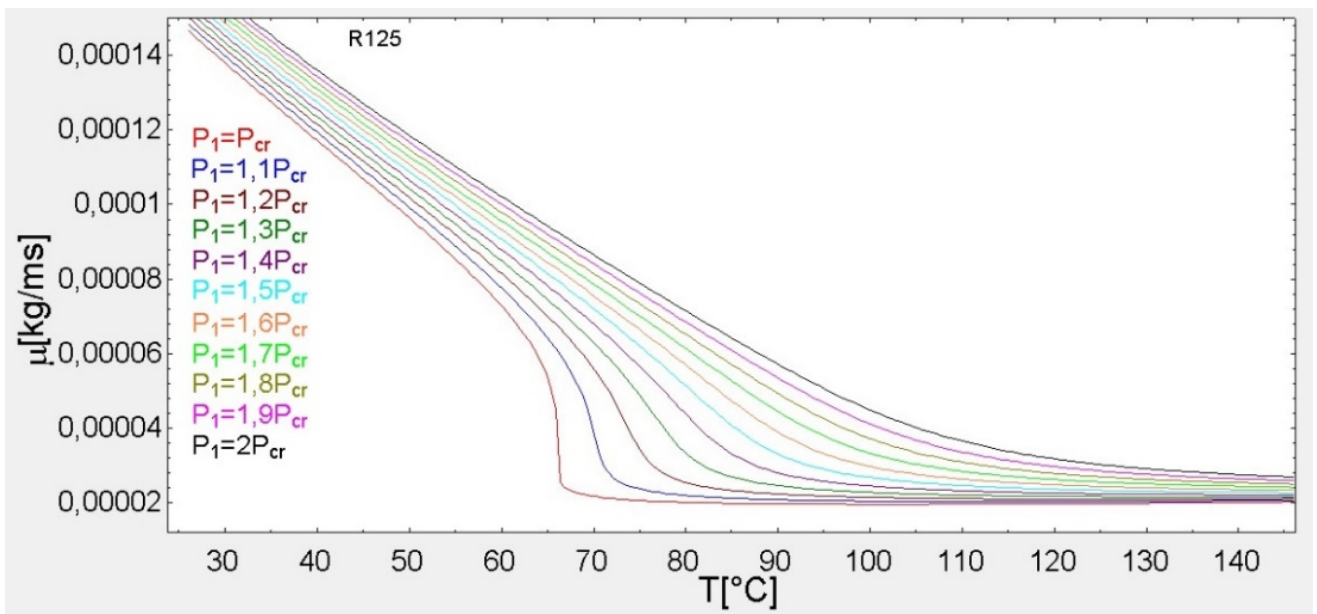
Slika 4-25: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{p_i}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R125

	1 T	2 $C_p$	3 P
Row 1	65,86	16,45	3618,00
Row 2	70,66	11,87	3979,80
Row 3	74,5	6,328	4341,60
Row 4	78,82	4,466	4703,40
Row 5	82,18	3,558	5065,20
Row 6	86,02	3,03	5427,00
Row 7	88,9	2,686	5788,80
Row 8	91,78	2,447	6150,60
Row 9	95,14	2,272	6512,40
Row 10	97,54	2,138	6874,20
Row 11	99,94	2,033	7236,00

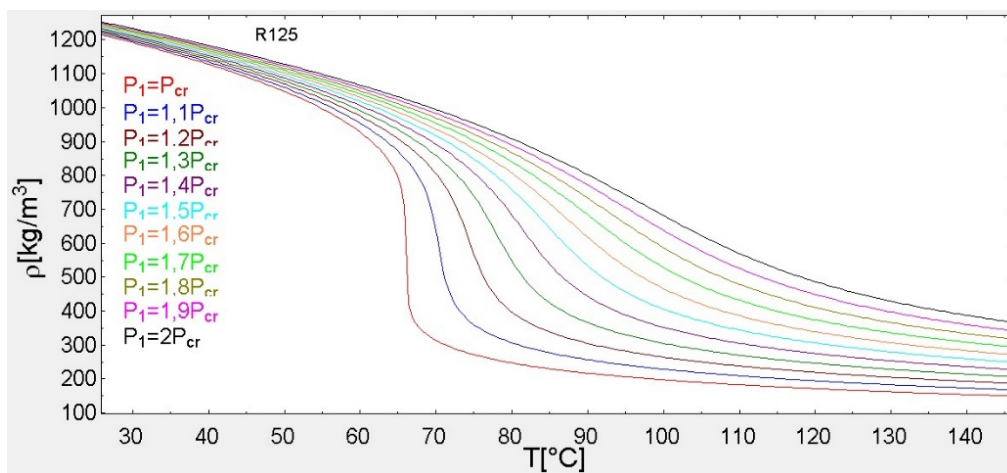
Slika 4-26: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R125



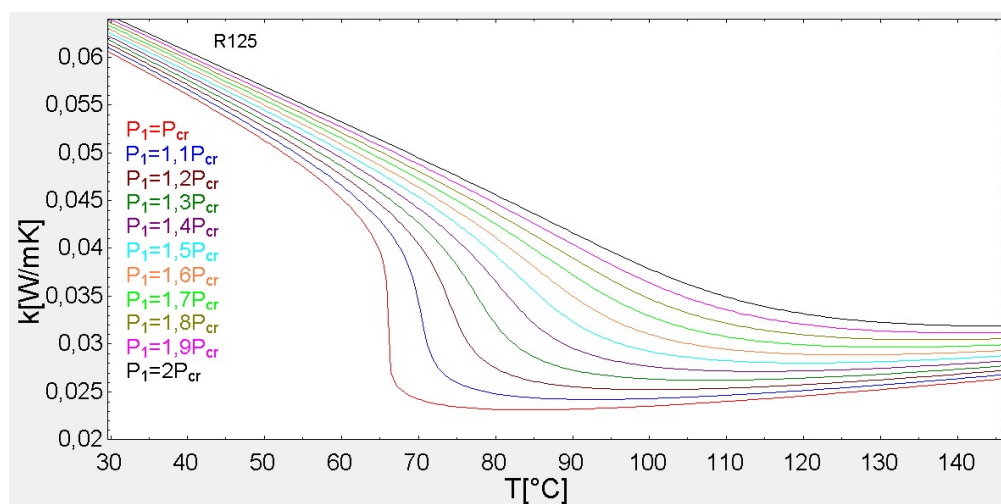
Slika 4-27: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R125



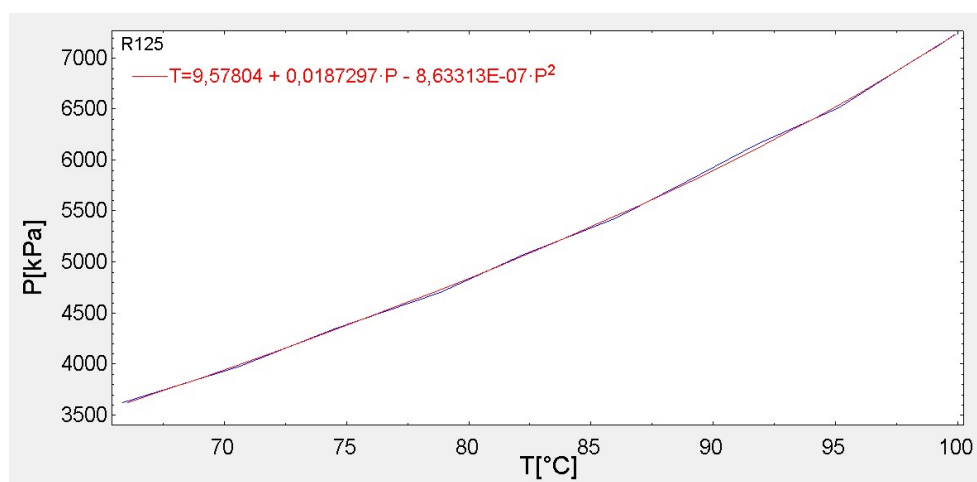
Slika 4-28: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R125



Slika 4-29: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R125



Slika 4-30: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R125



Slika 4-31: Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R125



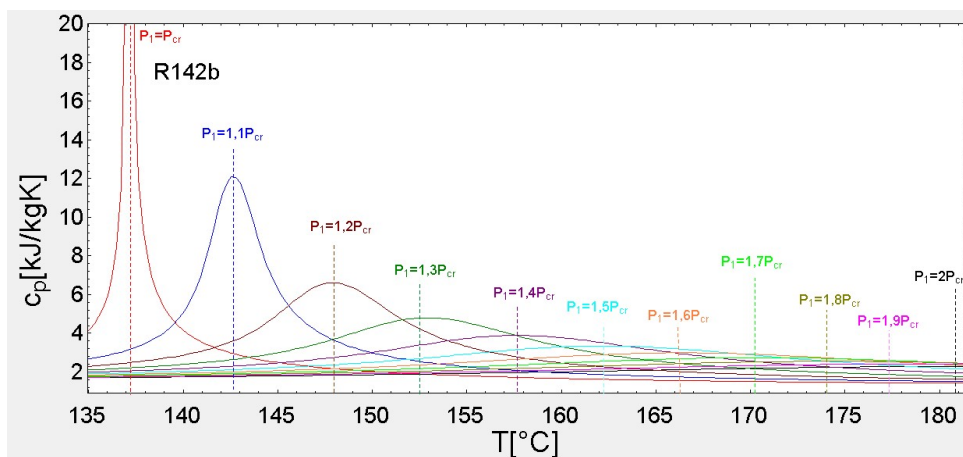
## 1.4. Radni fluid R142b

Sort	1 $c_{p_i}$	2 $k_i$	3 $\mu_i$	4 $\rho_i$	5 $T_i$
[73]	3,384	0,04865	0,00006151	669,1	133,9
[74]	3,504	0,04836	0,00006144	664,8	134,1
[75]	3,641	0,04806	0,00006137	660,2	134,4
[76]	3,802	0,04774	0,0000613	655,3	134,6
[77]	3,991	0,0474	0,00006122	650,1	134,8
[78]	4,218	0,04704	0,00006113	644,5	135,1
[79]	4,498	0,04665	0,00006104	638,4	135,3
[80]	4,851	0,04622	0,00006093	631,7	135,5
[81]	5,314	0,04574	0,00006081	624,3	135,8
[82]	5,95	0,04521	0,00006068	615,8	136
[83]	6,89	0,04459	0,00006052	605,9	136,2
[84]	8,44	0,04383	0,00006032	593,7	136,5
[85]	11,57	0,04284	0,00006006	577,4	136,7
[86]	22	0,04126	0,00005962	550,8	136,9
[87]	53,82	0,03219	0,00002587	375,6	137,2
[88]	17,92	0,03067	0,00002439	340,8	137,4
[89]	12,02	0,03001	0,00002375	324,9	137,6
[90]	9,419	0,02958	0,00002332	314	137,9
[91]	7,914	0,02925	0,000023	305,5	138,1
[92]	6,92	0,02899	0,00002275	298,6	138,3
[93]	6,207	0,02878	0,00002254	292,8	138,6
[94]	5,668	0,02859	0,00002235	287,6	138,8
[95]	5,244	0,02843	0,0000222	283,1	139
[96]	4,9	0,02829	0,00002205	279	139,3
[97]	4,615	0,02816	0,00002193	275,2	139,5
[98]	4,375	0,02805	0,00002181	271,8	139,7

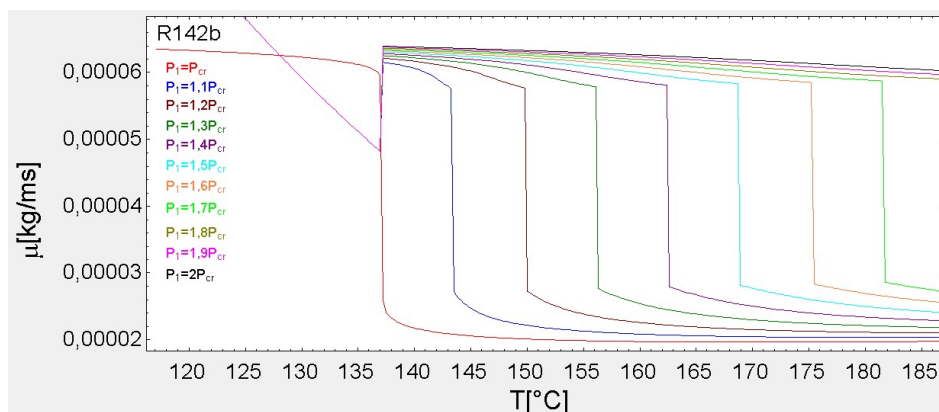
Slika 4-32: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{p_i}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R142b

	1 $c_p$	2 T	3 P
Row 1	53,82	137,2	4055
Row 2	12,08	142,5	4461
Row 3	6,613	147,9	4866
Row 4	4,788	152,8	5272
Row 5	3,882	157,7	5677
Row 6	3,342	162,1	6083
Row 7	2,985	166,3	6488
Row 8	2,732	170,3	6894
Row 9	2,544	174	7299
Row 10	2,399	177,5	7705
Row 11	2,284	180,8	8110

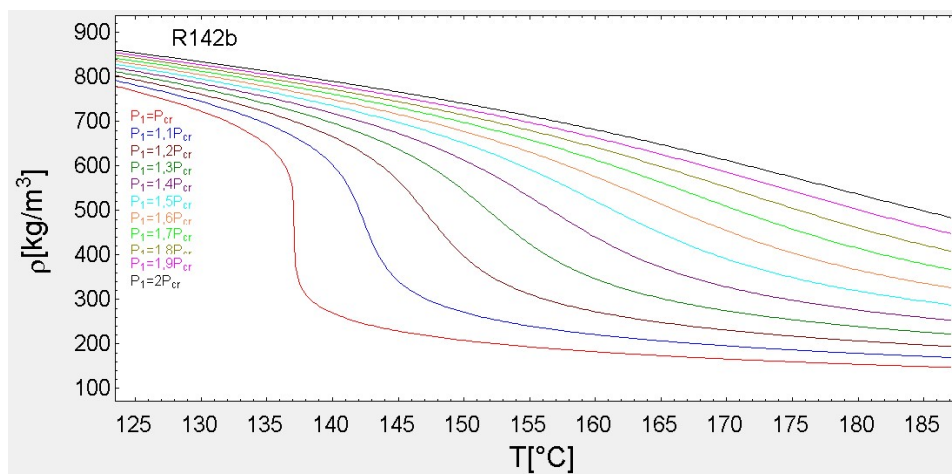
Slika 4-33: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R142b



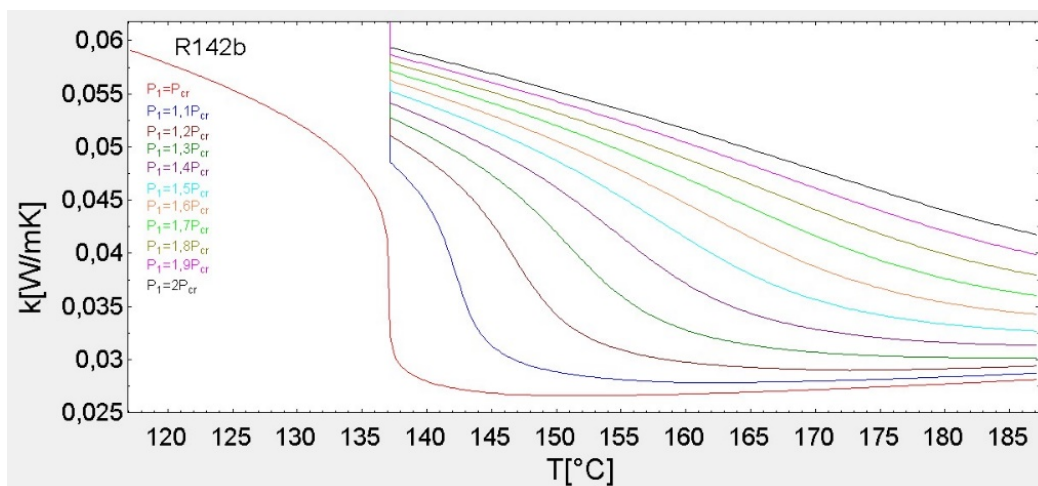
Slika 4-34: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R142b



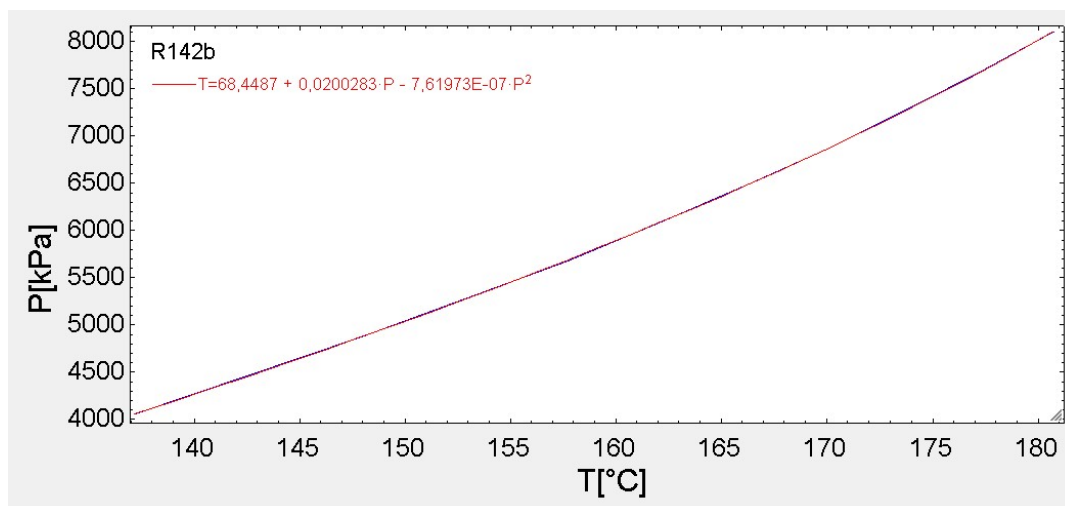
Slika 4-35: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R142b



Slika 4-36: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R142b



Slika 4-37: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R142b



Slika 4-38: Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R142b

Linear Regression Coefficients		
	Value	Std. Error
a0	6.844872E+01	4.523061E-01
a1	2.002828E-02	1.533041E-04
a2	-7.619728E-07	1.254781E-08

No. points = 11  
 rms = 6,0436E-02  
 bias = 2,2709E-17  
 R<sup>2</sup> = 100,00%

Copy to Clipboard

OK

Slika 4-39: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R142b

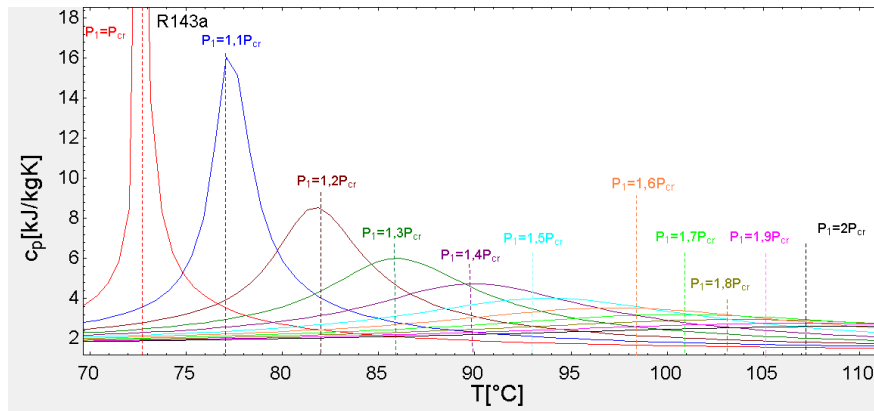
## 1.5. Radni fluid R143a

Sort	1 $c_{p_i}$ [kJ/kg-K]	2 $k_i$ [W/m-K]	3 $\mu_i$ [kg/m-s]	4 $\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	5 $T_i$
[56]	2,631	0,06361	0,00005512	713,3	65,7
[57]	2,714	0,06287	0,00005502	706,1	66,3
[58]	2,811	0,06208	0,00005492	698,4	66,9
[59]	2,927	0,06126	0,00005482	690,3	67,5
[60]	3,067	0,06038	0,0000547	681,5	68,1
[61]	3,243	0,05943	0,00005457	672	68,7
[62]	3,47	0,05839	0,00005442	661,4	69,3
[63]	3,779	0,05725	0,00005426	649,6	69,9
[64]	4,23	0,05594	0,00005406	636	70,5
[65]	4,967	0,0544	0,00005383	619,5	71,1
[66]	6,452	0,05241	0,00005351	597,9	71,7
[67]	11,63	0,04932	0,00005298	563	72,3
[68]	25,29	0,032	0,00002085	325,8	72,9
[69]	9,865	0,02984	0,0000195	288,3	73,5
[70]	6,869	0,02888	0,00001891	270,5	74,1
[71]	5,508	0,02826	0,00001853	258,4	74,7
[72]	4,71	0,02781	0,00001825	249,1	75,3
[73]	4,178	0,02745	0,00001803	241,5	75,9
[74]	3,796	0,02716	0,00001786	235,1	76,5
[75]	3,505	0,02692	0,00001771	229,5	77,1
[76]	3,277	0,02671	0,00001758	224,6	77,7
[77]	3,091	0,02653	0,00001747	220,2	78,3
[78]	2,937	0,02638	0,00001738	216,2	78,9
[79]	2,807	0,02624	0,00001729	212,5	79,5
[80]	2,695	0,02616	0,00001722	209,1	80,1
[81]	2,599	0,02608	0,00001715	206	80,7

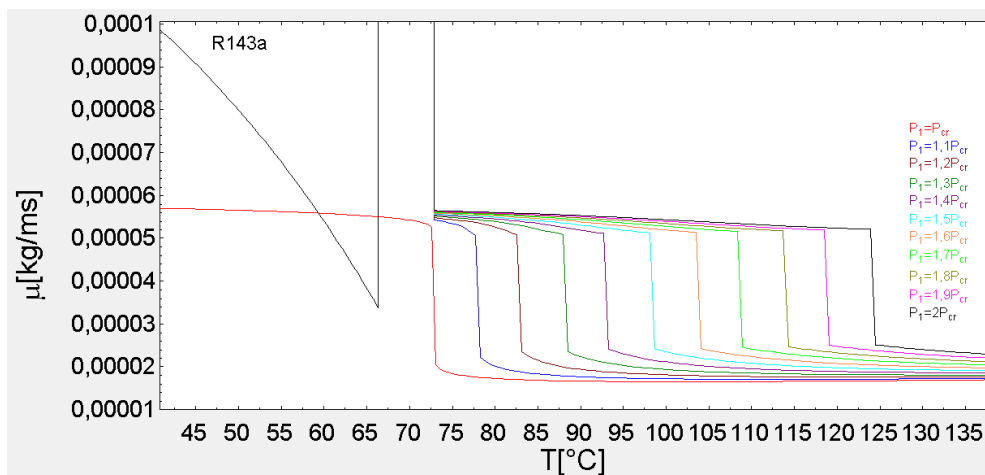
Slika 4-40: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{p_i}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R143a

Row 1	72,9	25,29	3761,00
<b>Row 2</b>	77,1	16,03	4137,10
Row 3	81,9	8,537	4513,20
Row 4	86,1	5,994	4889,30
Row 5	89,7	4,743	5265,40
Row 6	93,9	4,011	5641,50
Row 7	97,5	3,532	6017,60
Row 8	100,5	3,197	6393,70
Row 9	103,5	2,95	6769,80
Row 10	106,5	2,762	7145,90
Row 11	108,9	2,613	7522,00

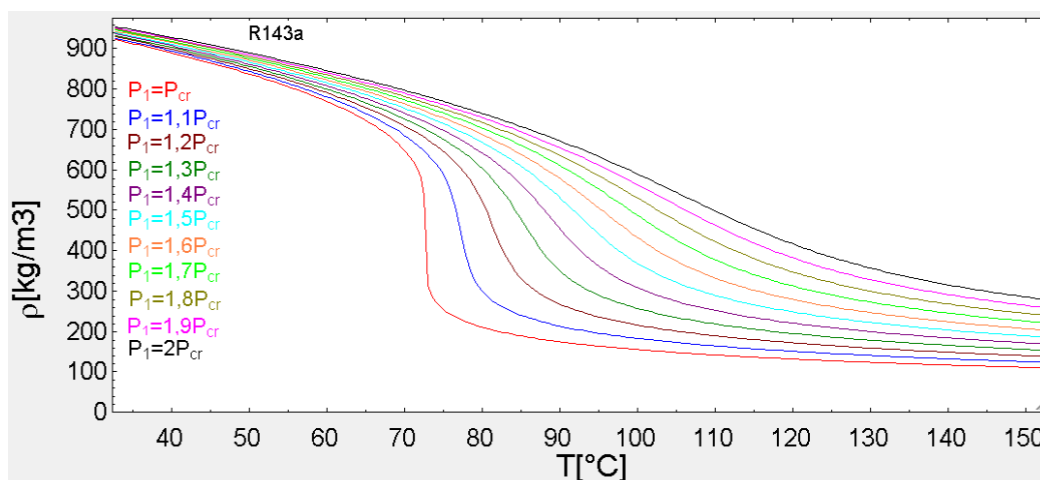
Slika 4-41: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R143a



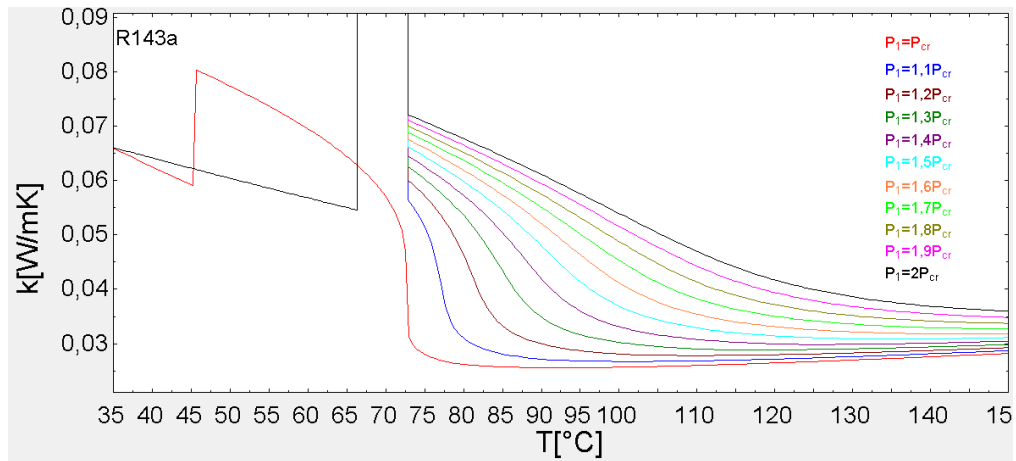
Slika 4-42: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R143a



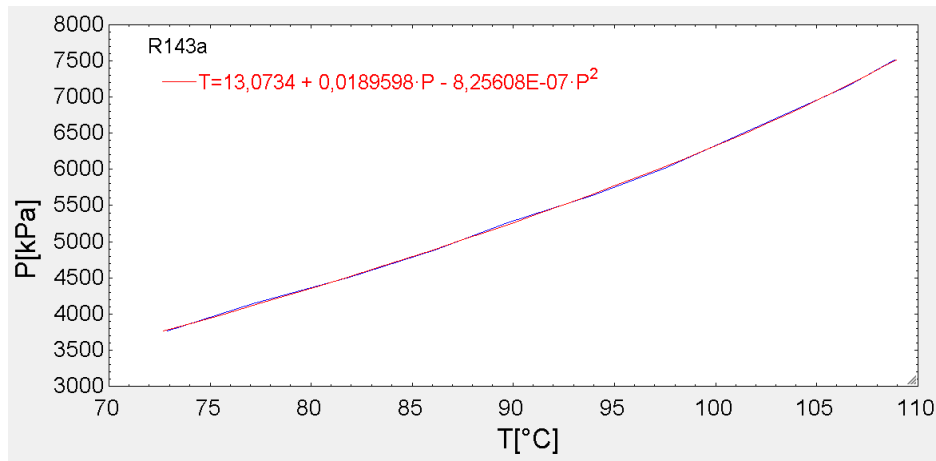
Slika 4-43: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R143a



Slika 4-44: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R143a



Slika 4-45: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R143a



Slika 4-46: Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R143a

Linear Regression Coefficients

	Value	Std. Error
a0	1,307343E+01	1,287601E+00
a1	1,895977E-02	4,705332E-04
a2	-8,256078E-07	4,152330E-08

No. points = 11  
rms = 1,7205E-01  
bias = 3,7849E-18  
R<sup>2</sup> = 99,98%

Copy to Clipboard

OK

Slika 4-47: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R143a

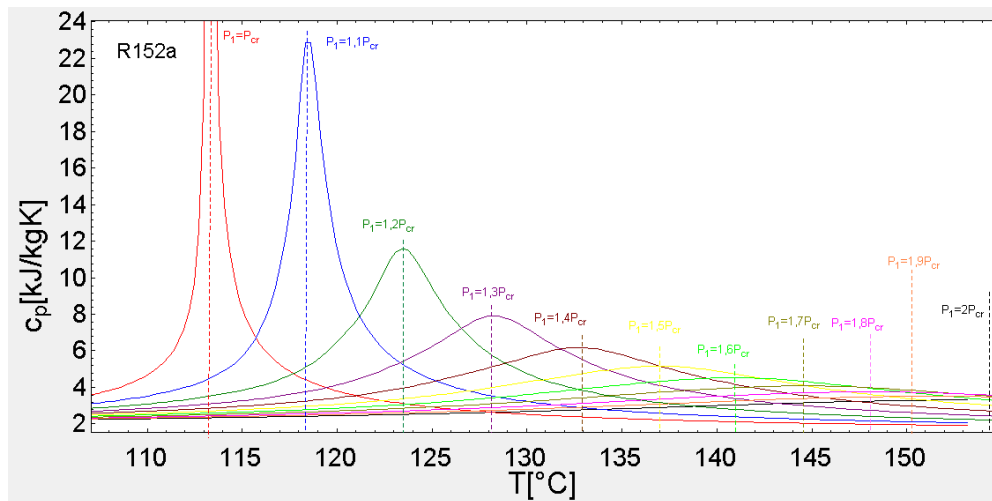
## 1.6. Radni fluid R152a

Sort	1 $c_{p_i}$	2 $k_i$	3 $\mu_i$	4 $\rho_i$	5 $T_i$
[128]	4,276	0,07644	0,0001529	569,9	109,2
[129]	4,41	0,07582	0,0001523	565,8	109,5
[130]	4,562	0,07519	0,0001517	561,6	109,8
[131]	4,734	0,07452	0,000151	557,1	110,1
[132]	4,934	0,07381	0,0001502	552,4	110,4
[133]	5,169	0,07307	0,0001494	547,3	110,7
[134]	5,451	0,07228	0,0001486	541,9	110,9
[135]	5,799	0,07143	0,0001477	536,1	111,2
[136]	6,243	0,07051	0,0001466	529,7	111,5
[137]	6,836	0,0695	0,0001455	522,6	111,8
[138]	7,682	0,06836	0,0001442	514,6	112,1
[139]	9,004	0,06703	0,0001426	505	112,4
[140]	11,42	0,06538	0,0001405	493	112,6
[141]	17,41	0,06306	0,0001375	475,7	112,9
[142]	66,17	0,05798	0,0001304	436,1	113,2
[143]	34,67	0,04096	0,0000211	278,5	113,5
[144]	19,08	0,03926	0,00002031	259,7	113,8
[145]	13,99	0,03829	0,00001986	248,6	114,1
[146]	11,36	0,03761	0,00001954	240,4	114,3
[147]	9,729	0,03707	0,0000193	234	114,6
[148]	8,605	0,03664	0,0000191	228,6	114,9
[149]	7,777	0,03627	0,00001893	223,9	115,2
[150]	7,139	0,03596	0,00001879	219,9	115,5
[151]	6,629	0,03568	0,00001866	216,2	115,8
[152]	6,212	0,03543	0,00001855	212,9	116
[153]	5,863	0,03521	0,00001845	209,9	116,3

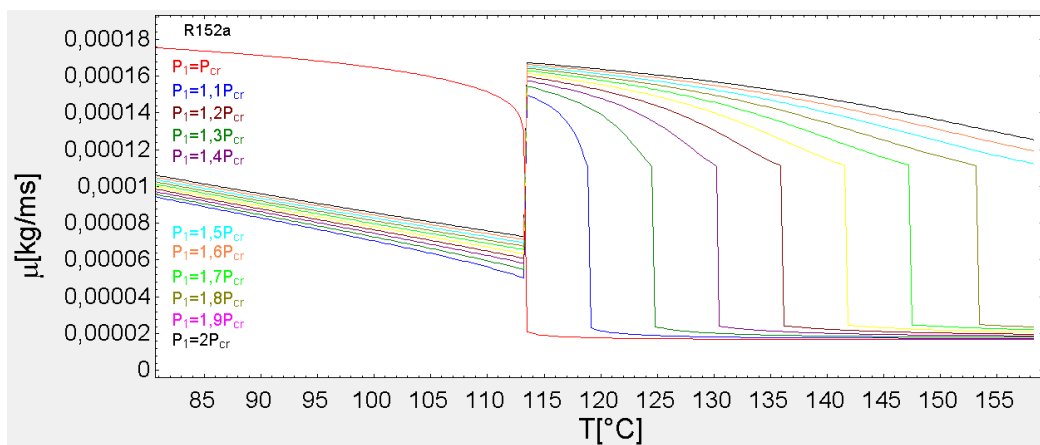
Slika 4-48: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{p_i}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R152a

	1 $T_i$	2 $c_p$	3 $P$
Row 1	113,2	66,17	4520,00
Row 2	118,6	22,84	4972,00
Row 3	123,4	11,59	5424,00
Row 4	128,2	7,915	5876,00
Row 5	133	6,17	6328,00
Row 6	137	5,168	6780,00
Row 7	141	4,526	7232,00
Row 8	144,4	4,081	7684,00
Row 9	148,1	3,758	8136,00
Row 10	151,2	3,512	8588,00
Row 11	154,3	3,32	9040,00

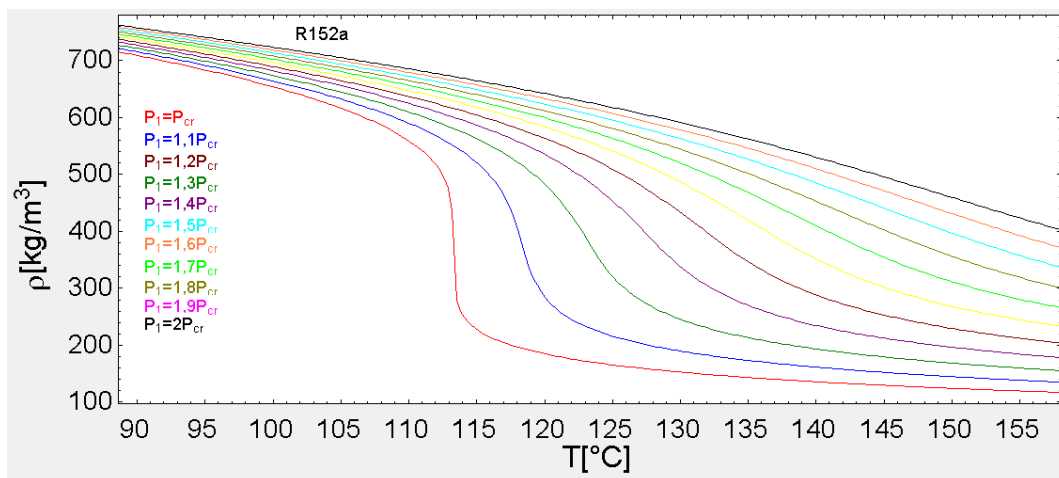
Slika 4-49: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R152a



Slika 4-50: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R152a

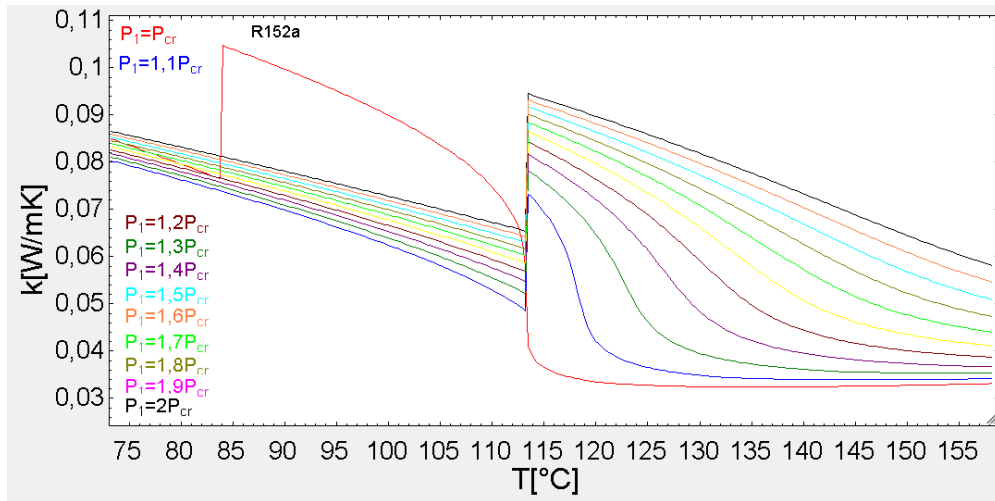


Slika 4-51: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R152a

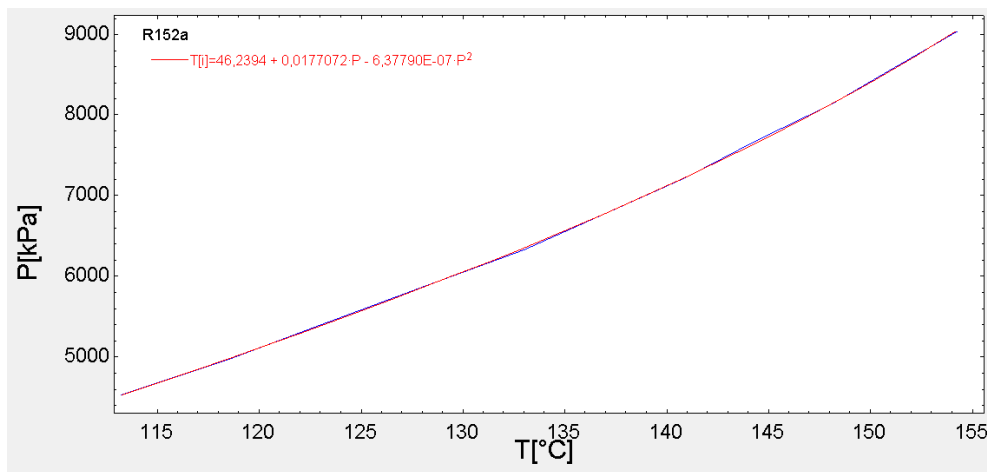


Slika 4-52: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi usljed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R152a





Slika 4-53: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkričnog tlaka za radni fluid R152a



Slika 4-54: Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkričnom tlaku za radni fluid R152a

Curve Fit Statistics				
	Value	Std. Error		
a0	6,962449E+03	7,989251E+02	No. points = 11	
a1	-1,168793E+02	1,199064E+01	rms = 2,2030E+01	
a2	8,438205E-01	4,465101E-02	bias = -4,8446E-16	
a3			R <sup>2</sup> = 99,98%	
a4			<input type="checkbox"/> Copy to Clipboard	
a5			<input checked="" type="checkbox"/> OK	
a6				

Slika 4-55: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R152a

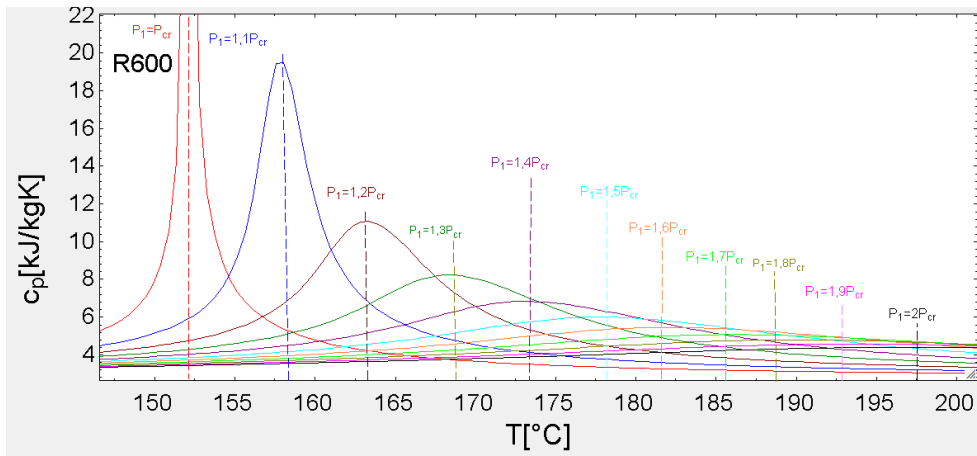
## 1.7. Radni fluid R600

Sort	1 $c_{pi}$ [kJ/kg-K]	2 $k_i$ [W/m-K]	3 $\mu_i$ [kg/m-s]	4 $\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	5 $T_i$
[72]	5,099	0,06635	0,00004119	356	146,1
[73]	5,249	0,06631	0,00004054	353	146,5
[74]	5,422	0,06631	0,00003987	349,9	147
[75]	5,626	0,06637	0,00003916	346,5	147,5
[76]	5,871	0,06649	0,00003842	342,9	148
[77]	6,172	0,0667	0,00003764	339	148,5
[78]	6,552	0,06703	0,00003681	334,8	148,9
[79]	7,05	0,06754	0,00003592	330	149,4
[80]	7,739	0,06829	0,00003493	324,6	149,9
[81]	8,768	0,06941	0,00003382	318,4	150,4
[82]	10,5	0,07112	0,00003251	310,6	150,9
[83]	14,21	0,07393	0,00003085	300,2	151,3
[84]	29,72	0,07943	0,00002819	281,8	151,8
[85]	36,88	0,04729	0,00001816	179,8	152,3
[86]	17,39	0,04583	0,00001716	164,1	152,8
[87]	12,58	0,04507	0,00001667	155,8	153,3
[88]	10,29	0,04456	0,00001635	150	153,7
[89]	8,916	0,04418	0,00001611	145,4	154,2
[90]	7,99	0,04387	0,00001592	141,6	154,7
[91]	7,319	0,04362	0,00001576	138,4	155,2
[92]	6,806	0,04341	0,00001562	135,6	155,7
[93]	6,401	0,04323	0,00001551	133,1	156,1
[94]	6,071	0,04307	0,00001541	130,9	156,6
[95]	5,796	0,04294	0,00001532	128,8	157,1
[96]	5,564	0,04282	0,00001524	126,9	157,6
[97]	5,365	0,04271	0,00001516	125,2	158,1

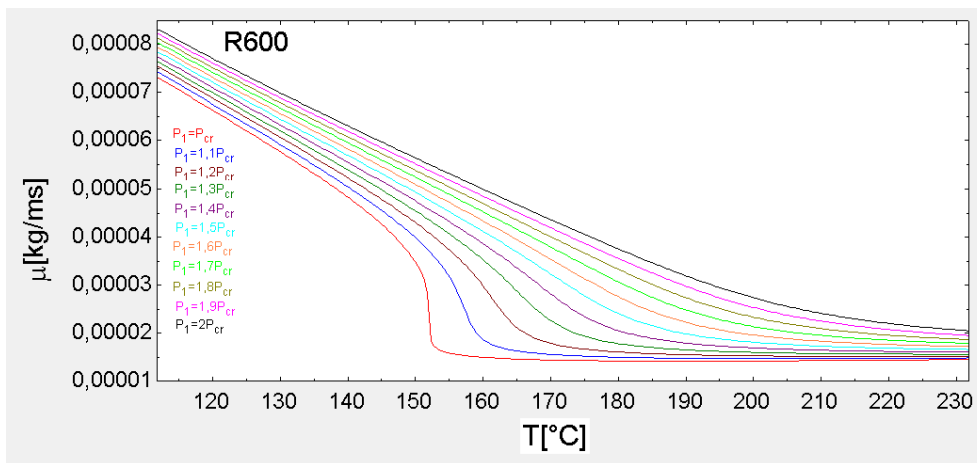
Slika 4-56: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{pi}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R600

	1 T	2 $C_p$	3 P
Row 1	152,3	36,88	3796,00
Row 2	158,1	19,49	4175,60
Row 3	163,3	11,07	4555,20
Row 4	168,1	8,228	4934,80
Row 5	172,9	6,824	5314,40
Row 6	177,7	5,994	5694,00
Row 7	181,6	5,447	6073,60
Row 8	185,9	5,063	6453,20
Row 9	189,7	4,78	6832,80
Row 10	193,6	4,563	7212,40
Row 11	197,4	4,393	7592,00

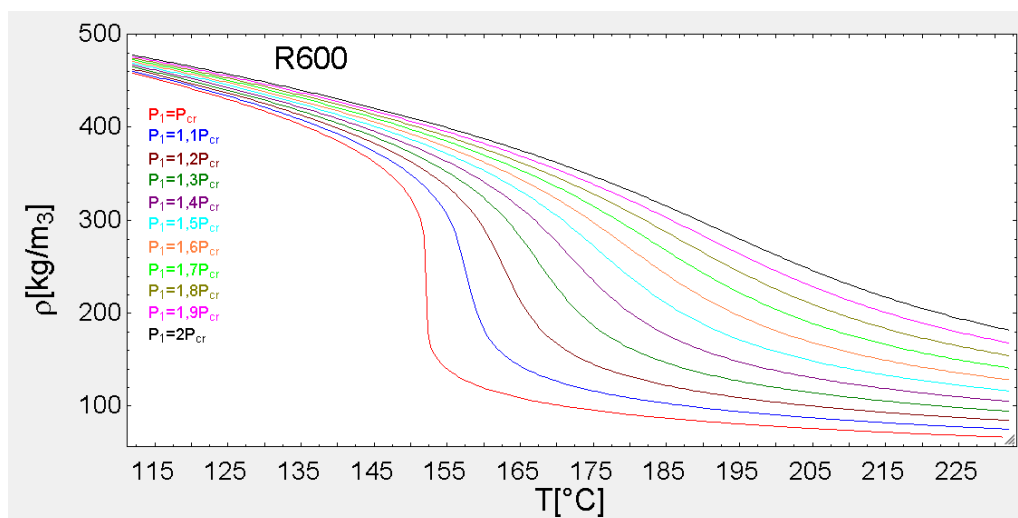
Slika 4-57: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R600



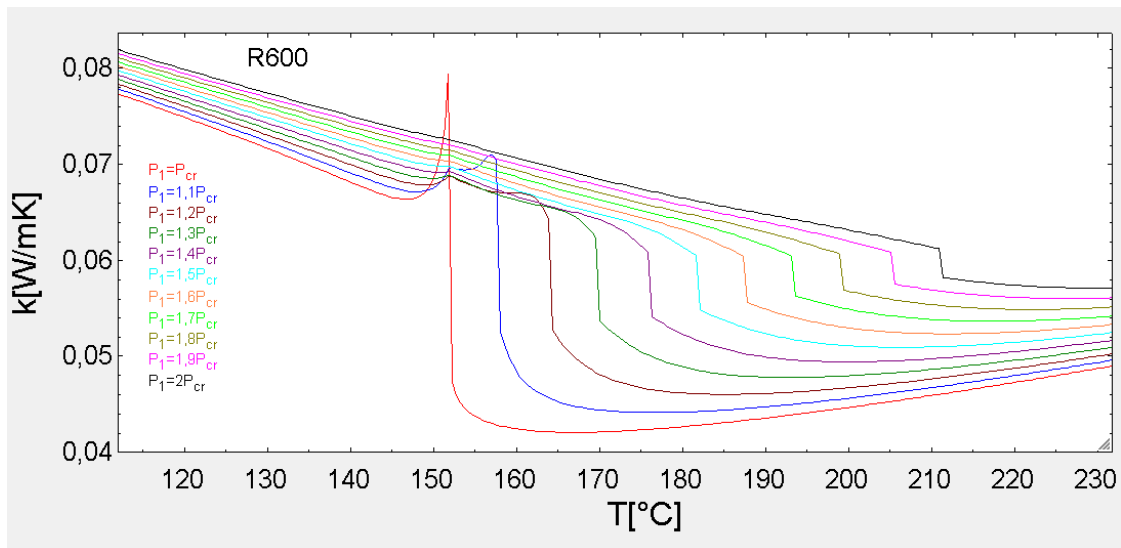
Slika 4-58: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R600



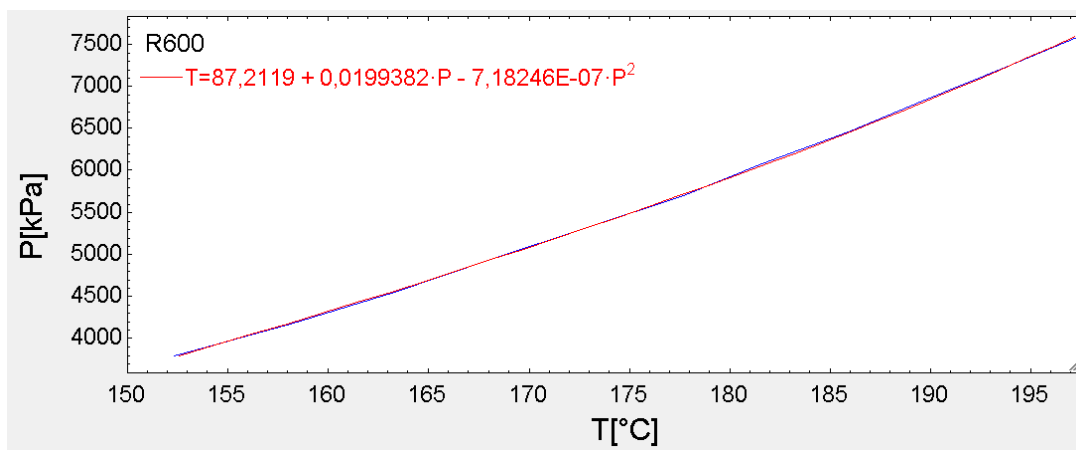
Slika 4-59: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R600



Slika 4-60: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R600



Slika 4-61: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkričnog tlaka za radni fluid R600



Slika 4-62: Prikaz ovisnosti pseudokrične temperature o nadkričnom tlaku za radni fluid R600

Linear Regression Coefficients

	Value	Std. Error
a0	8.721189E+01	1.277328E+00
a1	1.993818E-02	4.624752E-04
a2	-7.182461E-07	4.043590E-08

No. points = 11  
 rms = 1,7067E-01  
 bias = -2,2709E-17  
 R<sup>2</sup> = 99,99%

Copy to Clipboard

OK

Slika 4-63: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R600

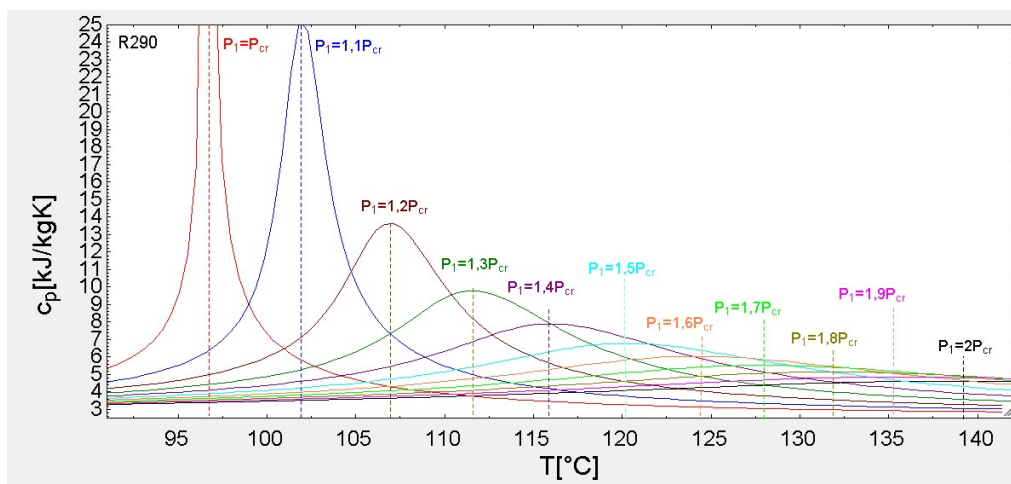
## 1.8. Radni fluid R290

Sort	1 $c_{p_i}$ [kJ/kg-K]	2 $k_i$ [W/m-K]	3 $\mu_i$ [kg/m-s]	4 $\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	5 $T_i$
[70]	4,97	0,06819	0,00004339	352,1	89,8
[71]	5,102	0,06814	0,00004277	349,4	90,28
[72]	5,253	0,06817	0,00004213	346,6	90,76
[73]	5,426	0,06831	0,00004147	343,6	91,24
[74]	5,627	0,06862	0,00004078	340,4	91,72
[75]	5,865	0,06917	0,00004007	337	92,2
[76]	6,151	0,07011	0,00003931	333,4	92,68
[77]	6,504	0,07169	0,00003851	329,4	93,16
[78]	6,954	0,07439	0,00003765	325,1	93,64
[79]	7,549	0,07929	0,00003672	320,3	94,12
[80]	8,383	0,08918	0,0000357	314,8	94,6
[81]	9,655	0,1141	0,00003453	308,3	95,08
[82]	11,88	0,2299	0,00003313	300,2	95,56
[83]	16,99	-0,3073	0,00003129	288,9	96,04
[84]	46,37	-0,09131	0,000028	266,5	96,52
[85]	31,44	0,04322	0,00001772	165,7	97
[86]	17,24	0,04185	0,00001688	153,6	97,48
[87]	12,82	0,04107	0,00001642	146,4	97,96
[88]	10,57	0,04053	0,0000161	141,3	98,44
[89]	9,172	0,04011	0,00001586	137,2	98,92
[90]	8,213	0,03977	0,00001567	133,7	99,4
[91]	7,507	0,03949	0,0000155	130,8	99,88
[92]	6,963	0,03925	0,00001537	128,2	100,4
[93]	6,529	0,03905	0,00001525	125,9	100,8
[94]	6,173	0,03887	0,00001514	123,8	101,3
[95]	5,877	0,03872	0,00001505	121,8	101,8

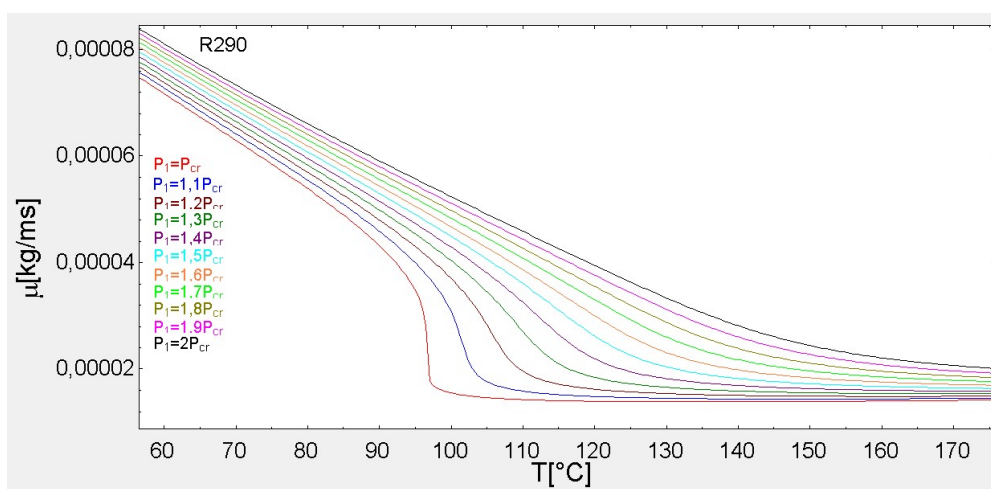
Slika 4-64: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{p_i}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R290

	1 T	2 Cp	3 P
Row 1	96,52	46,37	4247
Row 2	101,8	25,26	4672
Row 3	107,1	13,64	5096
Row 4	111,4	9,787	5521
Row 5	116,2	7,89	5946
Row 6	120	6,77	6371
Row 7	124,4	6,036	6795
Row 8	127,7	5,521	7220
Row 9	131,6	5,141	7645
Row 10	134,9	4,851	8069
Row 11	138,8	4,623	8494

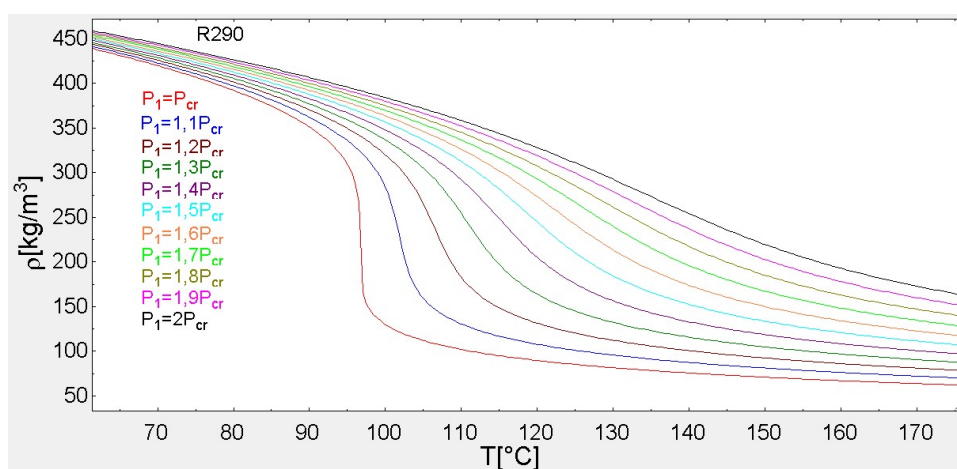
Slika 4-65: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R290



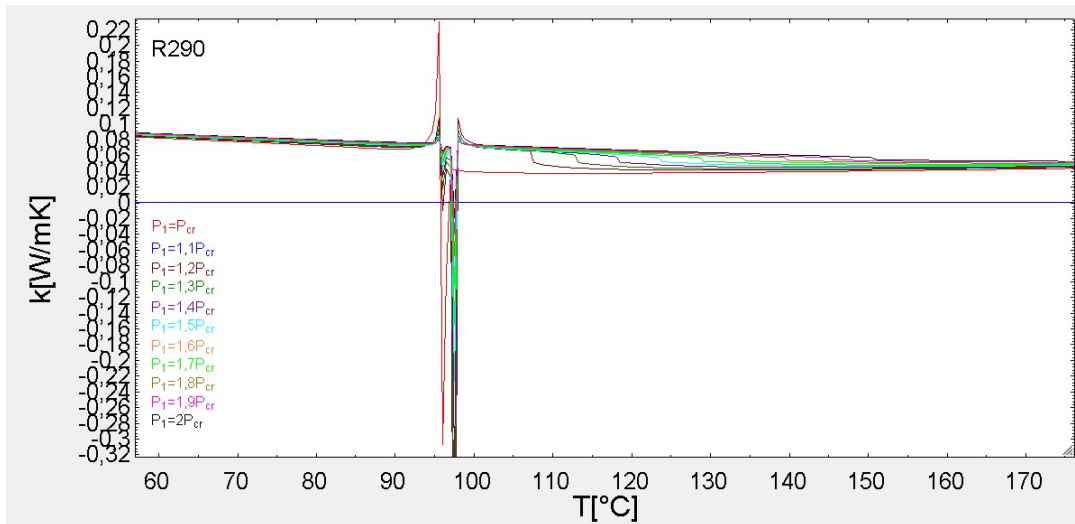
Slika 4-66: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R290



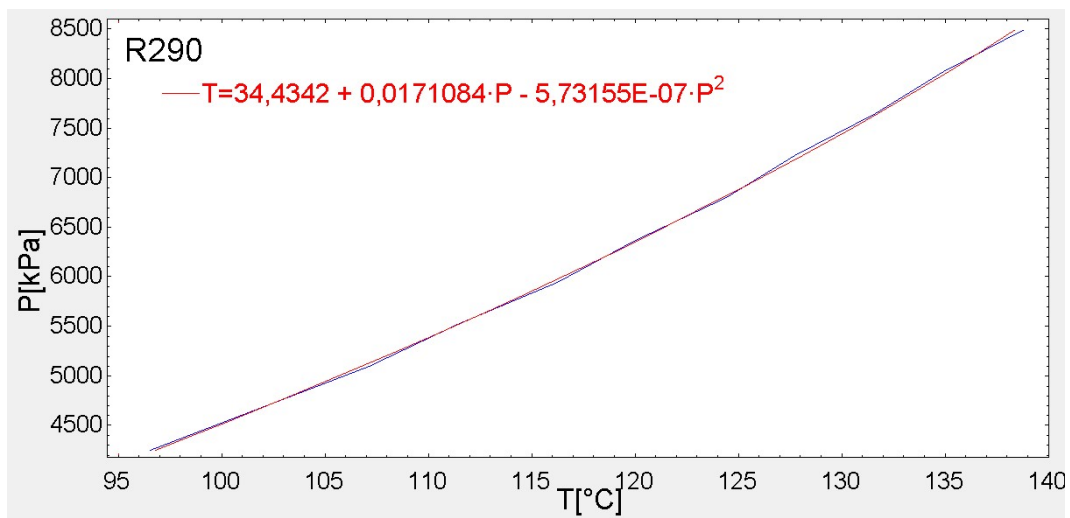
Slika 4-67: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R290



Slika 4-68: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R290



Slika 4-69: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R290



Slika 4-70: Prikaz ovisnosti pseudokritične temperature o nadkritičnom tlaku za radni fluid R290

Linear Regression Coefficients		
	Value	Std. Error
a0	3,443422E+01	1,926688E+00
a1	1,710842E-02	6,235072E-04
a2	-5,731546E-07	4,872638E-08

No. points = 11  
 rms = 2,5744E-01  
 bias = 6,9389E-18  
 $R^2 = 99,96\%$

Copy to Clipboard

OK

Slika 4-71: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R290

## 1.9. Radni fluid R236fa

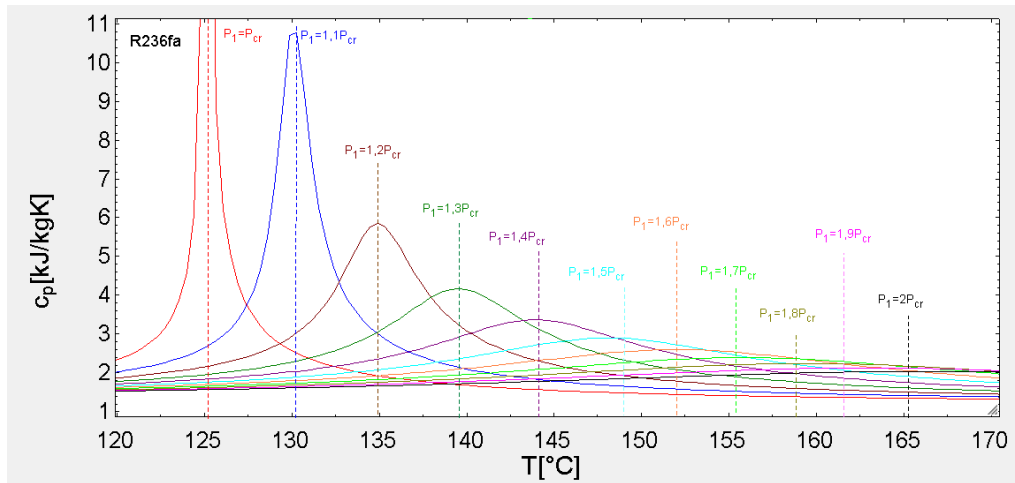
Sort	1 $c_{p_i}$ [kJ/kg-K]	2 $k_i$ [W/m-K]	3 $\mu_i$ [kg/m-s]	4 $\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	5 $T_i$
[84]	2,295	0,04782	0,00006572	866,6	119,8
[85]	2,361	0,04758	0,00006565	859,2	120,2
[86]	2,437	0,04733	0,00006557	851,4	120,6
[87]	2,526	0,04705	0,00006549	843,1	121
[88]	2,632	0,04676	0,0000654	834,2	121,5
[89]	2,762	0,04644	0,0000653	824,6	121,9
[90]	2,926	0,04609	0,00006518	814,1	122,3
[91]	3,139	0,0457	0,00006505	802,4	122,7
[92]	3,431	0,04525	0,00006489	789,2	123,1
[93]	3,863	0,04473	0,00006471	773,8	123,6
[94]	4,583	0,04409	0,00006448	754,9	124
[95]	6,089	0,04324	0,00006415	729,6	124,4
[96]	12,02	0,04179	0,00006357	686,5	124,8
[97]	21,42	0,03442	0,00002679	434,6	125,2
[98]	8,841	0,03343	0,00002532	391,2	125,7
[99]	6,203	0,033	0,00002465	369,9	126,1
[100]	4,993	0,03273	0,00002422	355,3	126,5
[101]	4,282	0,03255	0,00002391	344	126,9
[102]	3,808	0,03242	0,00002367	334,7	127,3
[103]	3,468	0,03232	0,00002347	326,9	127,8
[104]	3,209	0,03224	0,00002331	320	128,2
[105]	3,005	0,03218	0,00002317	314	128,6
[106]	2,84	0,03214	0,00002305	308,5	129
[107]	2,703	0,03211	0,00002295	303,6	129,4
[108]	2,588	0,03209	0,00002286	299	129,9
[109]	2,489	0,03207	0,00002278	294,8	130,3

Slika 4-72: Tablični prikaz dijela dobivenih vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta ( $c_{p_i}$ ), dinamičkog koeficijenta viskoznosti ( $\mu_i$ ), gustoće ( $\rho_i$ ) i koeficijenta toplinske vodljivosti ( $k_i$ ) za odgovarajuće temperature (kod  $P=P_{cr}$ ) za radni fluid R236fa

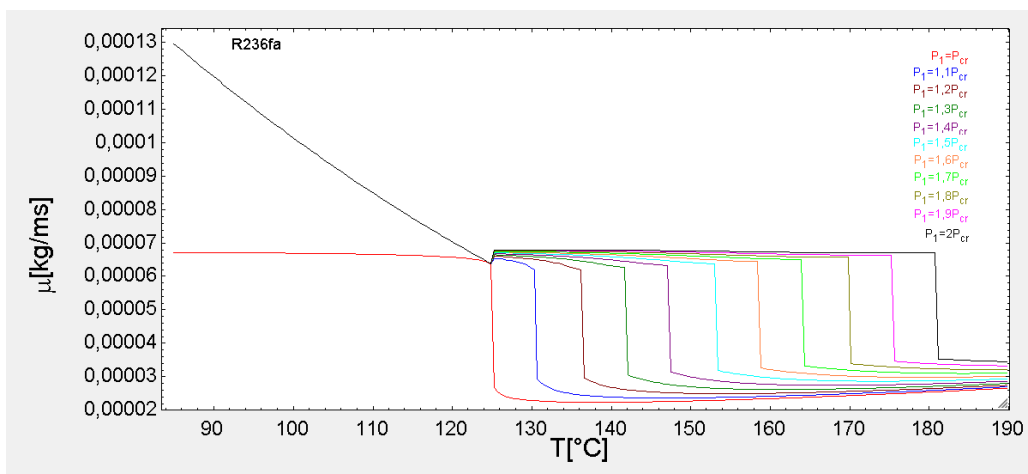
	1 T	2 $C_p$	3 P
Row 1	125,2	21,42	3200
Row 2	130,3	10,77	3520
Row 3	134,9	5,84	3840
Row 4	139,5	4,163	4160
Row 5	143,7	3,356	4480
Row 6	147,9	2,891	4800
Row 7	152,1	2,591	5120
Row 8	155,5	2,383	5440
Row 9	158,8	2,231	5760
Row 10	162,2	2,116	6080
Row 11	165,1	2,026	6400

Slika 4-73: Tablični prikaz vrijednosti pseudokritičnih temperatura  $T_{pc}(T_i)$  za odgovarajuće vrijednosti nadkritičnih tlakova i pripadne vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta ( $c_p$ ) za radni fluid R236fa

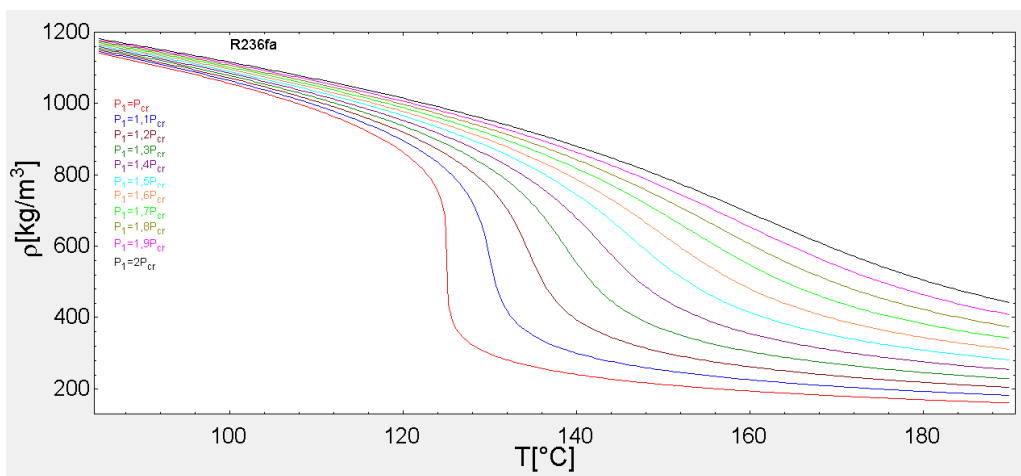




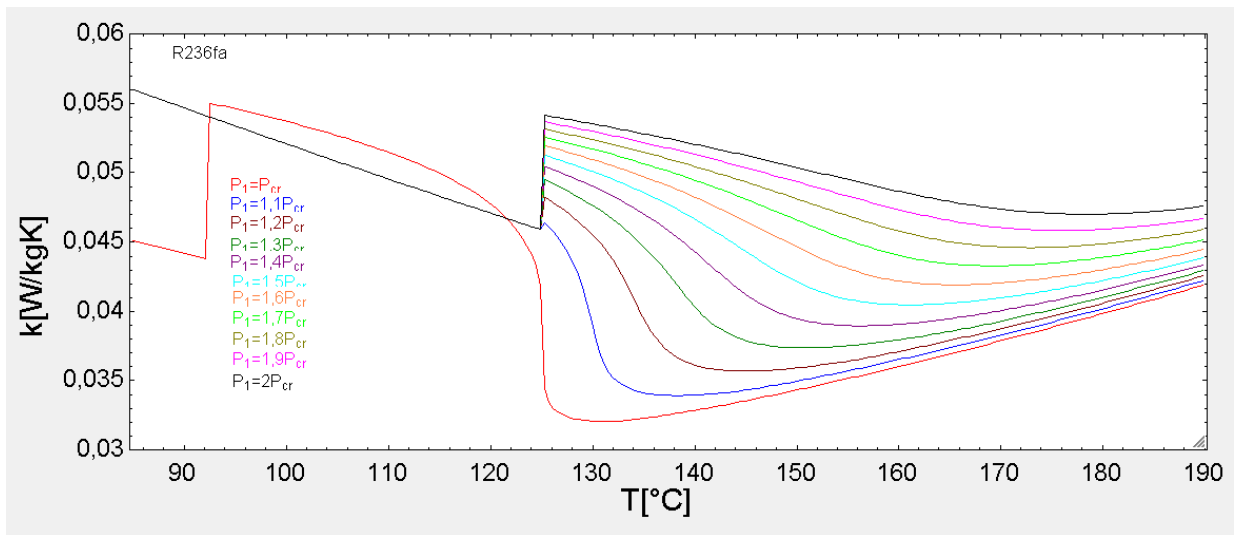
Slika 4-74: Grafički prikaz promjene vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta u ovisnosti o nadkritičnom tlaku i temperaturi za radni fluid R236fa



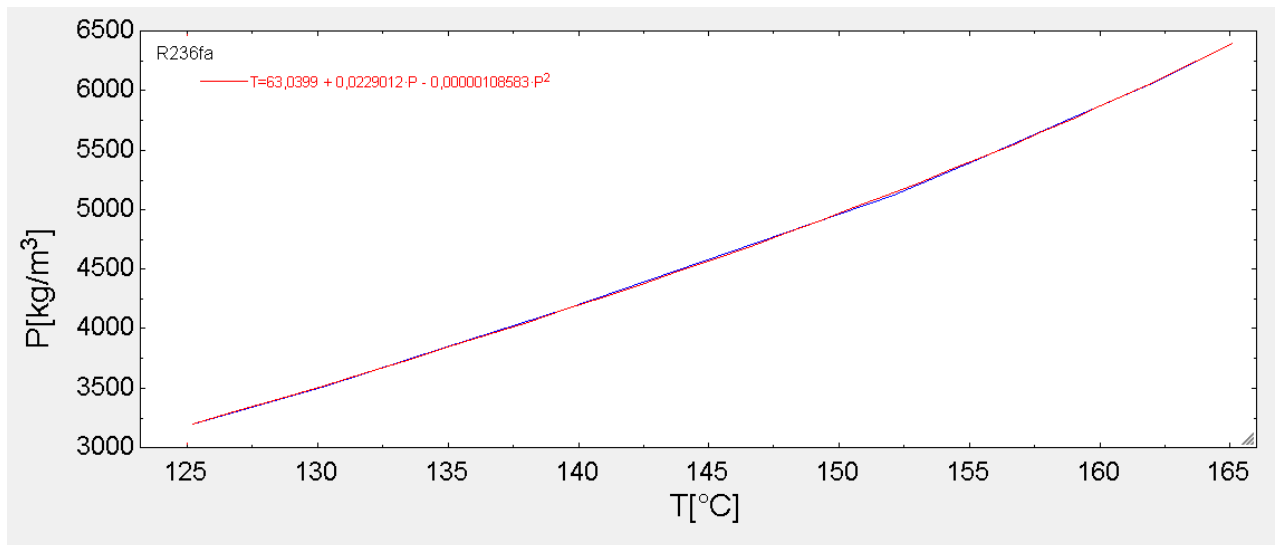
Slika 4-75: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta dinamičke viskoznosti u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R236fa



Slika 4-76: Prikaz promjene vrijednosti gustoće u ovisnosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkritičnog tlaka za radni fluid R236fa



Slika 4-77: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti o temperaturi uslijed povećanja vrijednosti nadkričnog tlaka za radni fluid R236fa



Slika 4-78: Prikaz ovisnosti pseudokrične temperature o nadkričnom tlaku za radni fluid R236fa

Linear Regression Coefficients

	Value	Std. Error
a0	6,303986E+01	8,205360E-01
a1	2,290122E-02	3,524195E-04
a2	-1,085828E-06	3,655231E-08

No. points = 11  
rms = 1,0964E-01  
bias = 8,8313E-18  
R<sup>2</sup> = 99,99%

Copy to Clipboard

Slika 4-79: Prikaz rezultata izračuna standardne pogreške regresijske jednadžbe za radni fluid R236fa

## 2. Privitak

### Izračun koeficijenta prijelaza topline pri nadkritičnim parametrima

#### 2.1. Radni fluid R32

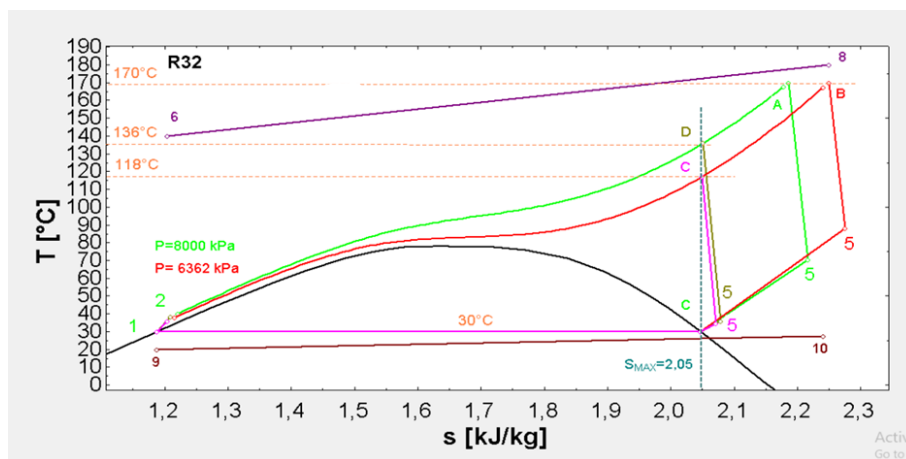
Za radni fluid R32 nadkritično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

A = temperatura 170°C i tlak 80 bar,

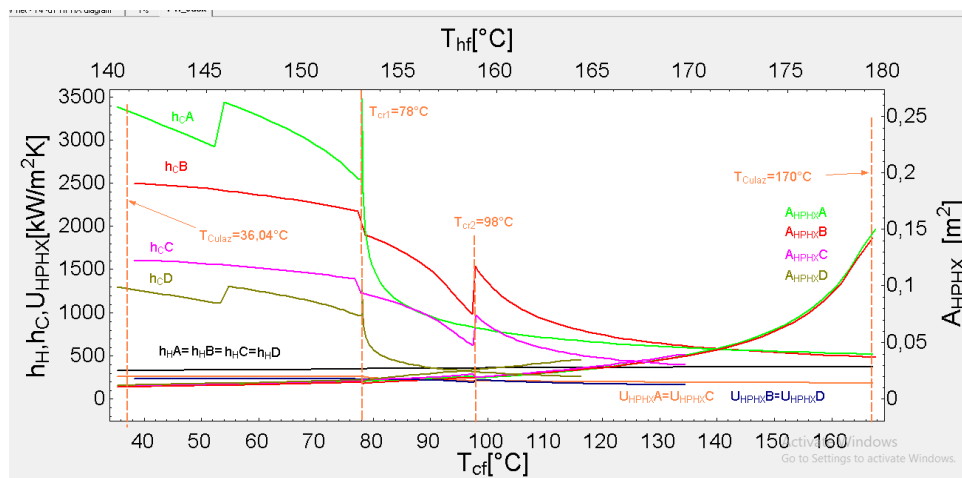
B = temperatura 170°C i tlak 63,62 bar,

C = temperatura 118°C i tlak 63,62 bar,

D = temperatura 136°C i tlak 80 bar.



Slika 4-83: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R32



Slika 4-84: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPFX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPFX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R32

## 2.2. Radni fluid R124

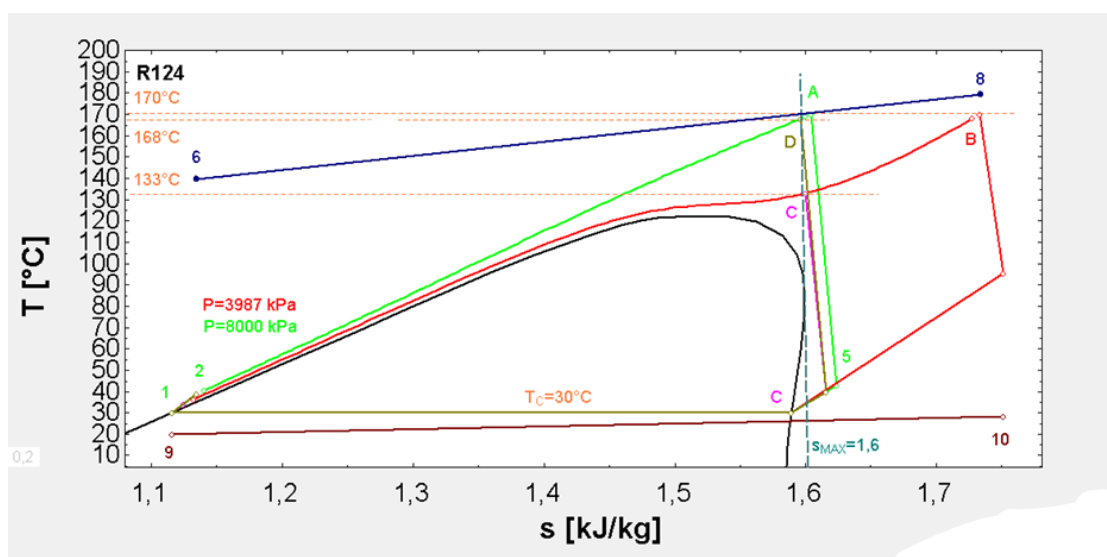
Za radni fluid R124 nadkritično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

A = temperatura 170°C i tlak 80 bar,

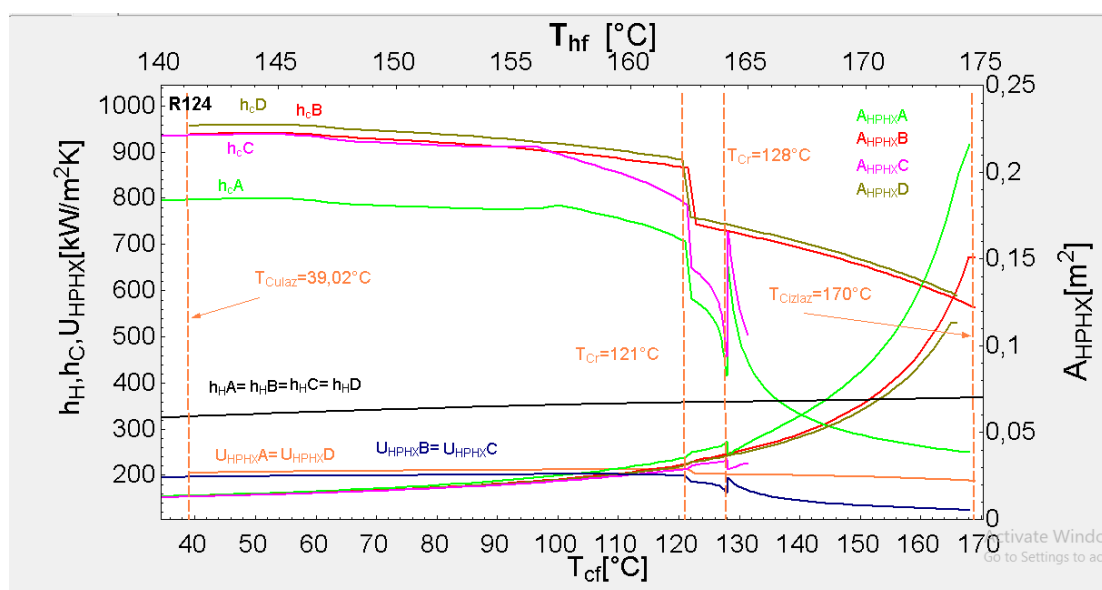
B = temperatura 170°C i tlak 39,87 bar,

C = temperatura 133°C i tlak 39,87 bar,

D = temperatura 168°C i tla 80 bar.



Slika 4-85: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R124



Slika 4-86: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza toplote ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza toplote ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača toplote ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača toplote za radni fluid R124

### 2.3. Radni fluid R125

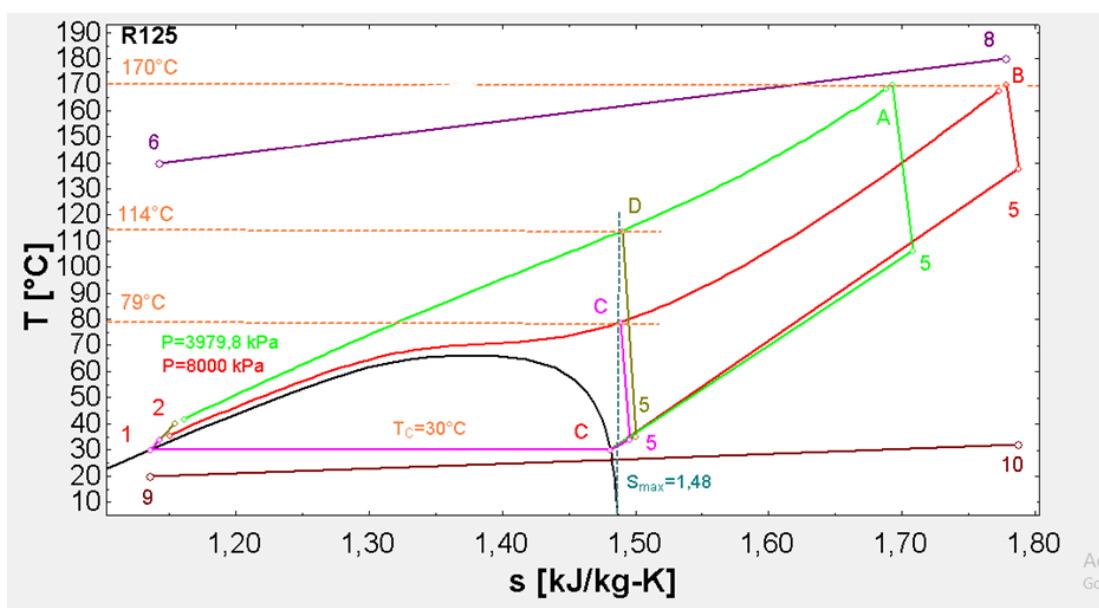
Za radni fluid R125 nadkritično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

A = temperatura 170°C i tlak 80 bar,

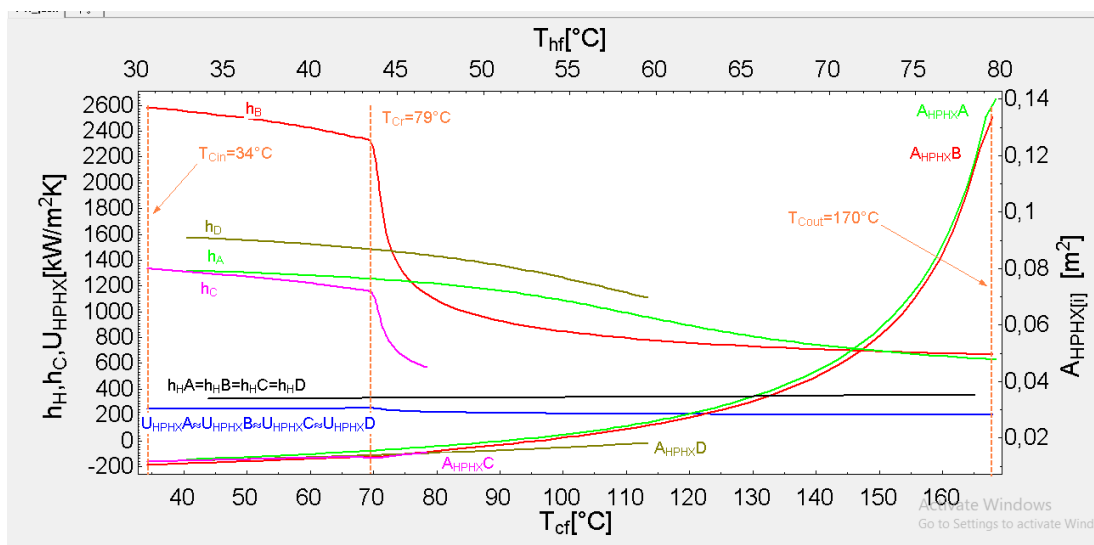
B = temperatura 170°C i tlak 39,798 bar,

C = temperatura 79°C i tlak 39,798 bar,

D = temperatura 114°C i tlak 80 bar.



Slika 4-87: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R125



Slika 4-88: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R125

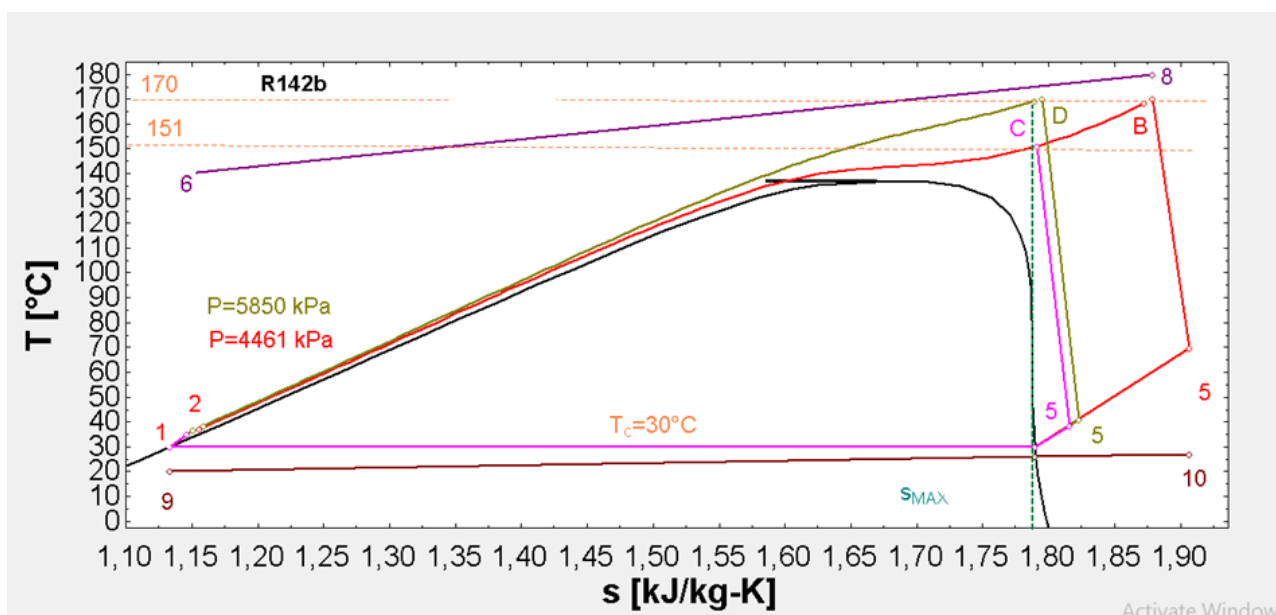
## 2.4. Radni fluid R142b

Za radni fluid R142b nadkritično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

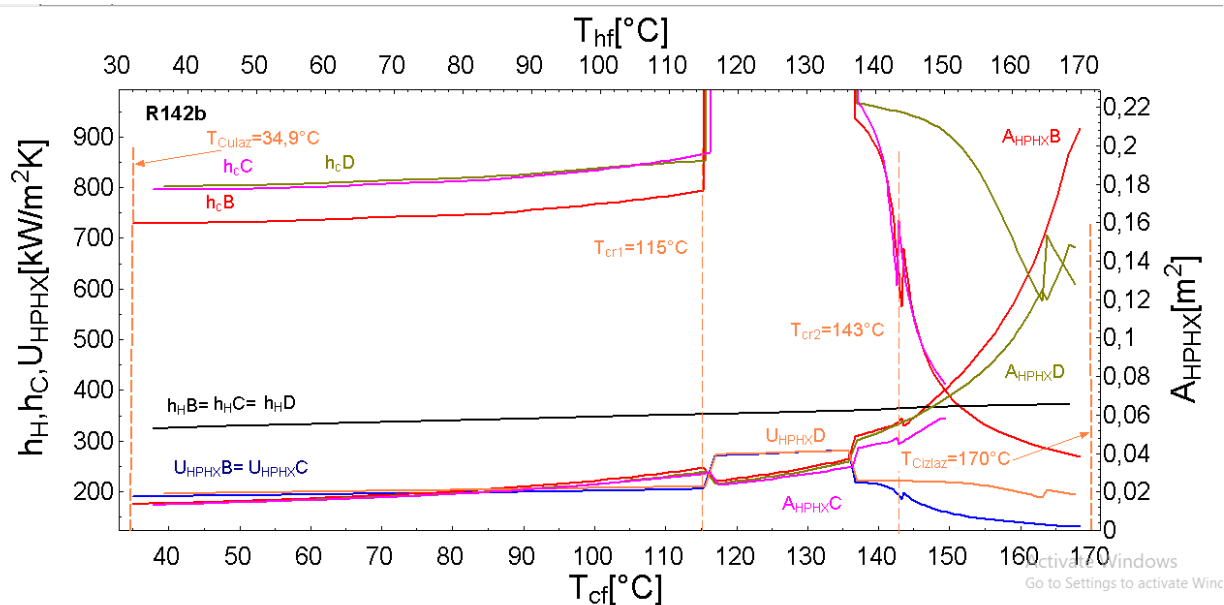
B = temperatura 170°C i tlak 44,61 bar,

C = temperatura 151°C i tlak 44,61 bar,

D = temperatura 170°C i tlak 58,5 bar.



Slika 4-89: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R142b



Slika 4-90: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R142b

## 2.5. Radni fluid R143a

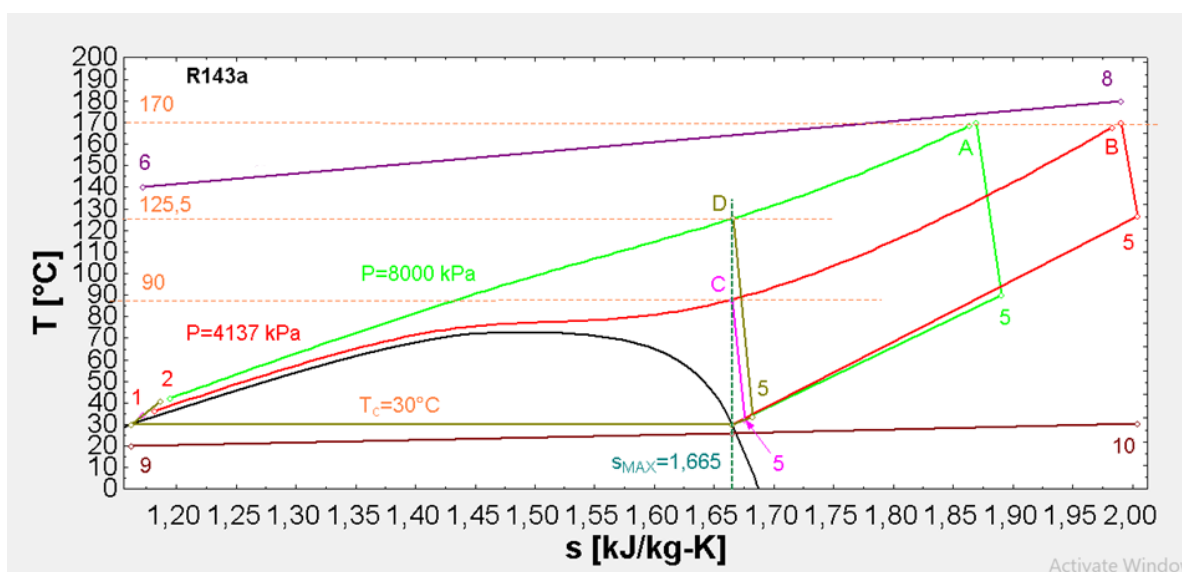
Za radni fluid R143a nadkrično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

A = temperatura 170°C i tlak 80 bar,

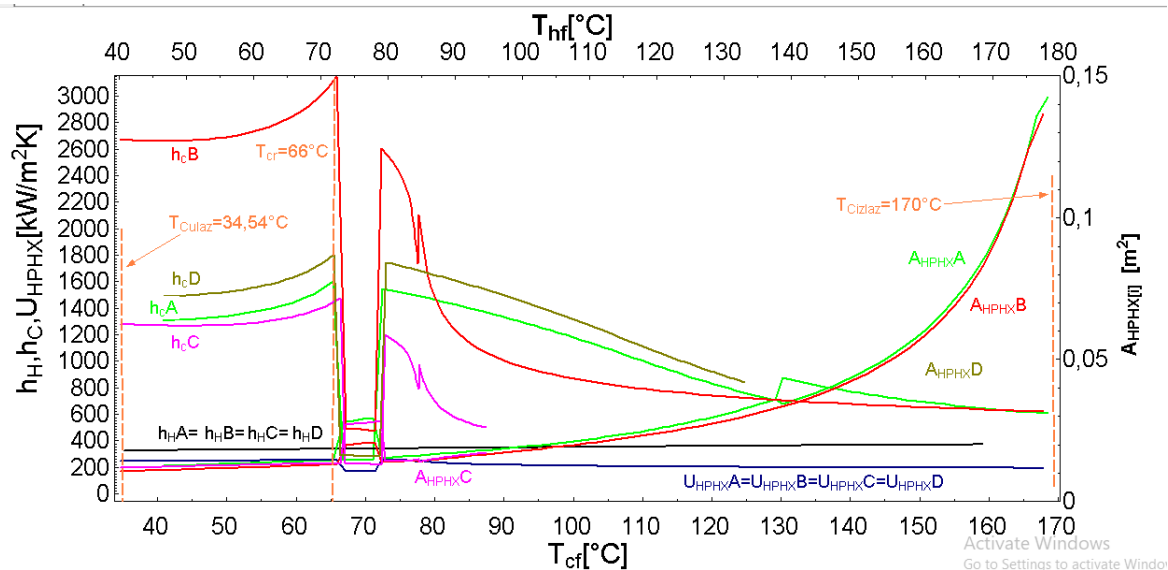
B = temperatura 170°C i tlak 41,37 bar,

C = temperatura 90°C i tlak 41,37 bar,

D = temperatura 125,5°C i tlak 80 bar.



Slika 4-91: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkričnog radnog područja za radni fluid R143a



Slika 4-92: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza toplote ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza toplote ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača toplote ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača toplote za radni fluid R143a

## 2.6. Radni fluid R152a

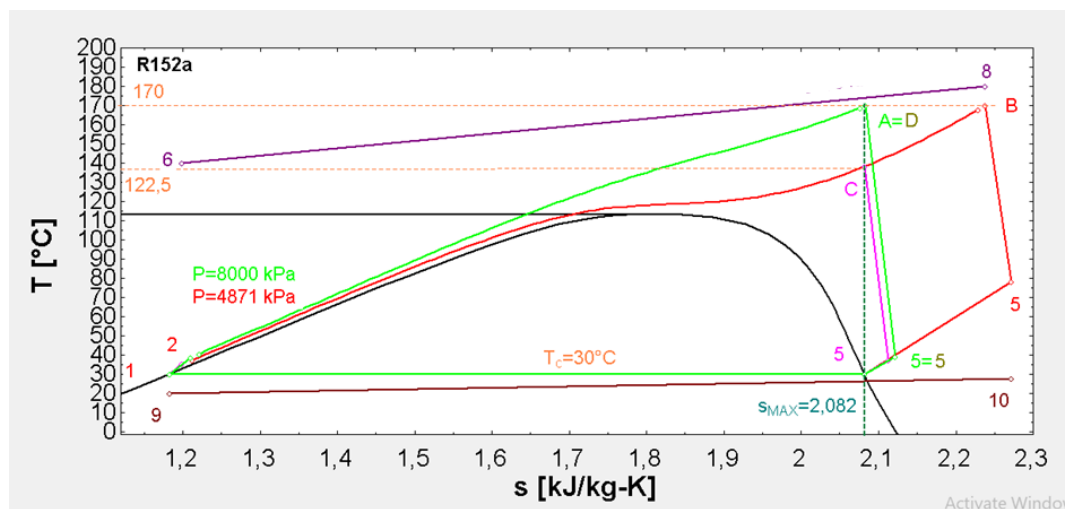
Za radni fluid R152a nadkritično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

A = temperatura 170°C i tlak 80 bar,

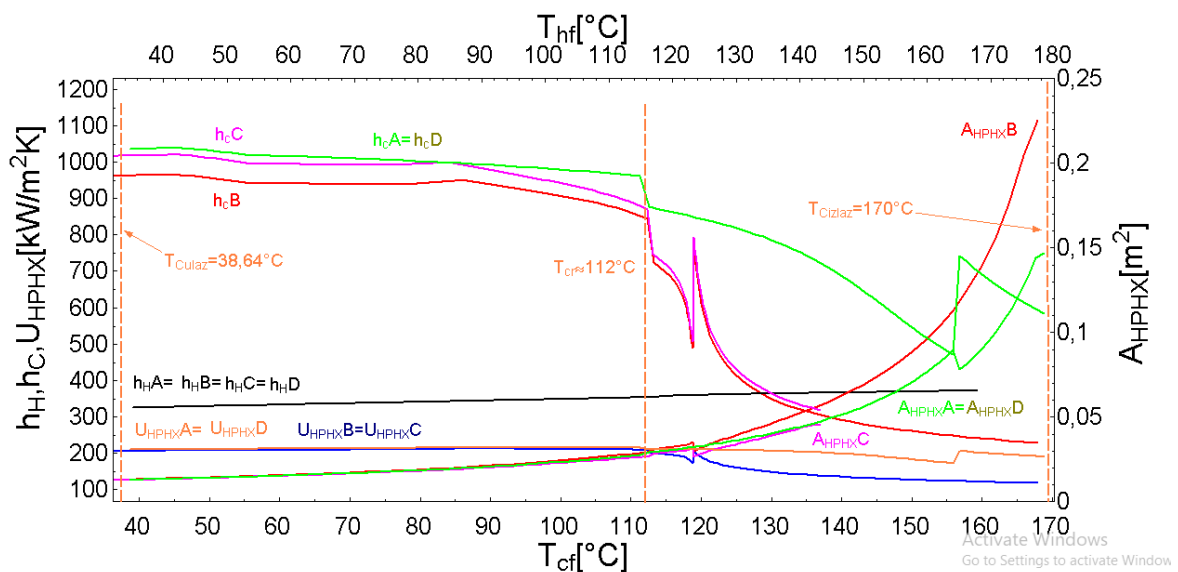
B = temperatura 170°C i tlak 48,71 bar,

C = temperatura 122,5°C i tlak 48,71 bar,

D = temperatura 170°C i tlak 80 bar.



Slika 4-93: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R152a



Slika 4-94: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza topline ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača topline ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača topline za radni fluid R152a



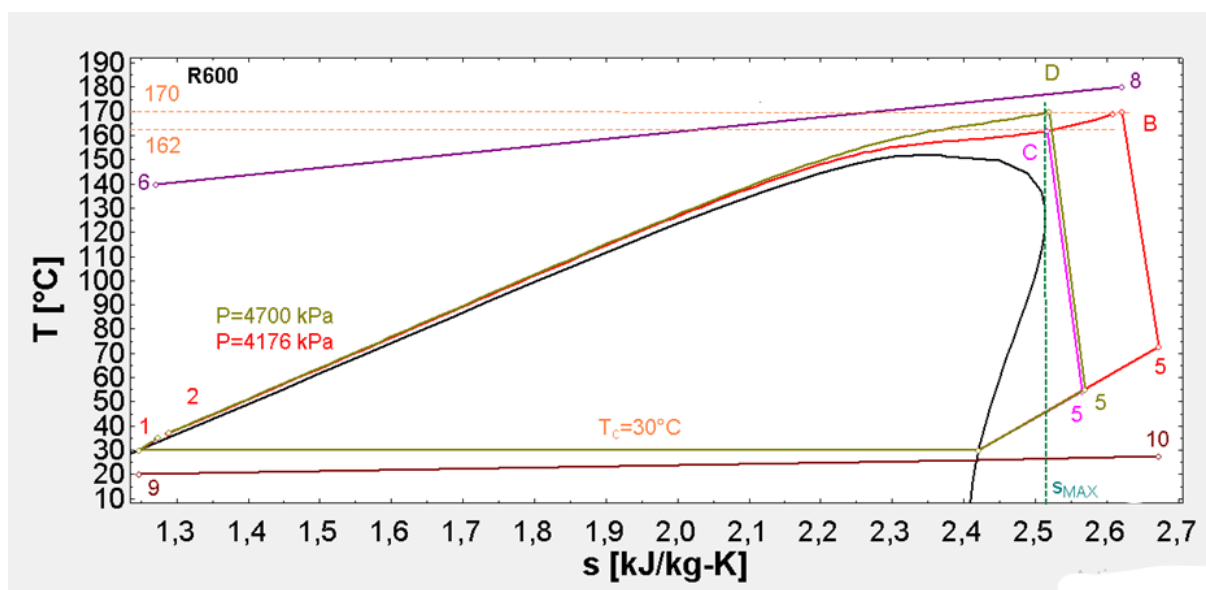
## 2.7. Radni fluid R600

Za radni fluid R600 nadkritično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

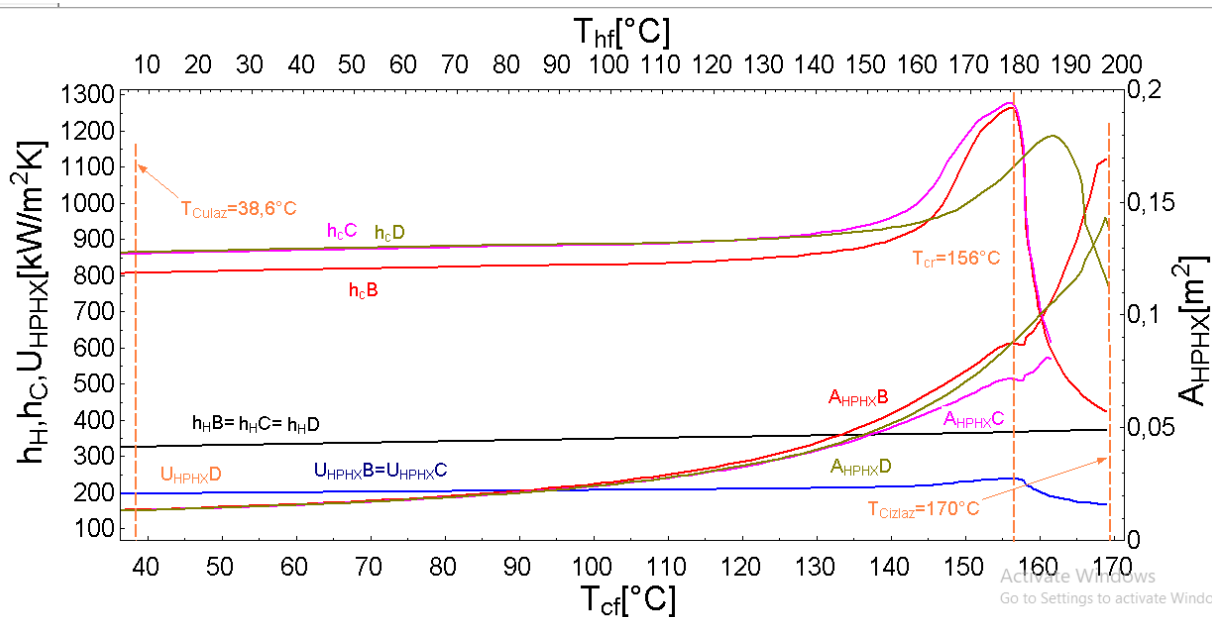
B = temperatura 170°C i tlak 41,76 bar,

C = temperatura 162°C i tlak 41,76 bar,

D = temperatura 170°C i tlak 47 bar.



Slika 4-95: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R600



Slika 4-96: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza toplote ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza toplote ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača toplote ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača toplote za radni fluid R600

## 2.8. Radni fluid R290

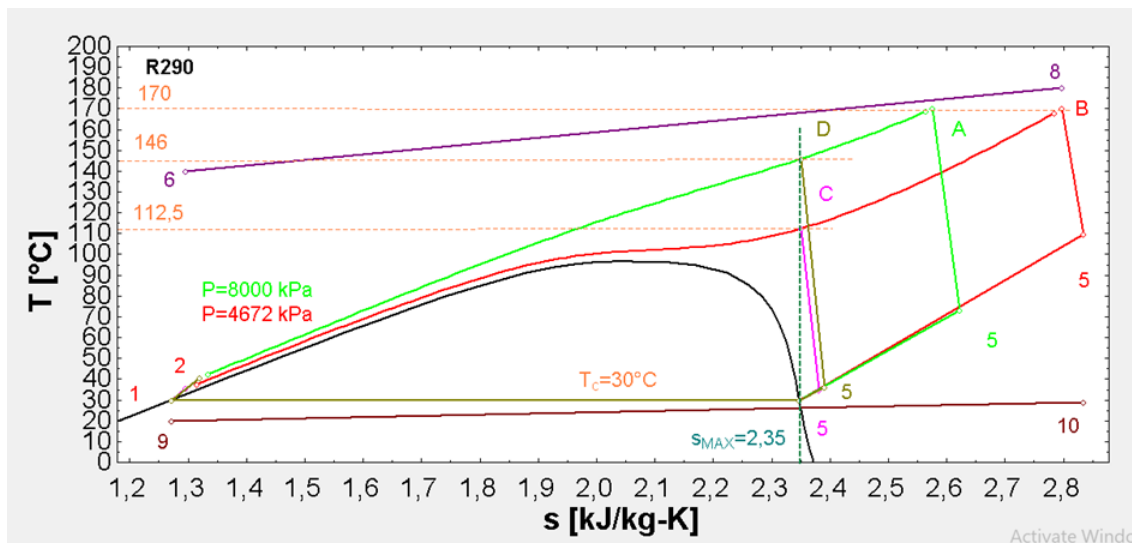
Za radni fluid R290 nadkritično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

A = temperatura 170°C i tlak 80 bar,

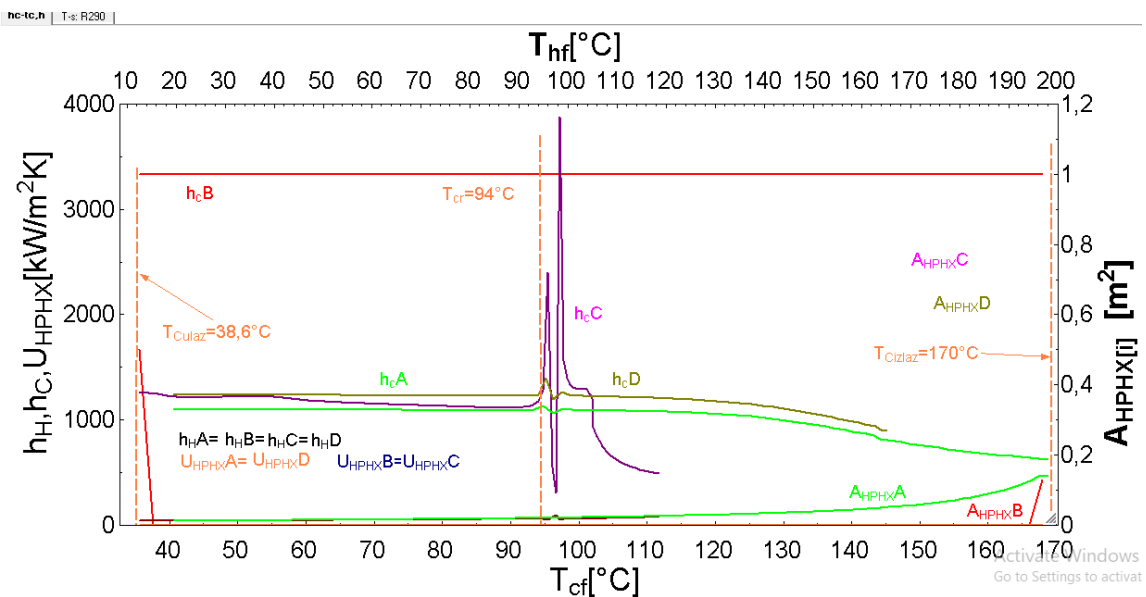
B = temperatura 170°C i tlak 46,72 bar,

C = temperatura 112,5°C i tlak 46,72 bar,

D = temperatura 146°C i tlak 80 bar.



Slika 4-97: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R290



Slika 4-98: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza toplote ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza toplote ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača toplote ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača toplote za radni fluid R290

## 2.9. Radni fluid R236fa

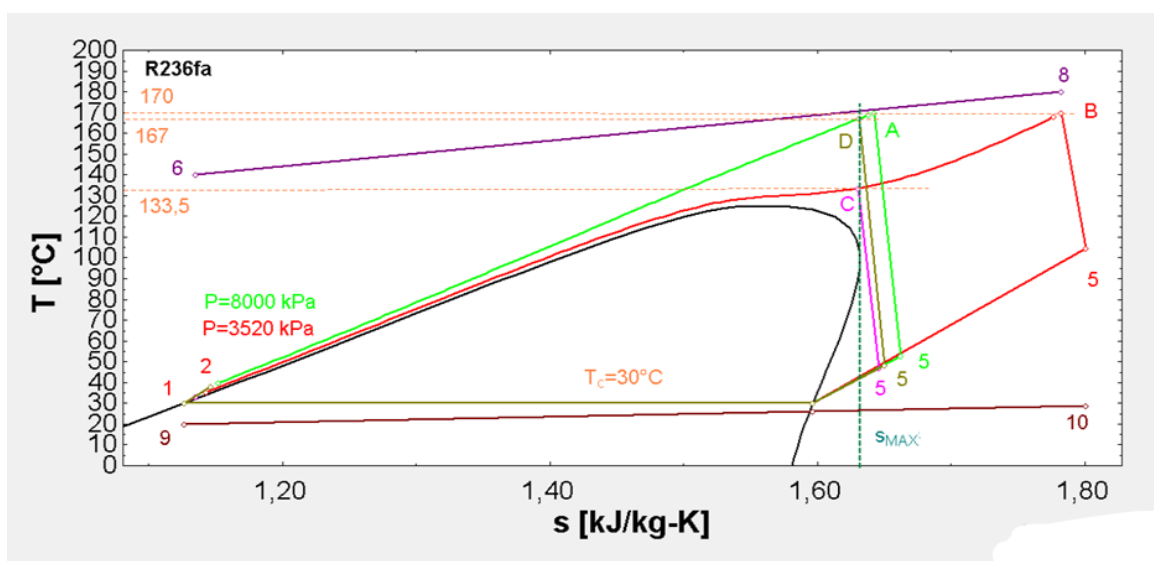
Za radni fluid R236fa nadkritično radno područje omeđeno je karakterističnim točkama:

A = temperatura 170°C i tlak 80 bar,

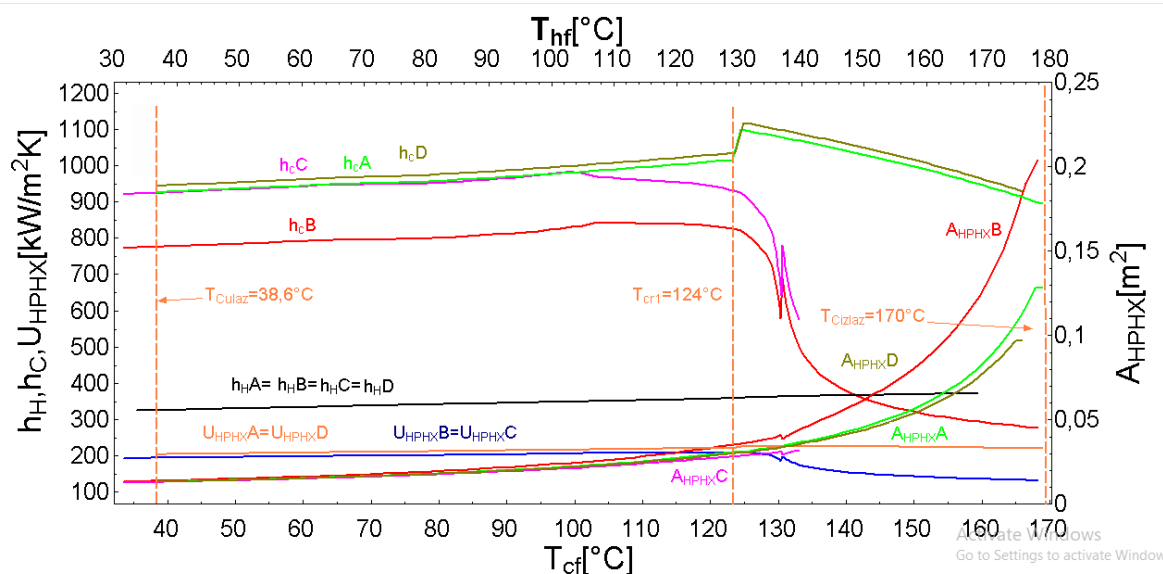
B = temperatura 170°C i tlak 35,2 bar,

C = temperatura 133,5°C i tlak 35,2 bar,

D = temperatura 167°C i tlak 80 bar.



Slika 4-99: Prikaz danog ORC ciklusa s karakterističnim točkama (A, B, C i D) nadkritičnog radnog područja za radni fluid R236fa



Slika 4-100: Prikaz promjene vrijednosti koeficijenta prijelaza toplote ( $h_H$ ,  $h_C$ ), ukupnih koeficijenta prolaza toplote ( $U_{HPHX}$ ) i površina segmenata izmjenjivača toplote ( $A_{HPHX}$ ) duž razmatranog izmjenjivača toplote za radni fluid R236fa