

# TERMODINAMIČKO OPTIMIRANJE DVOSTUPANJSKOG RAINKNEOVOG CIKLUSA S ORGANSKIM FLUIDOM ZA POTREBE GEOTERMALNE ELEKTRANE

---

Bešlić, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:128:589249>

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

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



**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

# TERMODINAMIČKO OPTIMIRANJE DVOSTUPANJSKOG RAINKNEOVOG CIKLUSA S ORGANSKIM FLUIDOM ZA POTREBE GEOTERMALNE ELEKTRANE

---

Bešlić, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:128:589249>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2023-02-13**



**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  
STROJARSKE KONSTRUKCIJE

Tomislav Bešlić

**Termodinamičko optimiranje  
dvostupanjskog Rankineovog ciklusa s  
organskim fluidom za potrebe geotermalne  
elektrane**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2022. godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STROJARSKE KONSTRUKCIJE

Tomislav Bešlić

**Termodinamičko optimiranje  
dvostupanjskog Rankineovog ciklusa s  
organskim fluidom za potrebe geotermalne  
elektrane**

ZAVRŠNI RAD

dr.sc. Mustapić Nenad, prof. v.š.

KARLOVAC, 2022. godina



## **IZJAVA:**

Izjavljujem da sam ja, student Tomislav Bešlić, matični broj 0248057261, upisan na Veleučilište u Karlovcu smjer stručni studij strojarskih konstrukcija akademske godine 2015/2016., radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja na Veleučilištu u Karlovcu. Ovim putem bih se htio zahvaliti mentoru Nenadu Mustapiću na pomoći prilikom izrade završnog rada.

Tomislav Bešlić

---

Karlovac, 29.9.2022.

## SAŽETAK

U ovom radu je odrađeno termodinamičko optimiranje Rankinevog ciklusa s organskim fluidom (ORC) za potrebe geotermalne elektrane. Definiran je matematički model postrojenja na osnovu prvog i drugog glavnog stavka termodinamike. Kao osnovni alat u završnom radu je korišten programski paket Engineering Equation Solver (EES). Za odabrane radne fluide je provedeno termodinamičko optimiranje navedene konfiguracije geotermalne elektrane pri temperaturama 120 °C, 140 °C, 160 °C i 180 °C. Naposljetku je odrađena konvencionalna eksergetska analiza za najbolje predstavnike kod odgovarajućih temperatura geotermalnog izvora pri čemu je zaključeno da je potrebno, obzirom na temperaturu geotermalne vode, upotrijebiti najprikladnije fluide za traženo postrojenje iz kojeg je cilj proizvesti što veću snagu sa najboljim vrijednostima energetske i eksergetske učinkovitosti.

Ključne riječi: Organski Rankineov ciklus, organski radni fluidi, geotermalna energija, eksergetska analiza

## SUMMARY

This paper presents thermodynamic optimization of the Rankine cycle with organic fluid (ORC) for the needs of a geothermal power plant. The mathematical model of the plant is based on the first and second main terms of thermodynamics, using an Engineering Equation Solver (EES) as a main tool.

Thermodynamic optimization, of the mentioned configuration of the geothermal power plant, was carried out for the selected working fluids at different temperatures (120 °C, 140 °C, 160 °C and 180 °C). Ultimately, the conventional exergetic analysis is performed to determine the optimal temperature of geothermal source. In conclusion, it is necessary to use the most suitable fluids for the requested improvement, considering the temperature of the geothermal water, to produce more power with the best values of energetic and exergetic efficiency.

Key words: Organic Rankine cycle, organic working fluids, geothermal energy, , exergetic analysis

# Sadržaj

Popis slika .....	
Popis tablica .....	
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TEORETSKE OSNOVE</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Geotermalna energija</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2 ORC s geotermalnom toplinom</b> .....	<b>3</b>
<b>2.3 Organski fluidi u ORC ciklusu</b> .....	<b>5</b>
<b>3. POSTAVA ZADATKA</b> .....	<b>6</b>
<b>3.1 Definiranje pojedinih komponenata dvostupanjskog Rankineovog ciklusa s organskim fluidom</b> .....	<b>6</b>
<b>3.2. Visokotemperaturni stupanj ORC postrojenja (VTS)</b> .....	<b>7</b>
<b>3.3 Niskotemperaturni stupanj ORC postrojenja (NTS)</b> .....	<b>9</b>
<b>4. RAZRADA ZADATKA</b> .....	<b>11</b>
<b>4.1 Analiza i optimiziranje ORC postrojenja</b> .....	<b>11</b>
<b>4.2 Programski paket EES (Engineering Equation Solver)</b> .....	<b>11</b>
<b>4.3 Organski fluidi korišteni u danom ORC postrojenju</b> .....	<b>12</b>
4.3.1 Analiza zadanih radnih fluida .....	14
4.3.2 Optimizacija .....	21
4.3.3 Razrada ostalih kombinacija fluida.....	27
<b>5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA</b> .....	<b>28</b>
<b>5.1. Opis najpovoljnijih fluida</b> .....	<b>28</b>
5.1.1. Isobutane .....	28
5.1.2 R1234ze(E).....	28
5.1.3 R134a.....	29
5.1.4. R1234yf.....	29
<b>5.2 Rezultati optimizacije na 120°C</b> .....	<b>30</b>
5.2.1 Rezultati kombinacije fluida R1234yf/R1234yf .....	33
5.2.2 Rezultati kombinacije fluida R1234yf/R1233zd(E) .....	35
<b>5.3 Rezultati optimizacije na 140°C</b> .....	<b>38</b>
5.3.1 Rezultati kombinacije fluida R134a/R1233zd(E) .....	41
5.3.2 Rezultati kombinacije fluida R134af/Neopentane.....	43
<b>5.4 Rezultati optimizacije na 160°C</b> .....	<b>45</b>
5.4.1 Rezultati kombinacije fluida R1234ze(E)/R134a .....	48
5.4.2 Rezultati kombinacije fluida R1234ze(E)/Isobutane .....	50

<b>5.5</b>	<b>Rezultati optimizacije na 180°C</b> .....	52
5.5.1	Rezultati kombinacije fluida Isobutane/R134a.....	55
5.5.2	Rezultati kombinacije fluida Isobutane/R1234ze(E) .....	57
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	59

## Popis slika

slika 1. Tlakovi i temperature unutar Zemljine kore [5] .....	2
slika 2. Postrojenje sa suhom parom [8].....	3
slika 3. Postrojenje sa jednostrukim isparavanjem [8] .....	4
slika 4. Binarni ciklus s organskim fluidom [9].....	4
slika 5. a) mokri fluid, b) izentropski fluid, c) suhi fluid [10] .....	5
slika 6. Toplinska shema dvostupanjskog ORC ciklusa s internim izmjenjivačem topline	6
slika 7. T-s dijagrami.....	7
slika 8. Proces zagrijavanja radnog fluida u visokotemperaturnom stupnju.....	8
slika 9. Turbina i elektro generator .....	8
slika 10. Kondenzator i pumpa .....	9
slika 11. Niskotemperaturni stupanj u zadanom ORC postrojenju.....	9
slika 12. T-s dijagram Cyclopentana za 120°C.....	15
slika 13. T-s dijagram Cyclopentana za 140°C.....	15
slika 14. T-s dijagram Cyclopentana za 160°C.....	16
slika 15. T-s dijagram Cyclopentana za 180°C.....	16
slika 16. Primjer parametarske tablice (8,2 bara) .....	17
slika 17. Parametarska tablica (9 bara) .....	18
slika 18. Parametarska tablica (9,5 bara) .....	19
slika 19. Postavke za ispis novog dijagrama .....	20
slika 20. W-p dijagram .....	20
slika 21. Prozor za optimiziranje .....	21
slika 22. Tablica za unos nezavisnih varijabli .....	22
slika 23. Broj kontrola optimizacije.....	22
slika 24. Dobiveni rezultati nakon optimizacije.....	23
slika 25. T-Q dijagram .....	26
slika 26. T-s dijagram visokotemperaturnog stupnja.....	26
slika 27. T-s dijagram niskotemperaturnog stupnja .....	27
slika 28. Dijagram snaga svih kombinacija fluida za 120°C.....	31
slika 29. W-p dijagram R1234yf/R1234yf .....	33
slika 30. T-s dijagrami R1234yf/R1234yf (desno VTS, lijevo NTS).....	34
slika 31. T-Q dijagram R1234yf/R1234yf.....	35
slika 32. T-Q dijagram R1234yf/R1233zd(E) .....	37

slika 33. Dijagram snaga svih kombinacija fluida za 140°C.....	39
slika 34. T-s dijagrami R134a/R1233zd(E) (desno VTS, lijevo NTS).....	42
slika 35. T-Q dijagram R134a/R1233zd(E).....	42
slika 36. T-Q dijagram R134a/ Neopentane.....	44
slika 37. Dijagram snaga svih kombinacija fluida za 160°C.....	46
slika 38. T-s dijagrami R1234ze(E)/R134a (desno VTS, lijevo NTS).....	49
slika 39. T-Q dijagram R1234ze(E)/R134a.....	49
slika 40. T-Q dijagram R1234ze(E)/Isobutan.....	51
slika 41. Dijagram snaga svih kombinacija fluida za 180°C.....	53
slika 42. T-s dijagrami Isobutane/R134a (desno VTS, lijevo NTS).....	56
slika 43. T-Q dijagram Isobutane/R134a.....	56
slika 44. T-Q dijagram Isobutane/R1234ze(E).....	58

## Popis tablica

Tablica 1. Fluidi korišteni za analizu i optimiziranje .....	13
Tablica 2. Zadane vrijednosti za potrebe analize.....	14
Tablica 3. Granica tlakova .....	21
Tablica 4. Parametri za maksimalni korisni rad .....	23
Tablica 5. Arrays table 1. dio .....	24
Tablica 6. Arrays table 2. dio .....	25
Tablica 7. Karakteristike Isobutana.....	28
Tablica 8. Karakteristike R1234ze(E) .....	29
Tablica 9. Karakteristike R134a.....	29
Tablica 10. Karakteristike R1234yf.....	29
Tablica 11. Wnet svih kombinacija za 120°C.....	32
Tablica 12. Granice tlakova R1234yf/R1234yf.....	33
Tablica 13. Rezultati R1234yf/R1234yf .....	34
Tablica 14. Granice tlakova R1234yf/R1233zd(E).....	35
Tablica 15. Rezultati R1234yf/R1233zd(E).....	36
Tablica 16. Wnet svih kombinacija za 140°C.....	40
Tablica 17. Granice tlakova R134af/R1233zd(E).....	41
Tablica 18. Rezultati R134af/R1233zd(E) .....	41
Tablica 19. Granice tlakova R134af/ Neopentane .....	42
Tablica 20. Rezultati R134af/ Neopentane .....	43
Tablica 21. Wnet svih kombinacija za 160°C.....	47
Tablica 22. Granice tlakova R1234ze(E)/R134a.....	48
Tablica 23. Rezultati R1234ze(E)/R134a .....	48
Tablica 24. Granice tlakova R1234ze(E)/Isobutane .....	50
Tablica 25. Rezultati R1234ze(E)/Isobutane .....	50
Tablica 26. Wnet svih kombinacija za 180°C.....	54
Tablica 27. Granice tlakova Isobutane/R134a.....	55
Tablica 28. Rezultati Isobutane/R134a.....	55
Tablica 29. Granice tlakova Isobutane/R1234ze(E) .....	57
Tablica 30. Rezultati Isobutane/R1234ze(E) .....	57



## Popis kratica

Oznaka	Jedinica	Opis
$p_{geo}$	kPa	Tlak geotermalnog fluida
$m_{geo}$	kg/s	Maseni protok geotermalnog fluida
$T_{amb}$	K	Temperatura okoliša
$P_{atm}$	kPa	Tlak okoliša
$T_{condHTS}$	K	Temperatura kondenzatora
$T_{condLTS}$	K	Temperatura kondenzatora
$T_{ppHTS}$	K	Temperaturna razlika geo i radnog fluida
$T_{ppLTS}$	K	Temperaturna razlika geo i radnog fluida
$T_{apHTS}$	K	Razlika između temp. zasićenja i temp. vode koja ulazi u isparivač
$T_{apLTS}$	K	Razlika između temp. zasićenja i temp. vode koja ulazi u isparivač
$\Delta T_{HTSSH}$	K	Temperaturna razlika pregrijavanja i temperature zasićenja
$\Delta T_{LTSSH}$	K	Temperaturna razlika pregrijavanja i temperature zasićenja
$\eta_{pHTS}$	%	Iskoristivost pumpe visokotemperaturnog stupnja
$\eta_{pLTS}$	%	Iskoristivost pumpe niskotemperaturnog stupnja
$\eta_{tHTS}$	%	Iskoristivost turbine visokotemperaturnog stupnja
$\eta_{tLTS}$	%	Iskoristivost turbine niskotemperaturnog stupnja

$\Delta T_{HTSSC}$	K	Temperaturna razlika zasićenja i trenutne temperature
$\Delta T_{LTSSC}$	K	Temperaturna razlika zasićenja i trenutne temperature
$\Delta T_{condHTS}$	K	Minimalna razlika između temperatura u kondenzatoru i radnom fluidu
$\Delta T_{condLTS}$	K	Minimalna razlika između temperatura u kondenzatoru i radnom fluidu
$W_{dot\_bhp}$	kW	Snaga pumpe
$P_{LTSmax}$	kPa	Maksimalni tlak niskotemperaturnog stupnja
$P_{HTSm}$	kPa	Maksimalni tlak visokotemperaturnog stupnja

# 1. UVOD

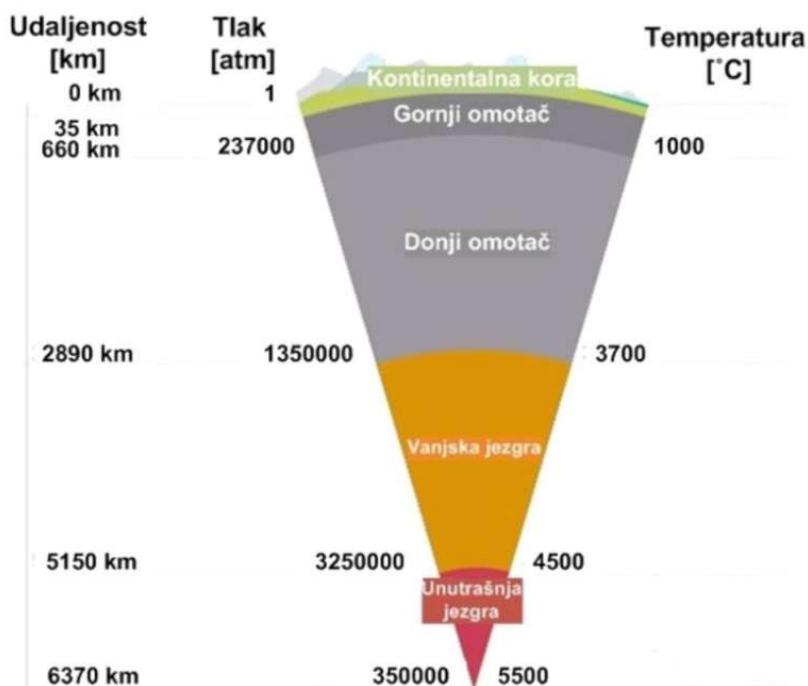
Za proizvodnju električne energije iz geotermalnih elektrana osnovna tehnologija se bazira na Rankineovom ciklusu s organskim fluidom (Organic Rankine Cycle – ORC). Zbog globalnog zatopljenja i zagađivanja okoliša je sve više izražena potreba za niskotemperaturnim i srednjetemperaturnim izvorima energije. Organski fluidi u Rankineovom ciklusu se koriste zbog nisko-temperaturnih i srednje-temperaturnih izvora geotermalne vode koji omogućuju proizvodnju električne energije ( u usporedbi sa vodom koja zahtijeva veće temperature i tlakove za dobivanje korisnog rada). U ORC postrojenju, toplinski tokovi iz nisko-temperaturnih izvora se pretvaraju u koristan rad, koji se u elektrogeneratoru pretvara u električnu energiju. Pomoću organskih fluida u ORC ciklusu moguća je proizvodnja električne energije iz niskotemperaturnih i srednjetemperaturnih geotermalnih izvora, gdje se iz proizvodnih bušotina na dubini između 2000 i 3500 m [1] dobavlja geotermalna voda temperaturnog raspona od 120 °C – 180 °C.

U ovom završnom radu se razmatra konfiguracija dvostupanjskog Rankineovog ciklusa s organskim fluidima za potrebe geotermalne elektrane sa internim izmjenjivačem topline u visokotemperaturnom stupnju, te su provedena termodinamička i eksergetska analiza i optimiranje ORC ciklusa koristeći dvanaest organskih radnih fluida (Cyclopentane, n-pentane, isopentane, neopentane, R1233zd(E), R245fa, R1234ze(Z), n-butane, isobutane, R1234ze(E), R134a i R1234yf) koji se kombiniraju međusobno u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju na temperaturama geotermalnih izvora od 120 °C, 140 °C, 160 °C i 180°C.

## 2. TEORETSKE OSNOVE

### 2.1 Geotermalna energija

Geotermalna energija se smatra obnovljivim izvorom energije, te se nalazi u zemljinoj unutrašnjosti. S povećanjem dubine u Zemljini unutrašnjost raste i temperatura stijena ili fluida, a temperatura Zemljine kore je između  $600^{\circ}\text{C}$  i  $1200^{\circ}\text{C}$  na dubini od 80 do 100 km, a procjenjuje se da je temperatura u Zemljinom središtu, na oko 6400 km dubine, oko  $5000^{\circ}\text{C}$  [2]. Geotermalna energija uglavnom nastaje uslijed polaganih prirodnih procesa raspadanja radioaktivnih elemenata (urana, torija i kalija) koji se nalaze u Zemljinoj unutrašnjosti. Takav proces se često naziva i fosilnom nuklearnom energijom [3]. U određenim dubinama Zemljine kore postoje ležišta geotermalnih fluida čija se energija može iskorištavati posredan ili neposredan način ovisno o temperaturi i tlaku fluida te njegovom sastavu. Geotermalni izvori se dijele na niske ( $<150^{\circ}\text{C}$ ), srednje ( $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ ) i visokotemperaturne geotermalne izvore ( $>200^{\circ}\text{C}$ ) [4]. Visokotemperaturnih geotermalnih izvora je relativno malo, a najveći broj je niskotemperaturnih geotermalnih izvora, a kojih u Republici Hrvatskoj, također, ima značajan broj.



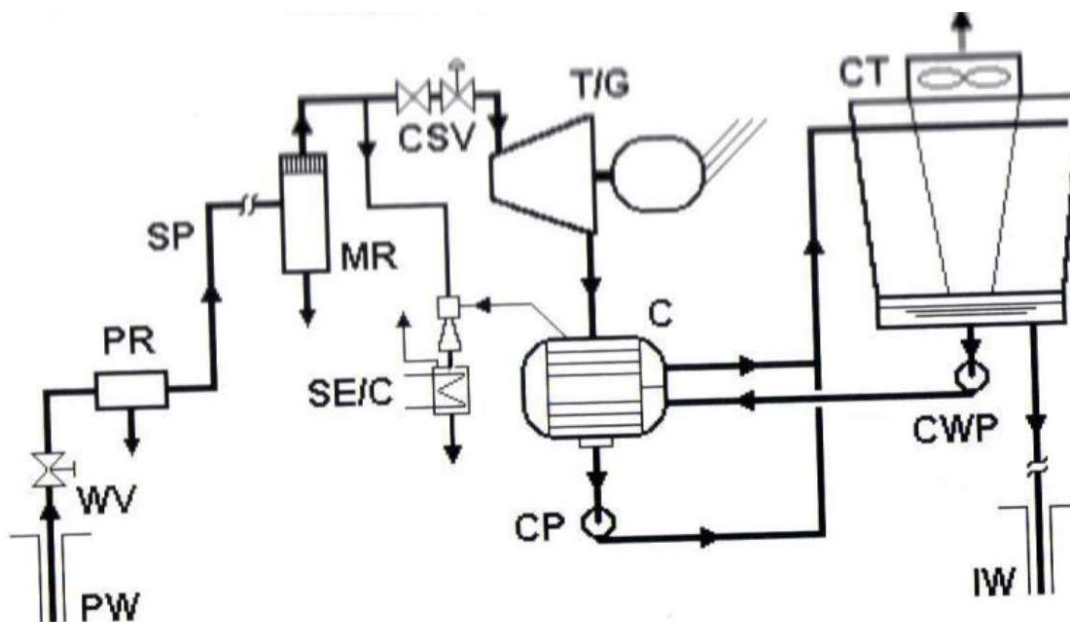
slika 1. Tlakovi i temperature unutar Zemljine kore [5]

## 2.2 ORC s geotermalnom toplinom

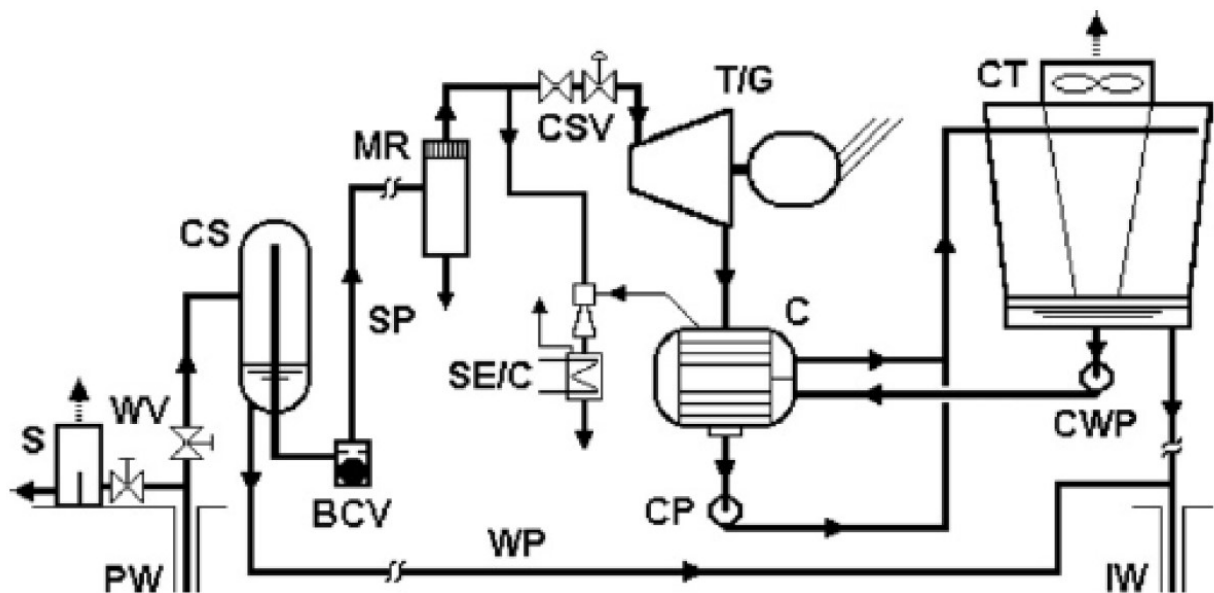
Podjela geotermalnih elektrana bazira se na termodinamičkim karakteristikama geotermalnog fluida. Iz geotermalnih bušotina može se eksploatirati suhozasićena ili pregrijana vodena para, voda u stanju vrele kapljevine, ili voda kao pothlađena kapljevine, te se tako i dijele na tri osnovna tipa [6]:

1. postrojenja sa suhom parom,
2. postrojenja s isparavanjem (jednostrukim i dvostrukim),
3. binarna postrojenja.

Instaliranje navedenih tipova geotermalnih elektrana ovisi o vrsti ležišta. Proizvodnja mehaničkog rada uz pomoć koje se dobiva električna energija zahtijeva paru za pogon turbina. Suha se para direktno odvodi u geotermalnu elektranu sa suhom parom, gdje ekspandira u turbini, obavljajući koristan mehanički rad za pogon električnog generatora (slika 2.). Za proizvodnju električne energije iz toplom vodom dominantnih geotermalnih ležišta, koriste se geotermalne elektrane s jednostrukim ili dvostrukim isparavanjem (slika 3.). Toplom vodom isparava se, u jednom ili dva isparivača, organski fluid te se nastala para odvodi u jednu ili dvije turbine. Ako ne postoje prirodna ležišta pare, ona se može proizvesti u vrućim suhim stijenama ili tzv. naprednim geotermalnim modulima [7].

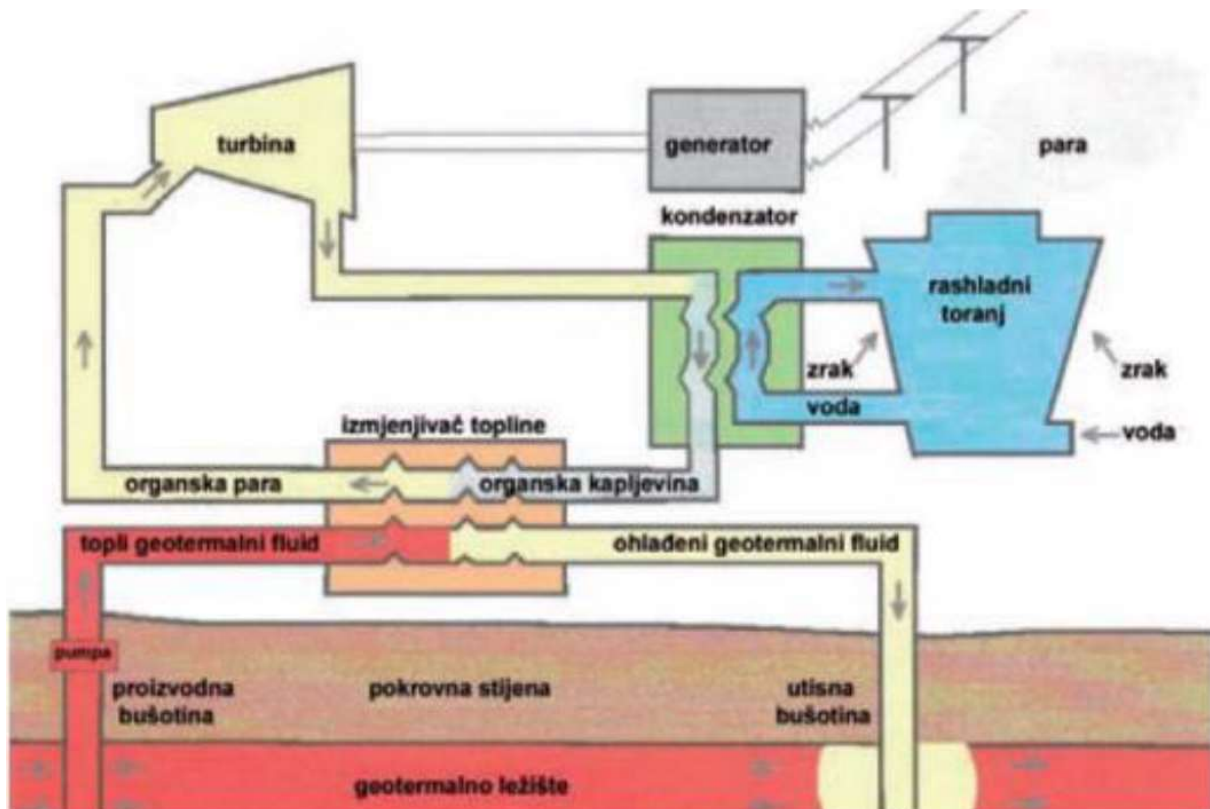


slika 2. Postrojenje sa suhom parom [8]



slika 3. Postrojenje sa jednostrukim isparavanjem [8]

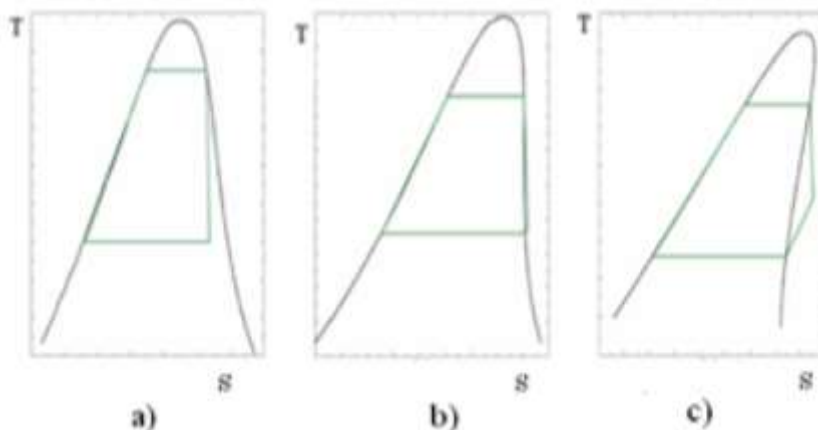
Na niskotemperaturnim geotermalnim izvorima gdje su niže razine pare može se dobiti posredno, korištenjem organskih fluida sa nižom točkom ključanja od vode. Geotermalni fluid predaje energiju radnom fluidu u izmjenjivaču topline (slika 4.).



slika 4. Binarni ciklus s organskim fluidom [9]

### 2.3 Organski fluidi u ORC ciklusu

Za dobro funkcioniranje cijelog procesa jedan od važnijih čimbenika je izbor radnih fluida. Izbor radnog fluida utječe na izlaznu snagu koju daje turbina. Radni fluidi se dijele na mokre, izentropske i suhe (slika 5.) [10].



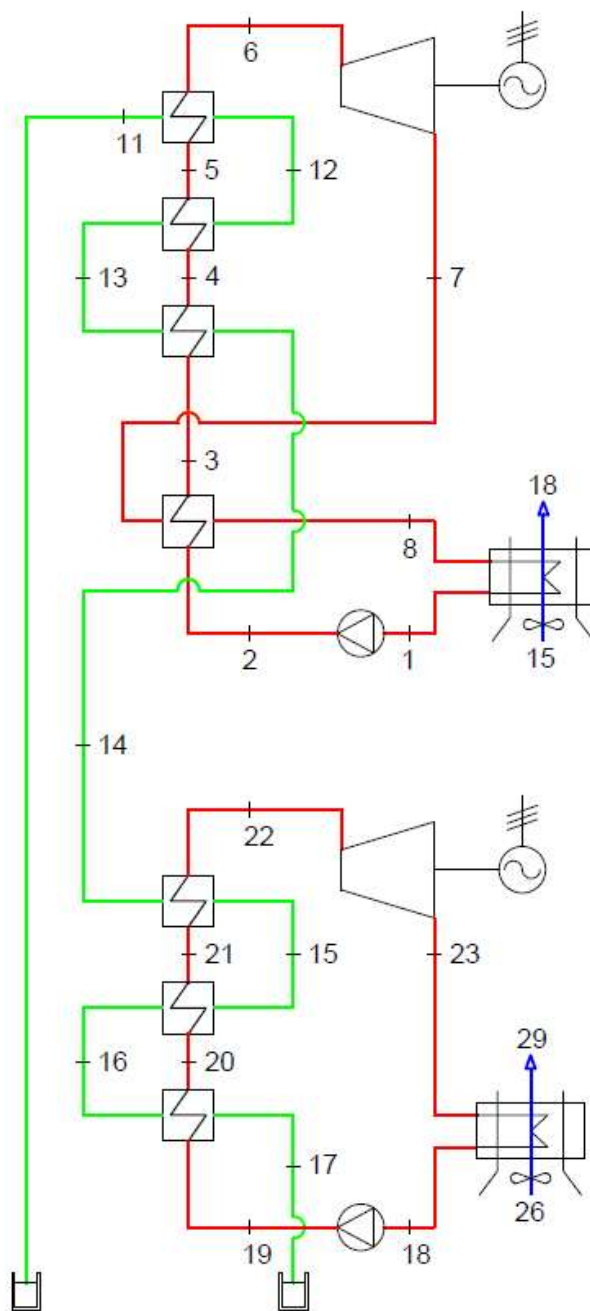
slika 5. a) mokri fluid, b) izentropski fluid, c) suhi fluid [10]

Nagib krivulje zasićenja iz T-s dijagrama određuje u kakvom će stanju radni fluid izaći iz turbine. Izbor mokrih fluida bih se trebao izbjegavati zbog negativnog nagiba krivulje zasićenja što znači da se tokom ekspanzije može naći kapljevita faza koja može naštetiti lopaticama turbine. Organski fluidi imaju tendenciju degradacije na višim temperaturama, za razliku od vode, na kojima su moguće kemijske promjene. Kod izbora organskog fluida treba naravno voditi računa o njegovom utjecaju na okoliš, a da u isto vrijeme bude siguran i cjenovno prihvatljiv.

### 3. POSTAVA ZADATKA

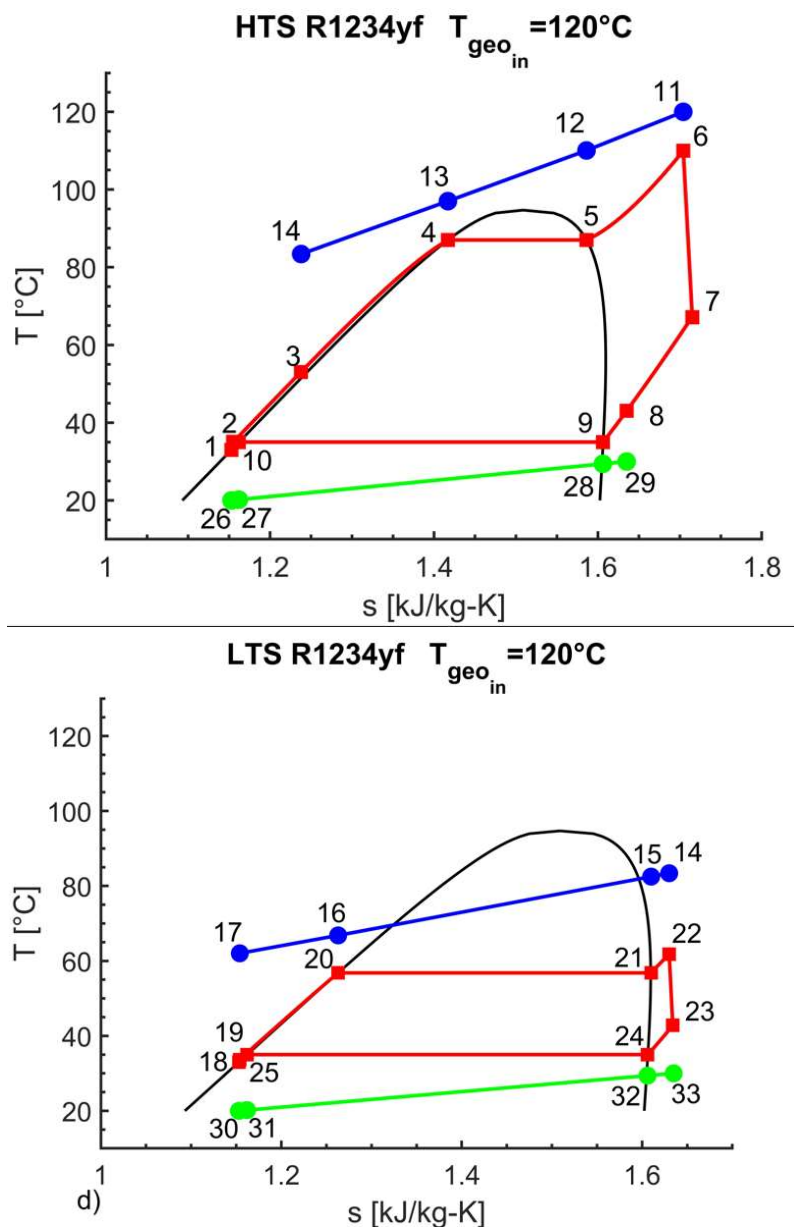
#### 3.1 Definiranje pojedinih komponenata dvostupanjskog Rankineovog ciklusa s organskim fluidom

Toplinska shema dvostupanjskog Rankineovog ciklusa s organskim fluidom i internim izmjenjivačem topline je prikazana na slici 6., a T-s dijagram navedenog ciklusa je dan na slici 7.



slika 6. Toplinska shema dvostupanjskog ORC ciklusa s internim izmjenjivačem topline

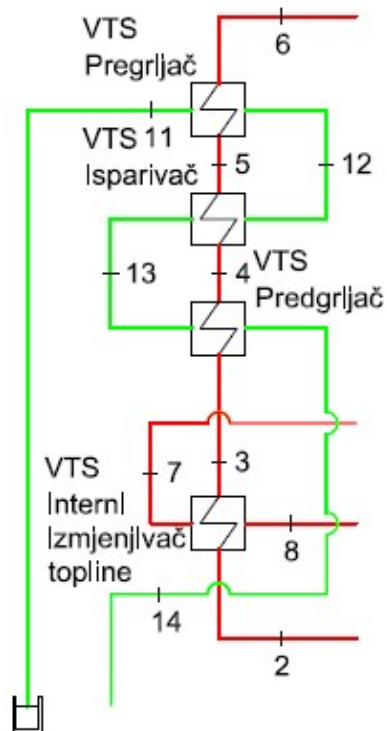




*slika 7. T-s dijagrami*

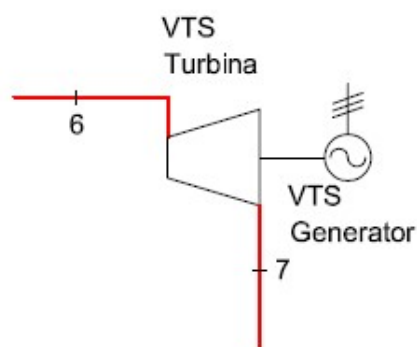
### 3.2. Visokotemperaturni stupanj ORC postrojenja (VTS)

Geotermalni fluid u ovom slučaju prvo prolazi kroz proces zagrijavanja radnog fluida u visokotemperaturnom stupnju gdje geotermalni fluid s nekom temperaturom  $T_{11}$  iz geotermalne bušotine ulazi u pregrijač (VTS<sub>pre</sub>) u kojemu se para pregrijava na temperaturu  $T_6$  i da bude što niži eksergetski gubitak, zatim geotermalni fluid  $T_{12}$  prolazi kroz isparivač (VTS<sub>isp</sub>) kako bi se radni fluid doveo iz stanja vrele kapljevine  $T_4$  do suhozasićene pare  $T_5$ . Nakon isparivača geotermalni fluid  $T_{13}$  se vodi do predgrijača (VTS<sub>pred</sub>) da se radnom fluidu dovede topline iz stanja  $T_3$  u stanje  $T_4$  pritom je radni fluid u stanju vrele kapljevine prije i poslije predgrijača, a prije predgrijača radni se fluid dodatno zagrijava u internom izmjenjivaču topline (VTS<sub>iit</sub>) u kojemu se predaje toplina iz radnog fluida koji izlazi iz turbine  $T_7$ , te ide dalje do kondenzatora (VTS<sub>kond</sub>)  $T_8$  (slika 8.).



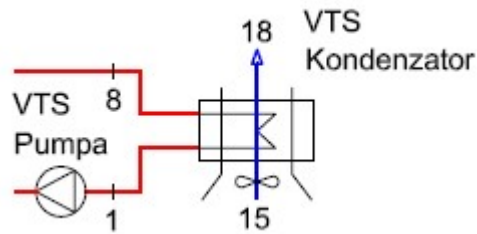
slika 8. Proces zagrijavanja radnog fluida u visokotemperaturnom stupnju

Nakon što se radni fluid zagrijavao uz pomoć geotermalnog fluida odlazi u turbinu ( $VTS_t$ ) gdje se energija fluida pretvara u mehanički rad i taj rad se u elektro-generatoru pretvara u električnu energiju (slika 9.). Radni fluid u turbini izentropski ekspandira i dalje ostaje u stanju pregrijane pare gdje se kasnije u internom izmjenjivaču topline hladi do stanja suhozasićene pare.



slika 9. Turbina i elektro generator

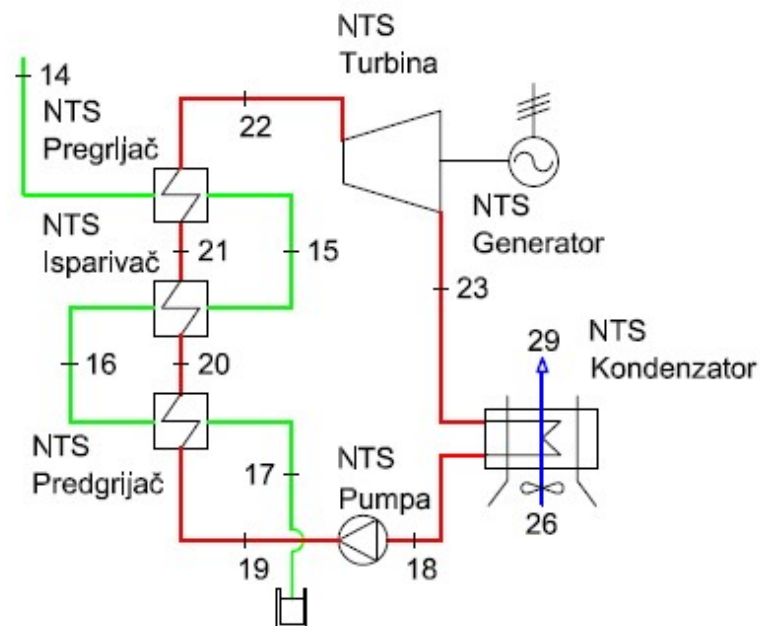
Kada radni fluid izmjeni energiju u internom izmjenjivaču topline odlazi u kondenzator ( $VTS_{kond}$ ) gdje ga se hladi do stanja vrele kapljevine pomoću zraka iz okoliša ( $T_{ok}=20^{\circ}C$ ,  $p_{ok}=1bar$ ). Radni fluid zatim ide u pumpu ( $VTS_p$ ) koja ga tlači ponovo na maksimalni tlak ciklusa (na izlasku iz turbine i u kondenzatoru je minimalni tlak) (slika 10.).



slika 10. Kondenzator i pumpa

### 3.3 Niskotemperaturni stupanj ORC postrojenja (NTS)

Geotermalni fluid stanja  $T_{14}$  nakon visokotemperaturnog stupnja ide do niskotemperaturnog stupnja koji je jednostavnije konstrukcije u odnosu na visokotemperaturni stupanj (bez internog izmjenjivača topline). Radni fluid u niskotemperaturnom stupnju poslije turbine ( $NTS_t$ ) ide odmah u kondenzator ( $NTS_{kond}$ ), a ne u interni izmjenjivač topline kao u visokotemperaturnom stupnju. Geotermalni fluid nakon niskotemperaturnog stupnja se utiskuje natrag u tlo  $T_{16}$ . Radni fluid se isto grije kroz tri izmjenjivača topline (predgrijač ( $NTS_{pred}$ ), isparivač ( $NTS_{isp}$ ), pregrijač ( $NTS_{pre}$ )) (slika 11.).



slika 11. Niskotemperaturni stupanj u zadanom ORC postrojenju

U postupku optimiranja ORC ciklusa za potrebne analize primijenjeno je nekoliko nezavisnih varijabli i pretpostavki:

1. postrojenje radi u energetski stacionarnom stanju,
2. temperatura okoliša je  $20^{\circ}\text{C}$ , a atmosferski tlak iznosi  $101,325\text{ kPa}$ ,

3. stanje fluida na ulazu u pumpu je vrela kapljevina,
4. izentropski stupanj korisnosti pumpe i turbine iznosi 0,90 i 0,80,
5. zanemaruje se pad tlaka u svim izmjenjivačima topline,
6. rashladni fluid u kondenzatoru je zrak s ulaznom temperaturom od 20°C,
7. u cjevovodima se ireverzibilnost zanemaruje,
8. karakteristika geotermalnog izvora zadana je masenim protokom geotermalnog fluida ( $\dot{m}_{geo}$ ) 1 (kg/s), te temperaturom i tlakom na izlazu iz geotermalne bušotine ( $T_{11}$  i  $P_{11}$ ) u iznosu od 120°C, 140°C, 160°C, 180°C i 200kPa.

## **4. RAZRADA ZADATKA**

### **4.1 Analiza i optimiziranje ORC postrojenja**

Na Rankinevom dvostupanjskom ciklusu je provedeno preliminarno analiziranje i optimiziranje geotermalne elektrane s organskim fluidom za potrebe proizvodnje električne energije. Parametri organskog radnog fluida koji se provode analiziranjem su temperatura i tlak u više točaka zagrijavanja, temperatura i tlak kondenzacije. Termodinamička analiza se provodi zbog pronalaženja maksimalne vrijednosti korisnog rada u kombinaciji dva radna fluida korištena u visokotemperaturnom stupnju i niskotemperaturnom stupnju, energetska učinkovitost, te eksergetski stupnjevi korisnosti ciklusa i postrojenja. Eksergetskom analizom potrebno je utvrditi koje su veličine, izvor i mjesta uzrok termodinamičkih neučinkovitosti u termodinamičkom modulu. Te informacije, koje se ne mogu riješiti uz pomoću termodinamičke analize modula, koriste se za poboljšanje stupnja učinkovitosti termodinamičkog stupnja, ili se mogu koristiti za potrebe usporedbe učinkovitosti dvaju termodinamičkih modula. Analize ciklusa sa zadanim organskim fluidima potrebno je provesti eksergetsko i termodinamičko optimiranje osnovnih nezavisnih varijabli postrojenja. Za termodinamičku i eksergetsku analizu i optimiranje postrojenja je izveden matematički model zadanog ORC ciklusa korištenjem programskog paketa EES (Engineering Equation Solver).

### **4.2 Programski paket EES (Engineering Equation Solver)**

Engineering Equation Solver (EES) je softverski paket kojega se koristi za rješavanje stupnja nelinearnih jednadžbi. Pruža mnogo korisnih već unesenih funkcija i jednadžbi za rješavanje termodinamičkih problema i prijenosa topline, što ga čini široko korištenim programom za inženjere strojarstva koji rade u tim područjima. EES ima mogućnost pohranjivanja termodinamičkih svojstava, što eliminira ručno rješavanje problema upotrebom ispisanog koda koji ima svojstva za spomenuta termodinamička svojstva.

U EES-u se također mogu koristiti parametarske tablice koje omogućuju korištenje više varijabli odjednom. Pomoću parametarskih tablica također se mogu generirati dijagrami. EES se također može integrirati, i u tablicama i kao naredba u kodu. EES također koristi alate za optimizaciju koji za odabranu varijablu minimiziraju ili maksimiziraju mijenjanjem niza drugih varijabli. EES kod omogućuje unesenim

jednadžbama rješavanje bilo kojim redoslijedom, ali također može sadržavati if-then izjave, koje se također mogu unositi jedna u drugu kako bi se stvorile if-then-else pojmovi.

#### **4.3 Organski fluidi korišteni u danom ORC postrojenju**

U završnom radu je korišteno 12 organskih radnih fluida (Tablica 1.) koji se međusobno kombiniraju u postrojenju postavljanjem jednog fluida u visokotemperaturni stupanj i jednog u niskotemperaturni stupanj, te su tako kombinirani na temperaturama 120°C, 140°C, 160°C i 180°C i tlakom geofluida za sve temperature na 10 bara. Analizom i optimiranjem u programskom paketu EES su tražene najbolje kombinacije fluida u zadanom ORC postrojenju za sve navedene temperature.

Tablica 1. Fluidi korišteni za analizu i optimiziranje

Wf	$P_{cr}$ (bar)	$T_{cr}$ (°C)	$0,9 \cdot P_{cr}$ (bar)	$T_{0,9 \cdot P_{cr}}$ (°C)	$P_{cond}$ (35°C)	$P_{sat}=105^\circ\text{C}$ (za 120°C)	$P_{sat}=125^\circ\text{C}$ (za 140°C)	$P_{sat}=145^\circ\text{C}$ (za 160°C)	$P_{sat}=165^\circ\text{C}$ (za 180°C)
Cyclopentane	45,71	238,6	41,14	231	0,6184	4,667 bar	7,222 bar	10,67 bar	15,22 bar
n-pentane	33,64	196,5	30,28	189,2	0,9835	6,597 bar	9,993 bar	14,56 bar	20,59 bar
Isopentane	33,7	187,2	30,33	180,3	1,288	8,021 bar	11,946 bar	17,13 bar	23,87 bar
Neopentane	31,96	160,6	28,76	154	2,333	12,33 bar	17,79 bar	24,91 bar	SC
R1233zd(E)	35,73	165,6	32,15	159,4	1,83	11,6 bar	17,35 bar	25,06 bar	SC
R245fa	36,51	154	32,86	148,5	2,11	14,16 bar	21,27 bar	30,84 bar	SC
R1234ze(Z)	35,31	150,1	31,78	144,2	2,476	15,0 bar	22,32 bar	SC	SC
n-butane	37,96	152	34,16	145,6	3,29	16,8 bar	24,15 bar	33,82 bar	SC
Isobutane	36,4	134,7	32,76	128,4	4,645	21,76 bar	30,91 bar	SC	SC
R1234ze(E)	36,32	109,4	32,69	103,9	6,685	SC	SC	SC	SC
R134a	40,59	101	36,53	95,81	8,875	SC	SC	SC	SC
R1234yf	33,82	94,7	30,44	89,4	8,952	SC	SC	SC	SC
SC - Supercritical									

### 4.3.1 Analiza zadanih radnih fluida

Za optimiziranje su se određivale granice nezavisnih varijabli u kojem će se području vršiti optimizacija, a to su nezavisne varijable:

1. tlak radnog fluida u visokotemperaturnom stupnju,
2. tlak radnog fluida u niskotemperaturnom stupnju,
3.  $\Delta_{T_{PRE}}$  (5-20°C).

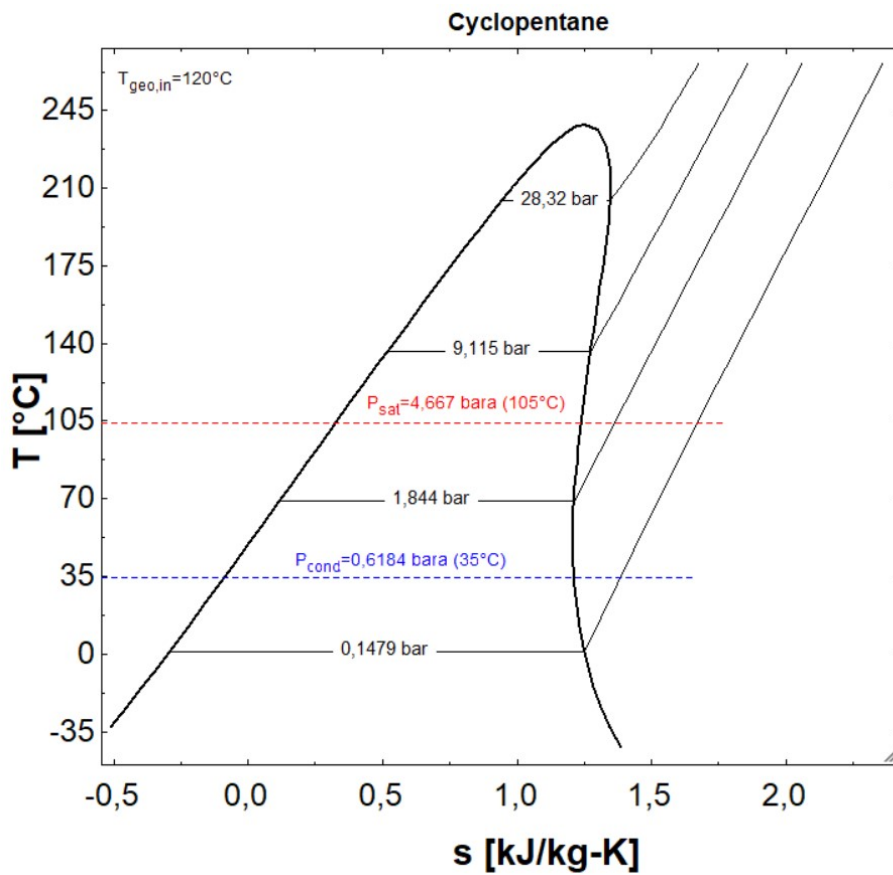
Na T-s dijagramu su prikazani tlakovi među kojima se vrši ciklus i gdje se nalaze optimalni tlakovi za maksimalni rad nekog radnog fluida. Sa rastom temperature geotermalnog izvora tako raste i tlak na kojem će se optimizirati pojedini fluid.

Primjer T-s dijagrama je uzet Cyclopentane za temperature 120°C (slike 12.), 140°C (slike 13.), 160°C (slike 14.) i 180°C (slike 15.). U tablici 2. su zadane vrijednosti koje su ostale konstantne tijekom analize. U svim analizama je pretpostavljeno da je maseni protok geotermalnog fluida 1 kg/s.

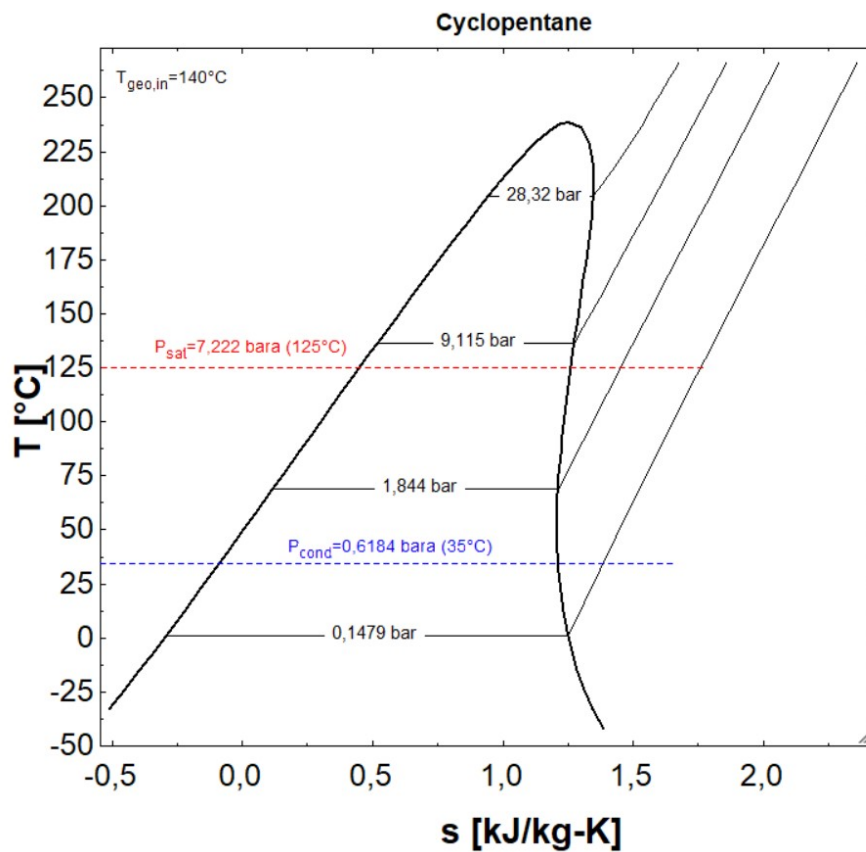
Tablica 2. Zadane vrijednosti za potrebe analize

Konstantne varijable	Vrijednosti
$p_{ok}$ [kPa]	101,3
$T_{ok}$ [°C]	20
$T_c$ [°C]	35
$T_{geo}$ [°C]	120, 140, 160, 180
$p_{geo}$ [kPa]	100
$\eta_{turbine}$ [%]	0,8
$\eta_{pumpe}$ [%]	0,9
$\Delta T_{pp}=\Delta T_E$ [°C]	5

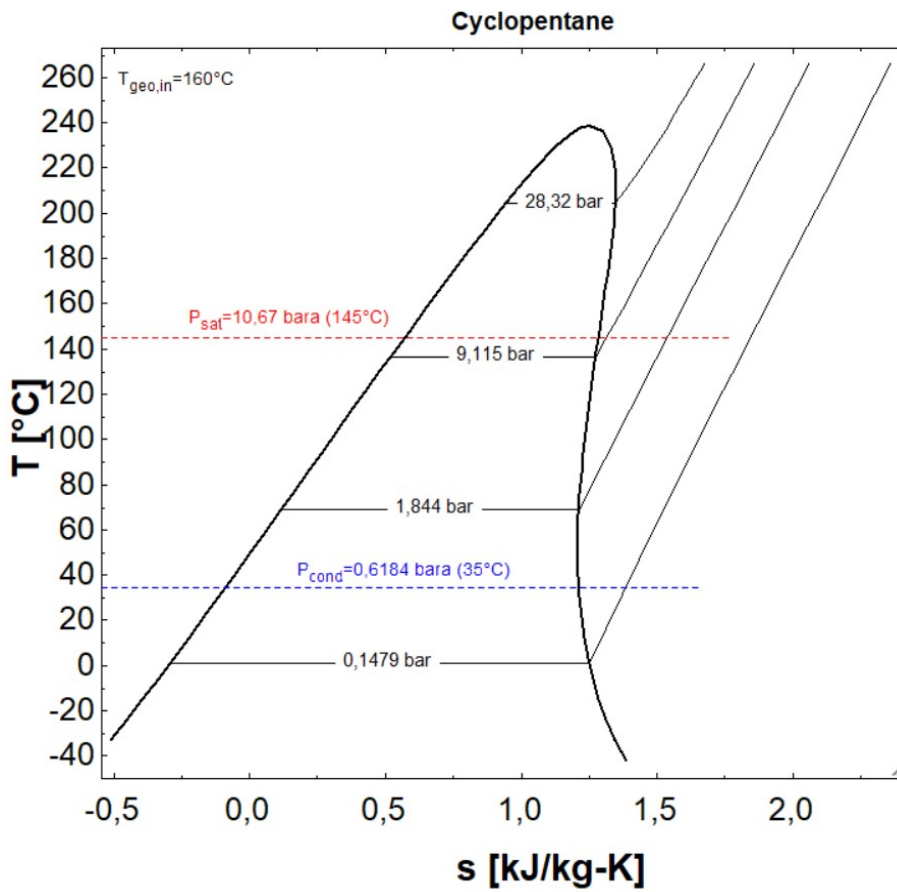




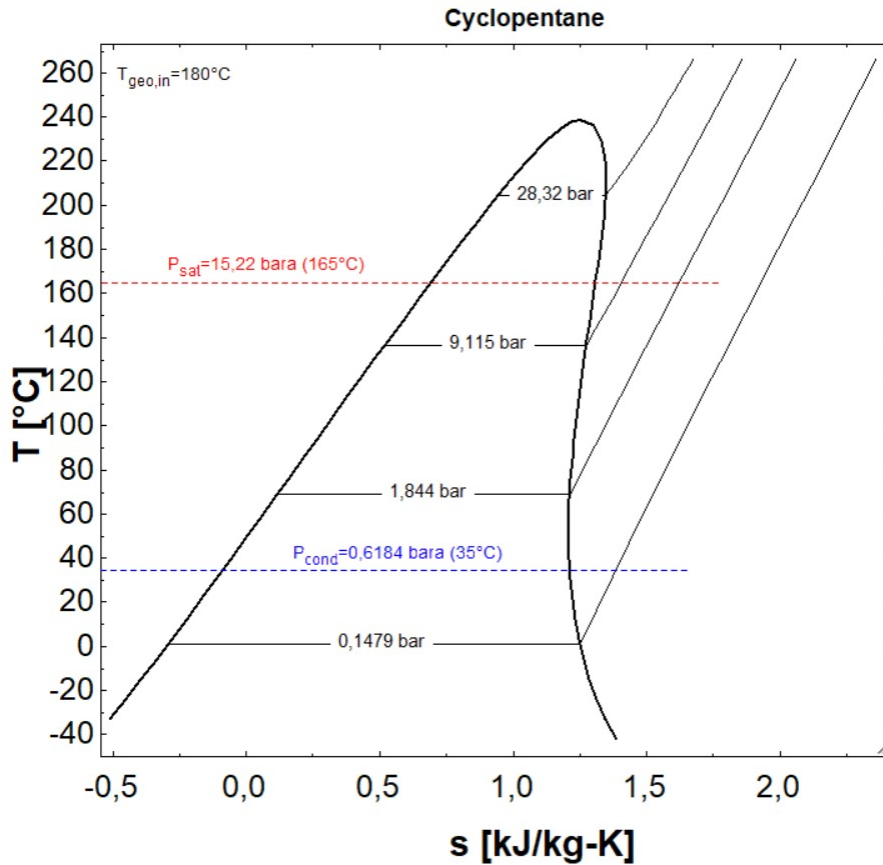
slika 12. T-s dijagram Cyclopentana za 120°C.



slika 13. T-s dijagram Cyclopentana za 140°C



*slika 14. T-s dijagram Cyclopentana za 160°C*



*slika 15. T-s dijagram Cyclopentana za 180°C*

Na T-s dijagramu je krivulja zasićenja Cyclopentana te su iscrtane linije tlakova  $P_{cond}$  koja predstavlja tlak na koji se radni fluid pada kad se ohladi u kondenzatoru na  $35^{\circ}\text{C}$  i  $P_{sat}$  koji predstavlja tlak isparavanja radnog fluida na temperaturu. Nakon određivanja tlakova isparavanja odnosno tlaka u kondenzatoru u T-s dijagramu uz pomoć W-p dijagrama se te granice sužavaju za što precizniju optimizaciju. EES također uključuje parametarske tablice koje korisniku omogućuju usporedbu više varijabli odjednom. Parametarske tablice također se mogu koristiti za generiranje dijagrama (slika 16.).

	1	2
	$P_{maxHTS}$ [bar]	$W_{net}$ [kW]
Run 1	4	16,15
Run 2	4,105	16,3
Run 3	4,211	16,44
Run 4	4,316	16,55
Run 5	4,421	16,65
Run 6	4,526	16,73
Run 7	4,632	16,79
Run 8	4,737	16,84
Run 9	4,842	16,87
Run 10	4,947	16,89
Run 11	5,053	16,89
Run 12	5,158	16,89
Run 13	5,263	16,86
Run 14	5,368	16,83
Run 15	5,474	16,78
Run 16	5,579	16,73
Run 17	5,684	16,66
Run 18	5,789	16,58
Run 19	5,895	16,49
Run 20	6	16,39

slika 16. Primjer parametarske tablice (8,2 bara)

Primjer je uzet iz kombinacije radnih fluida n-pentana u visokotemperaturnom stupnju i Isobutana u niskotemperaturnom stupnju na geotermalnom izvoru temperature od  $120^{\circ}\text{C}$ . Uz pomoć parametarske tablice tlak u visokotemperaturnom stupnju ( $p_{maxVTS}$ ) podijelimo na više varijabli, u ovom slučaju na njih dvadeset. korak 1 je donja granica (4 bara), a korak 20 je gornja granica (6 bara), te kad se one postave uz pomoć naredbe Alter Values podjeli granice na 20 podjednakih dijelova od jedne do druge granice. Tlak

u niskotemperaturnom sistemu je konstantan te je on u ovom slučaju stavljen na 8,2 bara. Postavljanjem uglatih zagrada u ispisanom kodu na nezavisna varijabla on postaje „tekst“ i kao takvog ga možemo koristiti u parametarskim tablicama i dobiti više varijabli za tu nezavisnu varijablu, a nakraju tražene rezultate za sve varijable i lakšu predodžbu kod sužavanja granica za optimiziranje. Kada u parametarskoj tablici vidimo da koristan rad ( $W_{net}$ ) raste, u ovom slučaju do amplitude 16,89 kW, te počne padat znači da smo našli granice za visokotemperaturni stupanj kad je u niskotemperaturnom stupnju 8,2 bara. Zatim se mijenja tlak u niskotemperaturnom stupnju i ponovo u parametarskim tablicama se traži maksimalni koristan rad. Sljedeći tlak koji se analizira u niskotemperaturnom stupnju je 9 bara (slika 17.).

8,2 bara   9 bara   9,5 bara		
1.20	$P_{maxHTS}$ [bar]	$W_{net}$ [kW]
Run 1	4	15,87
Run 2	4,105	16,05
Run 3	4,211	16,22
Run 4	4,316	16,37
Run 5	4,421	16,5
Run 6	4,526	16,61
Run 7	4,632	16,71
Run 8	4,737	16,79
Run 9	4,842	16,85
Run 10	4,947	16,9
Run 11	5,053	16,94
Run 12	5,158	16,96
Run 13	5,263	16,98
Run 14	5,368	16,97
Run 15	5,474	16,96
Run 16	5,579	16,94
Run 17	5,684	16,9
Run 18	5,789	16,86
Run 19	5,895	16,8
Run 20	6	16,74

slika 17. Parametarska tablica (9 bara)

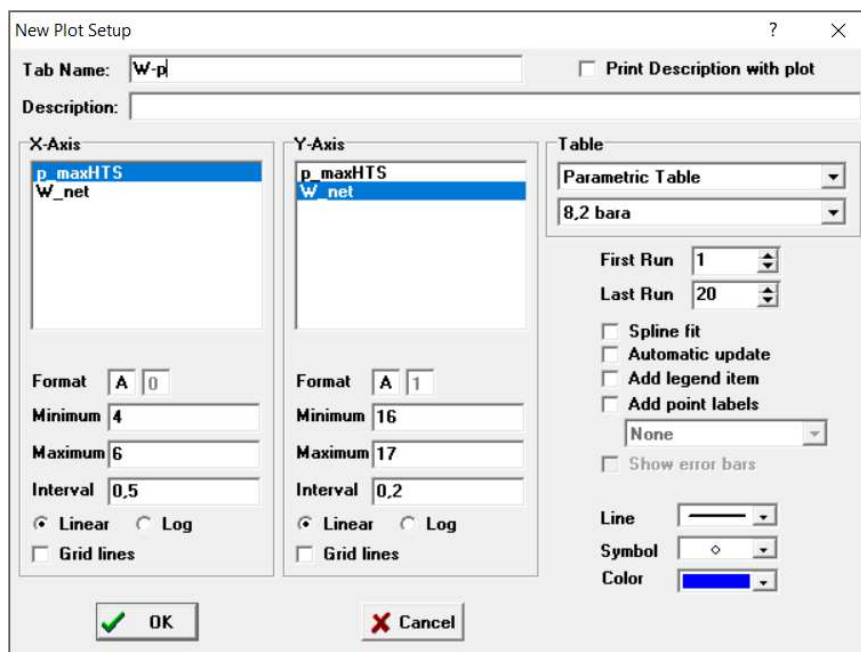
Na tlaku od 9 bara u niskotemperaturnom stupnju koristan rad je porastao na 16,98 kW što znači da bi trebalo povećati tlak u niskotemperaturnom stupnju tako da se nađe

gornja granica tlaka u niskotemperaturnom stupnju. Sljedeći postavljeni tlak u niskotemperaturnom stupnju je 9,5 bara (slika 18.).

	8,2 bara	9 bara	9,5 bara
1.20			
		$P_{\max\text{HTS}}$ [bar]	$W_{\text{net}}$ [kW]
Run 1		4	15,53
Run 2		4,105	15,74
Run 3		4,211	15,93
Run 4		4,316	16,09
Run 5		4,421	16,24
Run 6		4,526	16,38
Run 7		4,632	16,49
Run 8		4,737	16,59
Run 9		4,842	16,68
Run 10		4,947	16,75
Run 11		5,053	16,8
Run 12		5,158	16,85
Run 13		5,263	16,88
Run 14		5,368	16,9
Run 15		5,474	16,91
Run 16		5,579	16,9
Run 17		5,684	16,89
Run 18		5,789	16,86
Run 19		5,895	16,83
Run 20		6	16,78

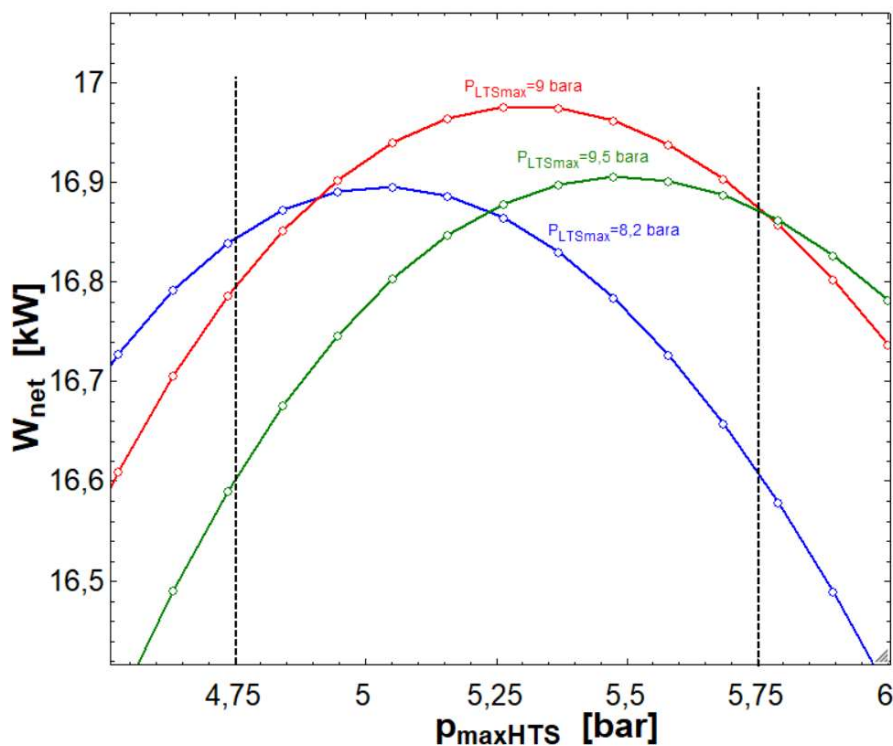
slika 18. Parametarska tablica (9,5 bara)

Kod tlaka od 9,5 bara u niskotemperaturnom stupnju je amplituda korisnog rada pala na 16,91 kW pa se da zaključiti kako je maksimalni korisni rad između 8,2 bara i 9,5 bara. Nakon toga kreće izrada W-p dijagrama iz dobivenih parametarskih tablica uz pomoć kojeg ćemo točnije odrediti granice tlakova za visokotemperaturni stupanj. Za izradu W-p dijagrama se ode na naredbu New plot window i odabere se opcija x-y plot, te se otvara prozor New Plot Setup (slika 19.).



slika 19. Postavke za ispis novog dijagrama

Naziv dijagrama je npr. W-p i odaberu se na desnom dijelu prozora tablice koje se koriste za iscrtavanje dijagrama u ovom slučaju su parametarske tablice za tlak od 8,2 bara. Za x-os se postavi p\_maxVTS, a na y-os W\_net, te se dole desno mogu postaviti vrsta i boja linije zbog bolje preglednosti dijagrama kada se još dodatno nacrtaju dijagrami za ostale tlakove iz parametarskih tablica. Kada se ponovi procedura za sva tri tlaka dobije se W-p dijagram (slika 20.).



slika 20. W-p dijagram



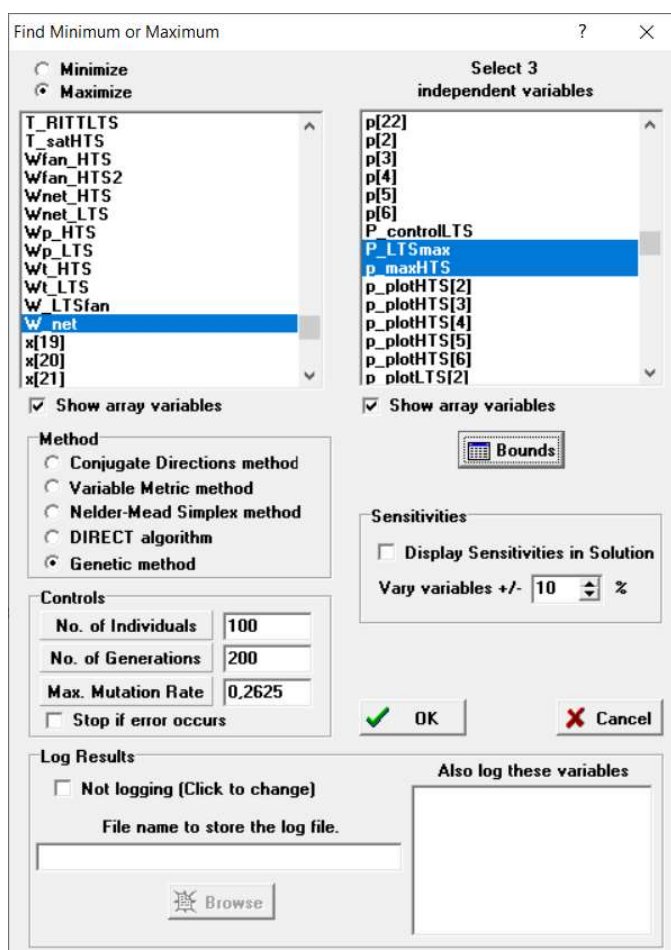
### 4.3.2 Optimizacija

Iz dobivenog W-p dijagrama se može vidjeti u kojem je području otprilike maksimalni korisni rad i odrediti konačne granice tlakova niskotemperaturnog i visokotemperaturnog stupnja. Granice tlakova za visokotemperaturni stupanj su iscrtane isprekidanom linijom. Granice tlakova za kombinaciju fluida Isopentane u visokotemperaturnom stupnju i Isobutane u niskotemperaturnom stupnju na geotermalnom izvoru od 120°C u Tablici 3.

Tablica 3. Granica tlakova

	min	max
P <sub>VTS</sub>	8,2 bara	9,5 bara
P <sub>NTS</sub>	4,75 bara	5,75 bara

Granice iz Tablice 2. koje su određene analizom i W-p dijagramom se koriste kod optimizacije. Kod optimiziranja tlakove u stupanjima i  $\Delta T_{NTS,SH}$  se stavljaju u zagrade, pa se tako smatraju neovisnim varijablama. Opcijom Find minimum or maximum se vrši optimizacija i otvara se prozor (slika 21.) u kojemu se odaberu neovisne varijable.



slika 21. Prozor za optimiziranje

Zatim se ode na dodatnu opciju Bounds (slika 22.), te se u tu tablicu upišu podaci iz Tablice 2., a za  $\Delta T_{NTS,SH}$  upišu minimalna temperatura 5°C, a maksimalna temperatura 20°C.

Variable	Guess	Lower	Upper	Display	Units	Alt Units	Key	Comment
DeltaT_LTSSH	5	5,0000E+00	2,0000E+01	A 3	N C			
P_LTSmax	8,2	8,2000E+00	9,5000E+00	A 0	N bar			
p_maxHTS	5	4,7500E+00	5,7500E+00	A 0	N bar			

slika 22. Tablica za unos nezavisnih varijabli

Proračun se vrši genetičkom metodom i broj kontrola optimizacije je prikazano na slici 23. Broj kontrola utječe na preciznost rezultata i samo trajanje optimizacije.

slika 23. Broj kontrola optimizacije

Zatim se pokreće optimizacija i nakon nekog vremenskog razmaka dobiju rezultati optimizacije (slika 24. i Tablica 4. i 5.) traženog postrojenja sa zadanim parametrima. Vrijeme optimizacije zavisi od fluida koji se kombiniraju. Od dobivenih rezultata je moguće iscrtati T-Q dijagram (slika 25.) i upisati vrijednosti tlakova i temperatura u postrojenju koji se dobiju kao rezultati. Crtanje T-Q dijagrama se izvodi na sličan način kao i W-p dijagrama, ali umjesto Parametric Table se koriste Arrays Table koji se dobiju nakon optimizacije, tako i T-s dijagram (slika 26.).



Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

Maximization of W\_net(Delta\_LTSSH\_P\_LTSmax\_p\_maxHTS) 20299 iterations: Genetic method (-100 individuals, 200 generations)

AUHTScnd = 10.8 [kJ/s-C]	AUHTScondensator = 11.32 [kJ/s-C]	AUHTSDS = 0.4201 [kJ/s-C]	AUHTSEV = 4.699 [kJ/s-C]	AUHTSS = 1.848 [kJ/s-C]	AUHTSPH = 0.962 [kJ/s-C]	AUHTSSC = 0.09889 [kJ/s-C]
AUHTSSH = 0.8538 [kJ/s-C]	AUHTSst = 19.68 [kJ/s-C]	AULTScnd = 10.01 [kJ/s-C]	AULTScondensator = 10.77 [kJ/s-C]	AULTSDS = 0.6521 [kJ/s-C]	AULTSEV = 4.644 [kJ/s-C]	AULTSPH = 1.128 [kJ/s-C]
AULTSSC = 0.1083 [kJ/s-C]	AULTSst = 0.1153 [kJ/s-C]	AULTSSD = 16.66 [kJ/s-C]	betaHTS = 0.2977	betaLTS = 0.3	cPa1 = 1.007 [kJ/kg-K]	cPa2 = 1.006 [kJ/kg-K]
cPa13 = 1.007 [kJ/kg-K]	cPa14 = 1.007	cPaHTS = 1.007 [kJ/kg-K]	cPaLTS = 1.007 [kJ/kg-K]	cPgeo2 = 4.227 [kJ/kg-K]	cPgeo3 = 4.243 [kJ/kg-K]	cPgeo4 = 4.207 [kJ/kg-K]
cPgeo4 = 4.204 [kJ/kg-K]	cPgeo5 = 4.193	cPgeoHTS = 4.226 [kJ/kg-K]	cPLTSgeo = 4.193 [kJ/kg-K]	cwS = 'Air_ha'	dTmLTScond = 9.513 [C]	dTmLTSscnd = 10.14 [C]
dTmLTSSEV = 18.3 [C]	dTmLTSph = 19.04 [C]	dTmLTSsc = 13.9 [C]	dTmLTSsh = 28.1 [C]	dTmHTScond = 9.288 [C]	dTmHTSDS = 7.924 [C]	dTmHTSEV = 18.36 [C]
dTmHTSHSE = 11.75 [C]	dTmHTSPH = 17.52 [C]	dTmHTSSC = 13.91 [C]	dTmHTSSH = 18.36 [C]	dTcondHTS = 5 [C]	dHTSSC = 2 [C]	<b>dHTSSH = 24.11 [C]</b>
dTHEHTS = 8	dLTSScond = 5 [C]	dLTSSC = 2 [C]	<b>dLTSSH = 5 [C]</b>	effectivenessHTSENPLANT = 0.2812	effectivenessHTSENPLANT = 0.4362	effectivenessLTSENPLANT = 0.3639
effectivenessLTSEXPLANT = 0.5639	eHTSCON = 0.283	eHTSEV = 0.8088	eHTSHE = 0.7266	eHTSP = 0.7505	eHTSPH = 0.7827	eHTSSH = 0.8364
eHTST = 0.8281	eLTScon = 0.2792	eLTSSEV = 0.7107	eLTSPEV = 0.7506	eLTSPh = 0.5998	eLTSPh = 0.6568	eLTSST = 0.8173
eLTSst = 0.1512 [kJ/s]	<b>eRecHTS = 0.8299</b>	eHTHTS = 0.2014 [kJ/kg]	lCycleENwLTS = 21.72	lHTScycleEN = 10.12 [s-K/kg-C]	lHTScycleENwF = 10.12 [s/kg]	lHTScycleEX = 44.64 [kJ/kg]
<b>lHTSplanEX = 2.845 [%]</b>	<b>lHTSplanEX = 19.47 [%]</b>	lLTScycleEN = 4.52	lHTScycleEX = 27.08 [kJ/s]	<b>lLTSplanEX = 1.645 [%]</b>	<b>lLTSplanEX = 15.27 [%]</b>	lmp = 0.95
lnet = 0.95	lPHTS = 0.7	lLTS = 0.7	lPHTS = 0.85	lLTS = 0.85	lTOTplanEX = 27.5 [kW]	EXav,geoHTS = 61.74
EXin,geoHTS = 26.93	EXLTSav,geo = 32.48	EXLTSin,geo = 18.31	EDLTSst = 27.84	EDLTSst = 47.67	EDHTSCON = 4.438	EDHTSEV = 3.742
EDHTSHSE = 0.7236	EDHTSPH = 0.06594 [kJ/s]	EDHTSSD = 0.7374	EDHTSSH = 0.6431	EDHTST = 2.769	EDLTScon = 4.451	EDLTSSEV = 4.228
EDLTSph = 0.07919 [kJ/s]	EDLTSph = 1.212	EDLTSsh = 0.218	EDLTSst = 1.41	EDLTSst = 13.12	EDLTSst = 13.12	EDLTSst = 6.19
EFHTSEV = 19.57	EFHTSPH = 2.646	EFHTSPH = 0.2642 [kJ/s]	EFHTSPH = 3.393	EFHTSPH = 3.931	EFHTST = 16.11 [kJ/s]	EFHTST = 6.175
EFHTSEV = 14.62	EFHTSPH = 0.3174 [kJ/s]	EFHTSPH = 3.029	EFHTSPH = 0.6351	EFHTST = 7.72 [kJ/s]	EFHTST = 59.69	EFHTST = 32.8
ELHTSCON = 1.752	ELHTSHSE = 0	ELHTSPH = 0	ELHTSPH = 0	ELHTSPH = 32.8	ELHTSSH = 0	ELHTST = 0
ELLTScon = 1.724	ELLTSSEV = 0	ELLTSph = 0	ELLTSph = 14.51	ELLTSph = 0	ELLTSst = 0	ELLTSst = 34.55
ELLTSst = 16.24	EPHTSCON = 1.752	EPHTSEV = 15.83	EPHTSHSE = 1.923	EPHTSPH = 0.1983 [kJ/s]	EPHTSPH = 2.656	EPHTST = 3.288
EPHTST = 13.34 [kJ/s]	EPHTSPH = 1.724	EPHTSPH = 10.39	EPHTSPH = 0.2383 [kJ/s]	EPHTSPH = 1.817	EPHTSPH = 0.4171	EPHTST = 6.31 [kJ/s]
EPHTST = 12.02 [kJ/kg]	EPHTSPH = 4.958 [kJ/s]	f_c = 0.01	f_cLTS = 0.01	FHTSobjective = 1.637 [kg/s-C]	gammaHTS = 35.04	gammaLTS = 34.23
geoS = 'water'	h_o1 = 247.2 [kJ/kg]	h_oHTS = -361.3 [kJ/kg]	h_o,co = 293.4 [kJ/kg]	h_o,geo = 83.84 [kJ/kg]	<b>mwHTS = 0.2977 [kg/s]</b>	<b>mwLTS = 0.3 [kg/s]</b>
<b>mwHTS = 10.43 [kg/s]</b>	<b>mwLTS = 10.27 [kg/s]</b>	mgeo = 1 [kg/s]	Pm1 = 10 [bar]	Pm2 = 10 [bar]	Pm3 = 10 [bar]	Patm = 1 [bar]
<b>PcondHTS = 1.288 [bar]</b>	<b>PcondLTS = 12.58</b>	PcHTS = 33.7 [bar]	PcLTS = 36.4 [bar]	Pgeo = 10 [bar]	<b>PLTScond = 4.645 [bar]</b>	<b>PLTSmax = 8.854 [bar]</b>
<b>PmaxHTS = 5.255 [bar]</b>	PRHTLTS = 0.2432	PRHTPHTS = 0.1559	QsummacondHTS = 105 [kJ/s]	QsummacondLTS = 103.4 [kJ/s]	Qav,geoHTS = 422.6 [kJ-C/s-K]	QHTScnd = 100.3 [kJ/s]
QHTSDS = 3.329 [kJ/s]	QHTSHE = 86.25 [kJ/s]	QHTSHE = 21.72 [kJ/s]	QHTSHE = 16.86 [kJ/s]	QHTSSC = 1.376 [kJ/s]	QHTSSH = 15.67 [kJ/s]	QinwHTS = 118.8 [kJ/s]
Qin,geoHTS = 118.8 [kJ-C/s-K]	QLTSav,geo = 301.4 [kJ-C/s-K]	QLTScond = 95.26 [kJ/s]	QLTScondensator = 103.4 [kJ/s]	QLTSDS = 6.613 [kJ/s]	QLTSinwF = 22.83 [kJ/s]	QLTSinwF = 22.83 [kJ/s]
QLTSin,geo = 109.7 [kJ-C/s-K]	QLTSPH = 21.47 [kJ/s]	QLTSSC = 1.507 [kJ/s]	QLTSPH = 3.239 [kJ/s]	<b>SUMMAHTS = 1</b>	<b>SUMMALTS = 1 [kJ/s]</b>	s_o1 = 1.166 [kJ/kg-K]
s_oHTS = -1.728 [kJ/kg-K]	s_o,co = 6.847 [kJ/kg-K]	s_o,geo = 0.2962 [kJ/kg-K]	TapHTS = 10 [C]	TapLTS = 10 [C]	TapHTS = 10 [C]	TapLTS = 118.2 [C]
Tm3 = 93.88 [C]	Tm4 = 91.49 [C]	Tm5 = 81.36	TmHTS = 105.9 [C]	TppHTS = 10 [C]	Tair,m3 = 35 [C]	TairHTS,m = 25 [C]
TairHTS,out = 30 [C]	Tair,inLTS = 20 [C]	Tair,m2 = 29.84 [C]	Tair,m2 = 20.07 [C]	Tair,m3 = 35 [C]	Tair,m3 = 35 [C]	Tair,mLTS = 25 [C]
Tair,outLTS = 30 [C]	Tamb = 20 [C]	TcondHTS = 35 [C]	TcondHTS = 28.11 [C]	TcontrolLTS = 76.88	TcontrolLTS = 76.88	TcLTS = 187.2 [C]
TgeoHTS = 120 [C]	TLTsap = 10 [C]	TLTScnd = 35 [C]	TLTScnd = 32.35 [C]	<b>LTSSpin = 91.88 [C]</b>	<b>LTSSpin = 91.88 [C]</b>	TLTSSmax = 65.84 [C]
TLTST = 10 [C]	TLTSTsat = 60.84 [C]	TmaxHTS = 110 [C]	TmaxHTS,lim = 110 [C]	TouHTS = 91.88 [C]	TouHTS = 91.88 [C]	ToutLTSstage = 65.72 [C]
TairLTS = 0.4889	TRHTLTS = 0.5875	<b>TsatHTS = 85.89 [C]</b>	WfanHTS = 1.05 [kJ/s]	WfanHTS2 = 1.565 [kg/s]	WfanHTS2 = 1.565 [kg/s]	<b>WHTS = isopentane</b>
<b>WnetHTS = 12.02 [kJ/kg]</b>	<b>WnetLTS = 4.958 [kJ/s]</b>	WPHTS = 0.2642 [kJ/s]	WPLTS = 0.3174 [kJ/s]	WHTS = 13.34 [kJ/s]	WHTS = 13.34 [kJ/s]	<b>WHTS = isobutane</b>
WLTfan = 1.034 [kJ/s]	<b>Wnet = 16.98 [kW]</b>	YDCON,KUMHTS = 0.1958 [kJ/kg]	YDCON,LTSKUM = 0.3446 [kJ/s]	YDEV,KUMHTS = 0.07504 [kJ/kg]	YDEV,LTSKUM = 0.1659 [kJ/s]	YDHE,KUMHTS = 0.2198
YDPH,KUMHTS = 0.01235 [kJ/kg]	YDPH,LTSKUM = 0.03697 [kJ/s]	YDP,KUMHTS = 0.1969	YDP,LTSKUM = 0.347 [kJ/s]	YDPH,KUMHTS = 0.2077	YDPH,LTSKUM = 0.3537 [kJ/s]	YDT,KUMHTS = 0.1214 [kJ/kg]
YDT,LTSKUM = 0.2089 [kJ/s]	YDHTSCON = 0.07436 [kJ/kg]	YDHTSEV = 0.06269 [kJ/kg]	YDHTSHE = 0.01212 [kJ/kg]	YDHTSPH = 0.001105 [kJ/s]	YDHTSPH = 0.01235 [kJ/kg]	YDHTSSH = 0.01077 [kJ/kg]
YDHTST = 0.0464 [kJ/kg]	YDLTScon = 0.1357 [kJ/s]	YDLTSEV = 0.1289 [kJ/s]	YDLTSPH = 0.002415 [kJ/s]	YDLTSPH = 0.03697 [kJ/s]	YDLTSSH = 0.006646 [kJ/s]	YDLTST = 0.043 [kJ/s]
YD,ZVHTSCON = 0.3383	YD,ZVHTSEV = 0.2852	YD,ZVHTSHE = 0.05515	YD,ZVHTSPH = 0.005026 [kJ/s]	YD,ZVHTSPH = 0.05621	YD,ZVHTSSH = 0.04902	YD,ZVHTST = 0.2111
YD,ZVLTSCON = 0.3837	YD,ZVLTSEV = 0.3645	YD,ZVLTSPH = 0.006827 [kJ/s]	YD,ZVLTSPH = 0.1045	YD,ZVLTSSH = 0.01879	YD,ZVLTST = 0.1216	YD,ZVHTST = 0.7986
YLCON,LTSKUM = 0.8488 [kJ/s]	YLPH,KUMHTS = 0.7692	YLPH,LTSKUM = 0.7962 [kJ/s]	YLHTSCON = 0.02935	YLHTSPH = 0	YLHTSPH = 0	YLCON,KUMHTS = 0
YLHTSPH = 0.5494	YLHTSSEV = 0	YLHTST = 0	YLLTSCON = 0.05258 [kJ/s]	YLLTSPH = 0	YLLTSPH = 0	YLHTSPH = 0
YLLTSSH = 0	YLLTST = 0					YLLTSPH = 0.4426 [kJ/s]

Click on this line to see the array variables in the Arrays Table window

63 potential unit problems were detected.

EES suggested units (shown in purple) for AU\_HTSScond AU\_HTSScondensator AU\_LTScond AU\_LTSSEV AU\_LTSIHE AU\_LTSPh

Calculation time = 2526.0 sec. 2 warnings (Click to show)

slika 24. Dobiveni rezultati nakon optimizacije

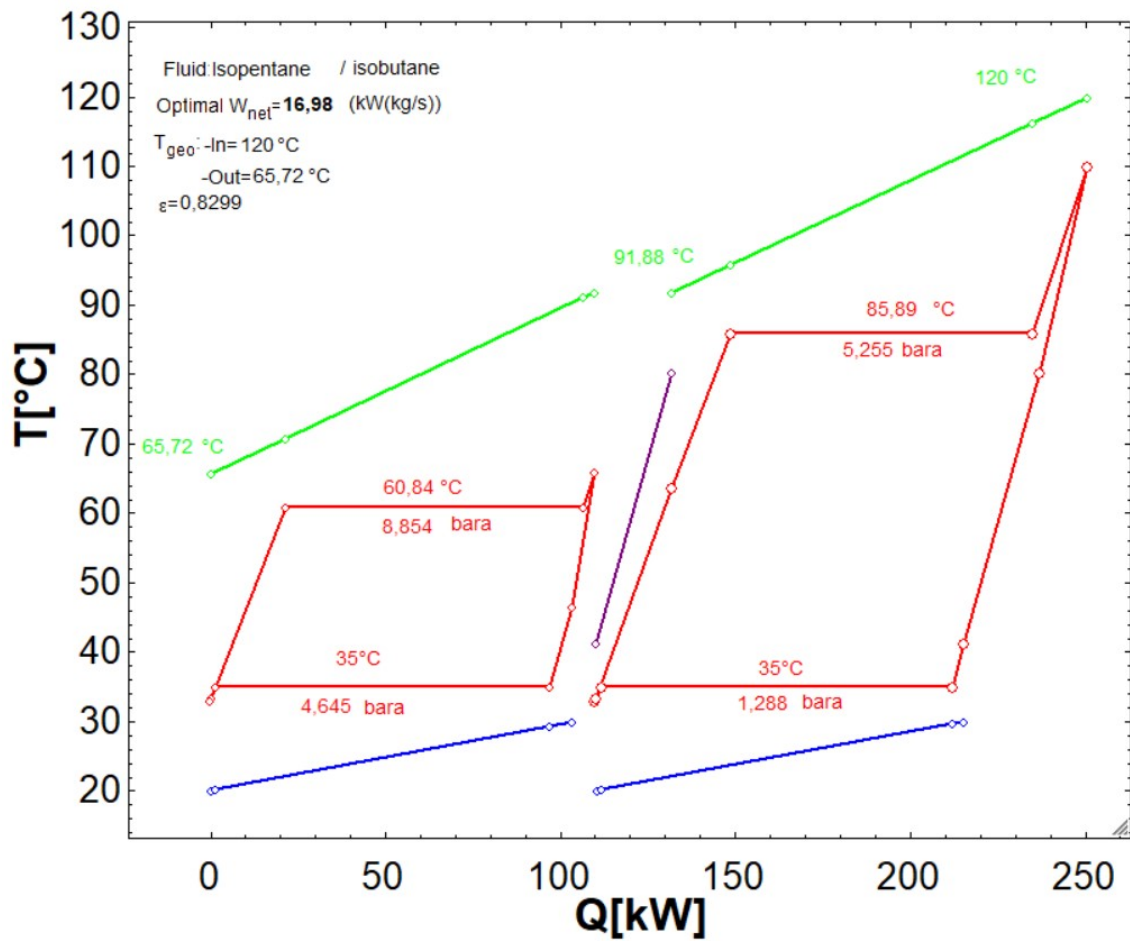
U rezultata se dobiju podaci o eksergiji u pojedinačnim dijelovima postrojenja, temperatura geofluida, radnog fluida u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju u svim točkama postrojenja kao i tlakove u svim dijelovima postrojenja. Bitniji rezultati za pregledat kad je izvršena optimizacija u Tablici 4.

Tablica 4. Parametri za maksimalni korisni rad

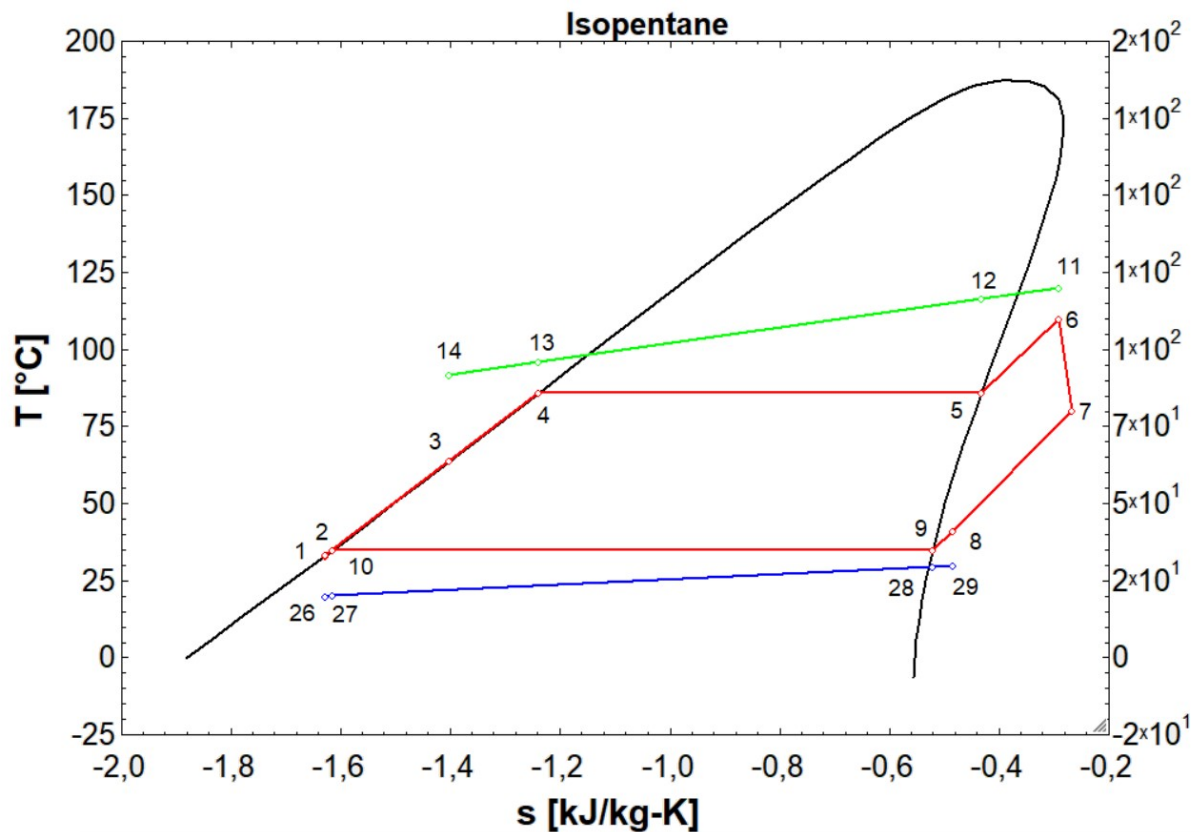
	Visokotemperaturni stupanj	Niskotemperaturni stupanj
T <sub>sat</sub> (°C)	85,89	60,84
P <sub>sat</sub> (bar)	5,255	8,854
W <sub>net</sub> (Kw)	12,02	4,958
		W <sub>net</sub> =16,98 kW



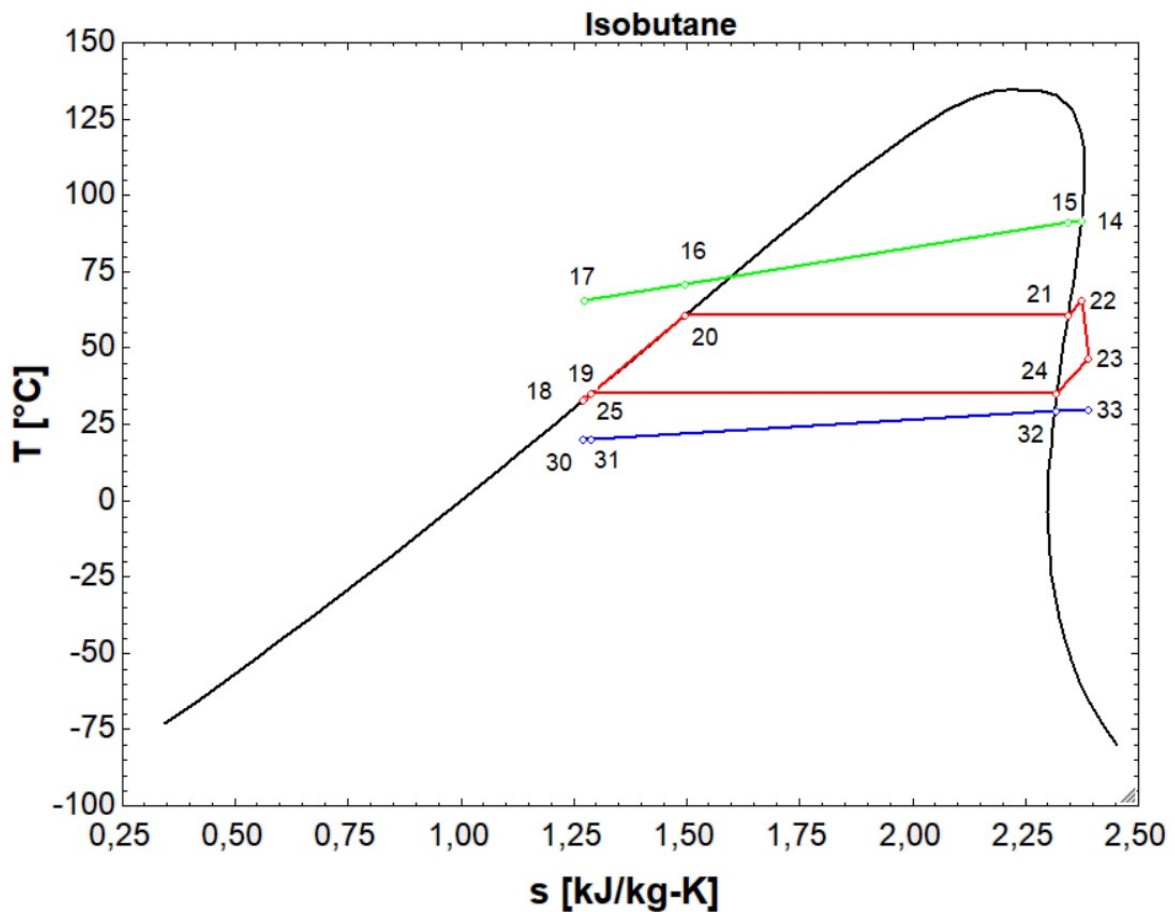




slika 25. T-Q dijagram



slika 26. T-s dijagram visokotemperaturnog stupnja



slika 27. T-s dijagram niskotemperaturnog stupnja

T-Q dijagram je zamišljen tako da prikazuje na koliko bara i kojoj temperaturi se radni fluid zagrijava ili hladi u stupnju. U crtane su i krivulje geofluida i veličine stanja na ulazu u visokotemperaturni stupanj, niskotemperaturni stupanj i izlazu iz niskotemperaturnog stupnja odnosno stanje u kojem se geotermalni fluid utiskuje natrag u bušotinu.

#### 4.3.3 Razrada ostalih kombinacija fluida

Istim pristupom su razrađene ostale kombinacije organskih fluida koje su odabrane za optimizaciju navedene u Tablici 1. Svaki fluid je kombiniran sa ostalim fluidima u visokotemperaturnom stupnju i niskotemperaturnom stupnju, tako je provedena i optimizacija istog fluida uparen sam sa sobom u oba stupnja. Pošto su zadane i četiri temperature geotermalnog izvora sve su se kombinacije fluida izvele još za sve navedene temperature osim pri temperaturi 180°C gdje se nisu računala zadnja tri fluida (R1234ze(E), R134a i R1234yf) jer su se stanja fluida u postrojenju nalazila iznad kritične točke. Sveukupno je napravljeno 540 termodinamičkih i eksergetskih analiza.



## 5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Analiza i optimizacija svih kombinacija radnih fluida i temperatura geotermalnih voda su provedena u EES (Engineering Equation Solver) softverskom paketu. Sa svim dobivenim rezultatima su izvedeni 4D dijagrami gdje se na jednom dijagramu vidljivi najveće korisne snage za sve kombinacije radnih fluida na geotermalnim vodama temperatura 120°C (slika 27.), 140°C (slika 28.), 160°C (slika 29.) i 180°C (slika 30.). Analizom rezultata dobivenih optimizacijom su se pokazali najpovoljnijim fluidima:

1. Isobutane,
2. R1234ze(E),
3. R134a,
4. R1234yf.

Radni fluidi Isobutane, R1234ze(E), R134a i R1234yf su se najbolje iskazali u visokotemperaturnom stupnju, a Neopentan i R1233zd(E) su povoljni kao radni fluidi u niskotemperaturnom stupnju što se može vidjeti u daljnim rezultatima i dijagramima.

### 5.1. Opis najpovoljnijih fluida

#### 5.1.1. Isobutane

Isobutane ili R600A, koji je ugljikovodik (HC), koristi se za kućanske hladnjake i automate za prodaju. Posebno u kućanskim hladnjacima, većina njih koristi R600a. Osim toga, koristi se kao gorivo za kazetni cilindar korištenjem prirode izgaranja osim rashladnog sredstva. Budući da je R600a prirodno rashladno sredstvo koje izvorno postoji u prirodnom svijetu, GWP je vrlo nizak, a ODP je također 0 [11].

Tablica 7. Karakteristike Isobutana

Isobutane	
GWP	3
Tlak kritične točke (kPa)	3648.70
Temperatura kritične točke (K)	408.15
Temperatura točke ključanja (K)	284.85

#### 5.1.2 R1234ze(E)

Kao čista tvar R1234ze(E) smatra se zamjenom za R134a. Međutim, njegov volumetrijski rashladni kapacitet je ispod onoga kod R134a i R1234yf. Njegova točka ključanja također je viša od one R134a. Stoga se R1234ze(E) ne može smatrati

zamjenom za R134a, već bi se trebao uzeti u obzir u novim dizajnim opreme za srednje temperature [12].

*Tablica 8. Karakteristike R1234ze(E)*

R1234ze(E)	
GWP	1
Tlak kritične točke (kPa)	3634.93
Temperatura kritične točke (K)	382.52
Temperatura točke ključanja (K)	254.2

### 5.1.3 R134a

R134a je rashladno sredstvo koje spada u rashladna sredstva na bazi HFC-a, a razvijeno je kao alternativno rashladno sredstvo R12, rashladno sredstvo na bazi visokog HCFC-a s koeficijentom loma ozonskog sloja ODP. Zbog toga se naširoko koristi za automate za prodaju, sredstva za stvaranje pjene, hladnjake, pogonsko gorivo itd., uglavnom za turbo rashladne uređaje, klima uređaje i rashladne uređaje koji su korišteni za R12. ODP je 0, ali budući da je problem što je koeficijent globalnog zagrijavanja GWP visok, budućnost je regulirana i količina korištenja će biti ograničena [13].

*Tablica 9. Karakteristike R134a*

R1234ze(E)	
GWP	1430
Tlak kritične točke (kPa)	4059.106
Temperatura kritične točke (K)	374.21
Temperatura točke ključanja (K)	247.07

### 5.1.4. R1234yf

R1234yf je potencijalni kandidat za ORC primjene, posebno za izvore topline niske do srednje temperature. Stoga je R1234yf predložen kao zamjenski kandidat za HFC, uglavnom iz ekološke perspektive, što je odlučujući čimbenik u odabiru rashladnih tekućina za ovu vrstu stupnja [14].

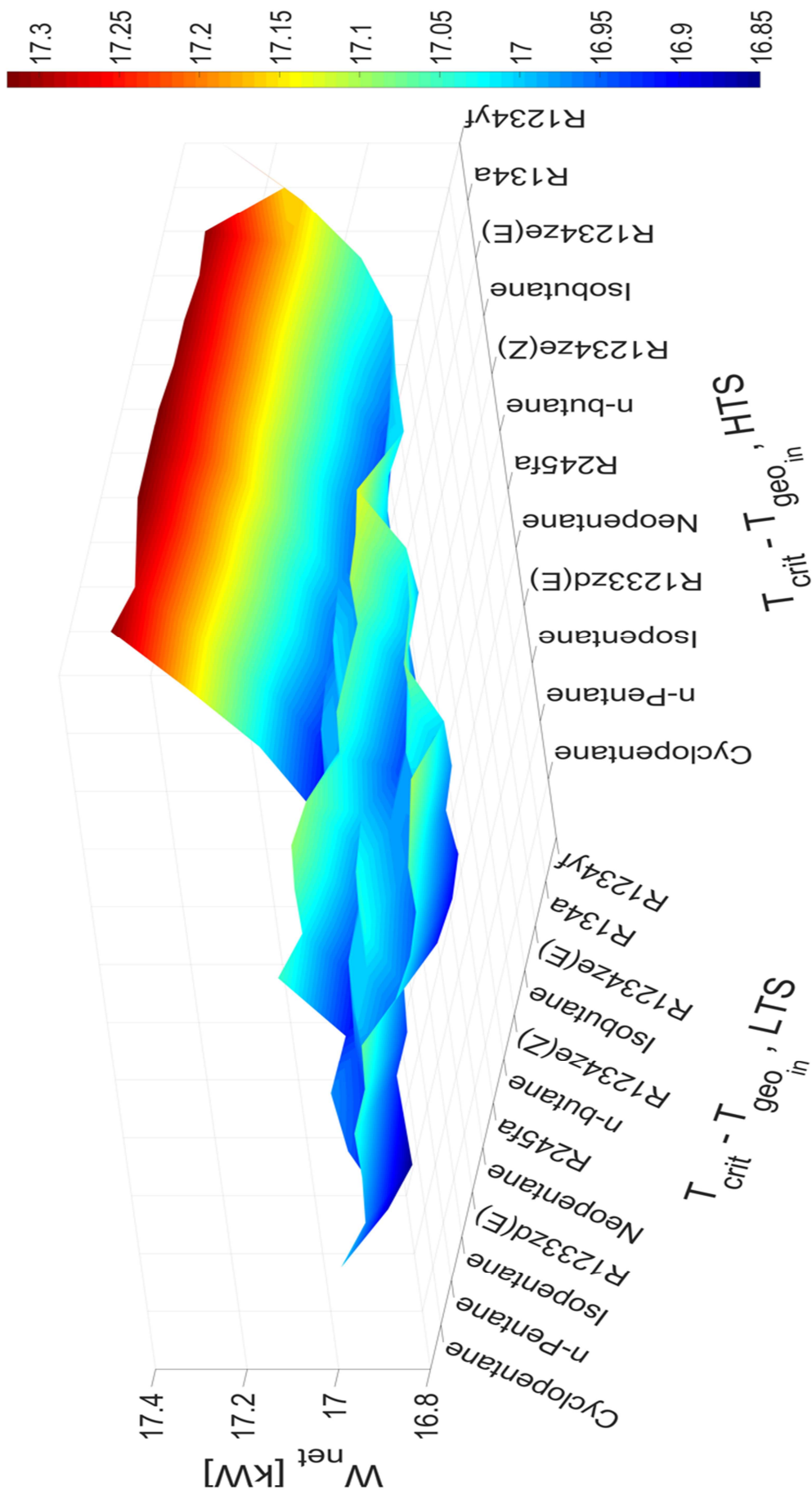
*Tablica 10. Karakteristike R1234yf*

R1234yf	
GWP	4
Tlak kritične točke (kPa)	3382
Temperatura kritične točke (K)	368
Temperatura točke ključanja (K)	244

## 5.2 Rezultati optimizacije na 120°C

Na geotermalnom izvoru temperature 120°C su izvedene 144 kombinacije fluida. Od svih kombinacija radnih fluida najbolji su se pokazali radni fluidi kombinacije R1234yf/R1234yf u kojemu je dobivena maksimalna snaga 17,32 kW, a R1234yf/R1233zd(E) je isto sa maksimalnom snagom od 17,32 kW. Kombinacija R1234yf/R1234yf u visokotemperaturnom stupnju je dobivena snaga od 14,13 kW, dok je u niskotemperaturnom stupnju snaga 3,187 kW, te su detaljniji rezultati prikazani u tablici 13 i slikama 30., 31.. U kombinaciji R123yf/R1233zd(E) snaga visokotemperaturnog stupnja je 14,15 kW, a u niskotemperaturnom stupnju je 3,174 kW, te su detaljniji rezultati prikazani u tablici 14 i slikama 32. Dijagram snaga svih kombinacija je prikazano na slici 27 i tablica 11 maksimalnih snaga.





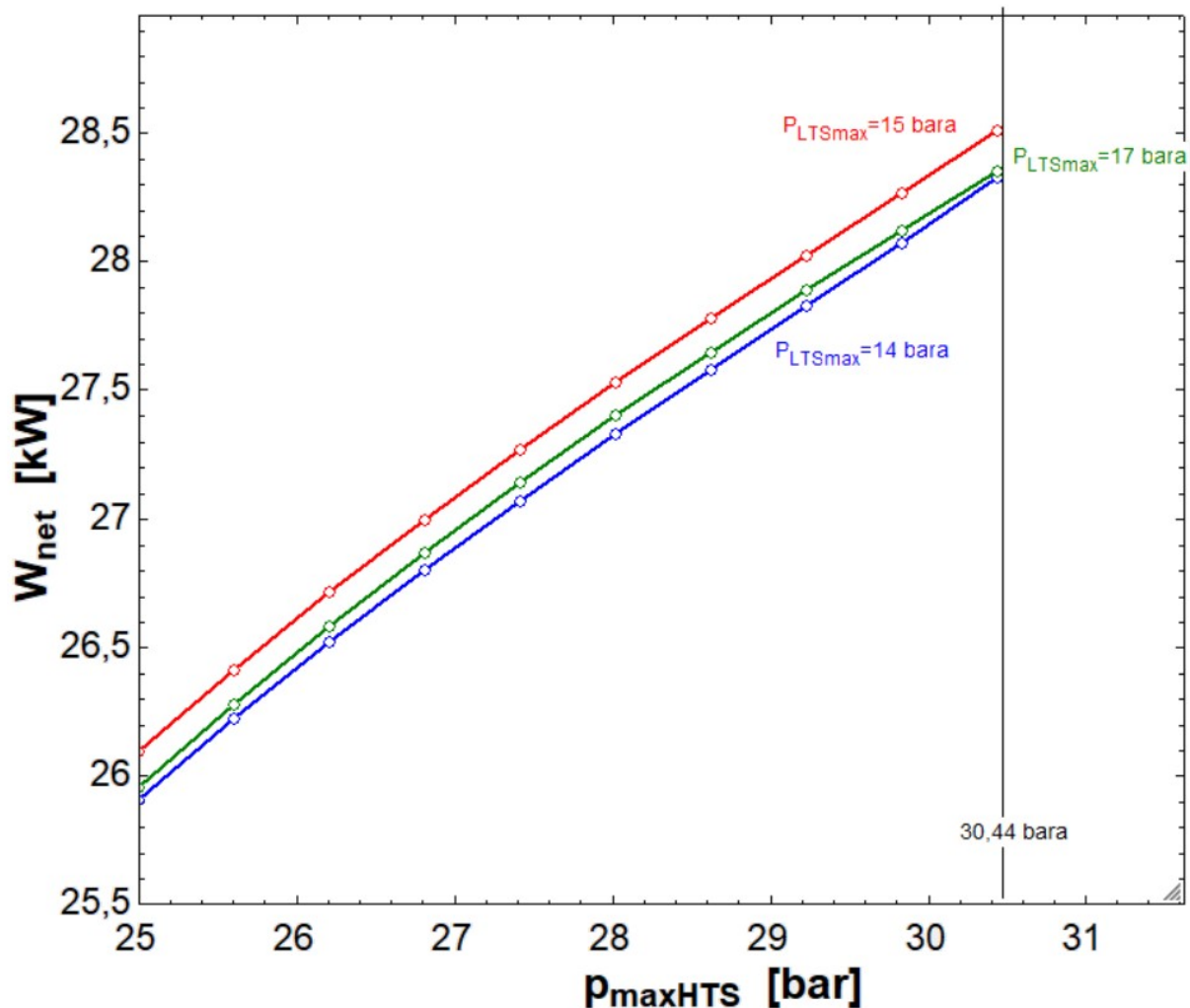
slika 28. Dijagram snaga svih kombinacija fluida za 120°C

Tablica 11. Wnet svih kombinacija za 120°C

WF H/S WF L/S	Cyclopentane	N-pentane R601	Isopentane R601a	R1233zd(E)	Neopentane R601b	R245fa	n-butane R600	R1234ze(Z)	isobutane R600a	R1234ze(E)	R134a	R1234yf
Cyclopentane	17 12,39 4,605	16,88 12,02 4,865	16,95 12,11 4,844	16,97 12,68 4,296	16,92 12,15 4,775	17,05 12,76 4,298	16,95 12,53 4,425	16,96 13,06 3,903	16,93 12,68 4,249	17,02 13,5 3,52	17,16 14,18 2,984	17,31 14,15 3,158
N-pentane R601	16,97 12,39 4,578	16,85 12 4,865	16,93 11,94 4,994	16,94 12,68 4,256	16,89 12,13 4,757	17,02 12,75 2,71	16,92 12,53 4,382	16,93 13,04 3,89	16,89 12,68 4,209	16,99 13,51 3,481	17,13 14,18 2,955	17,28 14,15 3,128
Isopentane R601a	17 12,33 4,679	16,89 11,97 4,919	16,96 12,07 4,891	16,97 12,65 4,323	16,93 12,11 4,818	17,06 12,72 4,34	16,95 12,5 4,456	16,96 13,02 3,942	16,93 12,65 4,276	17,02 13,49 3,527	17,15 14,18 2,975	17,3 14,15 3,148
R1233zd(E)	17,04 12,32 4,72	16,93 11,96 4,972	17 12,05 4,949	17 12,62 4,388	16,96 12,09 4,869	17,09 12,7 4,387	16,98 12,5 4,488	16,99 13,03 3,96	16,96 12,64 4,317	17,04 13,49 3,557	17,17 14,17 3,006	17,32 14,15 3,174
Neopentane R601b	17,04 12,32 4,715	16,93 11,94 4,991	17 12,04 4,961	17 12,61 4,393	16,96 12,07 4,889	17,08 12,67 4,418	16,98 12,48 4,507	16,98 13 3,86	16,95 12,65 4,305	17,04 13,5 3,541	17,17 14,16 3,007	17,32 14,15 3,174
R245fa	17,07 12,28 4,79	16,96 11,91 5,05	17,03 12,01 5,021	17,03 12,57 4,463	17 12,04 4,957	17,03 12,7 4,772	17,01 12,44 4,573	17,01 12,97 4,042	16,98 12,62 4,365	17,06 13,49 3,576	17,19 14,16 3,027	17,32 14,15 3,177
n-butane R600	17,02 12,32 4,697	16,91 11,97 4,933	16,98 12,05 4,925	16,98 12,62 4,36	16,94 12,07 4,872	17,06 12,7 4,367	16,96 12,46 4,501	16,97 13,02 3,945	16,93 12,64 4,296	17,02 13,49 3,531	17,16 14,18 2,98	17,31 14,15 3,16
R1234ze(Z)	17,01 12,34 4,672	16,9 11,97 4,931	16,97 12,06 4,912	16,98 12,63 4,348	16,94 12,1 4,836	17,06 12,72 4,348	16,96 12,49 4,476	16,97 13,02 3,944	16,93 12,66 4,275	17,03 13,5 3,531	17,16 14,17 2,987	17,31 14,15 3,16
isobutane R600a	17,02 12,29 4,725	16,91 11,92 4,99	16,98 12,02 4,958	16,98 12,6 4,383	16,95 12,08 4,87	17,06 12,68 4,389	16,96 12,44 4,524	16,96 12,99 3,97	16,93 12,63 4,309	17,02 13,49 3,531	17,15 14,16 2,986	17,3 14,15 3,15
R1234ze(E)	17,06 12,2 4,854	16,96 11,84 5,116	17,03 11,93 5,091	17,01 12,53 4,482	16,99 11,98 5,01	17,1 12,62 4,479	17 12,42 4,581	16,99 12,91 4,079	16,96 12,59 4,374	17,03 13,46 3,572	17,16 14,16 2,996	17,31 14,14 3,17
R134a	17,08 12,18 4,891	16,97 11,82 5,159	17,04 11,92 5,126	17,03 12,52 4,51	16,99 11,75 5,239	17,11 12,62 4,498	17,02 12,38 4,634	17 12,94 4,062	16,98 12,57 4,408	17,05 13,46 3,588	17,17 14,16 3,014	17,16 14,14 3,021
R1234yf	17,1 12,05 5,05	17,01 11,68 5,325	17,08 11,77 5,304	17,05 12,42 4,622	17,04 11,89 5,146	17,13 12,55 4,582	17,01 11,68 5,325	17 12,88 4,128	17 12,51 4,49	17,05 13,42 3,62	17,16 14,14 3,02	17,32 14,13 3,187

### 5.2.1 Rezultati kombinacije fluida R1234yf/R1234yf

U kombinaciji fluida R1234yf/R1234yf krivulja u W-p dijagramu (slika 29.) kontinuirano raste pa uzimamo gornju granicu tlaka u visokotemperaturnom stupnju  $T_{cr0,9}=30,44$  bara. Granice su prikazane u tablici 12.



slika 28. W-p dijagram R1234yf/R1234yf

Tablica 12. Granice tlakova R1234yf/R1234yf

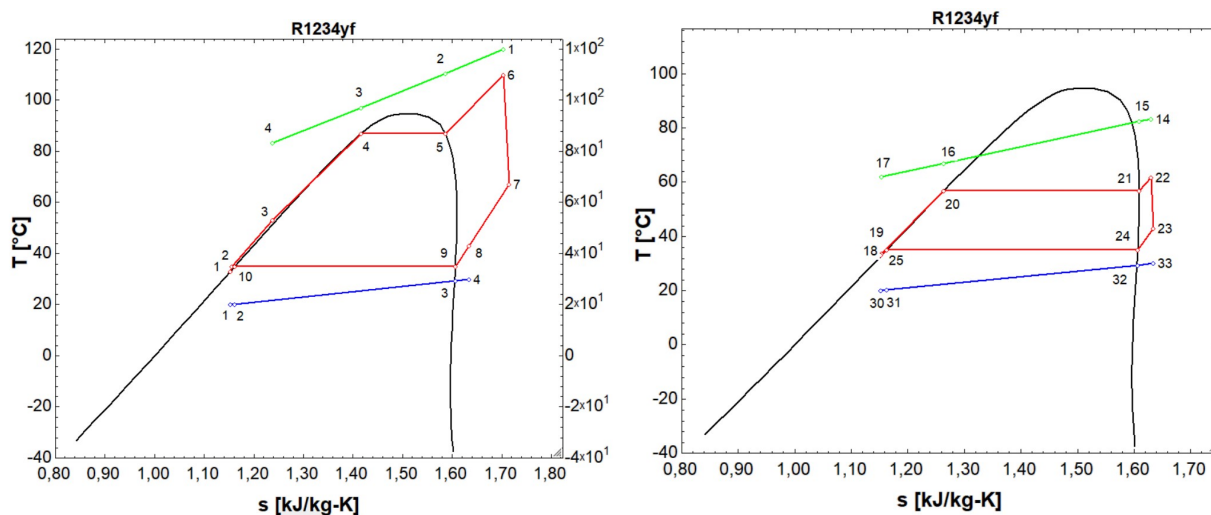
	Donja granica	Gornja granica
$P_{VTSmax}$	28 bara	30,44 bara
$P_{NTSmax}$	14 bara	17 bara

Tablica 13. Rezultati R1234yf/R1234yf

Configuration:	DS HTS IHE subcritical ORC SH SC ACC	
wfVTS/wf NTS:	R1234yf/R1234yf	
$T_{geo,in}$ :	120 (°C)	( $m_{geo}=1,0(kg/s)$ )

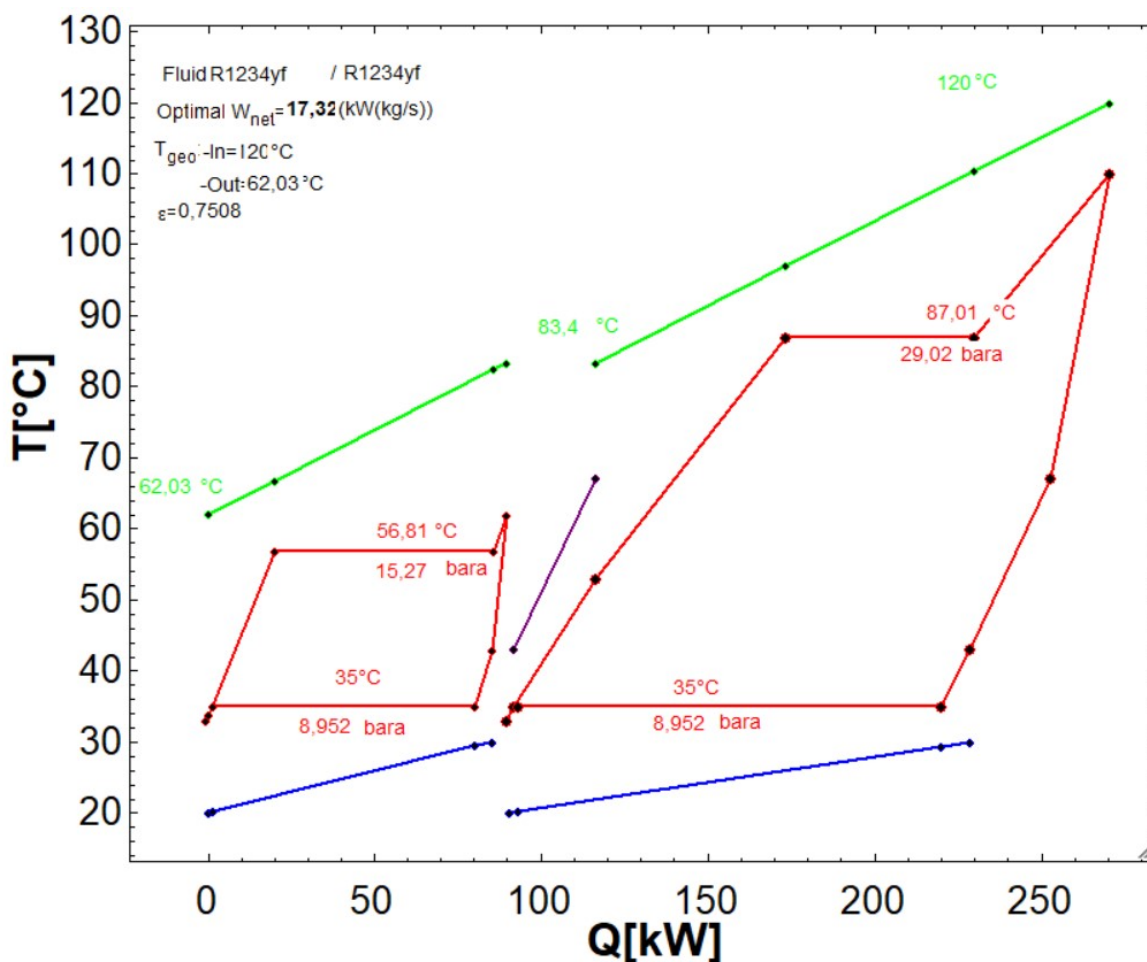
Component (i)	$E_{xf,i}(kW)$	$E_{xp,i}(kW)$	$E_{xD,i}(kW)$	$E_{xL,i}(kW)$	$Q_i(kW)$	$Au_i$
VTS IIP	2,581	1,839	0,7411	0	24,24	2,25
VTS PRED	11,05	8,513	2,539	26,13	57,23	3,121
VTS ISP	12,59	10,55	2,046	0	56,69	3,593
VTS PRE	9,91	8,404	1,506	0	40,42	2,562
VTS T	21,69	17,88	3,816	0		
VTS KOND	8,191	2,302	5,889	2,302	127,1	13,42
VTS P	2,368	1,78	0,5872	0		
NTS PRED	2,632	1,596	1,036	12,51	20,05	1,138
NTS ISP	10,31	7,329	2,984	0	65,69	3,952
NTS PRE	0,6758	0,452	0,2238	0	3,823	0,1622
NTS T	5,518	4,504	1,015	0		
NTS KOND	5,06	1,423	3,637	1,423	78,67	8,32
NTS P	0,4632	0,3478	0,1154	0		

$W_{net}$ :	17,32 kW	$\xi_{rec,VTS}$ :	0,7508		
$\eta_{tot,plant,Ex}$ :	23,17 %	$E_{DL,VTS,tot}$ :	45,55		
$W_{net,VTS}$ :	14,13 kW	$E_{DL,NTS,tot}$ :	22,94		
$W_{net,NTS}$ :	3,187 kW	$\eta_{NTS,plantEn}$ :	1,199	$\eta_{VTS,plantEn}$ :	3,35
$P_{HTS}$ :	15,27 bar	$\eta_{NTS,cycleEn}$ :	3,559	$\eta_{VTS,cycleEn}$ :	9,152
$P_{LTS}$ :	8,952 bar	$\eta_{NTS,plantEx}$ :	12,37	$\eta_{VTS,plantEx}$ :	23,17
$\Delta T_{SH,NTS}$ :	5 °C	$\eta_{NTS,cycleEx}$ :	23,33	$\eta_{VTS,cycleEx}$ :	42,07
$\Delta T_{SH,VTS}$ :	22,99 °C				
$T_{geo,out}$ :	62,03 °C				
T(17)					



slika 30. T-s dijagrami R1234yf/R1234yf (desno VTS, lijevo NTS)





slika 29. T-Q dijagram R1234yf/R1234yf

Na T-Q dijagramu (slika 31.) su vidljivi optimalni tlakovi i temperature u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju sa kojima se dobiva maksimalna snaga u postrojenju od 17,32 kW. Također se može vidjeti u tablici 13 da radni fluid u visokotemperaturnom stupnju, najviše topline izmjenjuje od geotermalne vode u predgrijaču kada se radni fluid nalazi u stanju vrele kapljevine. U niskotemperaturnom stupnju se pak najviše topline izmjenjuje u isparivaču kad je radni fluid u stanju mokre pare.

### 5.2.2 Rezultati kombinacije fluida R1234yf/R1233zd(E)

U kombinaciji fluida R1234yf/R1233zd(E) je isti slučaj da krivulja u W-p dijagramu kontinuirano raste pa uzimamo gornju granicu tlaka u visokotemperaturnom stupnju  $T_{cr0,9}=30,44$  bara. Granice su prikazane u tablici 14.

Tablica 14. Granice tlakova R1234yf/R1233zd(E)

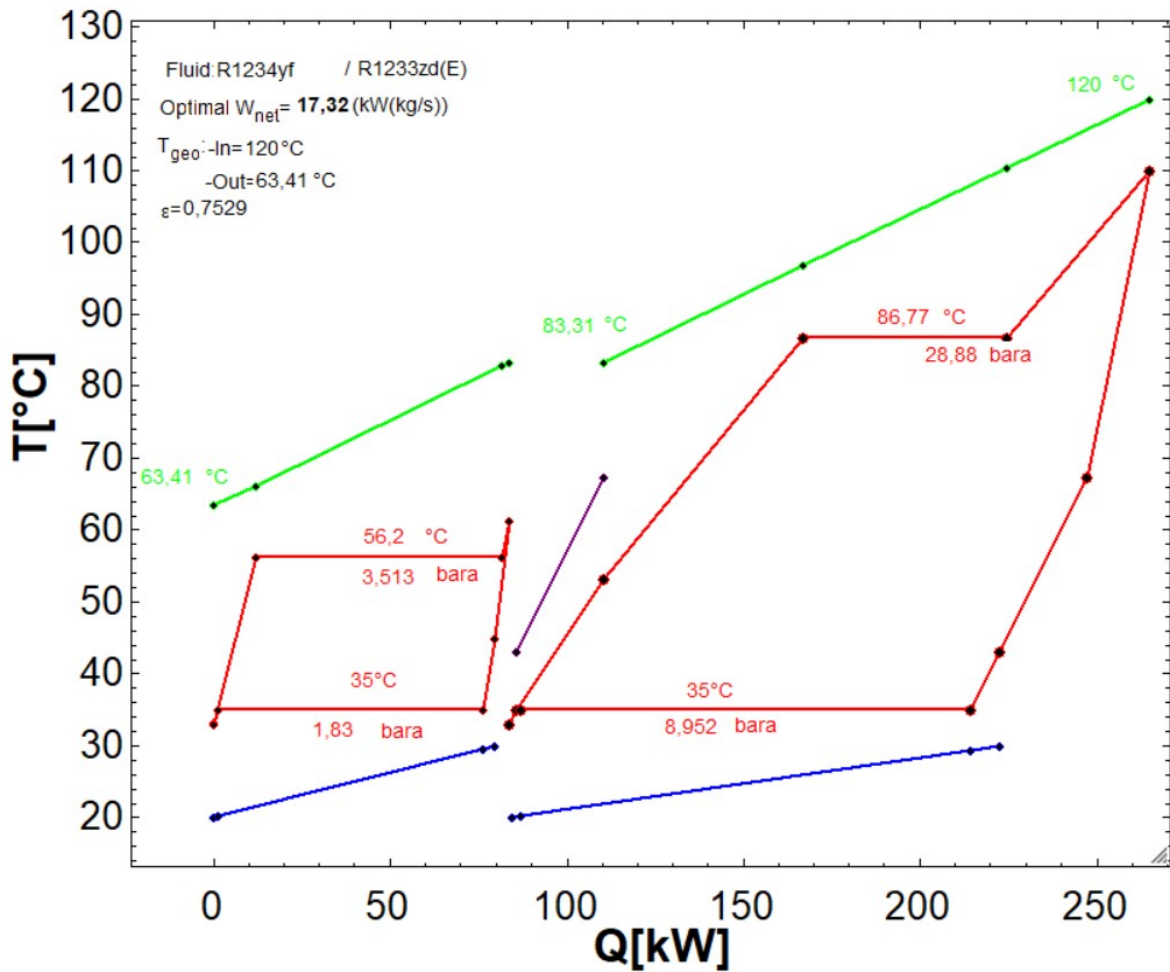
	Donja granica	Gornja granica
$P_{VTSmax}$	28 bara	30,44 bara
$P_{NTSmax}$	3 bara	4 bara

Tablica 15. Rezultati R1234yf/R1233zd(E)

Configuration:	DS HTS IHE subcritical ORC SH SC ACC		
wfVTS/wf NTS:	R1234yf/R1233zd(E)		
$T_{geo,in}$ :	120	(°C)	( $m_{geo}=1,0(kg/s)$ )

Component (i)	$E_{xf,i}(kW)$	$E_{xp,i}(kW)$	$E_{xD,i}(kW)$	$E_{xL,i}(kW)$	$Q_i(kW)$	$Au_i$
VTS IIP	2,626	1,872	0,7538	0	24,59	2,275
VTS PRED	10,91	8,411	2,5	26,06	56,6	3,104
VTS ISP	12,76	10,67	2,089	0	57,5	3,627
VTS PRE	9,956	8,435	1,521	0	40,62	2,562
VTS T	21,7	17,89	3,816	0		
VTS KOND	8,212	2,308	5,904	2,308	127,4	13,46
VTS P	2,358	1,773	0,5847	0		
NTS PRED	1,552	0,9085	0,6437	13,24	11,75	0,6417
NTS ISP	10,95	7,678	3,27	0	69,86	4,111
NTS PRE	0,3217	0,2119	0,1098	0	1,816	0,07471
NTS T	4,951	4,043	0,9076	0		
NTS KOND	4,695	1,322	3,373	1,322	74,85	7,99
NTS P	0,07379	0,05537	0,01842	0		

$W_{net}$ :	17,32	kW	$\xi_{rec,VTS}$ :	0,7529		
$\eta_{tot\ plant,Ex}$ :	28,41	%	$E_{DL,VTS\ tot}$ :	45,54		
$W_{net,VTS}$ :	14,15	kW	$E_{DL,NTS\ tot}$ :	22,88		
$W_{net,NTS}$ :	3,177	kW	$\eta_{NTS\ plantEn}$ :	1,197	$\eta_{VTS\ plantEn}$ :	3,354
$P_{HTS}$ :	4,645	bar	$\eta_{NTS\ cycleEn}$ :	3,809	$\eta_{VTS\ cycleEn}$ :	9,143
$P_{LTS}$ :	8,854	bar	$\eta_{NTS\ plantEx}$ :	12,35	$\eta_{VTS\ plantEx}$ :	23,2
$\Delta T_{SH,NTS}$ :	5	°C	$\eta_{NTS\ cycleEx}$ :	24,71	$\eta_{VTS\ cycleEx}$ :	42,04
$\Delta T_{SH,VTS}$ :	23,23	°C				
$T_{geo,out}$ :	63,41	°C				
T(17)						



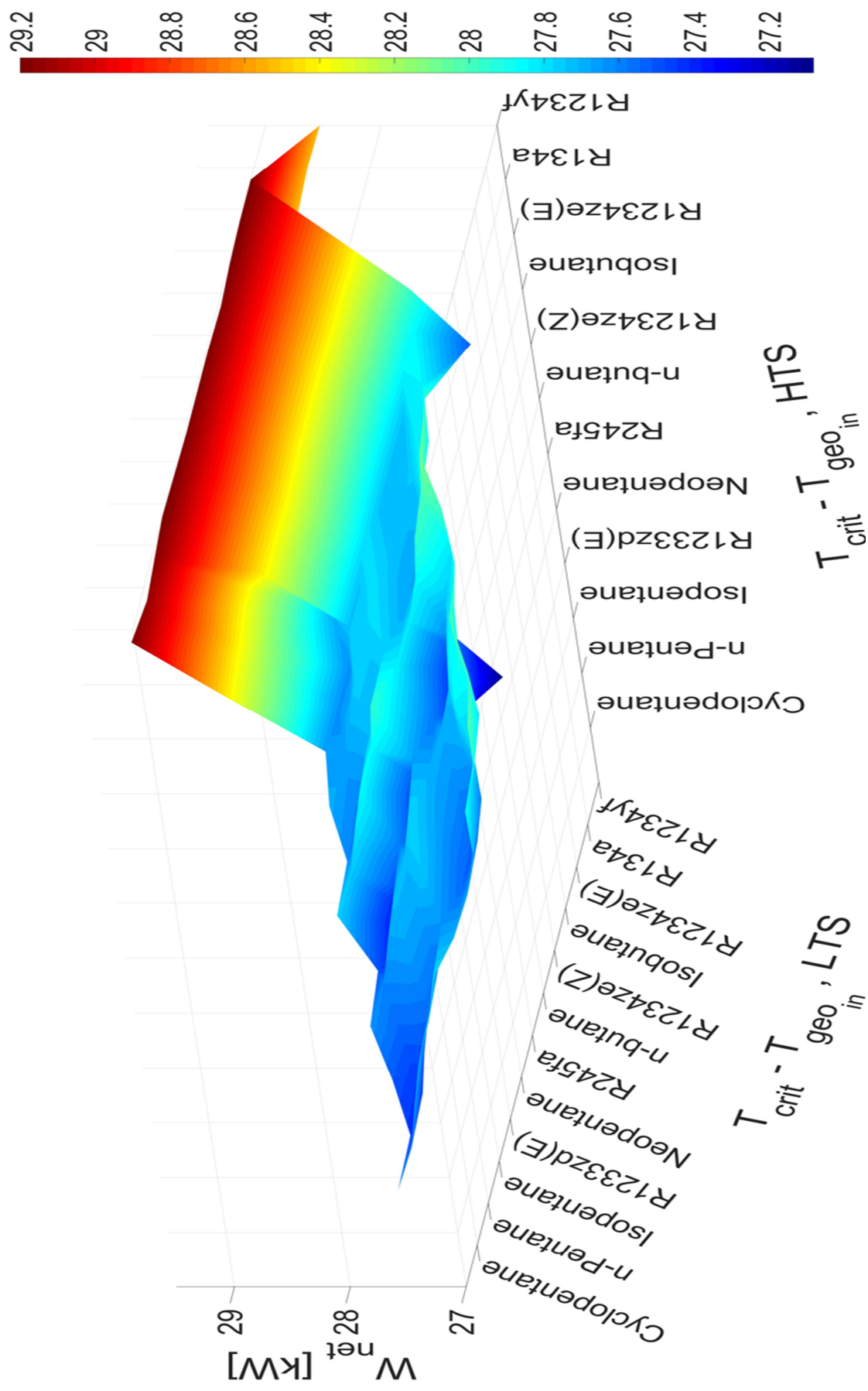
slika 30. T-Q dijagram R1234yf/R1233zd(E)

Na T-Q dijagramu (slika 32.) su vidljivi optimalni tlakovi i temperature u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju sa kojima se dobiva maksimalna snaga u postrojenju od 17,32 kW. Također se može vidjeti u tablici 15 da radni fluid u visokotemperaturnom stupnju, najviše topline izmjenjuje od geotermalne vode u isparivaču kada se radni fluid nalazi u stanju vrele kapljevine. U niskotemperaturnom stupnju se pak najviše topline izmjenjuje u isparivaču kad je radni fluid u stanju mokre pare.

### 5.3 Rezultati optimizacije na 140°C

Na geotermalnom izvoru temperature 140°C su izvedene 144 kombinacije fluida. Od svih kombinacija radnih fluida najbolji su se pokazali radni fluidi kombinacije R134af/R1233zd(E) u kojemu je dobivena maksimalna snaga 28,53 kW, a R134a/Neopentan je isto sa maksimalnom snagom od 28,53 kW. Kombinacija R134af/R1233zd(E u visokotemperaturnom stupnju je dobivena snaga od 25,1 kW, dok je u niskotemperaturnom stupnju snaga 3,428 kW, te su detaljniji rezultati prikazani u tablici 18 i slikama 34., 35.. U kombinaciji R123yf/R1233zd(E) snaga visokotemperaturnog stupnja je 25,1 kW, a u niskotemperaturnom stupnju je 3,429 kW, te su detaljniji rezultati prikazani u tablici 20 i slikama 36. Dijagram snaga svih kombinacija je prikazano na slici 33 i tablica 16 maksimalnih snaga.





slika 33. Dijagram snaga svih kombinacija fluida za 140°C

Tablica 16 Wnet svih kombinacija za 140°C

WF HTS WF LTS	Cyclopentane	N-pentane R601	Isopentane R601a	R1233zd(E)	Neopentane R601b	R245fa	n-butane R600	R1234ze(Z)	isobutane R600a	R1234ze(E)	R134a	R1234yf
Cyclopentane	27,61 20,32 7,288	27,43 19,65 7,781	27,51 16,69 7,822	27,63 21,01 6,621	27,49 19,83 7,667	27,77 21,08 6,692	27,61 20,69 6,18	27,69 21,89 5,797	27,65 21,08 6,573	28,43 23,23 5,197	29,18 25,7 3,479	28,52 25,1 3,415
N-pentane R601	27,59 20,27 7,327	27,42 19,62 7,809	27,52 19,7 7,828	27,61 20,97 6,641	27,13 20,83 6,301	27,75 21,04 6,71	27,59 20,65 6,918	27,66 21,87 5,793	27,63 21,06 6,57	28,2 23,23 4,963	29,14 25,7 3,444	28,48 25,1 3,38
Isopentane R601a	27,66 20,23 7,425	27,5 19,55 7,949	27,59 19,65 7,941	27,67 20,93 6,738	27,47 19,81 7,663	27,81 21,06 6,745	27,65 20,59 7,059	27,71 21,85 5,858	27,63 21,06 6,67	27,71 23,23 4,479	29,17 25,7 3,471	28,51 25,1 3,407
R1233zd(E)	27,72 20,16 7,557	27,56 19,49 8,069	27,66 19,6 8,055	27,72 20,91 6,81	27,59 19,68 7,909	27,86 20,99 6,864	27,71 20,61 7,096	27,76 21,81 5,941	27,74 21 6,741	28,48 23,23 5,247	29,2 25,7 3,495	28,53 25,1 3,429
Neopentane R601b	27,73 20,12 7,602	27,57 19,45 8,116	27,67 19,57 8,103	27,78 20,88 6,847	27,16 20,38 6,78	27,86 20,99 6,869	27,71 20,55 7,161	27,76 21,82 5,793	27,74 20,99 6,749	28,48 23,23 2,246	29,19 25,7 3,493	28,53 25,1 3,428
R245fa	27,79 20,06 7,729	27,64 19,4 8,241	27,74 19,53 8,21	27,78 20,84 6,939	27,67 19,67 7,999	27,96 20,97 6,968	27,77 20,5 7,269	27,8 21,76 6,04	27,8 20,93 6,864	28,52 23,23 5,282	29,18 25,7 3,475	28,55 25,1 3,447
n-butane R600	27,7 20,14 7,552	27,54 19,48 8,054	27,64 19,58 8,054	27,7 20,89 6,803	27,57 19,68 7,894	27,83 20,99 6,841	27,68 20,59 7,117	27,73 21,82 5,911	27,72 20,99 6,727	28,46 23,23 5,231	29,18 25,7 3,479	28,52 25,1 3,412
R1234ze(Z)	27,68 20,17 7,508	27,52 19,5 8,022	27,62 19,61 8,009	27,69 20,91 6,776	27,08 20,6 6,472	27,82 21,03 6,792	27,67 20,59 7,084	27,73 21,84 5,891	27,71 21,02 6,689	28,46 23,23 5,221	29,18 25,7 3,479	28,52 25,1 3,415
isobutane R600a	27,73 20,05 7,683	27,58 19,38 8,198	27,68 19,5 8,178	27,72 20,83 6,891	27,61 19,6 8,014	27,86 20,93 6,928	27,71 20,51 7,2	27,75 21,8 5,951	27,74 20,96 6,78	28,47 23,23 5,231	29,17 25,7 3,471	28,51 25,1 3,406
R1234ze(E)	27,87 19,76 8,109	27,74 19,07 8,668	27,84 19,22 8,615	27,83 20,68 7,148	27,76 19,38 8,378	27,96 20,82 7,143	27,83 20,37 7,463	27,82 21,69 6,134	27,84 20,86 6,978	28,52 23,23 5,282	29,19 25,7 3,485	28,52 25,1 3,419
R134a	27,91 19,66 8,254	27,79 18,99 8,804	27,89 19,12 8,769	27,86 20,62 7,243	27,81 19,32 8,49	28 20,76 7,238	27,86 20,34 7,527	27,84 21,66 6,187	27,87 20,83 7,044	28,54 23,23 5,302	29,2 25,7 3,5	28,54 25,1 3,434
R1234yf	28,06 18,96 9,103	27,98 18,24 9,74	28,07 18,5 9,567	27,95 20,29 7,659	27,99 18,86 9,129	28,11 20,53 7,577	27,99 20,06 7,298	27,99 21,5 6,412	27,97 20,68 7,298	28,58 23,23 5,342	29,2 25,7 3,499	28,53 25,1 3,431

### 5.3.1 Rezultati kombinacije fluida R134a/R1233zd(E)

U kombinaciji fluida R134a/R1233zd(E) je isti slucaj da krivulja u W-p dijagramu kontinuirano raste pa uzimamo gornju granicu tlaka u visokotemperaturnom stupnju  $T_{cr0,9}=36,53$  bara. Granice su prikazane u tablici 17.

Tablica 17. Granice tlakova R134af/R1233zd(E)

	Donja granica	Gornja granica
$P_{VTSmax}$	32 bara	36,59 bara
$P_{NTSmax}$	3 bara	4 bara

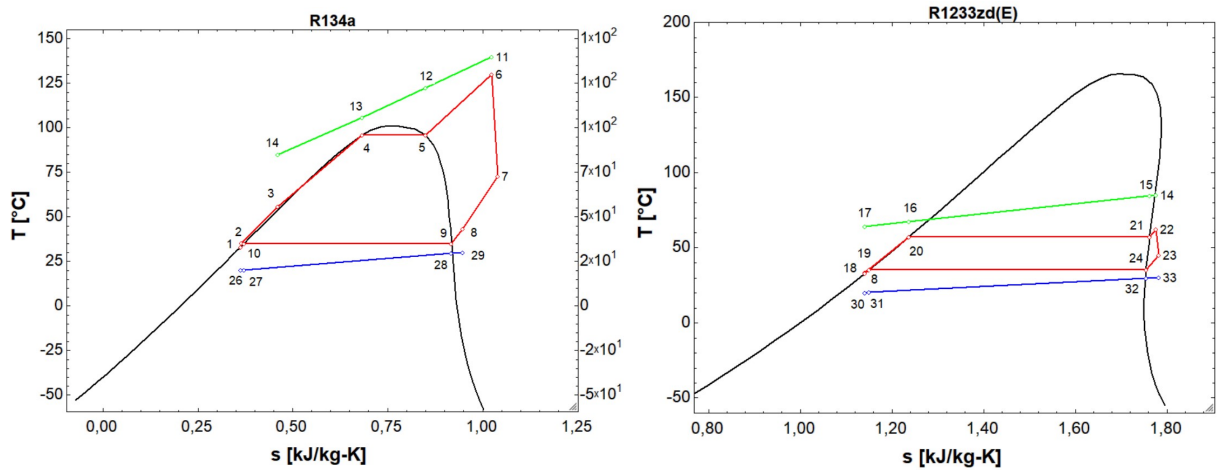
Tablica 18. Rezultati R134a/R1233zd(E)

Configuration:	DS HTS IHE subcritical ORC SH SC ACC	
wfVTS/wf NTS:	R134a/R1233zd(E)	
$T_{geo,in}$ :	140 (°C)	( $m_{geo}=1,0$ (kg/s))

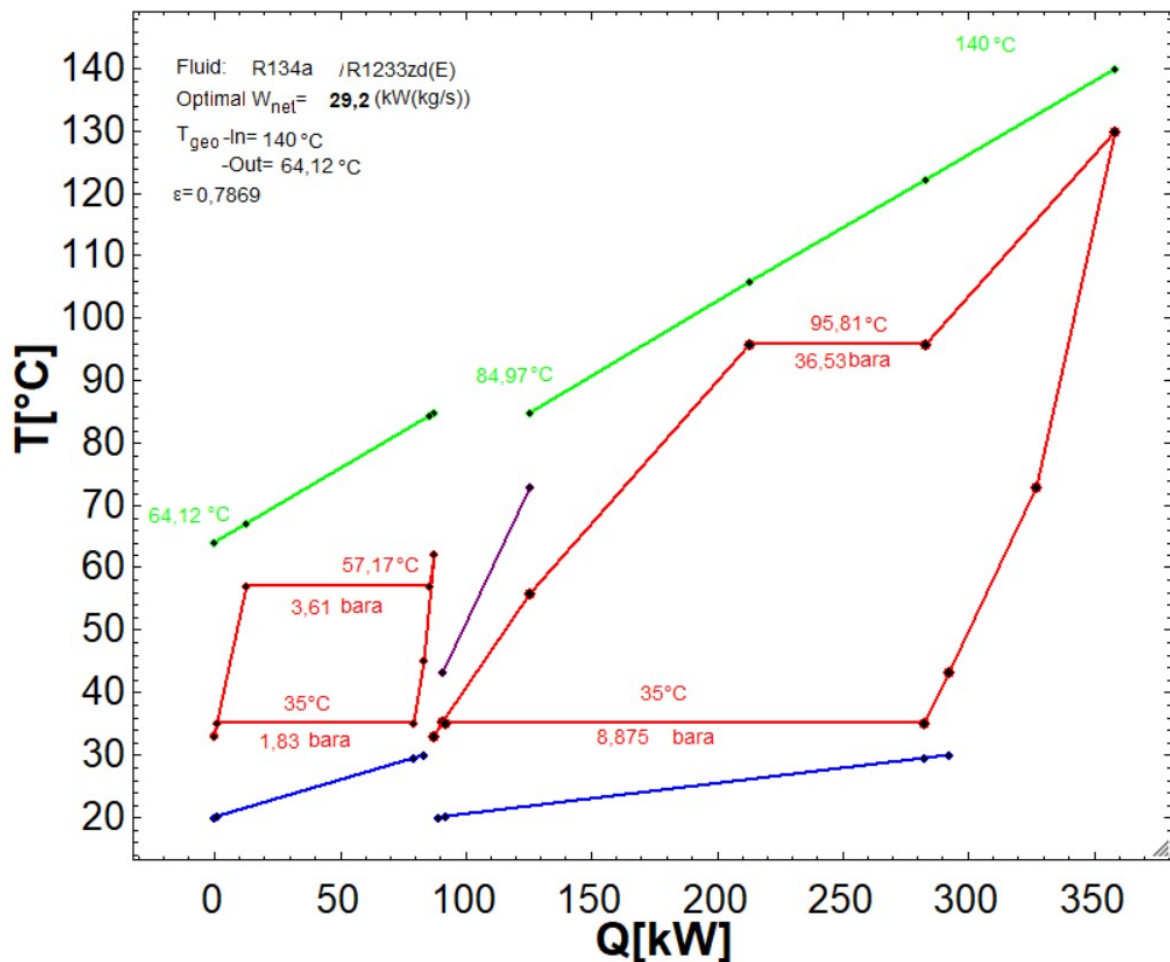
Component (i)	$E_{xf,i}$ (kW)	$E_{xp,i}$ (kW)	$E_{xD,i}$ (kW)	$E_{xL,i}$ (kW)	$Q_i$ (kW)	$Au_i$
VTS IIP	3,942	2,776	1,166	0	34,48	2,889
VTS PRED	17,92	14,44	3,48	27,32	87,67	4,909
VTS ISP	16,96	14,35	2,612	0	69,82	4,123
VTS PRE	20,72	17,66	3,058	0	75,38	4,452
VTS T	37,94	31,33	6,615	0		
VTS KOND	12,08	3,397	8,685	3,397	190,1	20,21
VTS P	3,59	2,701	0,8895	0		
NTS PRED	1,717	1,007	0,7107	13,63	12,79	0,6891
NTS ISP	11,63	8,184	3,445	0	72,74	4,218
NTS PRE	0,3451	0,2274	0,1177	0	1,908	0,07629
NTS T	5,394	4,406	0,9885	0		
NTS KOND	4,914	1,382	3,531	1,382	78,21	8,342
NTS P	0,08156	0,0612	0,02036	0		

$W_{net}$ :	29,2 kW	$\xi_{rec,VTS}$ :	0,7869		
$\eta_{tot,plant,Ex}$ :	34,32 %	$E_{DL,VTS,tot}$ :	57,22		
$W_{net,VTS}$ :	25,7 kW	$E_{DL,NTS,tot}$ :	23,82		
$W_{net,NTS}$ :	3,495 kW	$\eta_{NTS,plantEn}$ :	1,283	$\eta_{VTS,plantEn}$ :	5,061
$P_{HTS}$ :	36,53 bar	$\eta_{NTS,cycleEn}$ :	3,997	$\eta_{VTS,cycleEn}$ :	11,04
$P_{LTS}$ :	3,61 bar	$\eta_{NTS,plantEx}$ :	25,46	$\eta_{VTS,plantEx}$ :	30,21
$\Delta T_{SH,NTS}$ :	5,012 °C	$\eta_{NTS,cycleEx}$ :	24,8	$\eta_{VTS,cycleEx}$ :	46,28
$\Delta T_{SH,VTS}$ :	34,19 °C				
$T_{geo,out}$ :	64,12 °C				
T(17)					





slika 31. T-s dijagrami R134a/R1233zd(E) (desno VTS, lijevo NTS)



slika 32. T-Q dijagram R134a/R1233zd(E)

Na T-Q dijagramu (slika 35.) su vidljivi optimalni tlakovi i temperature u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju sa kojima se dobiva maksimalna snaga u postrojenju od 29,2 kW. Također se može vidjeti u tablici 18 da radni fluid u visokotemperaturnom stupnju, najviše topline izmjenjuje od geotermalne vode u predgrijaču kada se radni fluid nalazi u stanju vrele kapljevine. U niskotemperaturnom

stupnju se pak najviše topline izmjenjuje u isparivaču kad je radni fluid u stanju mokre pare.

### 5.3.2 Rezultati kombinacije fluida R134af/Neopentane

U kombinaciji fluida R134af/Neopentane je isti slučaj da krivulja u W-p dijagramu kontinuirano raste pa uzimamo gornju granicu tlaka u visokotemperaturnom stupnju  $T_{cr0,9}=36,53$  bara. Granice su prikazane u tablici 19.

Tablica 19. Granice tlakova R134af/ Neopentane

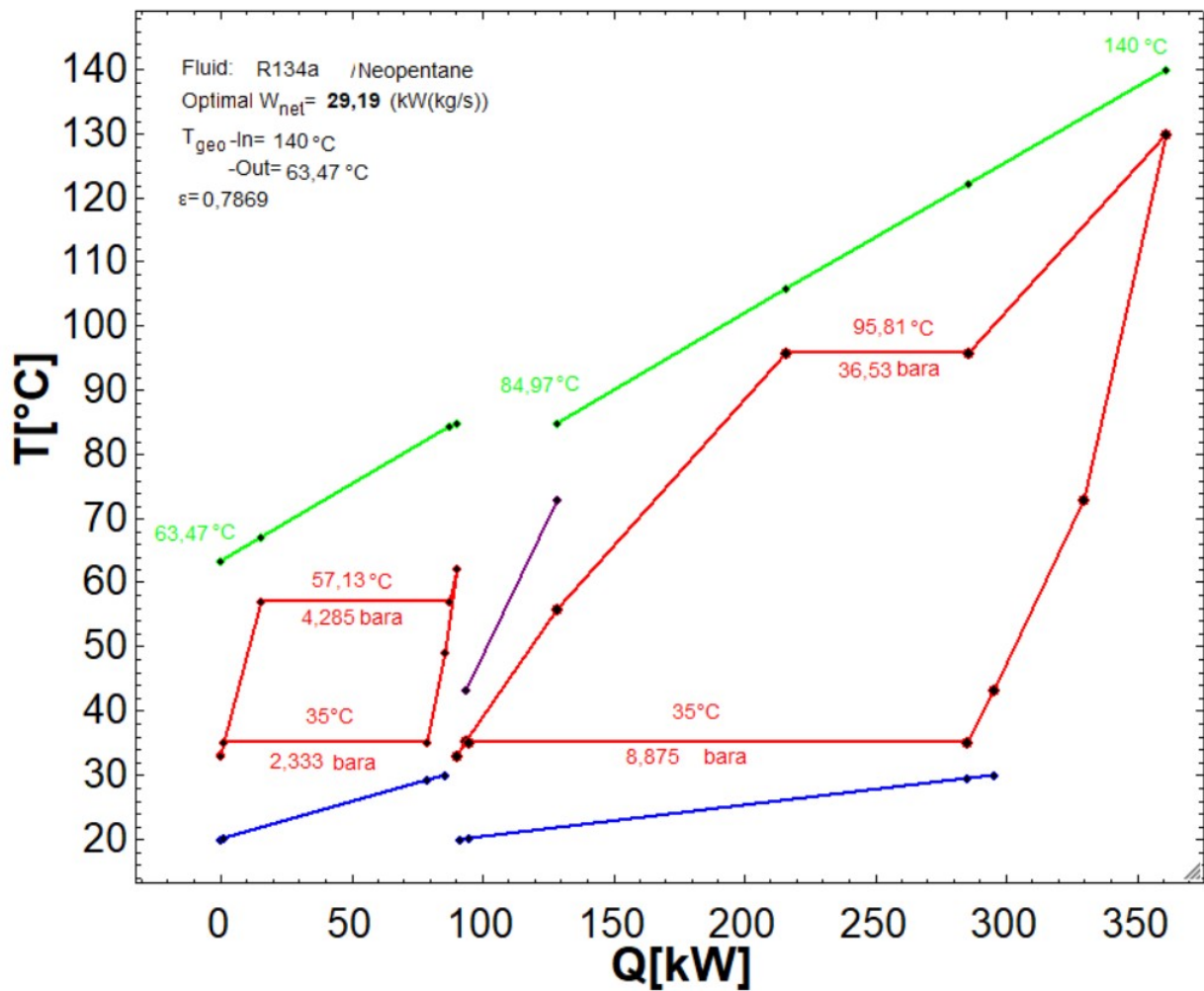
	Donja granica	Gornja granica
$P_{VTSmax}$	32 bara	36,59 bara
$P_{NTSmax}$	4 bara	5 bara

Tablica 20. Rezultati R134a/ Neopentane

Configuration:	DS HTS IHE subcritical ORC SH SC ACC	
wfVTS/wf NTS:	R134a/Neopentane	
$T_{geo,in}$ :	140 (°C)	( $m_{geo}=1,0$ (kg/s))

Component (i)	$E_{xf,i}$ (kW)	$E_{xp,i}$ (kW)	$E_{xD,i}$ (kW)	$E_{xL,i}$ (kW)	$Q_i$ (kW)	$Au_i$
VTS IIP	2,626	1,872	0,7538	0	24,59	2,275
VTS PRED	10,91	8,411	2,5	26,06	56,6	3,104
VTS ISP	12,76	10,67	2,089	0	57,5	3,627
VTS PRE	9,956	8,435	1,521	0	40,62	2,562
VTS T	21,7	17,89	3,816	0		
VTS KOND	8,212	2,308	5,904	2,308	127,4	13,46
VTS P	2,358	1,773	0,5847	0		
NTS PRED	1,552	0,9085	0,6437	13,24	11,75	0,6417
NTS ISP	10,95	7,678	3,27	0	69,86	4,111
NTS PRE	0,3217	0,2119	0,1098	0	1,816	0,07471
NTS T	4,951	4,043	0,9076	0		
NTS KOND	4,695	1,322	3,373	1,322	74,85	7,99
NTS P	0,07379	0,05537	0,01842	0		

$W_{net}$ :	29,19	kW	$\xi_{rec,VTS}$ :	0,7869		
$\eta_{tot\ plant,Ex}$ :	34,31	%	$E_{DL,VTS\ tot}$ :	57,22		
$W_{net,VTS}$ :	25,7	kW	$E_{DL,NTS\ tot}$ :	23,82		
$W_{net,NTS}$ :	3,493	kW	$\eta_{NTS\ plantEn}$ :	1,282	$\eta_{VTS\ plantEn}$ :	5,061
$P_{HTS}$ :	15,27	bar	$\eta_{NTS\ cycleEn}$ :	3,873	$\eta_{VTS\ cycleEn}$ :	11,04
$P_{LTS}$ :	8,952	bar	$\eta_{NTS\ plantEx}$ :	12,93	$\eta_{VTS\ plantEx}$ :	30,21
$\Delta T_{SH,NTS}$ :	5	°C	$\eta_{NTS\ cycleEx}$ :	24,8	$\eta_{VTS\ cycleEx}$ :	46,28
$\Delta T_{SH,VTS}$ :	34,19	°C				
$T_{geo,out}$ :	63,47	°C				
T(17)						

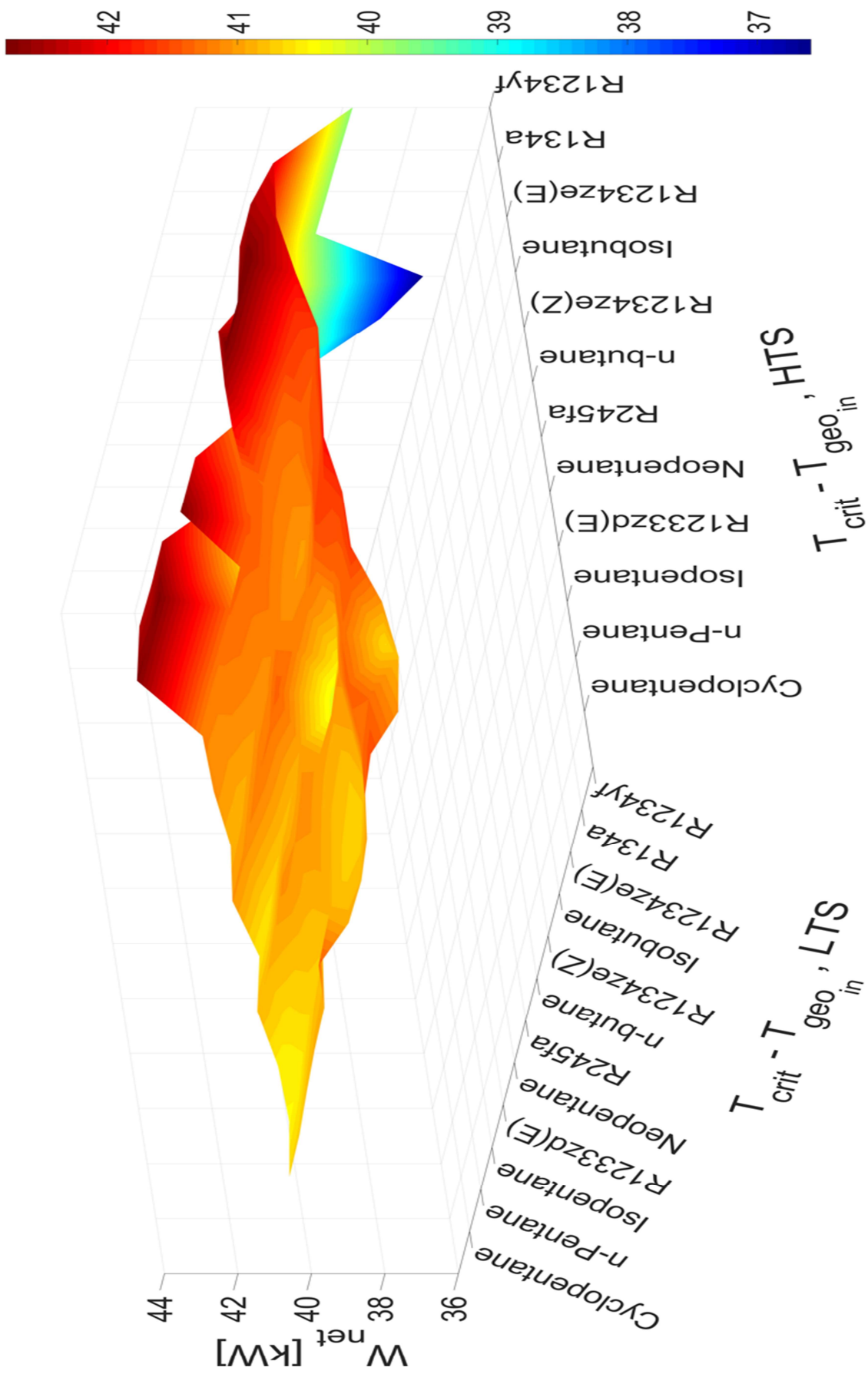


slika 33. T-Q dijagram R134a/ Neopentane

Na T-Q dijagramu (slika 36.) su vidljivi optimalni tlakovi i temperature u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju sa kojima se dobiva maksimalna snaga u postrojenju od 29,19 kW. Također se može vidjeti u tablici 20 da radni fluid u visokotemperaturnom stupnju, najviše topline izmjenjuje od geotermalne vode u predgrijaču kada se radni fluid nalazi u stanju vrele kapljevine. U niskotemperaturnom stupnju se pak najviše topline izmjenjuje u isparivaču kad je radni fluid u stanju mokre pare.

#### 5.4 Rezultati optimizacije na 160°C

Na geotermalnom izvoru temperature 160°C su izvedene 144 kombinacije fluida. Od svih kombinacija radnih fluida najbolji su se pokazali radni fluidi kombinacije R1234ze(E)/R134a u kojemu je dobivena maksimalna snaga 39,77 kW, a R1234ze(E)/Isobutane je sa maksimalnom snagom od 39,82 kW. Kombinacija R1234ze(E)/R134a u visokotemperaturnom stupnju je dobivena snaga od 35,01 kW, dok je u niskotemperaturnom stupnju snaga 4,764 kW, te su detaljniji rezultati prikazani u tablici 23 i slikama 38., 39.. U kombinaciji R1234ze(E)/R134a snaga visokotemperaturnog stupnja je 35,01 kW, a u niskotemperaturnom stupnju je 4,808 kW, te su detaljniji rezultati prikazani u tablici 25 i slikama 40. Dijagram snaga svih kombinacija je prikazano na slici 37 i tablica 21 maksimalnih snaga.



slika 37. Dijagram snaga svih kombinacija fluida za 160°C



Tablica 21. Wnet svih kombinacija za 160°C

WF HTS WF LTS	Cyclopentane	N-pentane R601	Isopentane R601a	R1233zd(E)	Neopentane R601b	R245fa	n-butane R600	R1234ze(Z)	isobutane R600a	R1234ze(E)	R134a	R1234yf
Cyclopentane	40,67 30,11 10,56	40,44 29,05 11,39	40,51 29,06 11,45	40,84 31,55 9,29	40,55 29,35 11,2	41,05 31,62 9,432	40,86 30,97 9,889	41,09 33,32 7,771	41,16 31,87 9,289	42,71 37,65 5,053	42,41 38,59 3,822	39,72 35,01 4,706
N-pentane R601	40,7 29,98 10,72	40,48 28,92 11,56	40,6 28,99 11,61	40,85 31,47 9,374	40,59 29,27 11,32	41,06 31,06 9,464	40,88 30,92 9,955	41,08 33,29 7,787	41,17 31,83 9,34	42,67 37,65 5,02	42,38 38,59 3,787	39,68 35,01 4,672
Isopentane R601a	40,81 29,88 10,93	40,6 28,82 11,78	40,72 28,94 11,61	40,94 31,41 9,524	40,71 29,23 11,48	41,15 31,53 9,623	40,97 30,89 10,05	41,15 33,25 7,903	41,26 31,79 9,472	42,72 37,65 5,062	42,4 38,59 3,816	39,72 35,01 4,712
R1233zd(E)	40,9 29,79 11,11	40,7 28,76 11,94	40,82 28,83 11,99	41,02 31,38 9,631	40,81 29,18 11,62	41,23 31,52 9,709	41,06 30,82 10,23	41,21 33,21 8,007	41,34 31,77 9,567	40,16 37,65 2,504	41,07 38,59 2,483	39,75 35,01 4,736
Neopentane R601b	40,94 29,72 11,22	40,75 28,68 12,06	40,87 28,77 12,1	41,04 31,3 9,738	40,85 29,11 11,73	41,25 31,47 9,783	41,09 30,75 10,33	41,22 33,18 8,046	41,36 31,81 9,546	42,75 37,65 5,098	42,11 38,59 3,525	39,22 35,01 4,206
R245fa	41,4 29,62 11,42	40,86 28,59 12,27	40,98 28,7 12,28	41,12 31,28 9,843	40,96 29,04 11,92	41,38 31,47 9,912	41,18 30,74 10,44	41,29 33,14 8,146	41,45 31,74 9,705	41,35 37,65 3,692	41,04 38,59 2,448	38,86 35,01 3,847
n-butane R600	40,89 29,74 11,16	40,7 28,7 12	40,82 28,8 12,02	41 31,35 9,648	40,8 29,13 11,67	41,22 31,44 9,77	41,05 30,8 10,25	41,19 33,18 8,016	41,32 31,77 9,551	41,95 37,65 4,295	40,99 38,59 2,403	37,45 35,01 2,439
R1234ze(Z)	40,85 29,84 11,01	40,65 28,78 11,87	40,77 28,87 11,9	40,97 31,39 9,584	40,55 28,45 12,1	41,19 31,51 9,675	41,01 30,84 10,17	41,17 33,22 7,951	41,3 31,78 9,518	41,46 37,65 3,805	42,4 38,59 3,816	36,59 35,01 1,578
isobutane R600a	41 29,55 11,46	40,83 28,5 12,33	40,95 28,62 12,33	41,07 31,25 9,823	40,9 28,7 12,14	41,29 31,41 9,884	41,13 30,74 10,39	41,23 33,18 8,057	41,39 31,74 9,657	42,74 37,65 5,08	41,69 38,59 3,10	39,82 35,01 4,808
R1234ze(E)	41,37 28,58 12,79	41,26 27,54 13,72	41,38 27,75 13,63	41,32 30,9 10,42	41,31 28,44 12,87	41,54 31,12 10,41	41,41 30,44 10,97	41,39 33 8,386	41,62 31,6 10,03	42,72 37,65 5,06	42,43 38,59 3,84	39,79 35,01 4,783
R134a	41,51 28,52 12,99	41,33 28,38 12,96	40,64 28,86 11,78	41,36 31,17 10,19	41,45 28,43 13,02	41,61 30,97 10,64	41,5 30,2 11,3	41,43 32,98 8,448	41,69 31,52 10,17	42,78 37,65 5,126	42,44 38,59 3,86	39,77 35,01 4,764
R1234yf	41,07 31,45 9,625	40,82 30,46 10,36	41,04 30,4 10,64	41,65 30,93 10,72	41,65 30,93 10,72	41,92 31,15 10,77	41,76 30,98 10,77	41,61 32,65 8,958	41,99 31,22 10,77	42,28 37,65 4,63	42,11 38,59 3,52	39,73 35,01 4,725

### 5.4.1 Rezultati kombinacije fluida R1234ze(E)/R134a

U kombinaciji fluida R1234ze(E)/R134a je isti slučaj da krivulja u W-p dijagramu kontinuirano raste pa uzimamo gornju granicu tlaka u visokotemperaturnom stupnju  $T_{cr0,9}=32,69$  bara. Granice su prikazane u tablici 22.

Tablica 22. Granice tlakova R1234ze(E)/R134a

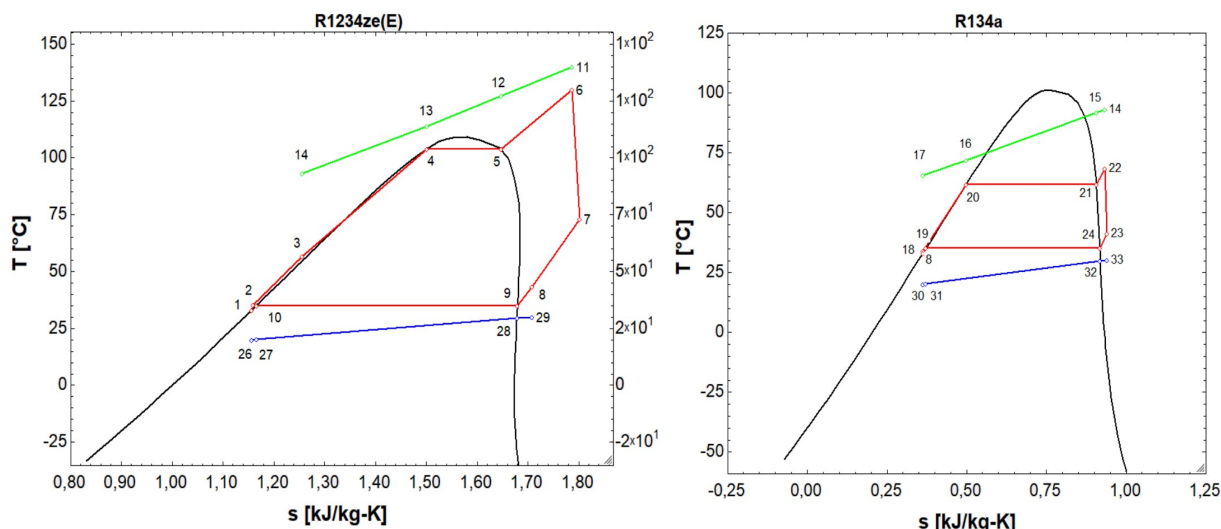
	Donja granica	Gornja granica
$P_{VTSmax}$	30 bara	32,69 bara
$P_{NTSmax}$	17 bara	19 bara

Tablica 23. Rezultati R1234ze(E)/R134a

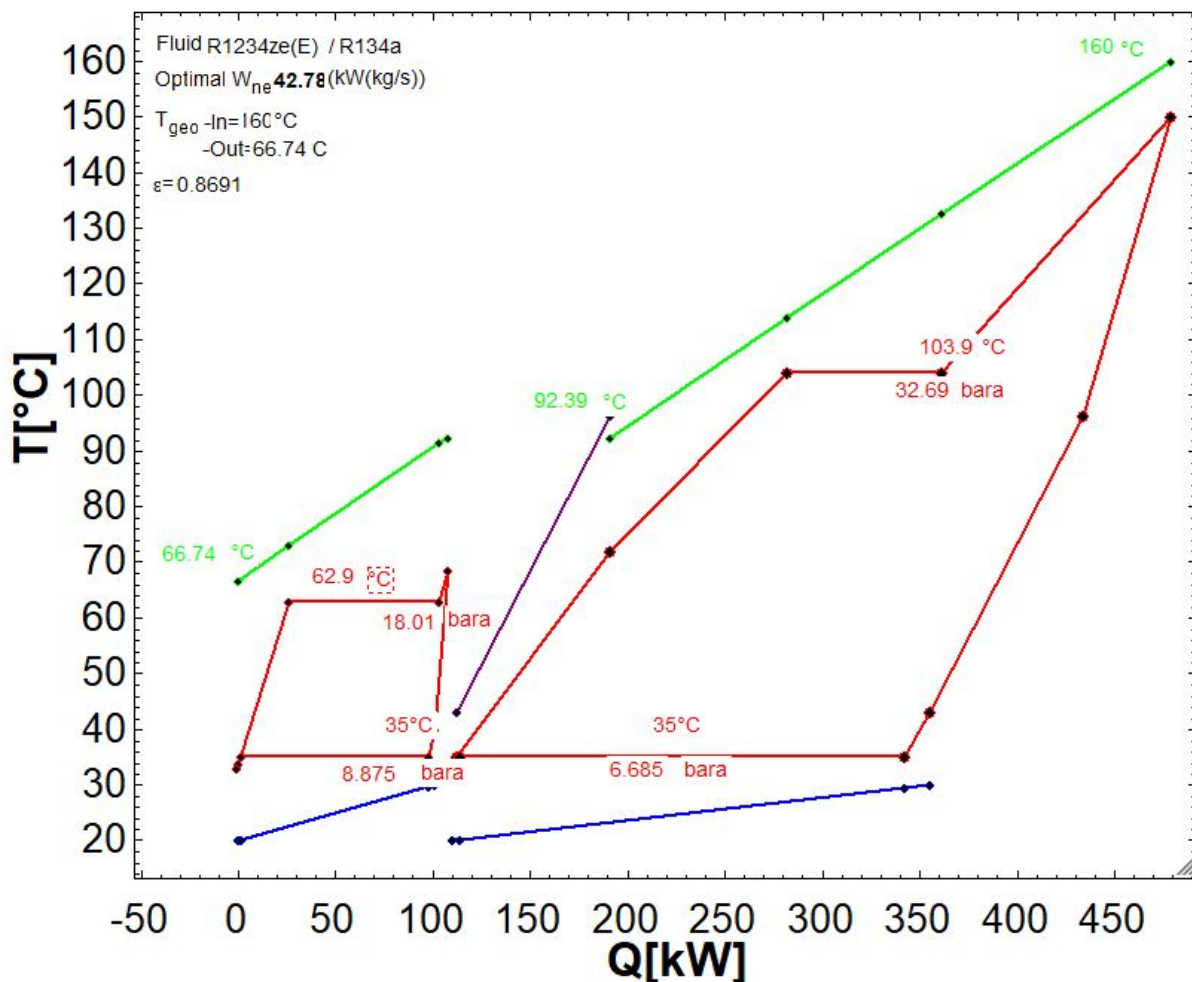
Configuration:	DS HTS IHE subcritical ORC SH SC ACC		
wfVTS/wfNTS:	R1234zeE/R134a		
$T_{geo,in}$ :	160 (°C)	$(m_{geo}=1,0(kg/s))$	

Component (i)	$E_{xf,i}(kW)$	$E_{xp,i}(kW)$	$E_{xD,i}(kW)$	$E_{xL,i}(kW)$	$Q_i(kW)$	$Au_i$
VTS IIP	11,32	8,126	3,199	0	78,93	5,39
VTS PRED	33,23	17,41	2,657	33,23	90,85	6,239
VTS ISP	20,78	17,74	3,042	0	79,67	4,484
VTS PRE	35,29	30,35	4,937	0	117,2	6,597
VTS T	53,53	44,57	8,965	0		
VTS KOND	14,58	4,095	10,48	4,095	228,4	24,24
VTS P	4,459	3,353	1,106	0		
NTS PRED	3,747	2,29	1,457	15,1	25,48	1,343
NTS ISP	13,53	9,89	3,637	0	77,43	4,388
NTS PRE	0,8632	0,5904	0,2728	0	4,384	0,1677
NTS T	8,273	6,742	1,531	0		
NTS KOND	5,962	1,688	4,274	1,688	96,41	10,4
NTS P	0,6036	0,4532	0,1503	0		

$W_{net}$ :	42,78 kW	$\xi_{rec,VTS}$ :	0,8691		
$\eta_{tot,plant,Ex}$ :	37,8 %	$E_{DL,VTS,tot}$ :	71,71		
$W_{net,VTS}$ :	37,65 kW	$E_{DL,NTS,tot}$ :	28,11		
$W_{net,NTS}$ :	5,126 kW	$\eta_{NTS,plantEn}$ :	1,687	$\eta_{VTS,plantEn}$ :	6,322
$P_{HTS}$ :	32,69 bar	$\eta_{NTS,cycleEn}$ :	4,762	$\eta_{VTS,cycleEn}$ :	13,09
$P_{LTS}$ :	18,01 bar	$\eta_{NTS,plantEx}$ :	15,47	$\eta_{VTS,plantEx}$ :	33,27
$\Delta T_{SH,NTS}$ :	5,535 °C	$\eta_{NTS,cycleEx}$ :	28,2	$\eta_{VTS,cycleEx}$ :	49,62
$\Delta T_{SH,VTS}$ :	46,06 °C				
$T_{geo,out}$ :	66,74 °C				
T(17)					



slika 34. T-s dijagrami R1234ze(E)/R134a (desno VTS, lijevo NTS)



slika 35. T-Q dijagram R1234ze(E)/R134a

Na T-Q dijagramu (slika 39.) su vidljivi optimalni tlakovi i temperature u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju sa kojima se dobiva maksimalna snaga u postrojenju od 42,78 kW. Također se može vidjeti u tablici 23 da radni fluid u visokotemperaturnom stupnju, najviše topline izmjenjuje od geotermalne vode u



pregrijaču kada se radni fluid nalazi u stanju vrele kapljevine. U niskotemperaturnom stupnju se pak najviše topline izmjenjuje u isparivaču kad je radni fluid u stanju mokre pare.

#### 5.4.2 Rezultati kombinacije fluida R1234ze(E)/Isobutane

U kombinaciji fluida R1234ze(E)/Isobutane je isti slučaj da krivulja u W-p dijagramu kontinuirano raste pa uzimamo gornju granicu tlaka u visokotemperaturnom stupnju  $T_{cr0,9}=32,69$  bara. Granice su prikazane u tablici 24.

Tablica 24. Granice tlakova R1234ze(E)/Isobutane

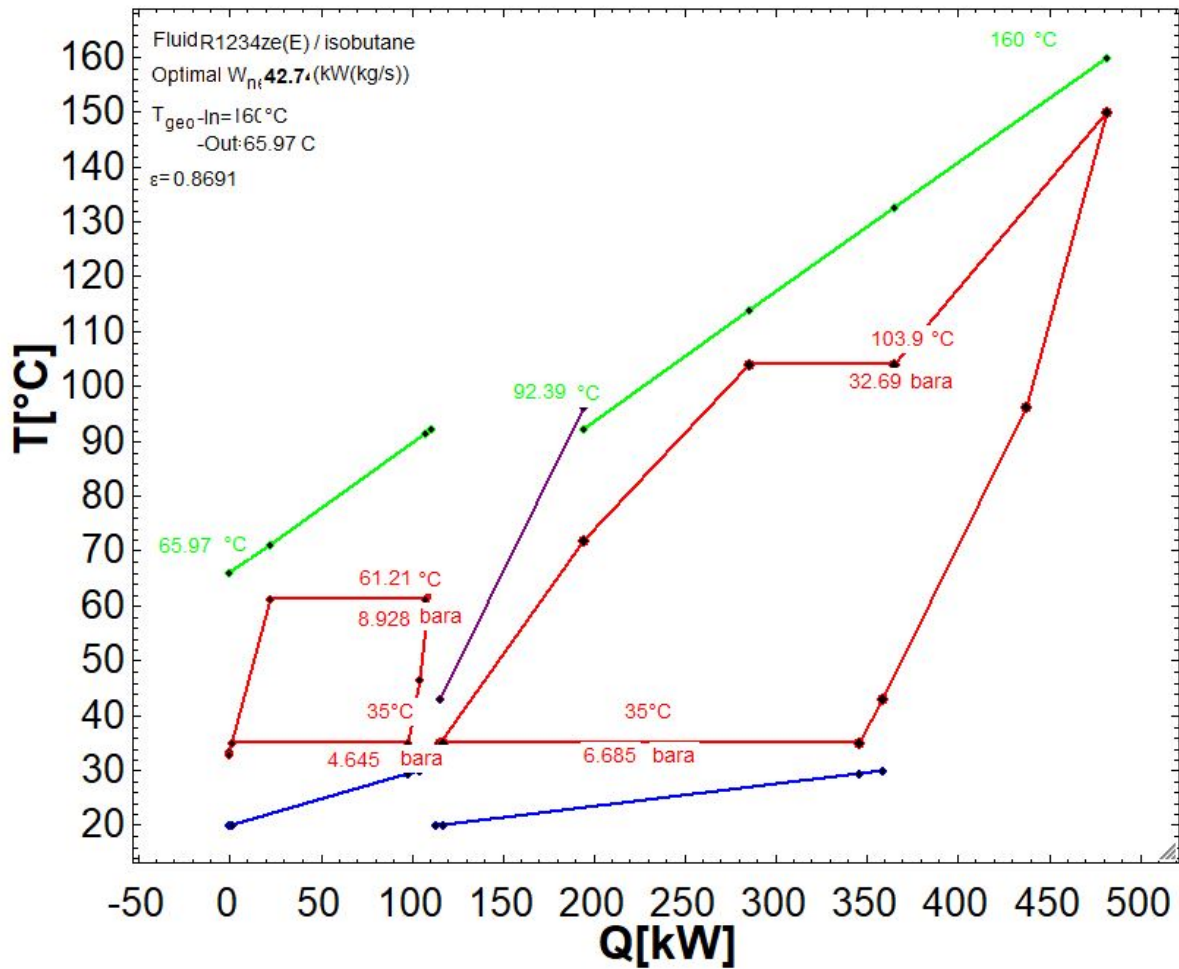
	Donja granica	Gornja granica
$P_{VTSmax}$	30 bara	32,69 bara
$P_{NTSmax}$	8 bara	10 bara

Tablica 25. Rezultati R1234ze(E)/Isobutane

Configuration:	DS HTS IHE subcritical ORC SH SC ACC	
wfVTS/wf NTS:	R1234ze(E)/Isobutane	
$T_{geo,in}$ :	160 (°C)	( $m_{geo}=1,0$ (kg/s))

Component (i)	$E_{xf,i}$ (kW)	$E_{xp,i}$ (kW)	$E_{xD,i}$ (kW)	$E_{xL,i}$ (kW)	$Q_i$ (kW)	$Au_i$
VTS IIP	11,32	8,126	3,199	0	78,93	5,39
VTS PRED	20,06	17,41	2,657	33,23	90,85	6,239
VTS ISP	20,78	17,74	3,042	0	76,96	4,484
VTS PRE	35,29	30,35	4,937	0	117,2	6,597
VTS T	53,53	44,57	8,965	0		
VTS KOND	14,58	4,095	10,48	4,095	228,4	24,24
VTS P	4,459	3,353	1,106	0		
NTS PRED	3,116	1,871	1,245	14,66	21,97	1,149
NTS ISP	14,81	10,55	4,264	0	85,63	4,666
NTS PRE	0,6465	0,4253	0,2212	0	3,278	0,1161
NTS T	7,896	7,896	1,442	0		
NTS KOND	6,239	1,742	4,497	1,742	96,17	10,11
NTS P	0,3262	0,2448	0,08136	0		

$W_{net}$ :	42,74 kW	$\xi_{rec,VTS}$ :	0,8691		
$\eta_{tot plant,Ex}$ :	37,76 %	$E_{DL,VTS tot}$ :	71,71		
$W_{net,VTS}$ :	37,65 kW	$E_{DL,NTS tot}$ :	28,15		
$W_{net,NTS}$ :	5,084 kW	$\eta_{NTS plantEn}$ :	1,673	$\eta_{VTS plantEn}$ :	6,322
$P_{HTS}$ :	32,69 bar	$\eta_{NTS cycleEn}$ :	4,585	$\eta_{VTS cycleEn}$ :	13,09
$P_{LTS}$ :	8,928 bar	$\eta_{NTS plantEx}$ :	15,35	$\eta_{VTS plantEx}$ :	33,27
$\Delta T_{SH,NTS}$ :	5,003 °C	$\eta_{NTS cycleEx}$ :	27,3	$\eta_{VTS cycleEx}$ :	49,62
$\Delta T_{SH,VTS}$ :	46,06 °C				
$T_{geo,out}$ :	65,97 °C				
T(17)					

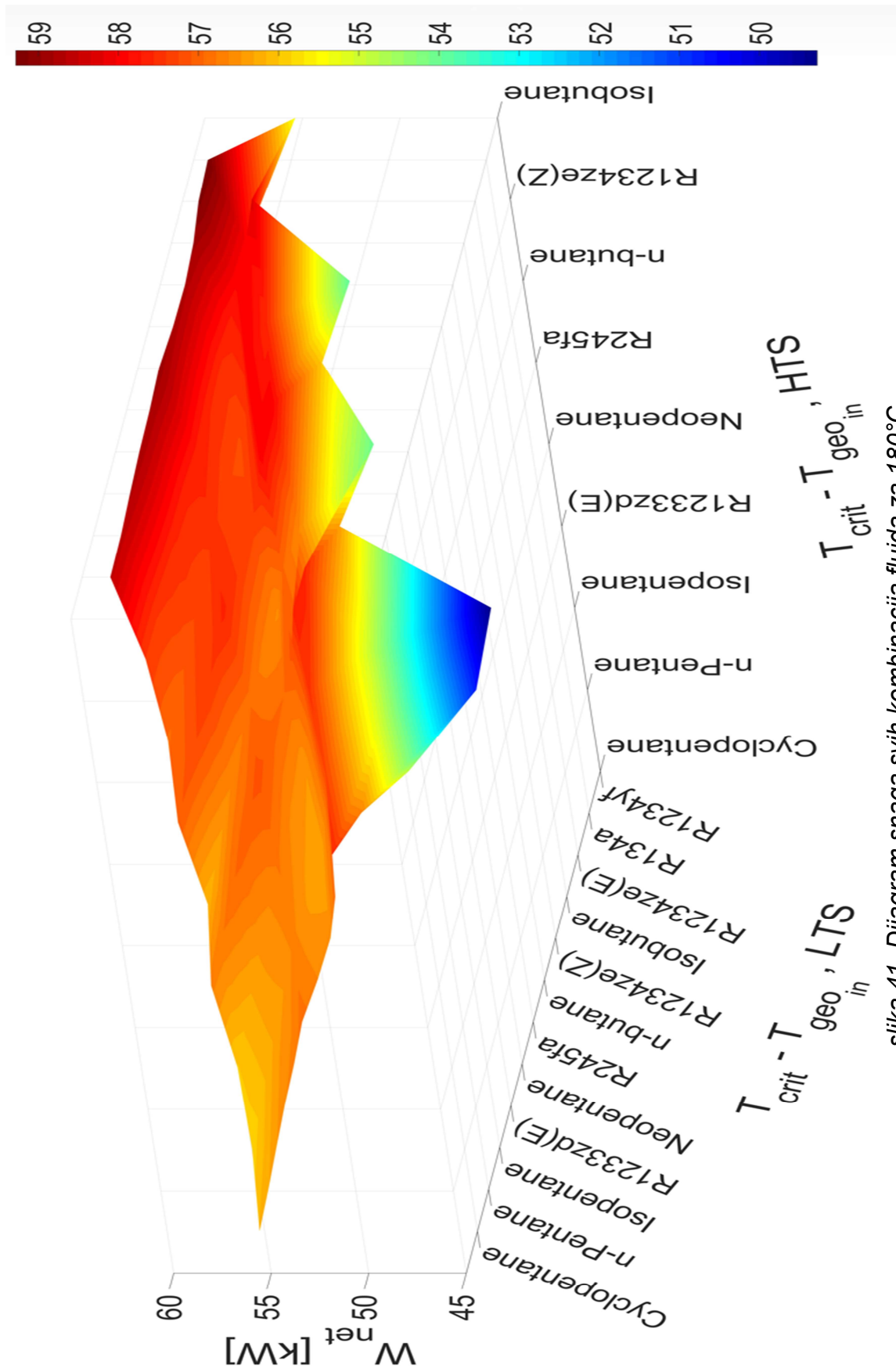


slika 40. T-Q dijagram R1234ze(E)/Isobutan

Na T-Q dijagramu (slika 40.) su vidljivi optimalni tlakovi i temperature u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju sa kojima se dobiva maksimalna snaga u postrojenju od 42,74 kW. Također se može vidjeti u tablici 25 da radni fluid u visokotemperaturnom stupnju, najviše topline izmjenjuje od geotermalne vode u pregrijaču kada se radni fluid nalazi u stanju vrele kapljevine. U niskotemperaturnom stupnju se pak najviše topline izmjenjuje u isparivaču kad je radni fluid u stanju mokre pare.

## 5.5 Rezultati optimizacije na 180°C

Na geotermalnom izvoru temperature 180°C su izvedene 108 kombinacije fluida. Od svih kombinacija radnih fluida najbolji su se pokazali radni fluidi kombinacije Isobutane/R134a u kojemu je dobivena maksimalna snaga 59,28 kW, a Isobutane/R1234ze(E) je sa maksimalnom snagom od 59,18 kW. Kombinacija Isobutane/R134a u visokotemperaturnom stupnju je dobivena snaga od 47,89 kW, dok je u niskotemperaturnom stupnju snaga 11,39 kW, te su detaljniji rezultati prikazani u tablici 27 i slikama 42., 43.. U kombinaciji Isobutane/R1234ze(E) snaga visokotemperaturnog stupnja je 47,89 kW, a u niskotemperaturnom stupnju je 11,29 kW, te su detaljniji rezultati prikazani u tablici 30 i slikama 44. Dijagram snaga svih kombinacija je prikazano na slici 41 i tablica 26 maksimalnih snaga.



slika 41. Dijagram snaga svih kombinacija fluida za 180°C

Tablica 26. Wnet svih kombinacija za 180°C

WFHTS WF LTS	Cyclopentane	N-pentane R601	Isopentane R601a	R1233zd(E)	Neopentane R601b	R245fa	n-butane R600	R1234ze(Z)	isobutane R600a	R1234ze(E)	R134a	R1234yf
Cyclopentane	56,17 41,71 14,47	55,89 40,22 15,67	55,98 40,18 15,8	56,68 44,41 12,28	56,19 40,86 15,34	57,06 44,58 12,48	56,91 43,67 13,23	57,4 47,68 9,716	58,55 47,89 10,66			
N-pentane R601	56,29 41,5 14,79	56,04 40,01 16,03	56,18 40,01 16,17	56,74 44,34 12,41	56,33 40,75 15,58	57,13 44,53 12,6	56,99 43,57 13,42	57,41 47,66 9,757	58,58 47,89 10,69			
Isopentane R601a	56,45 41,35 15,1	56,22 39,91 16,3	56,35 39,91 16,44	56,87 44,27 12,6	56,5 40,66 15,84	57,25 44,43 12,82	57,13 43,54 13,6	57,51 47,6 9,906	58,69 47,89 10,8			
R1233zd(E)	56,6 41,19 15,41	56,38 39,77 16,61	56,52 39,8 16,72	56,98 44,23 12,76	56,66 40,62 16,03	57,37 44,43 12,94	57,26 43,53 13,73	57,59 47,6 9,989	58,78 47,89 10,89			
Neopentane R601b	56,69 41,01 15,68	56,49 39,64 16,85	56,64 39,63 17,01	57,04 44,14 12,91	56,76 40,54 16,22	57,43 44,39 13,04	57,33 43,43 13,9	57,61 47,57 10,04	58,82 47,89 10,93			
R245fa	56,85 40,87 15,98	56,67 39,48 17,19	56,81 39,54 17,27	57,16 44,1 13,06	56,9 40,22 16,68	57,6 44,36 13,24	57,46 43,43 14,03	57,7 47,57 10,13	58,92 47,89 11,03			
n-butane R600	56,63 41,06 15,57	56,43 39,61 16,82	56,57 39,68 16,88	56,99 44,17 12,82	56,69 40,47 16,22	57,38 44,41 12,97	57,27 43,49 13,79	57,58 47,58 9,993	58,77 47,89 10,88			
R1234ze(Z)	56,54 41,2 15,34	56,33 39,78 16,54	56,47 39,79 16,67	56,93 44,22 12,72	56,6 40,61 15,99	57,32 44,44 12,87	57,21 43,51 13,69	57,54 47,6 9,544	58,73 47,89 10,84			
isobutane R600a	56,87 40,59 16,29	56,72 39,21 17,51	56,86 39,28 18,58	57,14 44,03 13,11	56,96 40,31 16,65	57,53 44,24 13,29	57,45 43,35 14,1	57,66 47,52 10,14	58,87 47,89 10,98			
R1234ze(E)	57,6 41,08 16,52	57,28 40,7 16,58	57,46 40,81 16,66	57,63 43,41 14,22	56,59 41,21 15,39	58,03 43,83 14,2	58,02 42,91 15,12	57,91 47,39 10,52	59,18 47,89 11,29			
R134a	56,68 43,69 12,99	55,21 42,23 12,98	54,96 42 12,96	57,61 44,77 12,84	54,67 41,67 13	58 44,98 13,02	57,58 44,6 13,2	57,99 47,29 10,7	59,28 47,89 11,39			
R1234yf	54,82 43,69 12,99	50,7 39,96 10,73	49,28 38,53 10,76	56,39 45,68 10,71	43,98 33,22 10,76	55,97 45,32 10,65	53,89 43,23 10,66	58,25 47,73 10,52	55,39 44,62 10,77			

Tablica 1. Wnet svih kombinacija za 180°C



### 5.5.1 Rezultati kombinacije fluida Isobutane/R134a

U kombinaciji fluida Isobutane/R134a je isti slucaj da krivulja u W-p dijagramu kontinuirano raste pa uzimamo gornju granicu tlaka u visokotemperaturnom stupnju  $T_{cr0,9}=32,75$  bara. Granice su prikazane u tablici 27.

Tablica 27. Granice tlakova Isobutane/R134a

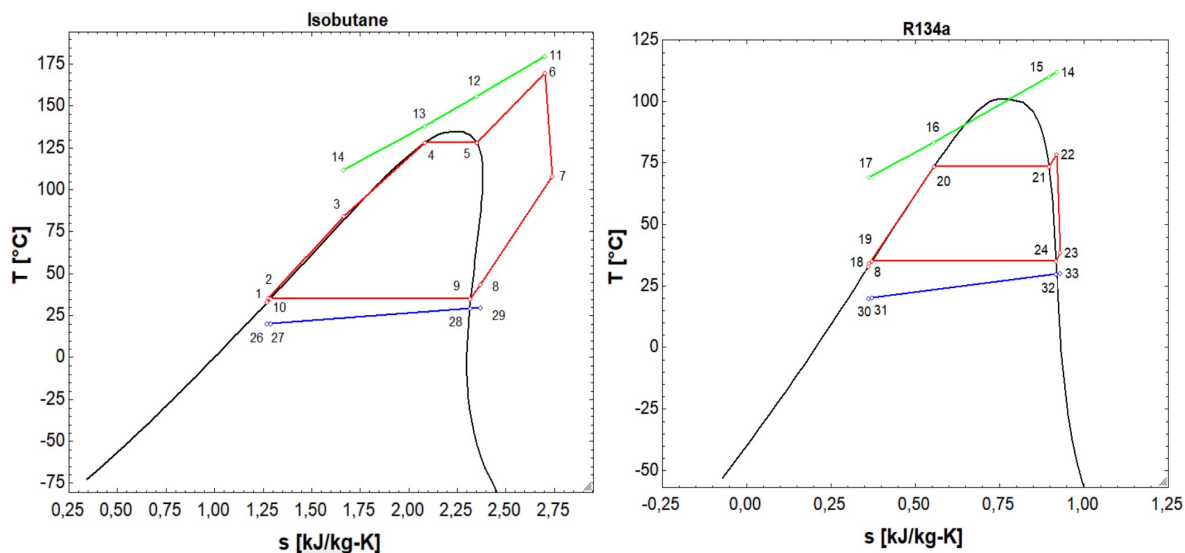
	Donja granica	Gornja granica
$P_{VTSmax}$	30 bara	32,75 bara
$P_{NTSmax}$	22 bara	24 bara

Tablica 28. Rezultati Isobutane/R134a

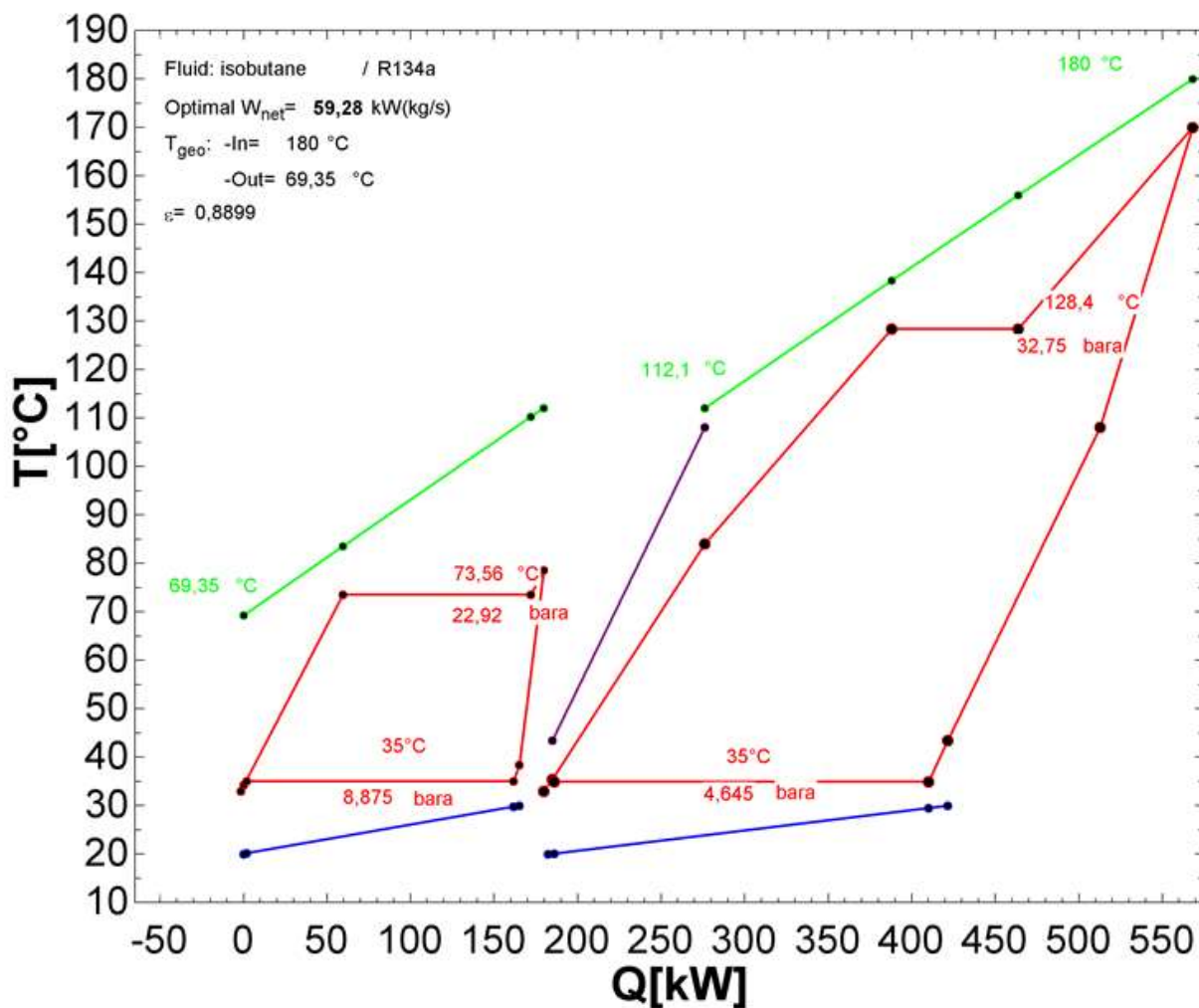
Configuration:	DS HTS IHE subcritical ORC SH SC ACC	
wfVTS/wf NTS:	Isobutane/R134a	
$T_{geo,in}$ :	180 (°C)	( $m_{geo}=1,0$ (kg/s))

Component (i)	$E_{xf,i}$ (kW)	$E_{xp,i}$ (kW)	$E_{xD,i}$ (kW)	$E_{xL,i}$ (kW)	$Q_i$ (kW)	$Au_i$
VTS IIP	14,51	10,9	3,604	0	91,31	6,258
VTS PRED	29,54	25,88	3,66	51,42	111,9	6,395
VTS ISP	22,96	20,45	2,507	0	75,77	4,366
VTS PRE	745,9	31,43	714,5	0	104,4	6,015
VTS T	66,12	55,25	10,87	0		
VTS KOND	14,16	3,988	10,17	3,988	224,2	23,86
VTS P	4,971	3,739	1,232	0		
NTS PRED	9,611	6,242	3,369	16,63	59,61	2,981
NTS ISP	23,34	17,38	5,961	0	112,5	5,475
NTS PRE	1,829	1,237	0,5923	0	7,711	0,2198
NTS T	17,91	14,58	3,327	0		
NTS KOND	9,762	2,769	6,993	2,769	159,7	17,37
NTS P	1,536	1,154	0,382	0		

$W_{net}$ :	59,28 kW	$\xi_{rec,VTS}$ :	0,8899		
$\eta_{tot,plant,Ex}$ :	-5,127 %	$E_{DL,VTS,tot}$ :	801,9		
$W_{net,VTS}$ :	47,89 kW	$E_{DL,NTS,tot}$ :	40,03		
$W_{net,NTS}$ :	11,39 kW	$\eta_{NTS,plantEn}$ :	2,94	$\eta_{VTS,plantEn}$ :	6,966
$P_{HTS}$ :	32,75 bar	$\eta_{NTS,cycleEn}$ :	6,334	$\eta_{VTS,cycleEn}$ :	16,41
$P_{LTS}$ :	22,92 bar	$\eta_{NTS,plantEx}$ :	21,99	$\eta_{VTS,plantEx}$ :	-4,142
$\Delta T_{SH,NTS}$ :	5,036 °C	$\eta_{NTS,cycleEx}$ :	32,72	$\eta_{VTS,cycleEx}$ :	-3,937
$\Delta T_{SH,VTS}$ :	41,59 °C				
$T_{geo,out}$ :	69,35 °C				
T(17)					



slika 36. T-s dijagrami Isobutane/R134a (desno VTS, lijevo NTS)



slika 37. T-Q dijagram Isobutane/R134a

Na T-Q dijagramu (slika 43.) su vidljivi optimalni tlakovi i temperature u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju sa kojima se dobiva maksimalna snaga u postrojenju od 59,28 kW. Također se može vidjeti u tablici 28 da radni fluid u

visokotemperaturnom stupnju, najviše topline izmjenjuje od geotermalne vode u predgrijaču kada se radni fluid nalazi u stanju vrele kapljevine. U niskotemperaturnom stupnju se pak najviše topline izmjenjuje u isparivaču kad je radni fluid u stanju mokre pare.

### 5.5.2 Rezultati kombinacije fluida Isobutane/R1234ze(E)

U kombinaciji fluida Isobutane/R1234ze(E) je isti slučaj da krivulja u W-p dijagramu kontinuirano raste pa uzimamo gornju granicu tlaka u visokotemperaturnom stupnju  $T_{cr,9}=32,75$  bara. Granice su prikazane u tablici 29.

Tablica 29. Granice tlakova Isobutane/R1234ze(E)

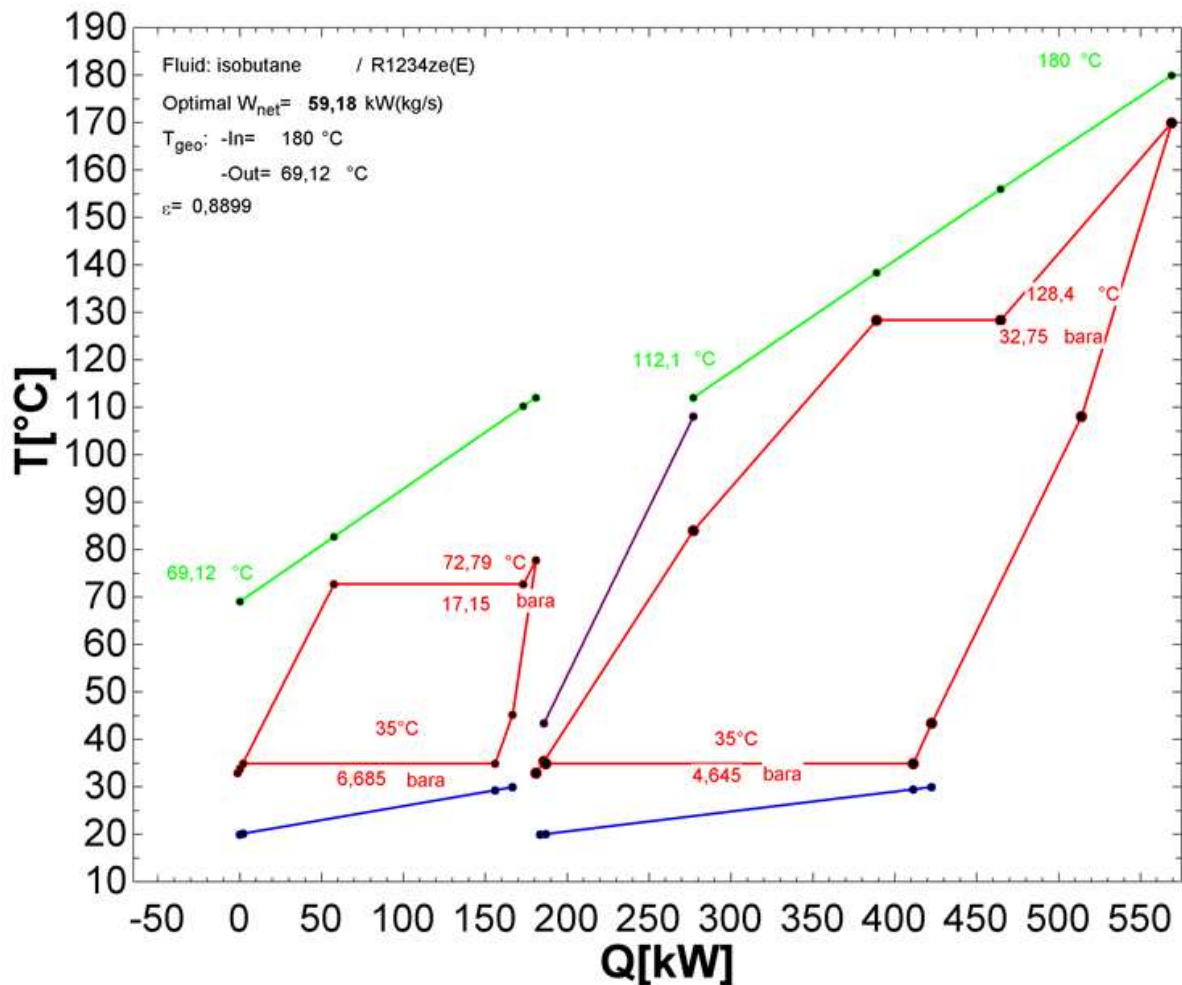
	Donja granica	Gornja granica
$P_{VTSmax}$	30 bara	32,75 bara
$P_{NTSmax}$	16 bara	19 bara

Tablica 30. Rezultati Isobutane/R1234ze(E)

Configuration:	DS HTS IHE subcritical ORC SH SC ACC	
wfVTS/wf NTS:	Isobutane/R1234ze(.E)	
$T_{geo,in}$ :	180 (°C)	( $m_{geo}=1,0$ (kg/s))

Component (i)	$E_{xf,i}$ (kW)	$E_{xp,i}$ (kW)	$E_{xD,i}$ (kW)	$E_{xL,i}$ (kW)	$Q_i$ (kW)	$Au_i$
VTS IIP	14,51	10,9	3,604	0	91,31	6,258
VTS PRED	29,54	25,88	3,66	51,42	111,9	6,395
VTS ISP	22,96	20,45	2,507	0	75,77	4,366
VTS PRE	745,9	31,43	714,5	0	104,4	6,015
VTS T	66,12	55,25	10,87	0		
VTS KOND	14,16	3,988	10,17	3,988	224,2	23,86
VTS P	4,971	3,739	1,232	0		
NTS PRED	9,184	5,884	3,3	16,49	57,38	2,864
NTS ISP	23,95	17,67	6,272	0	115,8	5,565
NTS PRE	1,791	1,191	0,6002	0	7,549	0,2106
NTS T	17,35	14,17	3,179	0		
NTS KOND	9,977	2,787	7,19	2,787	153,5	16,14
NTS P	1,209	0,9078	0,301	0		

$W_{net}$ :	59,18 kW	$\xi_{rec,VTS}$ :	0,8899		
$\eta_{tot,plant,Ex}$ :	-5,119 %	$E_{DL,VTS,tot}$ :	801,9		
$W_{net,VTS}$ :	47,89 kW	$E_{DL,NTS,tot}$ :	40,13		
$W_{net,NTS}$ :	11,29 kW	$\eta_{NTS,plantEn}$ :	2,915	$\eta_{VTS,plantEn}$ :	6,966
$P_{HTS}$ :	32,75 bar	$\eta_{NTS,cycleEn}$ :	6,247	$\eta_{VTS,cycleEn}$ :	16,41
$P_{LTS}$ :	17,15 bar	$\eta_{NTS,plantEx}$ :	21,81	$\eta_{VTS,plantEx}$ :	-4,142
$\Delta T_{SH,NTS}$ :	5,071 °C	$\eta_{NTS,cycleEx}$ :	32,31	$\eta_{VTS,cycleEx}$ :	-3,937
$\Delta T_{SH,VTS}$ :	41,59 °C				
$T_{geo,out}$ :	69,12 °C				
T(17)					



slika 38. T-Q dijagram Isobutane/R1234ze(E)

Na T-Q dijagramu (slika 44.) su vidljivi optimalni tlakovi i temperature u visokotemperaturnom i niskotemperaturnom stupnju sa kojima se dobiva maksimalna snaga u postrojenju od 59,18 kW. Također se može vidjeti u tablici 30 da radni fluid u visokotemperaturnom stupnju, najviše topline izmjenjuje od geotermalne vode u predgrijaču kada se radni fluid nalazi u stanju vrele kapljevine. U niskotemperaturnom stupnju se pak najviše topline izmjenjuje u isparivaču kad je radni fluid u stanju mokre pare.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu je provedena analiza i optimiziranje organskih radnih fluida u dvostupanjskom Rankineovom ciklusu za potrebe geotermalne elektrane. U tu svrhu je provedena:

1. termodinamička analiza i optimiziranje,
2. eksergetska analiza i optimiziranje.

Analiza i optimiziranje je izvedeno pomoću programskog paketa EES (Engineering Equation Solver). Termodinamičkom analizom se može ustanoviti da radni fluidi imaju različito ponašanje jer radni fluidi kod visokotemperaturnog stupnja preuzimaju najviše topline iz pregrijača ili isparivača ili predgrijača, zavisno o odabranom fluidu u stupnju, a kod niskotemperaturnog stupnja se najviše topline izmjenjuje u isparivaču. Svaki radni fluid ima svoj optimalni tlak i temperaturu isparavanja u kojoj daje maksimalnu vrijednosti energetske i eksergetske učinkovitost postrojenja. Najveće vrijednosti energetske i eksergetske učinkovitosti su pokazali fluidi R1234yf na 120°C, R134a na 140°C, R1234ze(E) na 160°C i Isobutane na 180°C, te su se fluidi R1233zd(E) i Neopentane pokazali dobri kao partneri u niskotemperaturnim stupnjevima.

S obzirom na temperaturu geotermalne vode potrebno je upotrijebiti najprikladnije fluide za traženo postrojenje iz kojeg je cilj proizvesti što veću snagu sa najboljim vrijednostima energetske i eksergetske učinkovitosti. Razvoj tehnologije ORC postrojenja na geotermalne vode ima značajnu ulogu kojom bi se ostvarili ciljevi smanjenja emisija stakleničkih plinova i emisije fosilnih goriva.



## LITERATURA

- [1] Mustapić, N., Dragić, M., Vreš, M. Thermodynamic analysis of organic rankine cycle based on geothermal power plant-case study of geothermal field Rečica near Karlovac. Zbornik Međunarodne konferencije o obnovljivim izvorima električne energije–MKOIEE, 287-297, 2017.
- [2] Kurevija, T, Golub, M. Iskorištavanje geotermijskih ležišta. Skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko geološko naftni fakultet. 2008.
- [3] Guzović, Z., Majcen, B. Mogućnosti proizvodnje električne energije u Republici Hrvatskoj iz srednjotemperaturnih geotermalnih izvora. Zbornik radova 9. međunarodnog znanstveno-stručnog savjetovanja Energetska i procesna postrojenja i 4. međunarodnog foruma o obnovljivim izvorima energije, 1-19, 2010.
- [4] Gupta, H. K., Roy, S. Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century. Elsevier, 2006. Dostupno i na: [https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=3sOyhcp5eZYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Geothermal+Energy:An+alternative+Resource+for+the+21st+Century&ots=Aplm1hWQd0&sig=Hp\\_POm516qRw-SwUiMtqjw\\_kkal&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Geothermal%20Energy%3AAn%20alternative%20Resource%20for%20the%2021st%20Century&f=false](https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=3sOyhcp5eZYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Geothermal+Energy:An+alternative+Resource+for+the+21st+Century&ots=Aplm1hWQd0&sig=Hp_POm516qRw-SwUiMtqjw_kkal&redir_esc=y#v=onepage&q=Geothermal%20Energy%3AAn%20alternative%20Resource%20for%20the%2021st%20Century&f=false) (21.9.2022.).
- [5] 3. Cartwright, J. What's at the centre of the earth?. Dostupno na: [http://horizon-magazine.eu/article/what-s-centre-earth\\_en.html](http://horizon-magazine.eu/article/what-s-centre-earth_en.html).
- [6] <https://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija/69-nacini-pretvorbe-geotermalne-energije-u-elektricnu-energiju?showall=1>
- [7] Mustapić, N. Guzović, Z., Staniša B., Energetski strojevi i moduli, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.
- [8] DiPippo, R. *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact*. Butterworth-Heinemann, 2012. Dostupno i na: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31215437/132459833-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1663748438&Signature=Qxbm034GA0HNh-ahil-L~9ZVDFul1ysTyjHWRVIXeQUu0wXkOUOmqqk3Adv7BWm7j9jq4Xdi00f54AvEySgT1zE6Kh~4zznAn8fWiWLZTe616L9nA85~aDcpUSF1RHB-at0E2i-iWliOPofdxHvA5LYnmSdNUCvdTqEoxcCQ-fRiVcGYQrrhPyRziOY1yfYNNauRkX6bLFtESwCUQgzWdZBAd3Tvq-uLXoLsAFLi6idvKz5kcx0~Cwc7TyshxkdajUKUwTYvj8ZvW0D3fTOVOKJjZ11ttTaAKC~cIMghptkMLtz2Sis1uwXZZb1jYVqsE9NEFWHvrDm~nqN7Cz8lw\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31215437/132459833-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1663748438&Signature=Qxbm034GA0HNh-ahil-L~9ZVDFul1ysTyjHWRVIXeQUu0wXkOUOmqqk3Adv7BWm7j9jq4Xdi00f54AvEySgT1zE6Kh~4zznAn8fWiWLZTe616L9nA85~aDcpUSF1RHB-at0E2i-iWliOPofdxHvA5LYnmSdNUCvdTqEoxcCQ-fRiVcGYQrrhPyRziOY1yfYNNauRkX6bLFtESwCUQgzWdZBAd3Tvq-uLXoLsAFLi6idvKz5kcx0~Cwc7TyshxkdajUKUwTYvj8ZvW0D3fTOVOKJjZ11ttTaAKC~cIMghptkMLtz2Sis1uwXZZb1jYVqsE9NEFWHvrDm~nqN7Cz8lw_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA) (21.9.2022.).
- [9] Alerić, I. Načini pretvorbe geotermalne energije u električnu. Dostupno na: <https://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija/69-nacini-pretvorbe-geotermalne-energije-u-elektricnu-energiju?start=3> (21.9.2022.).
- [10] Rettig1, A. ... [et. al.]. Chernushevich, J.: Application of Organic Rankine Cycles (ORC), World Engineers Convention, Geneva, 2011. Dostupno na: <https://www.zhaw.ch/storage/engineering/institute-zentren/iefef/PDFs/orc-final-paper-wec2011-2011-07-30.pdf> (21.9.2022.).
- [11] <https://w-refrigerant.com/en/?s=Isobutan>
- [12] <https://w-refrigerant.com/en/?s=R1234ze%28E%29>
- [13] <https://w-refrigerant.com/en/latest-refrigerant-en/r134a/>
- [14] <https://w-refrigerant.com/en/?s=R1234yf>