KONSTRUKCIJA TURBINE S RADIJALNIM ULAZOM RADNOG FLUIDA ZA POTREBE GEOTERMALNE ELEKTRANE

Đuretković, Mislav

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:732786

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MISLAV ĐURETKOVIĆ

KONSTRUKCIJA TURBINE S RADIJALNIM ULAZOM RADNOG FLUIDA ZA POTREBE GEOTERMALNE ELEKTRANE

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MISLAV ĐURETKOVIĆ

KONSTRUKCIJA TURBINE S RADIJALNIM ULAZOM RADNOG FLUIDA ZA POTREBE GEOTERMALNE ELEKTRANE

ZAVRŠNI RAD

dr. sc. Nenad Mustapić, prof. v. š.

KARLOVAC, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Karlovac University of Applied Sciences	Klasa: 602-11/__-01/____ Ur.broj: 2133-61-04-__-01
ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA	Datum:

Ime i prezime	Mislav Đuretković	
OIB / JMBG		
Adresa		
Tel. / Mob./e-mail		
Matični broj studenta		
JMBAG		
Studij (staviti znak **X** ispred odgovarajućeg studija)	preddiplomski	specijalistički diplomski
Naziv studija	Stručni studij strojarstva	
Godina upisa	2016.	
Datum podnošenja molbe		
Vlastoručni potpis studenta/studentice		

Naslov teme na hrvatskom:
KONSTRUKCIJA TURBINE S RADIJALNIM ULAZOM RADNOG FLUIDA ZA POTREBE GEOTERMALNE ELEKTRANE

Naslov teme na engleskom:
DESIGN OF RADIAL INFLOW TURBINE FOR GEOTHERMAL POWER PLANT

Opis zadatka:
Zadatak završnog rada je konstrukcija (preliminarni dizajn) turbine s radijalnim ulazom radnog fluida (u daljnjem tekstu radijalna turbina) za potrebe geotermalne elektrane. Pretpostavka je da geotermalna elektrana radi na geotermalnom polju Rečica kod Karlovca. Tehničke karakteristike geotermalnog polja su: temperatura i tlak geofluida iznose 120°C i 20 bara, dok je maseni protok 94,38 kg/s.
Potrebno je opisati i verificirati matematički model za preliminarni dizajn radijalne turbine (VUKA model), te ga uključiti u model geotermalne elektrane.
Geotermalna elektrana je izvedena kao osnovna konfiguracija Rankine-ovog ciklusa sa organskim fluidom (u daljnjem tekstu ORC). Problem riješiti upotrebom programskog paket EES (Engineering Equation Solver), čiji je sastavni dio paket za optimiranje koji koristi genetski algoritam. Konstrukcija radijalne turbine zadovoljava maksimalnu vrijednost funkcije cilja. Optimiranje provesti za dvije funkcije cilja: eksergetski stupanj korisnosti postrojenja i neto dobivena snaga postrojenja. Pretpostaviti da je kondenzator hlađen zrakom, a da je temperatura kondenzacije 30°C, dok je vrijednost minimalne temperaturne razlike (pinch point) kondenzatora 5°C. Proračune provesti za naredne radne fluide: R32, R134a, R143a, R290, R1234yf i propilen. Zadane su neredne radne karakteristike ORC ciklusa: tlak radnog fluida je veći i manji od kritičnog (podkritični ili nadkritični ORC), vrijednost minimalne temperaturne razlike između geofluida i radnog fluida iznosi 5°C i 10°C. Radijalna turbina je jednostepena, te radi s 3000o/min, ili ima proizvoljni broj okretaja. Potrebno je provesti detaljnu analizu dobivenih rezultata, te definirati odgovarajuće zaključke.

Mentor:	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno koristeći znanje i vještine stečene tijekom studija te navedenu stručnu literaturu. Zahvaljujem mentoru dr. sc. Nenadu Mustapiću na pomoći i savjetima prilikom izrade završnog rada.

Karlovac, _____ Potpis:_____

SAŽETAK

U ovom završnom radu definirao se matematički model za preliminarnu konstrukciju turbine s radijalnim ulazom radnog fluida (u daljnjem tekstu radijalna turbina) za potrebe geotermalne elektrane. Geotermalna elektrane je izvedena kao osnovni Rankine-ov ciklus s organskim fluidom (u daljnjem tekstu ORC). Zatim je model radijalne turbine uključen u model ORC-a te je provedena optimizacija parametara ciklusa i turbine genetskim algoritmom. Optimizacija je provedena za 6 odabranih radnih fluida te za 6 kombinacija parametara. Za funkcije cilja optimizacije odabrani su eksergetski stupanj korisnosti postrojenja i neto dobivena snaga postrojenja. Svi proračuni i optimiranje provedeni su u programskom paketu EES (Engineering Equation Solver). Analizom dobivenih rezultata određena je optimalna konstrukcija turbine te optimalni parametri ORC-a za dano postrojenje.

Ključne riječi: turbina sa radijalnim ulazom radnog fluida, preliminarna konstrukcija, organski Rankine-ov ciklus, optimizacija.

SUMMARY

In this undergraduate thesis, a mathematical model for preliminary design of a radial inflow turbine (RIT) for a geothermal power plant is defined. The power plant is based on a simple organic Rankine cycle (ORC). The model of the RIT is integrated with the mathematical model of the ORC. After that, optimization of the RIT and ORC parameters was conducted using the genetic algorithm technique. Optimization was conducted for 6 working fluids and 6 different combinations of parameters. Objective functions of the optimization are the exergetic efficiency of the power plant and the net generated power. All the calculations and the optimization were done in EES (Engineering Equation Solver) software. Results analysis determines the optimal RIT construction and parameters of the ORC for the considered power plant.

Key words: radial inflow turbine, preliminary design, organic Rankine cycle, optimization.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....

POPIS TABLICA.....

POPIS OZNAKA .....

1. UVOD 1

2. TEORETSKE OSNOVE..... 4

2.1. Osnovna konstrukcija turbine s radijalnim ulazom radnog fluida..... 4

2.2. Matematički model preliminarnog proračuna radijalne turbine 7

2.2.1. Matematički model rotora 8

1.1.1.1. Modeliranje ulaza u rotor..... 9

1.1.1.2. Modeliranje izlaza iz rotora 12

2.2.2. Matematički model statora (mlaznica)..... 15

2.2.3. Matematički model ulaznog kanala..... 21

2.2.4. Matematički model difuzora 22

2.3. Matematički model gubitaka u radijalnoj turbini 24

2.3.1. Gubici u rotoru 24

2.3.1.1. Gubitak ulaznog kuta 24

2.3.1.2. Gubitak u rotorskim lopaticama..... 24

2.3.1.3. Gubitak zbog zazora 25

2.3.1.4. Gubitak trenja diska 26

2.3.1.5. Gubitak izlaznog ruba..... 26

2.3.1.6. Gubitak izlazne kinetičke energije..... 27

2.3.1.7. Ukupni gubitak u rotoru..... 27

2.3.2. Gubitak u statorskim lopaticama..... 27

2.3.3. Gubitak u ulaznom kanalu..... 27

2.3.4. Ukupni gubitak u turbini 27
2.4. Ograničenja konstrukcije 28
2.4.1. Elastično naprezanje u rotoru 28
2.4.2. Vibracije 28
2.4.3. Geometrijska ograničenja 29
3. POSTAVKA ZADATKA 30
4. RAZRADA ZADATKA I ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA 32
4.1. Usporedba matematičkog modela radijalne turbine s rezultatima objavljenim u stručnoj literaturi 32
4.1.1. Usporedba VUKA modela s stručnom literaturom [7] 32
4.1.2. Usporedba VUKA modela s stručnom literaturom [29] 36
4.2. Optimiranje parametara ORC ciklusa s radijalnom turbinom 37
4.3. Analiza rezultata 40
5. ZAKLJUČAK 53
LITERATURA 54
PRILOZI 57
1. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R1234yf 57
2. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R290 75
3. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R143a 87
4. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R134a 104
5. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R32 116
6. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za propilen 128

POPIS SLIKA

Slika 1:Izvedbe ORC ciklusa i njegovih komponenti 1
Slika 2:Shema geotermalne elektrane sa jednostavnim podkritičnim ORC ciklusom 2
Slika 3: Osnovni ORC ciklus s nadkritičnim tlakom 3
Slika 4: Presjek radijalne turbine [1] 4
Slika 5: Radijalna turbina [1] 4
Slika 6: Meridijonalni presjek rotora 5
Slika 7: h-s dijagram ekspanzije u turbini 6
Slika 8: Shema preliminarnog proračuna turbine 7
Slika 9:Korelacije vrijednosti omjera brzina v_s, stupnja korisnosti η_{ts} i specifične brzine N_s 8
Slika 10:Trokut brzina na ulazu (a) i izlazu (b) iz rotora [4] 10
Slika 11:Shema algoritma za modeliranje rotora 14
Slika 12: Statorske lopatice [7] 15
Slika 13: Profil statorske lopatice [1] 17
Slika 14:Shema algoritma za modeliranje statora 20
Slika 15: Geometrija ulaznog kanala [4] 21
Slika 16: Skica bitnih geometrijskih veličina difuzora [1] 22
Slika 17:*T-s* dijagram osnovnog podkritičnog ciklusa 38
Slika 18: Dopušteno područje ulaznih tlakova i temperatura turbine za R1234yf 39
Slika 19: Dijagram za rezultate optimiranja; funkcija cilja $\eta_{plant,ex}$ 42
Slika 20:Dijagram za rezultate optimiranja, funkcija cilja W_{net} 43
Slika 21: Tablični prikaz usporedba gabarita rotora, funkcija cilja $\eta_{plant,ex}$, $N \neq 3000$, podkritično 44
Slika 22: Tablični prikaz usporedbe gabarita rotora, funkcija cilja $\eta_{plant,ex}$, $N=3000$, podkritično 45
Slika 23: Tablični prikaz usporedbe gabarita rotora, funkcija cilja W_{net}, $N \neq 3000$, podkritično 46
Slika 24: Tablični prikaz usporedbe gabarita rotora, funkcija cilja W_{net}, $N=3000$, podkritično 47
Slika 25:Tablični prikaz usporedbe gabarita rotora za nadkritični slučaj 48
Slika 26: *T-s* dijagram za rezultate optimiranja iz tablice 8 50
Slika 27: Rotor: pogled 1 51
Slika 28: Rotor: pogled 2 51
Slika 29: Rotor: pogled 3 52
Slika 30: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 10 57

Slika 31: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 12 59
Slika 32: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 14 60
Slika 33: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 16 62
Slika 34:*T-s* dijagram za rezultate iz tablice 18 63
Slika 35: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 20 65
Slika 36: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 22 66
Slika 37: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 24 68
Slika 38: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 26 69
Slika 39: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 28 71
Slika 40: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 30 72
Slika 41: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 32 74
Slika 42: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 34 75
Slika 43: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 36 77
Slika 44: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 38 78
Slika 45: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 40 80
Slika 46: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 42 81
Slika 47: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 44 83
Slika 48: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 46 84
Slika 49: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 48 86
Slika 50: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 50 87
Slika 51: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 52 89
Slika 52: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 54 90
Slika 53: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 56 92
Slika 54: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 58 93
Slika 55: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 61 95
Slika 56: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 62 96
Slika 57: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 64 98
Slika 58: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 66 99
Slika 59: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 68 101
Slika 60: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 70 102
Slika 61: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 72 104
Slika 62: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 74 106
Slika 63: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 76 107

Slika 64: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 78 109
Slika 65: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 80 110
Slika 66: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 82 112
Slika 67: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 84 113
Slika 68: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 86 115
Slika 69: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 88 116
Slika 70: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 90 118
Slika 71: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 92 119
Slika 72: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 94 121
Slika 73: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 96 122
Slika 74: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 98 124
Slika 75: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 100 125
Slika 76: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 102 127
Slika 77: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 104 128
Slika 78: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 106 130
Slika 79: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 108 131
Slika 80: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 110 133
Slika 81: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 112 134
Slika 82: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 114 136
Slika 83: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 116 137
Slika 84: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 118 139

POPIS TABLICA

Tablica 1: Kritični tlak i temperatura te molarna masa radnih fluida 31
Tablica 2: Usporedba VUKA modela s literaturom [7] 33
Tablica 3:Usporedba VUKA modela i literature [7] sa N_s i v_s kao ulaznim parametrima 34
Tablica 4: Usporedba optimiziranog VUKA modela i modela sa zadanim parametrima 35
Tablica 5:Ulazni podaci za usporedbu s literaturom [29] 36
Tablica 6: Rezultati usporedbe s literaturom [29] 36
Tablica 7: Fiksni parametri ORC ciklusa 40
Tablica 8: Optimizirane veličine ORC ciklusa, funkcija cilja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (nadkritično, ΔTpp=5°C, N ≠3000) 49
Tablica 9: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000) 50
Tablica 10: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 57
Tablica 11: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 58
Tablica 12: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (podkritično, ΔTpp=10°C, N ≠3000) 58
Tablica 13: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 59
Tablica 14: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 60
Tablica 15: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 61
Tablica 16: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 61
Tablica 17: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000) 62
Tablica 18: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 63
Tablica 19: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje *Wnet*; R1234yf (podkritično, ΔTpp=5°C, N≠3000) 64
Tablica 20: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000) 64
Tablica 21: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 65
Tablica 22: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 66

Tablica 23: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 67
Tablica 24: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 67
Tablica 25: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (podkritično, ΔTpp=10°C, N=3000) 68
Tablica 26: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000) 69
Tablica 27: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000) 70
Tablica 28: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 70
Tablica 29: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 71
Tablica 30: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000) 72
Tablica 31: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000) 73
Tablica 32: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 73
Tablica 33: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 74
Tablica 34: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000) 75
Tablica 35: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000) 76
Tablica 36: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq$3000) 76
Tablica 37: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq$3000) 77
Tablica 38: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 78
Tablica 39: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 79
Tablica 40: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 79
Tablica 41: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 80
Tablica 42: Rezultati optimiziranja W_{net} za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000) 81
Tablica 43: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000) 82
Tablica 44: Rezultati optimiziranja W_{net} za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq$3000) 82

Tablica 45: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000) 83
Tablica 46: Rezultati optimiziranja W_{net} za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 84
Tablica 47: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 85
Tablica 48: Rezultati optimiziranja W_{net} za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000) 85
Tablica 49: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 86
Tablica 50: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 87
Tablica 51: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta plant,ex$; R143a (podkritično, ΔTpp=5°C, N ≠3000) 88
Tablica 52: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 88
Tablica 53: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 89
Tablica 54: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 90
Tablica 55: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 91
Tablica 56: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000) 91
Tablica 57: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000) 92
Tablica 58: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000) 93
Tablica 59: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000) 94
Tablica 60: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 94
Tablica 61: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000) 95
Tablica 62: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 96
Tablica 63: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 97
Tablica 64: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 97
Tablica 65: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $Wnet$; R143a (podkritično, ΔTpp=10°C, N =3000) 98
Tablica 66: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 99

Tablica 67: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 100
Tablica 68: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 100
Tablica 69: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 101
Tablica 70: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 102
Tablica 71: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 103
Tablica 72: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 104
Tablica 73: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 105
Tablica 74: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 105
Tablica 75: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 106
Tablica 76: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 107
Tablica 77: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 108
Tablica 78: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 108
Tablica 79: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000) 109
Tablica 80: Rezultati optimiziranja W_{net} za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000) 110
Tablica 81: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 111
Tablica 82: Rezultati optimiziranja W_{net} za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 111
Tablica 83: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000) 112
Tablica 84: Rezultati optimiziranja W_{net} za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 113
Tablica 85: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 114
Tablica 86: Rezultati optimiziranja W_{net} za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000) 114
Tablica 87: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 115
Tablica 88: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000) 116

Tablica 89: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000) 117
Tablica 90: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 117
Tablica 91: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000) 118
Tablica 92: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 119
Tablica 93: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 120
Tablica 94: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 120
Tablica 95: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 121
Tablica 96: Rezultati optimiziranja W_{net} za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000) 122
Tablica 97: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000) 123
Tablica 98: Rezultati optimiziranja W_{net} za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000) 123
Tablica 99: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000) 124
Tablica 100: Rezultati optimiziranja W_{net} za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 125
Tablica 101: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 126
Tablica 102: Rezultati optimiziranja W_{net} za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 126
Tablica 103: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 127
Tablica 104: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 128
Tablica 105: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N ≠3000) 129
Tablica 106: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 129
Tablica 107: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000) 130
Tablica 108: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000) 131
Tablica 109: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 132
Tablica 110: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 132

Tablica 111: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 133
Tablica 112: Rezultati optimiziranja W_{net} za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000)..... 134
Tablica 113: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; Propilen (podkritično, ΔTpp=5°C, $N \neq$3000) 135
Tablica 114: Rezultati optimiziranja W_{net} za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq$3000) 135
Tablica 115: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq$3000) 136
Tablica 116: Rezultati optimiziranja W_{net} za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 137
Tablica 117: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000) 138
Tablica 118: Rezultati optimiziranja W_{net} za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)..... 138
Tablica 119: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000) 139

POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
A_1	m^2	površina ulaza u ulazni kanal
A_5	m^2	ulazna površina difuzora
A_6	m^2	izlazna površina difuzora
AR_d	-	omjer površina difuzora
b_2	m	visina statorske lopatice na ulazu
b_3	m	visina statorske lopatice na izlazu
b_4	m	visina lopatice na ulazu u rotor
b_5	m	visina rotorske lopatice na izlazu
b_t	m	visina lopatice na grlu rotora
C	m	duljina C
c_1	m/s	apsolutna brzina na ulazu u turbinu
c_{1novo}	m/s	nova vrijednost ulazne brzine
c_2	m/s	apsolutna brzina na ulazu u stator
c_3	m/s	apsolutna brzina na izlazu iz statora
c_4	m/s	apsolutna brzina na ulazu u rotor
c_5	m/s	apsolutna brzina na izlazu iz rotora
c_6	m/s	apsolutna brzina na izlazu iz difuzora
c_{6s}	m/s	apsolutna brzina na izlazu iz difuzora (izentropska promjena stanja)
C_a	s/m^2	aksijalni koeficijent
c_d	m	radijalna duljina (tetive) statorske lopatice
C_{diff}	-	stupanj korisnosti difuzora
c_{m2}	m/s	apsolutna meridijonalna brzina na ulazu u stator

c_{m3}	m/s	apsolutna meridijonalna brzina na izlazu iz statora
c_{n3}	m	duljina (tetive) statorske lopatice
c_{m4}	m/s	apsolutna meridijonalna brzina na ulazu u rotor
c_{m5}	m/s	apsolutna meridijonalna brzina na izlazu iz rotora
control	-	kontrolni omjer
C_r	s/m^2	radijalni koeficijent
c_{t2}	m/s	apsolutna tangencijalna brzina na ulazu u stator
c_{t3}	m/s	apsolutna tangencijalna brzina na izlazu iz statora
c_{t4}	m/s	apsolutna tangencijalna brzina na ulazu u rotor
$\bar{c}$	m/s	srednja brzina toka u rotoru
d	m	položaj maksimalne debljine statorske lopatice
d_4	m	promjer ulaza u rotor
D_h	m	hidraulički promjer rotora
e	-	eksponent
E	kPa	Youngov modul
f_{nozzle}	Hz	frekvencija pobude
h_{01}	kJ/kg	stagnacijska (totalna) entalpija na ulazu u turbinu
h_{02}	kJ/kg	stagnacijska entalpija na ulazu u stator
h_{03}	kJ/kg	stagnacijska entalpija na izlazu iz statora
h_{04}	kJ/kg	stagnacijska entalpija na ulazu u rotor
h_{05}	kJ/kg	stagnacijska (totalna) entalpija na izlazu iz rotora
h_{06}	kJ/kg	stagnacijska entalpija na izlazu iz difuzora
h_1	kJ/kg	entalpija na ulazu u turbinu
h_2	kJ/kg	entalpija na ulazu u stator

h_3	kJ/kg	entalpija na izlazu iz statora
h_{3ss}	kJ/kg	entalpija na izlazu iz statora (nadzvučno strujanje)
h_4	kJ/kg	entalpija na ulazu u rotor
h_5	kJ/kg	entalpija na izlazu iz rotora
$h_{5,id}$	kJ/kg	entropija na izlazu iz rotora (izentropska promjena stanja)
h_6	kJ/kg	entalpija na izlazu iz difuzora
h_{6s}	kJ/kg	entalpija na izlazu iz difuzora (izentropska promjena stanja)
Δh_{act}	kJ/kg	pad entalpije
Δh_{id}	kJ/kg	izentropski pad entalpije
Δh_i	kJ/kg	gubitak ulaznog kuta
Δh_p	kJ/kg	gubitak u rotorskim lopaticama
Δh_c	kJ/kg	gubitak zbog zazora
Δh_w	kJ/kg	gubitak trenja diska
Δh_{te}	kJ/kg	gubitak izlaznog ruba
Δh_e	kJ/kg	gubitak izlazne kinetičke energije
Δh_{losses}	kJ/kg	gubitak u rotoru
Δh_{st}	kJ/kg	gubitak u statorskim lopaticama
Δh_{vol}	kJ/kg	gubitak u ulaznom kanalu
$\Delta h_{loss,tot}$	kJ/kg	ukupni gubitak u turbini
i_n	°	upadni (zahvatni) kut statora
k_{b2}	-	faktor blokade toka na ulazu statora
k_{b3}	-	faktor blokade toka na izlazu iz statora
$k_{b3control}$	-	faktor blokade toka na izlazu iz statora
k_{b4}	-	fakor blokade toka na ulazu u rotor

k_{b5}	-	faktor blokade toka na izlazu iz rotora
k_f	-	torzijski koeficijent
K_{st}	-	koeficijent gubitka u statoru
L	m	duljina putanje toka fluida kroz stator
L_{dif}	m	duljina difuzora
L_h	m	hidraulička dužina rotora
M	g/mol	molarna masa radnog fluida
M_2	m/s	Machov broj na ulazu u stator
M_3	-	Machov broj na izlazu iz statora
$M_{4,rel}$	-	relativni Machov broj na ulazu u rotor
M_4	-	Machov broj na ulazu u rotor
$M_{5,rel}$	-	relativni Machov broj na izlazu iz rotora
M_5	-	Machov broj na izlazu iz rotora
$\dot{m}$	kg/s	maseni protok radnog fluida
N	min^{-1}	brzina vrtnje turbine
N_s	-	specifična brzina
$N_{s,act}$	-	stvarna specifična brzina
o_{n3}	m	širina grla mlaznica
o_t	m	širina grla rotora
os_3	-	omjer širine grla i koraka lopatice na izlazu
p_{01}	bar	stagnacijski (totalni) tlak na ulazu u turbinu
p_{04}	bar	stagnacijski tlak na ulazu u rotor
p_{05}	bar	stagnacijski tlak na izlazu iz rotora
p_1	bar	tlak na ulazu u turbinu
p_2	bar	tlak na ulazu u stator

p_3	bar	tlak na izlazu iz statora
p_4	bar	tlak na ulazu u rotor
p_5	bar	tlak na izlazu iz rotora
p_6	bar	tlak na izlazu iz difuzora
p_{6s}	bar	tlak na izlazu iz difuzora (izentropska promjena stanja)
p_{atm}	bar	tlak zraka
p_{cr}	bar	kritični tlak radnog fluida
p_{cond}	bar	tlak kondenzacije
p_{geo}	bar	tlak geotermalnog fluida
$\Delta p_{0,rel}$	bar	relativni gubitak tlaka
q_5	m	korak rotorskih lopatica na srednjem izlaznom polumjeru
r_1	m	ulazni polumjer turbine (ulaznog kanala)
r_{1novo}	m	nova vrijednost ulaznog polumjera
r_2	m	ulazni polumjer statora
r_3	m	izlazni polumjer statora
r_4	m	polumjer ulaza u rotor
r_5	m	polumjer izlaza iz rotora
r_{h5}	m	unutarnji polumjer izlaza iz rotora
r_{s5}	m	vanjski polumjer izlaza iz rotora
r_6	m	polumjer izlaza iz difuzora
r_t	m	polumjer grla rotora
r_{vol}	m	polumjer ulazne površine
Re	-	Reynoldsov broj
$\overline{Re}_{stat}$	-	prosječni Reynoldsov broj u statoru
s_{01}	kJ/(kgK)	stagnacijska (totalna) entropija na ulazu u turbinu

s_{03}	kJ/(kgK)	stagnacijska entropija na izlazu iz statora
s_{04}	kJ/(kgK)	stagnacijska entropija na ulazu u rotor
s_{05}	kJ/(kgK)	stagnacijska entropija na izlazu iz rotora
s_{06s}	kJ/(kgK)	stagnacijska entropija na izlazu (izentropska promjena stanja)
s_1	kJ/(kgK)	entropija na ulazu u turbinu
s_2	kJ/(kgK)	entropija na ulazu u stator
s_3	kJ/(kgK)	entropija na izlazu iz statora
s_4	kJ/(kgK)	entropija na ulazu u rotor
s_5	kJ/(kgK)	entropija na izlazu iz rotora
s_6	kJ/(kgK)	entropija na izlazu iz difuzora
s_{6s}	kJ/(kgK)	entropija na izlazu difuzora (izentropska promjena stanja)
$s_{5,id}$	kJ/(kgK)	entropija na izlazu iz rotora (izentropska promjena stanja)
SC	-	koeficijent vrtloženja
s_{n3}	m	korak lopatice na izlazu iz statora
SS_2	m/s	brzina zvuka na ulazu u stator
SS_3	m/s	brzina zvuka na izlazu iz statora
SS_4	m/s	brzina zvuka na ulazu u rotor
SS_5	m/s	brzina zvuka na izlazu iz rotora
t	m	debljina statorske lopatice
T_{01}	°C	stagnacijska (totalna) temperatura na ulazu u turbinu
T_1	°C	temperatura na ulazu u turbinu
T_2	°C	temperatura na ulazu u stator
T_3	°C	temperatura na izlazu iz statora
T_4	°C	temperatura na ulazu u rotor

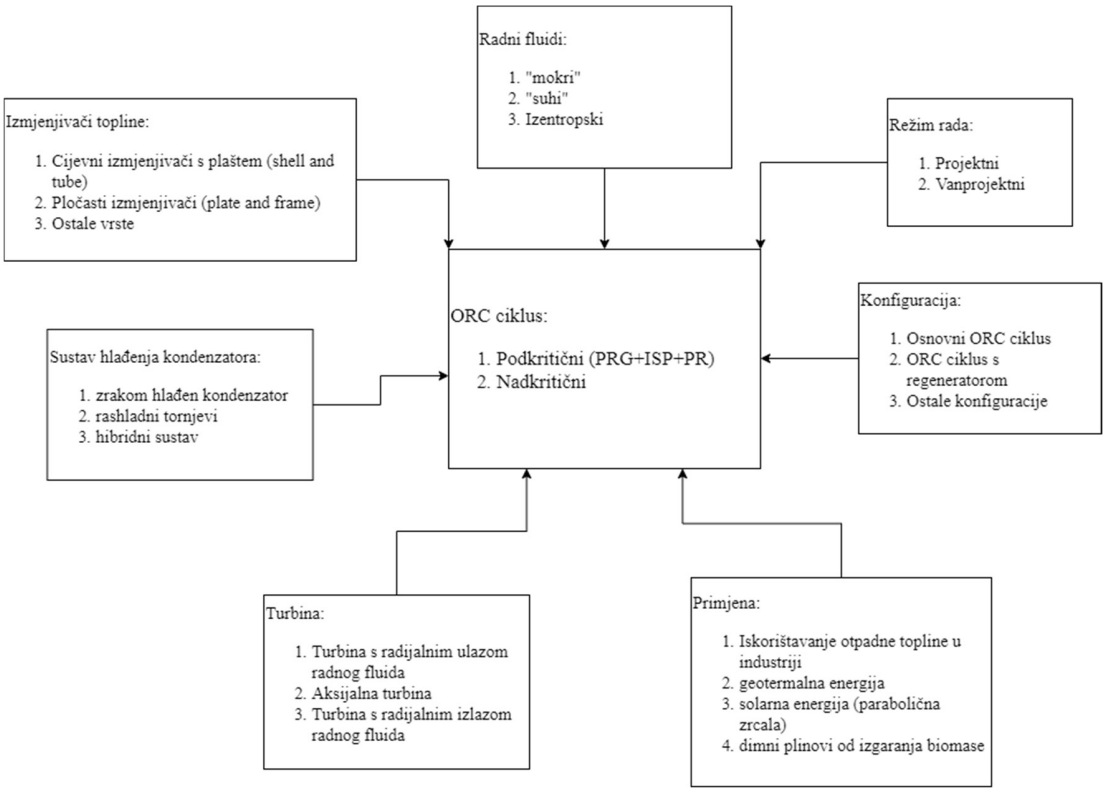
T_5	°C	stagnacijska temperatura na izlazu iz rotora
T_6	°C	temperatura na izlazu iz difuzora
t_{b2}	m	debljina ulaznog ruba statorske lopatice
t_{b3}	m	debljina izlaznog ruba statorske lopatice
t_{b4}	m	debljina ulaznog ruba lopatice
t_{b5}	m	debljina izlaznog ruba rotorske lopatice
$T_{air,in}$	°C	temperatura zraka
T_{cond}	°C	temperatura kondenzacije
T_{cr}	°C	kritična temperatura radnog fluida
$T_{geo,in}$	°C	temperatura geotermalnog fluida
t_{max}	m	maksimalna debljina statorske lopatice
t_{ref}	m	referentna debljina statorske lopatice
ΔT_{pp}	°C	minimalna temperaturna razlika između radnog i geofluida
ΔT_{SH}	°C	stupanj pregrijanja
ΔT_{cond}	°C	minimalna temperaturna razlika kondenzatora
u_4	m/s	obodna brzina na ulazu u rotor
u_5	m/s	obodna brzina na izlazu iz rotora
u_{s5}	m/s	obodna brzina na vanjskom izlaznom polumjeru
u_{h5}	m/s	obodna brzina na unutarnjem izlaznom polumjeru
v_2	m^3/kg	specifični volumen na ulazu u stator
v_3	m^3/kg	specifični volumen na izlazu iz statora
w_4	m/s	relativna brzina na ulazu u rotor
w_{t5}	m/s	relativna tangencijalna brzina na izlazu iz rotora
w_5	m/s	relativna brzina na izlazu iz rotora
w_t	m/s	relativna brzina toka na grlu rotora

w_{t4}	m/s	relativna tangencijalna brzina na ulazu u rotor
W_{out}	kW	snaga turbine
W	kW	snaga
W_{net}	kW	neto dobivena snaga postrojenja
y	m	y koordinata
Z	m	visina rotora
Z_r	-	broj rotorskih lopatica
Z_s	-	broj statorskih lopatica
α_4	°	apsolutni kut toka na ulazu u rotor
α_3	°	apsolutni kut toka na izlazu iz statora
α_{2a}	°	apsolutni kut toka na ulazu u stator s obzirom na tangencijalni smjer
α_2	°	apsolutni kut toka na ulazu statora
$\beta_{4,blade}$	°	kut lopatice na ulazu u rotor
β_4	°	relativni kut toka na ulazu u rotor
β_5	°	relativni kut toka na izlazu iz rotora
β_{s5}	°	relativni kut toka na vanjskom izlaznom polumjeru
β_{h5}	°	relativni kut toka na unutarnjem izlaznom polumjeru
$\beta_{5,blade}$	°	kut lopatice na izlazu iz rotora
$\beta_{s5,blade}$	°	kut lopatice na vanjskom izlaznom polumjeru
$\beta_{h5,blade}$	°	kut lopatice na unutarnjem izlaznom polumjeru
β_3	°	kut statorske lopatice na izlazu
β_2	°	kut statorske lopatice na izlazu
$\beta_{4,opt}$	°	optimalni ulazni kut toka
β_t	°	kut lopatice na grlu rotora

β	°	kut β
γ_3	°	kut središnje linije lopatice na izlazu
ε_a	m	aksijalni zazor
ε_b	m	bazni zazor
ε_r	m	radijalni zazor
ζ	-	geometrijski faktor
η_{ts}	-	stupanj korisnosti turbine
$\eta_{ts,tot}$	-	nova vrijednost stupnja korisnosti turbine
$\eta_{plant,ex}$	-	eksergetski stupanj korisnosti postrojenja
$\eta_{plant,en}$	-	energetski stupanj korisnosti postrojenja
θ_{dif}	°	kut divergencije difuzora
μ_4	kg/(ms)	viskoznost na ulazu u rotor
μ_5	kg/(ms)	viskoznost na izlazu iz rotora
$\bar{\mu}$	kg/(ms)	srednja viskoznost u rotoru
μ_2	kg/(ms)	viskoznost na ulazu u stator
μ_3	kg/(ms)	viskoznost na izlazu iz statora
ν	-	Poissonov faktor
ν_s	-	omjer brzina
ρ	kg/m^3	gustoća materijala rotora
ρ_{01}	kg/m^3	stagnacijska (totalna) gustoća fluida na ulazu u turbinu
ρ_{04}	kg/m^3	stagnacijska gustoća fluida na ulazu u rotor
ρ_{05}	kg/m^3	stagnacijska gustoća fluida na izlazu iz rotora
ρ_1	kg/m^3	gustoća fluida na ulazu u turbinu
ρ_2	kg/m^3	gustoća fluida na ulazu u stator

ρ_3	kg/m^3	gustoća fluida na izlazu iz statora
ρ_{3ss}	kg/m^3	gustoća fluida na izlazu iz statora (nadzvučno strujanje)
ρ_4	kg/m^3	gustoća fluida na ulazu u rotor
$\rho_{5,id}$	kg/m^3	gustoća fluida na izlazu iz rotora (izentropska promjena stanja)
ρ_5	kg/m^3	gustoća fluida na izlazu iz rotora
ρ_6	kg/m^3	gustoća fluida na izlazu iz difuzora
$\bar{\rho}$	kg/m^3	srednja gustoća fluida u rotoru
σ	-	krutost mlaznice
σ_r	kPa	elastično naprezanje rotorskih lopatica
$\sigma_{r,dop}$	kPa	dopušteno naprezanje
σ_γ	kPa	granica elastičnosti materijala rotora
ω	s^{-1}	kutna brzina
ω_{rotor}	Hz	prirodna frekvencija rotora

1. UVOD



Slika 1:Izvedbe ORC ciklusa i njegovih komponenti

Rankineov ciklus s organskim fluidom (ORC – Organic Rankine Cycle, u daljnjem tekstu ORC ciklus) radi istovjetno kao i ciklus parne turbine samo što se umjesto vodene pare koriste razni organski fluidi. Slika 1 prikazuje razne izvedbe ORC ciklusa i njegovih komponenti. Osnovni ciklusi mogu se podijeliti na one koji rade s podkritičnim tlakovim te na one koji rade s nadkritičnim tlakovima (do 80 bar). Kod ORC ciklusa koji rade s podkritičnim tlakovima toplina se radnom fluidu dovodi u predgrijaču , isparivaču te pregrijaču . Kod ORC ciklusa s nadkritičnim tlakom cjelokupni toplinski tok radnom fluidu se dovodi u jednom takozvanom visokotlačnom izmjenjivaču topline. Visokotlačni izmjenjivač topline kod nadkritičnog ciklusa, kao i predgrijač, isparivač te pregrijač kod podkritičnog ciklusa, najčešće se izvode kao cijevni izmjenjivači s plaštem dok se ponekad izvode kao pločasti izmjenjivači ili neke druge izvedbe (izmjena topline s zrakom ili dimnim plinovima).

Koristi se niz organskih radnih fluida koje karakteriziraju niski tlak i temperatura isparavanja te velika molekularna masa. Važne karakteristike su i kritični tlak te kritična temperatura. Prema izgledu linije zasićenja fluidi se dijele na „mokre“, „suhe“ i izentropske fluide.

ORC ciklusi, kako nadkritični tako i podkritični, izvode se u raznim konfiguracijama poput osnovnog ORC ciklusa te ORC ciklusa s regeneratorom.

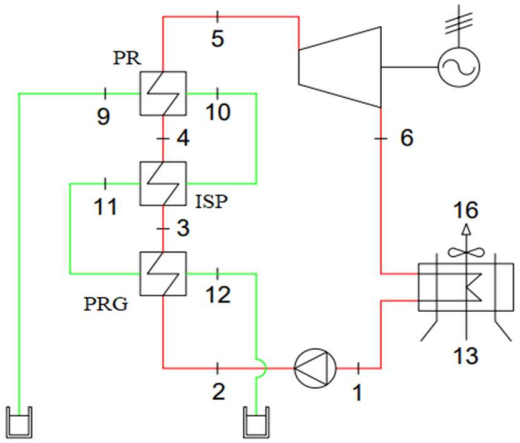
Sustav hlađenja kondenzatora se izvodi kao zrakom hlađen kondenzator, sustav sa rashladnim tornjevima ili hibridni sustav.

Najvažniji element (kod većih postrojenja) ORC postrojenja je turbina. Turbina se izvodi kao turbina s radijalnim ulazom radnog fluida, aksijalna turbina ili turbina s radijalnim izlazom radnog fluida.

Zbog karakteristika organskog radnog fluida ORC ciklus je prikladan za iskorištavanje izvora topline nižih temperatura. Najčešće se primjenjuje za iskorištavanje otpadne topline u industriji, iskorištavanje geotermalne energije, iskorištavanje solarne energije (solarni kolektori s paraboličnim zrcalima), te iskorištavanje energije dimnih plinova od izgaranja biomase.

Uobičajeno je da se prvo izvodi proračun ORC postrojenja u projektnom (nominalnom) režimu rada te se određuju bitne karakteristike postrojenja te dimenzije komponenti. Nakon toga se provodi i analiza za vanprojektni režim rada.

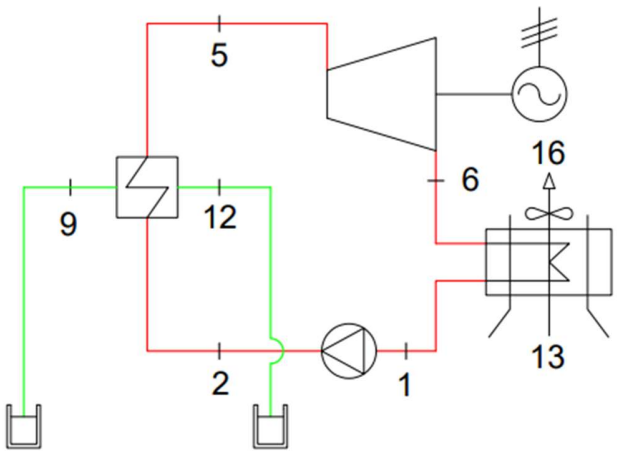
U ovom radu proračun i analiza provodi se samo za osnovni ORC ciklus s turbinom s radijalnim ulazom radnog fluida kao ekspanzijskim strojem i geotermalnim fluidom kao izvorom topline.



Slika 2:Shema geotermalne elektrane sa jednostavnim podkritičnim ORC ciklusom

Slika 2 prikazuje shemu geotermalne elektrane izvedene kao jednostavni ORC ciklus s podkritičnim tlakom i zrakom hlađenim kondenzatorom. Pothlađena kapljevina stanja 1 se pomoću pumpe tlači do tlaka isparavanja (stanje 2). U predgrijaču (PRG) pothlađena kapljevina stanja 2 se dovodi do stanja vrele kapljevine (stanje 3). Zatim se u isparivaču (ISP) dovodi do stanja suhozasićene pare (stanje 4). U pregrijaču (PR) se daljnjim dovođenjem topline radni fluid dovodi u stanje pregrijane pare (stanje 5) s kojim ulazi u turbinu. Cjelokupni toplinski tok u predgrijaču, isparivaču te pregrijaču radnom fluidu predaje geotermalni fluid (voda). Prilikom te izmjene topline geotermalni fluid prolazi kroz stanja od 9 do 12 kako je označeno na slici 2. U turbini para ekspandira do tlaka kondenzacije (stanje 6) prilikom čega se dobije koristan rad. Nakon ekspanzije u turbini, u kondenzatoru para kondenzira do stanja 1, prilikom čega se toplinski tok predaje zraku koji ulazi u kondenzator sa stanjem 13, a izlazi sa stanjem 16.

Slika 3 prikazuje osnovni ORC ciklus sa nadkritičnim tlakom. Ova izvedba ORC ciklusa radi istovjetno kao i izvedba s podkritičnim tlakom samo što se cjelokupna izmjena topline između geotermalnog fluida i radnog fluida odvija u jednom visokotlačnom izmjenjivaču topline.



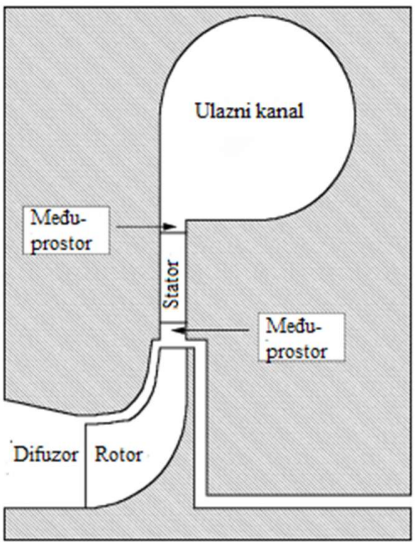
Slika 3: Osnovni ORC ciklus s nadkritičnim tlakom

2. TEORETSKE OSNOVE

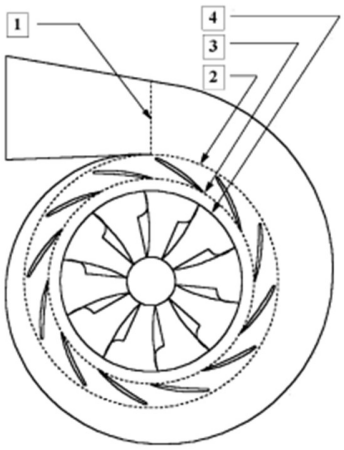
2.1. Osnovna konstrukcija turbine s radijalnim ulazom radnog fluida

Turbina s radijalnim ulazom radnog fluida (u daljnjem tekstu radijalna turbina) je alternativa aksijalnoj turbini kao ekspanzijskom stroju u ORC ciklusu. U radijalnoj turbini radni fluid ulazi u rotor usmjeren radijalno u odnosu na os rotora.

Radijalna turbina se sastoji od 4 dijela (slika 4, slika 5). To su: ulazni kanal spiralnog oblika, stator (mlaznice), rotor i difuzor. Između ulaznog kanala te između statora i rotora postavlja se međuprostor koji omogućava kvalitetno miješanje fluida prije ulaska u statorske, odnosno rotorske lopatice.

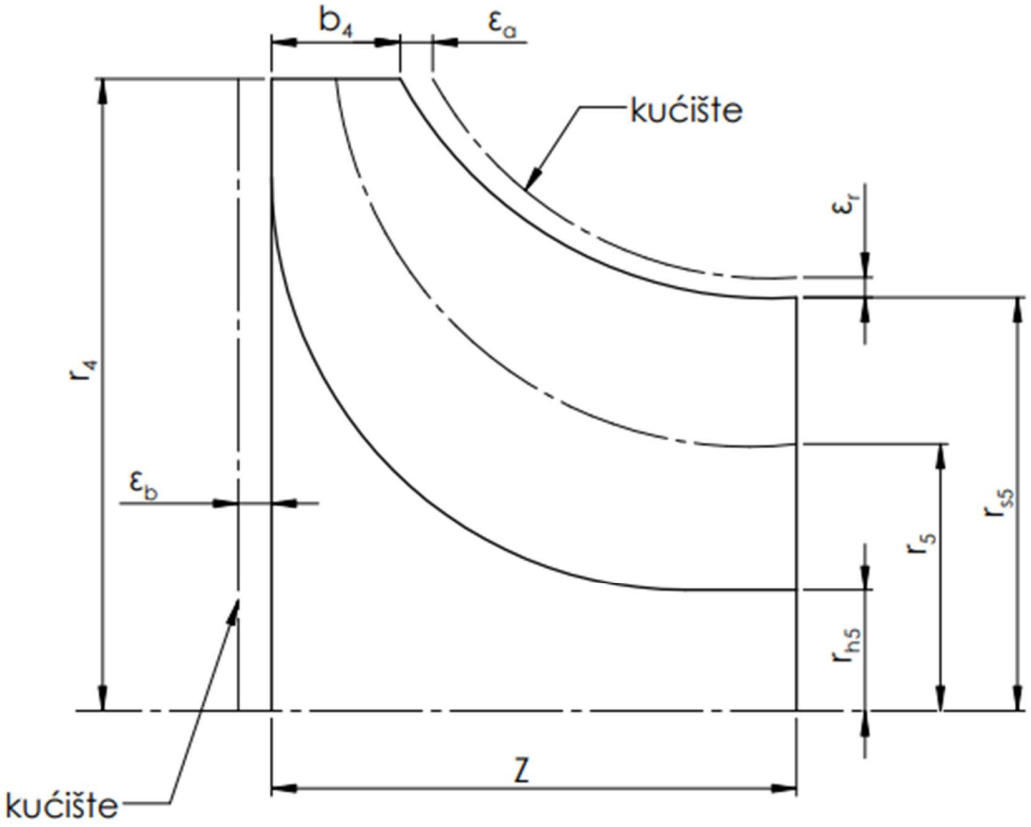


Slika 4: Presjek radijalne turbine [1]



Slika 5: Radijalna turbina [1]

Na slici 5 su označeni ulaz u turbinu (1), ulaz u mlaznice (2), izlaz iz mlaznice (3) te ulaz u rotor (4). Osnovna namjena ulaznog kanala je jednolika raspodjela radnog fluida po obodu (ulazu) statora. Prilikom prolaska kroz statorske lopatice radni fluid se ubrzava do potrebne brzine. Zatim se ekspanzijom u rotoru kinetička energija fluida pretvara u rad.

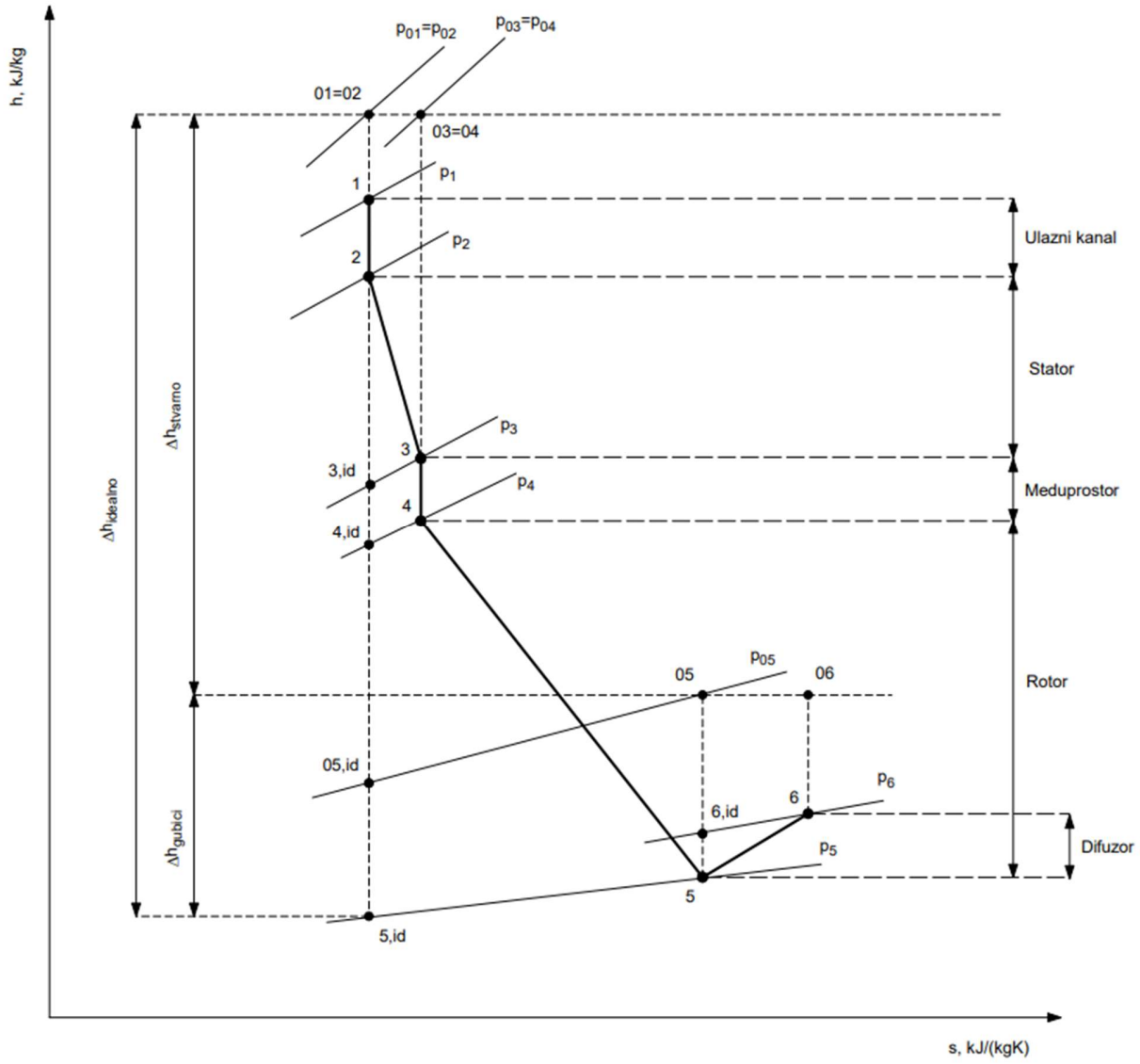


Slika 6: Meridijonalni presjek rotora

Na slici 6 prikazan je meridijonalni presjek rotora na kojemu su označene bitne geometrijske veličine. Ulazni polumjer rotora je r_4. Na izlazu iz rotora definirani su naredne veličine: izlazni polumjer r_5, unutarnji polumjer r_{h5}, te vanjski polumjer r_{s5}. Visina rotora označena je sa Z. Rotor se sastoji od lopatica ulazne visine b_4, dok je izlazna visina b_5 dobivena izrazom: $b_5 = r_{s5} - r_{h5}$. Između rotora i kućišta se nalaze zazori, a to su: aksijalni zazor ε_a, radijalni zazor ε_r te bazni zazor ε_b.

Ako je kinetička energija fluida na izlazu iz rotora značajnog iznosa dio energije se može povratiti primjenom difuzora. Promjene stanja radnog fluida prilikom ekspanzije kroz turbinu prikazane su h-s dijagramom na slici 7.

Sastavni dio proračuna su stagnacijske veličine stanja. Oznake stagnacijskih stanja radnog fluida na h-s dijagramu počinju „nulom“.

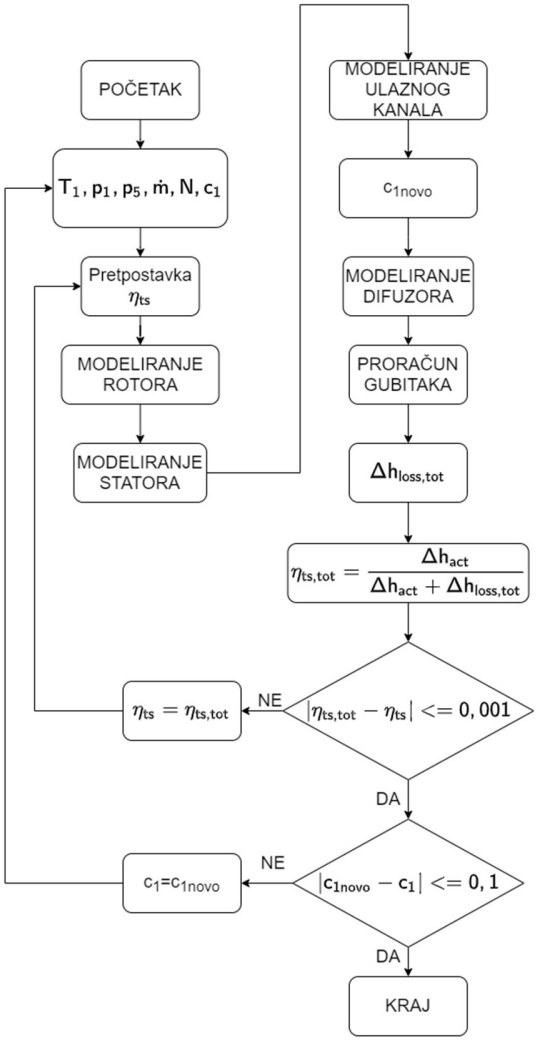


Slika 7: h-s dijagram ekspanzije u turbini

2.2. Matematički model preliminarnog proračuna radijalne turbine

Preliminarnim proračunom se određuju geometrijske i pogonske veličine radijalne turbine. Preliminarni proračun ne može potpuno opisati ponašanje fluida prilikom toka kroz turbinu stoga se na temelju preliminarnih rezultata provodi CFD (Computational Fluid Dynamics) analiza. Na temelju rezultata CFD analize geometrijske veličine se podešavaju u svrhu poboljšanja učinkovitosti turbine. U ovom radu provodi se samo preliminarni proračun.

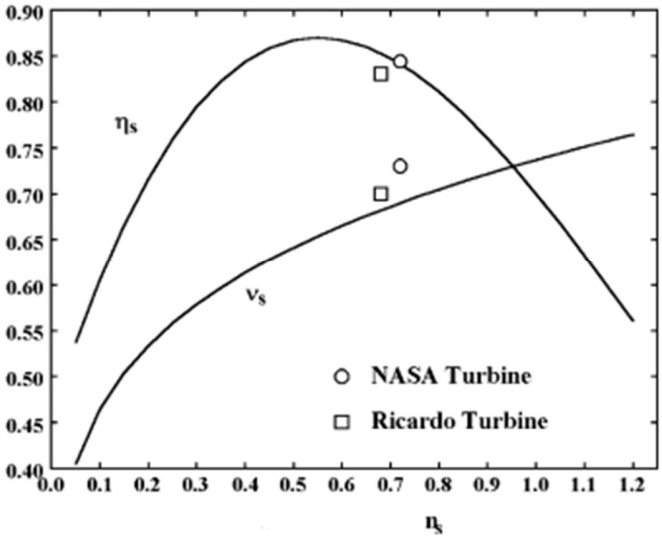
Ulazni podaci proračuna su sljedeći: temperatura na ulazu u turbinu (T_1, °C), tlak na ulazu u turbinu (p_1, bar), tlak na izlazu iz rotora (p_5, bar), maseni protok radnog fluida ($\dot{m}$, kg/s), brzina vrtnje turbine (N, min^{-1}), apsolutna brzina na ulazu u turbinu (c_1, m/s). Iznos ulazne brzine radnog fluida c_1 je pretpostavka, a algoritam iteracijom izračuna točnu vrijednost. Pojednostavljena shema algoritma prikazana je na slici 8. Detalji proračuna opisani su u daljnjem tekstu.



Slika 8: Shema preliminarnog proračuna turbine

2.2.1. Matematički model rotora

Proračun počinje definiranjem termodinamičkih svojstava i veličina stanja na ulazu u turbinu i izlazu iz rotora. U proračunu se koriste bezdimenzijski parametri opisani u stručnoj literaturi [1], [2]: specifična brzina N_s, omjer brzina ν_s i stupanj korisnosti turbine od totalne do statičke veličine stanja η_{ts} (na engleskom: „total-to-static efficiency“). Stupanj korisnosti η_{ts} uzima u obzir pad entalpije od stagnacijskog stanja 01 do statičke veličine stanja 5.



Slika 9:Korelacije vrijednosti omjera brzina ν_s, stupnja korisnosti η_{ts} i specifične brzine N_s

Aungier [1] je razvio korelacije između omjera brzina ν_s, stupnja korisnosti η_{ts} i specifične brzine N_s (Slika 9). Te korelacije definirane su jednadžbama (2-16) i (2-17). Za pojedine turbine i specifične brzine može se dogoditi da jednadžba (2-16) neće dati optimalne vrijednosti. U tom slučaju [3] predlaže izabrati vrijednost ν_s između 0,6 i 0,7, što je optimalno područje prikazano na slici 9.

Stupanj korisnosti dan izrazom (2-17) je polazna vrijednost kojom započinje iteracija. Stvarne veličine stanja na izlazu iz rotora u ovoj fazi proračuna još nisu poznate, stoga se pretpostavlja izentropska ekspanzija u rotoru. U daljnjem tekstu dan je algoritam proračuna rotora radijalne turbine:

$h_1 = \mathrm{f}(p_1, T_1)$ entalpija na ulazu u turbinu (2-1)

$s_1 = \mathrm{f}(p_1, T_1)$ entropija na ulazu u turbinu (2-2)

$\rho_1 = \mathrm{f}(p_1, T_1)$ gustoća na ulazu u turbinu (2-3)

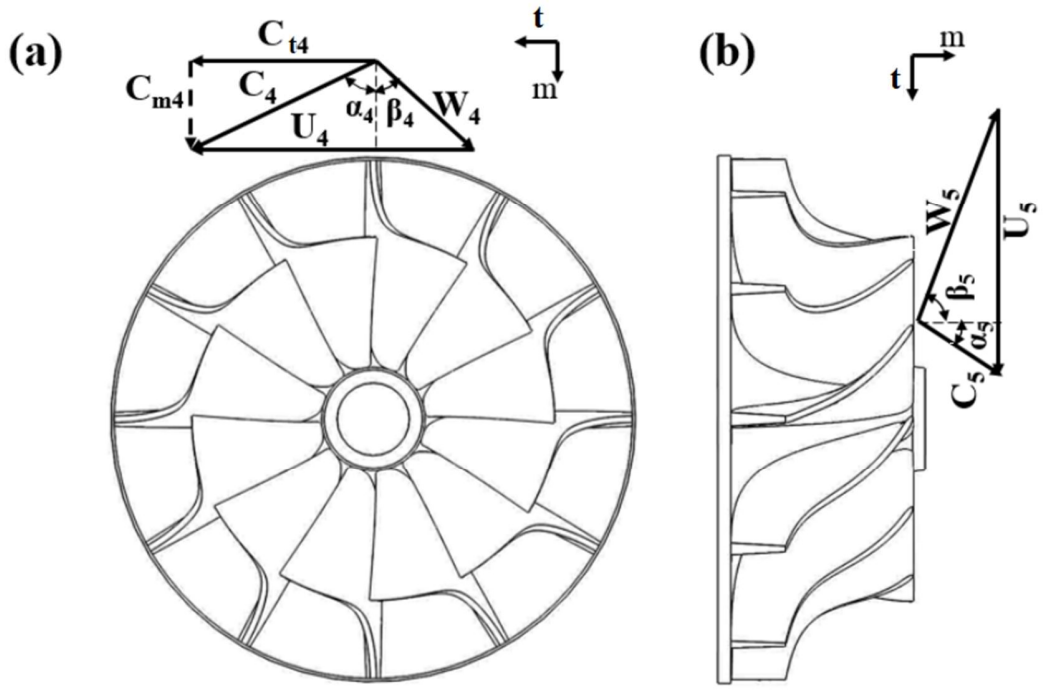
$s_{01} = s_1$ stagnacijska (totalna) entropija na ulazu u turbinu (2-4)

$h_{01} = h_1 + \frac{C_1^2}{2}$	stagnacijska (totalna) entropija na ulazu u turbinu	(2-5)
$p_{01} = f(h_{01}, s_{01})$	stagnacijski (totalni) tlak na ulazu u turbinu	(2-6)
$T_{01} = f(h_{01}, s_{01})$	stagnacijska (totalna) temperatura na ulazu u turbinu	(2-7)
$\rho_{01} = f(h_{01}, s_{01})$	stagnacijska (totalna) gustoća na ulazu u turbinu	(2-8)
$s_{5,id} = s_{01}$	entropija na izlazu iz rotora (pretpostavka)	(2-9)
$h_{5,id} = f(p_5, s_{5,id})$	entropija na izlazu iz rotora (pretpostavka)	(2-10)
$\rho_{5,id} = f(p_5, s_{5,id})$	gustoća na izlazu iz rotora (pretpostavka)	(2-11)
$\Delta h_{id} = h_{01} - h_5$	izentropski pad entalpije	(2-12)
$\omega = (2 \cdot \pi \cdot N)/60$	kutna brzina	(2-13)
$\rho_{05} = \rho_{5,id}$	stagnacijska gustoća na izlazu iz rotora (pretpostavka)	(2-14)
$N_s = \omega \cdot \frac{\left(\frac{\dot{m}}{\rho_{05}}\right)^{0,5}}{(\Delta h_{id})^{0,75}}$	specifična brzina [2]	(2-15)
$\nu_s = 0{,}737 N_s^{0.2}$	omjer brzina [1]	(2-16)
$\eta_{ts} = 0{,}87 - 1{,}07(N_s - 0{,}55)^2 - 0{,}5(N_s - 0{,}55)^3$	stupanj korisnosti [1]	(2-17)
$h_{05} = h_{01} - \eta_{ts} \cdot \Delta h_{id}$	stagnacijska (totalna) entalpija na izlazu iz rotora	(2-18)
$\Delta h_{act} = \eta_{ts} \cdot \Delta h_{id}$	pad entalpije	(2-19)
$W_{out} = \dot{m} \cdot \Delta h_{act}$	snaga turbine	(2-20)

1.1.1.1. Modeliranje ulaza u rotor

Bitan element proračuna su trokuti brzina (slika 10). Trokut brzina definiraju obodna brzina *u*, apsolutna brzina *c*, relativna brzina *w* te njihove tangencijalne i meridijonalne komponente (indeksi t i m). Apsolutni kut toka α i relativni kut toka β mjereni su od meridijonalnog (radijalnog) smjera do pripadajuće brzine. Ukoliko je tangencijalna komponenta brzine usmjerena u istom smjeru kao i obodna brzina pripadajući kut je pozitivan, u suprotnom je negativan. Korištenjem izraza navedenih u stručnoj literaturi [1] i trigonometrijskih odnosa moguće je potpuno definirati trokut brzina i

geometrijske parametre na ulazu u rotor te termodinamičke veličine. Broj rotorskih lopatica je određen prema izrazu (2-32) iz stručne literature [5]. Izraz (2-24) prilagođen je iz [1] zbog drugačijeg definiranja kutova u trokutu brzina. Pretpostavka je da su lopatice na ulazu u rotor su usmjerene radijalno stoga je kut lopatice $\beta_{4,blade}$ jednak nuli.



Slika 10:Trokut brzina na ulazu (a) i izlazu (b) iz rotora [4]

U nastavku je dan algoritam za modeliranje ulaza u rotor:

$\beta_{4,blade} = 0°$	kut lopatice na ulazu u rotor	(2-21)
$u_4 = \nu_s \cdot (2 \cdot \Delta h_{id})^{0,5}$	obodna brzina na ulazu u rotor [1]	(2-22)
$c_{t4} = u_4 \cdot \frac{\eta_{ts}}{2 \cdot \nu_s^2}$	apsolutna tangencijalna brzina na ulazu u rotor [1]	(2-23)
$\alpha_4 = 90 - (10{,}8 + 14{,}2 N_s^2)$	apsolutni kut toka na ulazu u rotor [1]	(2-24)
$N_{s,act} = \omega \cdot \frac{\left(\frac{\dot{m}}{\rho_{05}}\right)^{0,5}}{(\Delta h_{act})^{0,75}}$	stvarna specifična brzina	(2-25)
$r_4 = u_4/\omega$	polumjer ulaza u rotor	(2-26)

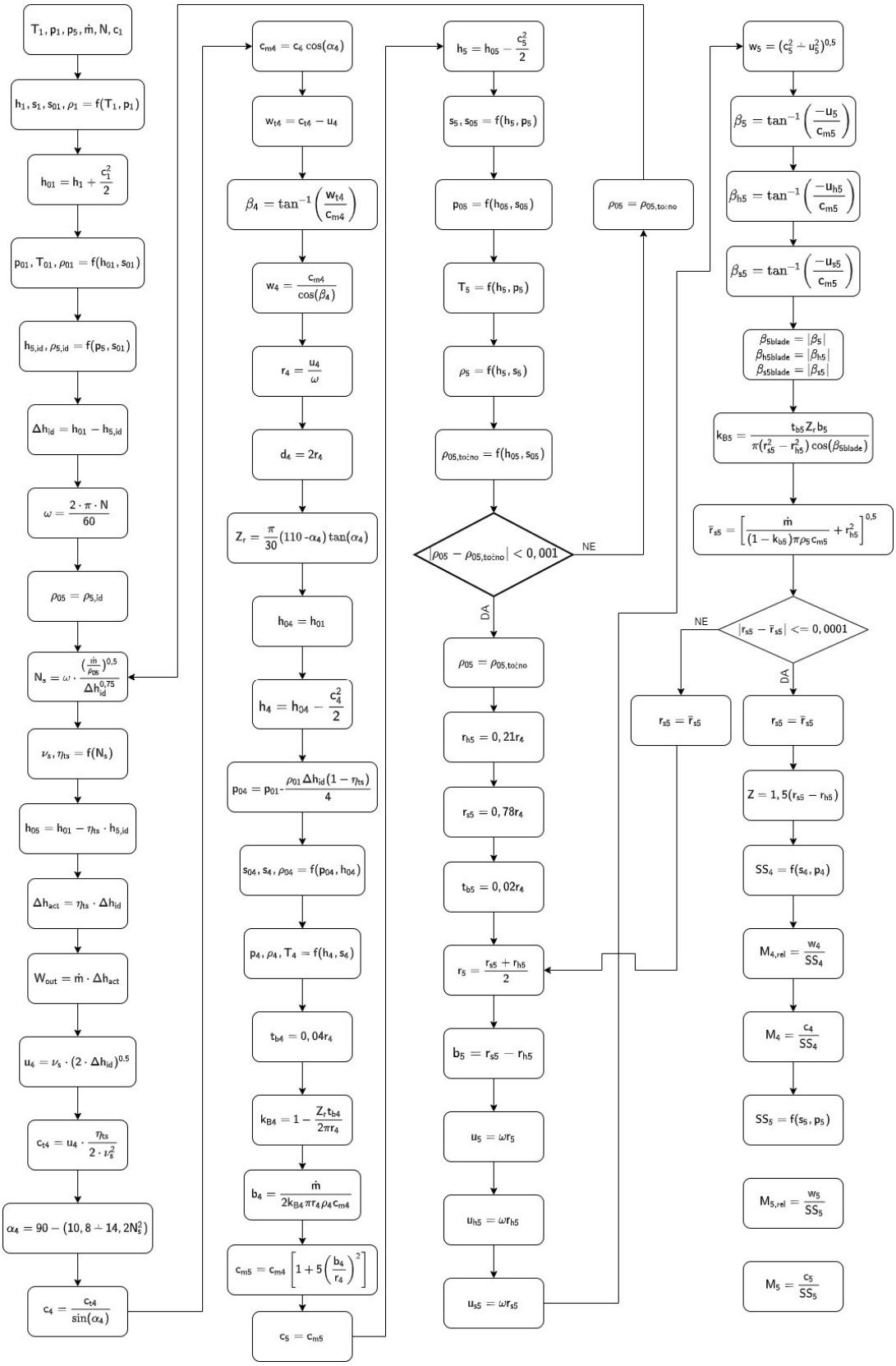
$d_4 = 2r_4$	promjer ulaza u rotor	(2-27)
$c_4 = \frac{c_{t4}}{\sin \propto_4}$	apsolutna brzina na ulazu u rotor	(2-28)
$c_{m4} = c_4 \cos \propto_4$	apsolutna meridijonalna brzina na ulazu u rotor	(2-29)
$w_{t4} = c_{t4} - u_4$	relativna tangencijalna brzina na ulazu u rotor	(2-30)
$\beta_4 = \tan^{-1}\left(\frac{w_{t4}}{c_{m4}}\right)$	relativni kut toka na ulazu u rotor	(2-31)
$w_4 = \sqrt{w_{t4}^2 + c_{m4}^2}$	relativna brzina na ulazu u rotor	(2-32)
$Z_r = \frac{\pi}{30}(110 - \propto_4) \tan \propto_4$	broj rotorskih lopatica [4]	(2-33)
$h_{04} = h_{01}$	stagnacijska entalpija na ulazu u rotor	(2-34)
$h_4 = h_{04} - \frac{C_4^2}{2}$	entalpija na ulazu u rotor	(2-35)
$p_{04} = p_{01} - \frac{\rho_{01}\Delta h_{id}(1-\eta_{ts})}{4}$	stagnacijski tlak na ulazu u rotor [1]	(2-36)
$s_{04} = \mathrm{f}(p_{04}, h_{04})$	stagnacijska entropija na ulazu u rotor	(2-37)
$\rho_{04} = \mathrm{f}(p_{04}, h_{04})$	stagnacijska gustoća na ulazu u rotor	(2-38)
$s_4 = s_{04}$	entropija na ulazu u rotor	(2-39)
$p_4 = \mathrm{f}(h_4, s_4)$	tlak na ulazu u rotor	(2-40)
$\rho_4 = \mathrm{f}(h_4, s_4)$	gustoća na ulazu u rotor	(2-41)
$T_4 = \mathrm{f}(h_4, s_4)$	temperatura na ulazu u rotor	(2-42)
$t_{b4} = 0{,}04r_4$	debljina ulaznog ruba lopatice [1]	(2-43)
$k_{B4} = 1 - \frac{Z_r t_{b4}}{2\pi r_4}$	faktor blokade toka na ulazu u rotor [1]	(2-44)
$b_4 = \frac{\dot{m}}{2k_{B4}\pi r_4 \rho_4 c_{m4}}$	visina lopatice na ulazu u rotor	(2-45)

1.1.1.2. Modeliranje izlaza iz rotora

Uz pretpostavku da nema vrtloženja na izlazu iz rotora (c_{t5} = 0; α_5=0), sličnim postupkom kao i za ulaz u rotor, definiraju se trokuti brzina, geometrija te termodinamička svojstva na izlazu iz rotora. Budući da je vrijednost gustoće ρ_{05} u jednadžbi (2-14) pretpostavka, provodi se iteracija jednadžbi (2-14)-(2-54) do konvergencije na odgovarajuću vrijednost. Veličine u jednadžbama (2-55)-(2-72) dobivene su iteracijom, a za polaznu vrijednost r_{s5} u (2-55) izabrana je najveća dopuštena, koja je predložena u stručnoj literaturi [6]. Za varijable r_{h5} i t_{b5} korišteni su iznosi predloženi u stručnoj literaturi [1]. Nakon definiranja geometrije i trokuta brzina na izlazu iz rotora određuje se visina rotora prema (2-73). Zatim se izračunavaju i Machovi brojevi na ulazi i izlazu iz rotora kako bi se provjerilo dolazi li do nadzvučnog strujanja fluida. Shema algoritma za modeliranje rotora je prikazana na slici 11. Algoritam za modeliranje izlaza iz rotora dan je u daljnjem tekstu:

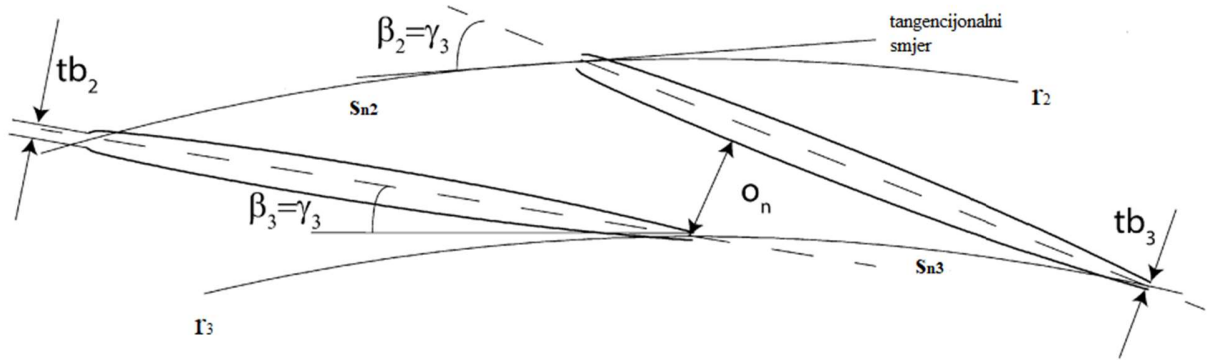
$c_{m5} = c_{m4}\left[1 + 5\left(\frac{b_4}{r_4}\right)^2\right]$	apsolutna meridijonalna brzina na izlazu iz rotora [1]	(2-46)
$c_5 = c_{m5}$	apsolutna brzina na izlazu iz rotora	(2-47)
$h_5 = h_{05} - \frac{c_5^2}{2}$	entalpija na izlazu iz rotora	(2-48)
$s_5 = \mathrm{f}(h_5, p_5)$	entropija na izlazu iz rotora	(2-49)
$s_{05} = s_5$	stagnacijska entropija na izlazu iz rotora	(2-50)
$p_{05} = \mathrm{f}(h_{05}, s_{05})$	stagnacijski tlak na izlazu iz rotora	(2-51)
$T_5 = \mathrm{f}(h_5, p_5)$	stagnacijska temperatura na izlazu iz rotora	(2-52)
$\rho_{05} = \mathrm{f}(h_{05}, s_{05})$	stagnacijska gustoća na izlazu iz rotora	(2-53)
$\rho_5 = \mathrm{f}(h_5, s_5)$	gustoća na izlazu iz rotora	(2-54)
$r_{h5} = 0{,}185 r_4$	unutarnji polumjer izlaza iz rotora [1]	(2-55)
$r_{s5} = 0{,}78 r_4$	vanjski polumjer izlaza iz rotora [6]	(2-56)
$t_{b5} = 0{,}02 r_4$	debljina izlaznog ruba rotorske lopatice [1]	(2-57)
$r_5 = \frac{r_{s5} + r_{h5}}{2}$	polumjer izlaza iz rotora	(2-58)
$b_5 = r_{s5} - r_{h5}$	visina rotorske lopatice na izlazu	(2-59)

$u_5 = \omega r_5$	obodna brzina na izlazu iz rotora	(2-60)
$u_{s5} = \omega r_{s5}$	obodna brzina na vanjskom izlaznom polumjeru	(2-61)
$u_{h5} = \omega r_{h5}$	obodna brzina na unutarnjem izlaznom polumjeru	(2-62)
$w_{t5} = -u_5$	relativna tangencijalna brzina na izlazu iz rotora	(2-63)
$w_5 = (c_5^2 + u_5^2)^{0,5}$	relativna brzina na izlazu iz rotora	(2-64)
$\beta_5 = \tan^{-1}\left(\frac{-u_5}{c_{m5}}\right)$	relativni kut toka na izlazu iz rotora	(2-65)
$\beta_{s5} = \tan^{-1}\left(\frac{-u_{s5}}{c_{m5}}\right)$	relativni kut toka na vanjskom izlaznom polumjeru	(2-66)
$\beta_{h5} = \tan^{-1}\left(\frac{-u_{h5}}{c_{m5}}\right)$	relativni kut toka na unutarnjem izlaznom polumjeru	(2-67)
$\beta_{5,blade} = \lvert\beta_5\rvert$	kut lopatice na izlazu iz rotora	(2-68)
$\beta_{s5,blade} = \lvert\beta_{s5}\rvert$	kut lopatice na vanjskom izlaznom polumjeru	(2-69)
$\beta_{h5,blade} = \lvert\beta_{h5}\rvert$	kut lopatice na unutarnjem izlaznom polumjeru	(2-70)
$k_{B5} = 1 - \frac{t_{b5} Z_r b_5}{\pi(r_{s5}^2 - r_{h5}^2)\cos(\beta_{5,blade})}$	faktor blokade toka na izlazu iz rotora	(2-71)
$r_{s5} = \left[\frac{\dot{m}}{k_{B5}\pi\rho_5 c_{m5}} + r_{h5}^2\right]^{0,5}$	vanjski izlazni polumjer rotora	(2-72)
$Z = 1{,}5(r_{s5} - r_{h5})$	visina rotora [1]	(2-73)
$SS_4 = \mathrm{f}(s_4, p_4)$	brzina zvuka na ulazu u rotor	(2-74)
$M_{4,rel} = w_4/SS_4$	relativni Machov broj na ulazu u rotor	(2-75)
$M_4 = c_4/SS_4$	Machov broj na ulazu u rotor	(2-76)
$SS_5 = \mathrm{f}(s_5, p_5)$	brzina zvuka na izlazu iz rotora	(2-77)
$M_{5,rel} = w_5/SS_5$	relativni Machov broj na izlazu iz rotora	(2-78)
$M_5 = c_5/SS_5$	Machov broj na izlazu iz rotora	(2-79)



Slika 11:Shema algoritma za modeliranje rotora

2.2.2. Matematički model statora (mlaznica)



Slika 12: Statorske lopatice [7]

Slika 12 prikazuje statorske lopatice. Pretpostavljeno je da je statorska lopatica izvedena sa ravnom središnjom linijom. Polumjer ulaza u stator je označen sa r_2, a izlaza sa r_3. Širina grla označena je sa o_n. Debljine ulaznog i izlaznog ruba statorske lopatice označeni su sa t_{b2} i t_{b3}. Kut središnje linije statorske lopatice u ovom slučaju je isti i na ulazu i izlazu i označen je sa γ_3. Vrijednost kuta γ odgovara vrijednosti kuta statorske lopatice β. Prilikom modeliranja statorske lopatice kutovi β i γ mjereni su od tangencijalnog smjera. Korak statorskih lopatica s_n, definiran je kao duljina kružnog luka između vrha dviju lopatica na ulaznom ili izlaznom polumjeru.

Prema stručnoj literaturi [8], između izlaza iz statora i ulaza u rotor mora se postaviti međuprostor koji omogućuje kvalitetno miješanje fluida prije ulaska u rotor. Visina tog prolaza je postavljena na visinu rotorske lopatice na ulazu, što je ujedno i visina statorske lopatice. U stručnoj literaturi [9] je predložena potrebna duljina prolaza između izlaza iz mlaznice i ulaza u rotor iz čega se dobije iznos r_3. Kako je navedeno u stručnoj literaturi [10], za računanje tangencijalne komponente brzine primjenjuje se zakon o očuvanju kutne količine gibanja izražen prema (2-83). Definiranje termodinamičkih veličina i trokuta brzine na izlazu iz mlaznice polazi od pretpostavke iznosa gustoće ρ_3 (2-84) i k_{b3} (2-85). Stoga se provodi iteracija jednadžbi (2-86) – (2-127) do konvergencije na točnu vrijednost gustoće ρ_3. Ako ne dolazi do pojave nadzvučnog strujanja fluida (M_3<1) os_3 se računa prema (2-100). Ukoliko dolazi do nadzvučnog strujanja ($M_3 \geq 1$) os_3 se računa prema (2-105) uz prethodno definiranje termodinamičkih veličina za stanje nadzvučnog strujanja (2-101) – (2-104). U daljnjem tekstu dani su izrazi kojima se definiraju bitne veličine na izlazu iz statora:

$b_3 = b_4$ visina statorske lopatice na izlazu (2-80)

$b_2 = b_3$ visina statorske lopatice na ulazu (2-81)

$r_3 = 2b_3\cos(\alpha_4) + r_4$ izlazni polumjer statora [9] (2-82)

$c_{t3} = c_{t4}\frac{r_4}{r_3}$ apsolutna tangencijalna brzina na izlazu iz statora [10] (2-83)

$\rho_3 = f(h_{01}, s_{01})$ gustoća na izlazu iz statora (pretpostavka) (2-84)

$k_{b3} = 1$ faktor blokade toka na izlazu iz statora (pretpostavka) (2-85)

$c_{m3} = \frac{\dot{m}}{2k_{b3}\pi r_3 \rho_3 b_3}$ apsolutna meridijonalna brzina na izlazu iz statora (pretpostavka) (2-86)

$c_3 = (c_{m3}^2 + c_{t3}^2)^{0,5}$ apsolutna brzina na izlazu iz statora (2-87)

$h_{03} = h_{01}$ stagnacijska entalpija na izlazu iz statora (2-88)

$h_3 = h_{03} - \frac{c_3^2}{2}$ entalpija na izlazu iz statora (2-89)

$s_3 = s_4$ entropija na izlazu iz statora (2-90)

$\rho_3 = f(h_3, s_3)$ gustoća na izlazu iz statora (2-91)

$c_{m3} = (c_3^2 + c_{t3}^2)^{0,5}$ apsolutna meridijonalna brzina na izlazu iz statora (2-92)

$\propto_3 = \tan^{-1}\left(\frac{c_{t3}}{c_{m3}}\right)$ apsolutni kut toka na izlazu iz statora (2-93)

$v_3 = 1/\rho_3$ specifični volumen na izlazu iz statora (2-94)

$Z_s \approx 1{,}3Z_r$ broj statorskih lopatica [11] (2-95)

$T_3 = f(h_3, v_3)$ temperatura na izlazu iz statora (2-96)

$p_3 = f(h_3, v_3)$ tlak na izlazu iz statora (2-97)

$SS_3 = f(T_3, h_3)$ brzina zvuka na izlazu iz statora (2-98)

$M_3 = c_3/SS_3$ Machov broj na izlazu iz statora (2-99)

$os_3 = \cos(\alpha_3)$ omjer širine grla i koraka lopatice na izlazu [1] (2-100)

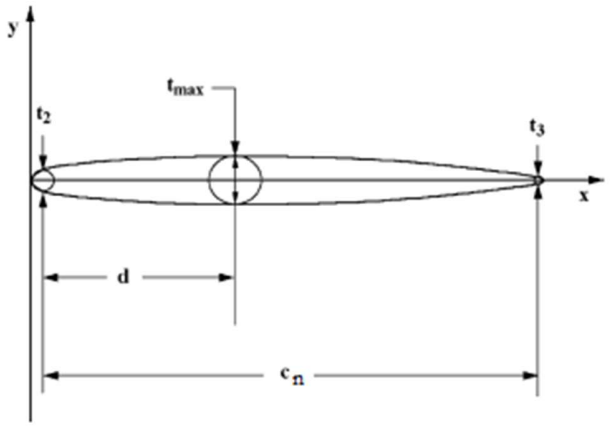
$h_{03} = h_{04}$ stagnacijska entalpija na izlazu iz statora (2-101)

$h_{3ss} = h_{03} - \frac{SS_3^2}{2}$ entalpija na izlazu iz statora (nadzvučno strujanje) (2-102)

$s_3 = s_4$ stagnacijska entropija na izlazu iz statora (2-103)

$\rho_{3ss} = f(h_{3ss}, s_3)$	gustoća na izlazu iz statora (nadzvučno strujanje)	(2-104)
$os_3 = \frac{\rho_3 c_{m3}}{\rho_{3ss} SS_3}$	omjer širine grla i koraka lopatice [1]	(2-105)
$s_{n3} = \frac{2\pi r_3}{Z_s}$	korak lopatice na izlazu iz statora	(2-106)
$o_{n3} = os_3 s_{n3}$	širina grla mlaznica	(2-107)
$\sigma = \frac{c_n}{s_n} = \frac{1}{0{,}75}$	krutost mlaznice [2]	(2-108)
$c_{n3} = \frac{s_{n3}}{\frac{1}{\sigma}} = \sigma s_{n3}$	duljina (tetive) statorske lopatice	(2-109)
$c_d = c_{n3}\cos(\alpha_3)$	radijalna duljina (tetive) statorske lopatice.	(2-110)

Metodom navedenom u [1] se potpuno definira geometrija statorskih lopatica. Polazeći od pretpostavki danih izrazima (2-111) - (2-115) provodi se iteracija izraza (2-116) - (2-123) do konvergencije na odgovarajuću vrijednost γ_3. Detaljna geometrija statorske lopatice prikazana je na slici 13.



Slika 13: Profil statorske lopatice [1]

Ako je iznos koordinate $y \geq 0{,}6c_{n3}$ za izračun geometrijskog faktora ζ koristi se izraz (2-117), u suprotnom se koristi izraz (2-118). Nakon definiranje geometrije statorske lopatice određuju se brzine i kutovi u trokutu brzina na ulazu u stator, a zatim i termodinamičke veličine te Machov broj. Kako bi se definirao trokut brzina na ulazu u mlaznicu provodi se iteracija izraza (2-133)–(2-140) do konvergencije na točnu vrijednost c_{m2}, polazeći od vrijednosti dobivene izrazom (2-133). U nastavku je dan preostali dio algoritma za proračun statora, a cijeli algoritam je prikazan na slici 14.

$t_{b2} = 0{,}025c_{n3}$ debljina ulaznog ruba statorske lopatice [1] (2-111)

$t_{b3} = 0{,}012c_{n3}$ debljina izlaznog ruba statorske lopatice [1] (2-112)

$t_{max} = 0{,}06c_{n3}$ maksimalna debljina statorske lopatice [1] (2-113)

$d = 0{,}4c_{n3}$ položaj maksimalne debljine statorske lopatice (2-114)

$\gamma_3 = 5°$ kut središnje linije lopatice na izlazu (pretpostavka) (2-115)

$y = s_{n3}\cos(\gamma_3)$ y koordinata (2-116)

$\zeta = \frac{c_{n3}-y}{d}$ geometrijski faktor [1] (2–117)

$\zeta = \frac{y}{c_{n3}-d}$ geometrijski faktor [1] (2–118)

$t_{ref} = t_{b2} + (t_{b3} - t_{b2})\left(\frac{c_{n3}-y}{d}\right)$ referentna debljina statorske lopatice [1] (2-119)

$e = \left[0{,}95\left(2 - \frac{y}{c_{n3}}\right)(1-\zeta) + 0{,}05\right]\left(\frac{0{,}4d}{c_{n3}}\right)^{0{,}5}$ eksponent [1] (2-120)

$t = t_{ref} + \left(t_{max} - t_{ref}\right)\zeta^e$ debljina statorske lopatice [1] (2-121)

$\bar{o}_3 = s_{n3}\sin(\gamma_3) - \frac{t}{2}$ širina grla mlaznice (2-122)

$\gamma_{3novo} = \sin^{-1}\left(\sin\gamma_3 \cdot \frac{o_{n3}}{\bar{o}_3}\right)$ kut središnje linije lopatice na izlazu (2-123)

$\beta_3 = \gamma_3$ kut statorske lopatice na izlazu (2-124)

$r_2 = c_d + r_3$ ulazni polumjer statora (2-125)

$\beta_2 = \beta_3$ kut statorske lopatice na izlazu (2-126)

$k_{b3control} = 1 - \frac{Z_s t_{b3}}{2\pi r_3 \sin\beta_3}$ faktor blokade toka na izlazu iz statora (2-127)

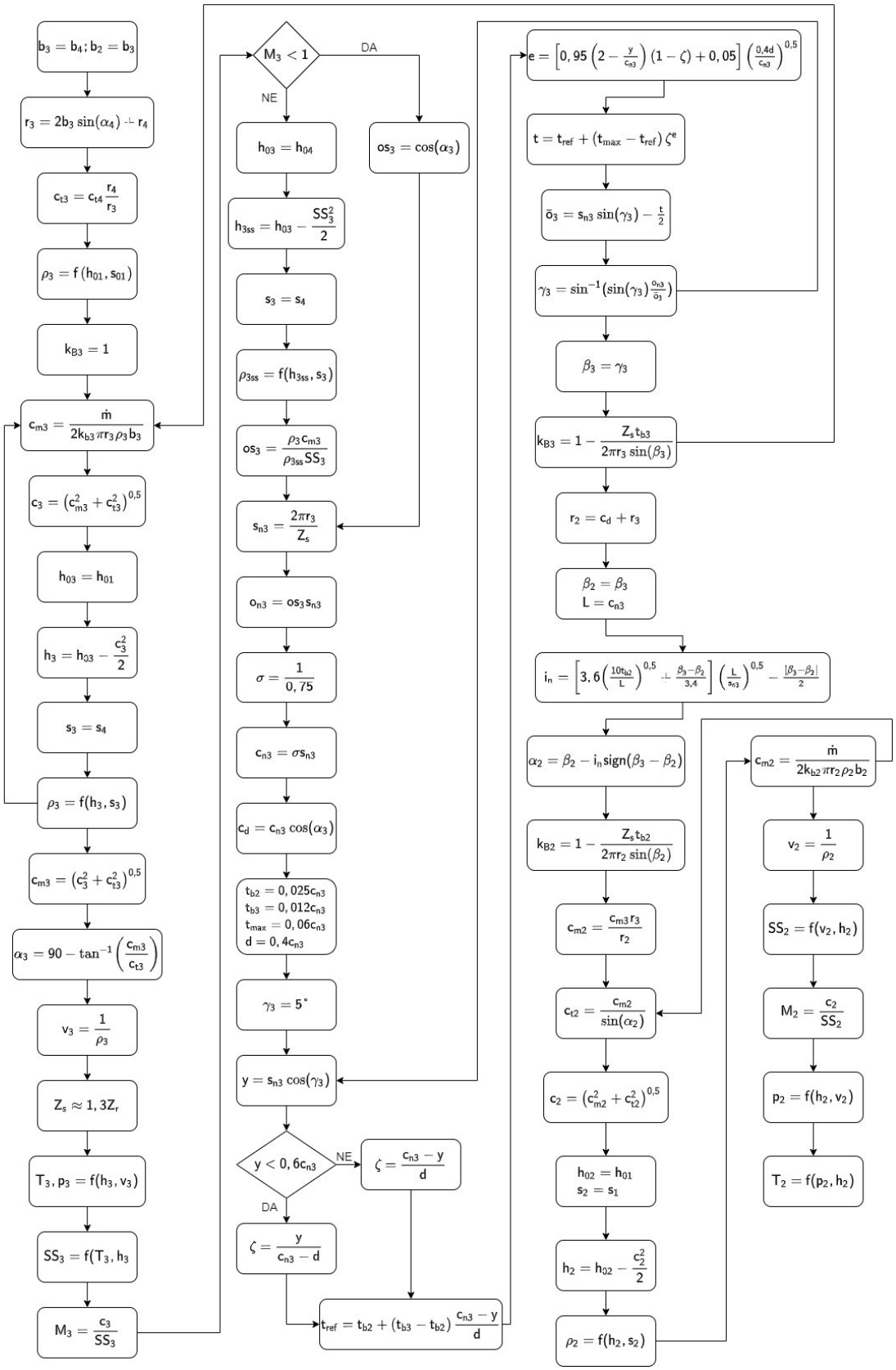
$L = c_{n3}$ duljina putanje toka fluida kroz stator (2-128)

$i_n = \left[3{,}6\left(\frac{10t_{b2}}{L}\right)^{0{,}5} + \frac{|\beta_3-\beta_2|}{3{,}4}\right]\left(\frac{L}{s_{n3}}\right)^{0{,}5} - \frac{|\beta_3-\beta_2|}{2}$ upadni (zahvatni) kut statora [12] (2-129)

$\alpha_{2a} = \beta_2 - i_n\text{sign}(\beta_3 - \beta_2)$ apsolutni kut toka na ulazu u stator (tangencijalni smjer)[1] (2-130)

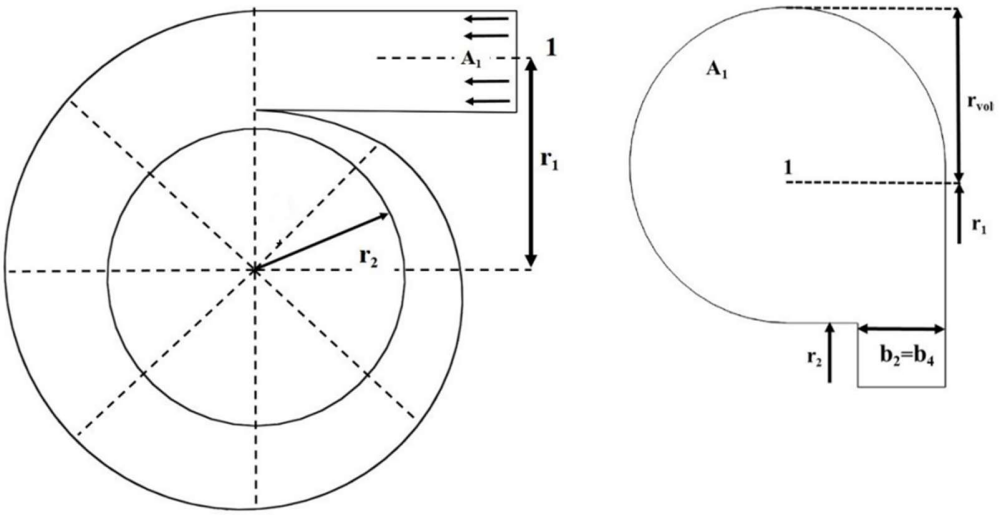
$\alpha_2 = 90 - \alpha_{2a}$ apsolutni kut toka na ulazu statora (radijalni smjer) (2-131)

$k_{b2} = 1 - \frac{Z_s t_{b2}}{2\pi r_2 \sin\beta_2}$	faktor blokade toka na ulazu statora	(2-132)
$c_{m2} = \frac{r_3 c_{m3}}{r_2}$	apsolutna meridijonalna brzina na ulazu u stator	(2-133)
$c_{t2} = c_{m2} \cdot \tan(\alpha_2)$	apsolutna tangencijalna brzina na ulazu u stator	(2-134)
$c_2 = (c_{m2}^2 + c_{t2}^2)^{0,5}$	apsolutna brzina na ulazu u stator	(2-135)
$h_{02} = h_{01}$	stagnacijska entalpija na ulazu u stator	(2-136)
$h_2 = h_{02} - \frac{c_2^2}{2}$	entalpija na ulazu u stator	(2-137)
$s_2 = s_1$	entropija na ulazu u stator	(2-138)
$\rho_2 = f(h_2, s_2)$	gustoća na ulazu u stator	(2-139)
$c_{m2} = \frac{\dot{m}}{2k_{b2}\pi r_2 \rho_2 b_2}$	apsolutna meridijonalna brzina na ulazu u stator	(2-140)
$v_2 = 1/\rho_2$	specifični volumen na ulazu u stator	(2-141)
$SS_2 = f(v_2, h_2)$	brzina zvuka na ulazu u stator	(2-142)
$M_2 = c_2/SS_2$	Machov broj na ulazu u stator	(2-143)
$p_2 = f(h_2, v_2)$	tlak na ulazu u stator	(2-144)
$T_2 = f(p_2, h_2)$	temperatura na ulazu u stator	(2-145)



Slika 14:Shema algoritma za modeliranje statora

2.2.3. Matematički model ulaznog kanala



Slika 15: Geometrija ulaznog kanala [4]

Slika 15 prikazuje bitne geometrijske veličine ulaznog kanala. Za ulazni kanal je zadan kružni presjek površine A_1 i polumjera r_{vol}. U obzir se uzima i koeficijent vrtloženja koji predstavlja utjecaj trenja sa vrijednošću predloženom u stručnoj literaturi [8]. Prema stručnoj literaturi [1] kroz međuprostor između ulaznog kanala i statora očuvana je kutna količina gibanja stoga se za proračun on može zanemariti pa se ulazni polumjer izračuna preko veličina na ulazu u stator. Izrazi (2-147)-(2-149) su izračunati sa početnom pretpostavkom brzine c_1, a izraz (2-151) je nova vrijednost kojom se započinje iduća iteracija proračuna. Nakon provedenog proračuna, u stručnoj literaturi [1] predlaže se postavljanje međuprostora s omjerom ulaznog i izlaznog polumjera 1,05.

$SC = 0{,}9$ koeficijent vrtloženja [8] (2-146)

$r_1 = \frac{r_2 \cdot c_{t2}}{c_1 \cdot SC}$ ulazni polumjer turbine (ulaznog kanala) (2-147)

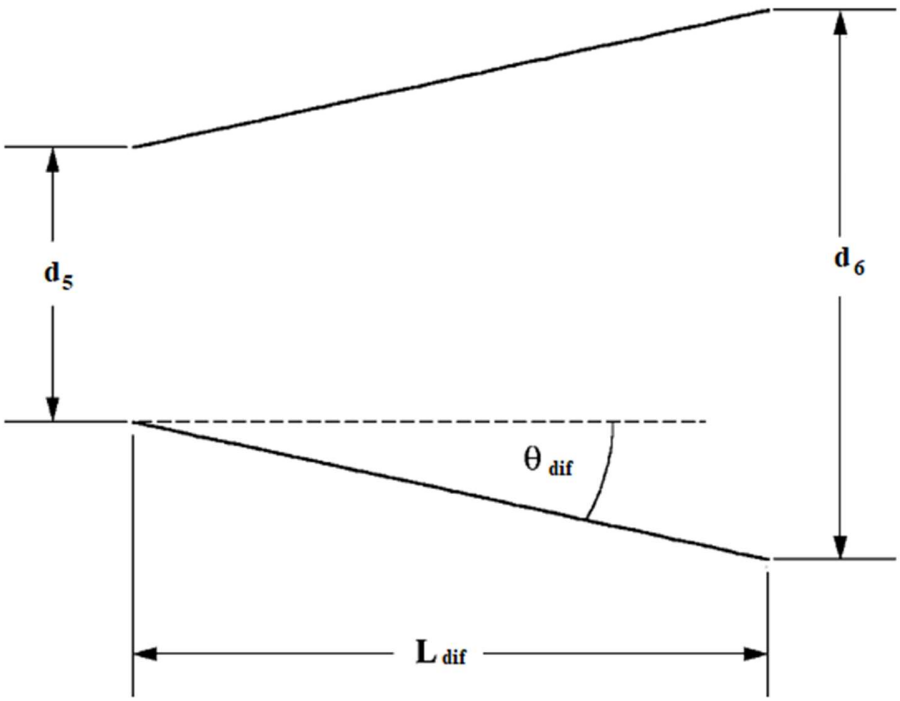
$A_1 = \frac{\dot{m}}{c_1 \rho_1}$ površina ulaza u ulazni kanal (2-148)

$r_{vol} = \left(\frac{A_1}{3\frac{\pi}{4}+1}\right)^{0,5}$ polumjer ulazne površine (2-149)

$r_{1novo} = r_2 + r_{vol}$ nova vrijednost ulaznog polumjera (2-150)

$c_{1novo} = \frac{r_2 \cdot c_{t2}}{r_{1novo} \cdot SC}$ nova vrijednost ulazne brzine (2-151)

2.2.4. Matematički model difuzora



Slika 16: Skica bitnih geometrijskih veličina difuzora [1]

Na slici 16 su označene bitne geometrijske veličine difuzora. To su promjeri na ulazu i izlazu, d_5 i d_6, kut divergencije difuzora θ_{dif} i duljina difuzora L_{dif}. Kut divergencije je postavljen na 5° što zadovoljava prijedlog $2\theta_{dif}$ <11° iz stručne literature [1]. Izlazna brzina iz difuzora je zadana na 10 m/s. Duljina difuzora je dana izrazom (2-170) navedenim u stručnoj literaturi [13]. Prvo se definiraju veličine stanja na izlazu iz difuzora uz pretpostavku izentropske promjene stanja. Zatim se pomoću tih veličina i stupnja korisnosti difuzora danog izrazom (2-159) iz stručne literature [14] izračunaju stvarne veličine stanje te geometrijske veličine difuzora. Algoritam proračuna dan je narednom tekstu:

θ_{dif} = 5°	kut divergencije difuzora	(2-152)
c_6=10 m/s	apsolutna brzina na izlazu iz difuzora	(2-153)
$h_{06}=h_{05}$	stagnacijska entalpija na izlazu iz difuzora	(2-154)
$s_{06s}=s_{05}$	stagnacijska entropija na izlazu (izentropski)	(2-155)
$s_{6s}=s_{06s}$	entropija na izlazu difuzora (izentropski)	(2-156)

$A_5 = \pi(r_{s5}^2 - r_{h5}^2)$ ulazna površina difuzora (2-157)

$C_{diff} = -3{,}15 \cdot 10^{-4} \cdot |\alpha_5|^2 + 6{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot |\alpha_5| + 0{,}57$ stupanj korisnosti difuzora [14] (2-158)

$c_{6s} = \sqrt{c_5^2 - C_{diff} \cdot (c_5^2 - c_6^2)}$ apsolutna brzina na izlazu iz difuzora (izentropski) (2-159)

$h_{6s} = h_{06s} - 0{,}5c_{6s}^2 + h_5$ entalpija na izlazu iz difuzora (izentropski) (2-160)

p_{6s}=f(h_{6s}, s_{6s}) tlak na izlazu iz difuzora (izentropski) (2-161)

p_6=p_{6s} tlak na izlazu iz difuzora (2-162)

$h_6 = h_{06} - 0{,}5c_6^2$ entalpija na izlazu iz difuzora (2-163)

T_6 = f(p_6, h_6) temperatura na izlazu iz difuzora (2-164)

ρ_6 = f(p_6, T_6) gustoća na izlazu iz difuzora (2-165)

s_6 = f(p_6, T_6) entropija na izlazu iz difuzora (2-166)

$A_6 = \frac{\dot{m}}{c_6 \rho_6}$ izlazna površina difuzora (2-167)

$AR_d = \frac{A_6}{A_5}$ omjer površina difuzora (2-168)

$L_{dif} = b_5 \frac{AR_d - 1}{2 \tan \theta_{dif}}$ duljina difuzora [13] (2-169)

$r_6 = \sqrt{\frac{A_6}{\pi}}$ polumjer izlaza iz difuzora. (2-170)

2.3. Matematički model gubitaka u radijalnoj turbini

U literaturi postoje razni modeli koji predviđaju gubitke prilikom preliminarnog dizajniranja turbine. U ovom radu koristit će se modeli gubitaka koji su pokazali najmanje odstupanje od CFD (Computational Fluid Dynamics) analize prema istraživanju provedenom u stručnoj literaturi [15].

2.3.1. Gubici u rotoru

2.3.1.1. Gubitak ulaznog kuta

Ovaj gubitak definiran je kao pad entalpije do kojeg dolazi zbog poremećaja u toku fluida kada je ulazni kut toka različit od optimalnog ulaznog kuta. Optimalni kut toka i pad entalpije definirani su izrazima iz literature [16].

$$\beta_{4,opt} = atan\left[\frac{-1{,}98\cdot\tan(\alpha_4)}{Z_r\left(1-\frac{1{,}98}{Z_r}\right)}\right] \quad \text{optimalni ulazni kut toka [16]} \quad (2\text{-}171)$$

$$\Delta h_i = 0{,}5\cdot w_4^2\cdot sin^2(\beta_4-\beta_{4,opt}) \quad \text{gubitak ulaznog kuta [16]} \quad (2\text{-}172)$$

2.3.1.2. Gubitak u rotorskim lopaticama

Ovaj gubitak definiran je kao pad entalpije kojim su obuhvaćeni gubici prilikom prolaska kroz rotorske lopatice, kao što su gubici zbog trenja, vrtloženja te nastanka sekundarnih tokova. Za izračun ovog gubitka odabran je model iz stručne literature [8], poznat kao i CETI model. Gubitak u rotorskim lopaticama dan je izrazom (2-184), dok su veličine potrebne za izračun tog gubitka definirane izrazima predloženim u stručnoj literaturi [3]. U nastavku su navedeni izrazi za proračun gubitka u rotorskim lopaticama.

$$r_t = r_5 \quad \text{polumjer grla rotora [3]} \quad (2\text{-}173)$$

$$q_5 = \frac{2\pi r_5}{Z_r} \quad \text{korak rotorskih lopatica na srednjem izlaznom polumjeru [3]} \quad (2\text{-}174)$$

$$o_t = \frac{q_5\cdot c_{m5}}{w_5} \quad \text{širina grla rotora [3]} \quad (2\text{-}175)$$

$$b_t = o_t \quad \text{visina lopatice na grlu rotora [3]} \quad (2\text{-}176)$$

$$\frac{r_4-r_5}{o_t} \geq 0{,}2 \quad \text{uvjet za } m_f \text{ [3]} \quad (2\text{-}177)$$

$\beta_t = 0{,}8\beta_{5,blade}$ kut lopatice na grlu rotora [3] (2-178)

$w_t = 0{,}7w_5$ relativna brzina toka na grlu rotora [3] (2-179)

$\beta = 0{,}5 \cdot \tan^{-1}\left(tan\beta_{4,blade} + tan\beta_{5,blade}\right)$ kut β [3] (2-180)

$C = \frac{Z}{\cos(\beta)}$ duljina C [3] (2-181)

$L_h = \frac{\pi}{4}(Z - 0{,}5b_4 + r_4 - r_t - 0{,}5b_t)$ hidraulička dužina rotora [8] (2-182)

$D_h = 0{,}5\left[\frac{4\pi r_4 b_4}{2\pi r_4 + Z_r b_4} + 2\pi\left(\frac{r_{s5}^2 - r_{h5}^2}{\pi(r_{s5} - r_{h5}) + Z_r b_5}\right)\right]$ hidraulički promjer rotora [8] (2-183)

$\Delta h_p = m_f \cdot 0{,}11 \cdot \left[\frac{L_h}{D_h} + 0{,}68\left(1 - \left[\frac{r_t}{r_4}\right]^2\right)\frac{\cos(\beta_t)}{\frac{b_t}{C}}\right] \cdot \frac{w_4^2 + w_t^2}{2}$ (2-184)

Ukoliko je izraz (2-177) zadovoljen, faktor m_f korišten u izrazu (2-184) iznosi 1, u suprotnom iznosi 2.

2.3.1.3. Gubitak zbog zazora

Zbog zazora između gornjeg ruba rotorskih lopatica i kućišta dio fluida iscuri bez da se iskoristi njegova kinetička energija. Ovaj gubitak definiran je kao pad entalpije dan izrazom (2-189) iz stručne literature [17]. Za proračun gubitka definirani su aksijalni i radijalni zazor te aksijalni i radijalni koeficijent prema izrazima iz stručne literature [1], [18], [19].

$\varepsilon_a = 0{,}04b_5$ aksijalni zazor [1] (2-185)

$\varepsilon_r = 0{,}04b_5$ radijalni zazor [1] (2-186)

$C_a = \frac{1 - \frac{r_{s5}}{r_4}}{c_{m4} b_4}$ aksijalni koeficijent [18] (2-187)

$C_r = \frac{r_{s5}}{r_4}\left(\frac{Z - b_4}{c_{m5} r_5 b_5}\right)$ radijalni koeficijent [19] (2-188)

$\Delta h_c = u_4^3 \cdot \frac{Z_r}{8\pi} \cdot [0{,}4\varepsilon_a C_a + 0{,}75\varepsilon_r C_r - (\varepsilon_a \varepsilon_r C_a C_r)^{0{,}5}]$ gubitak zbog zazora [17] (2-189)

2.3.1.4. Gubitak trenja diska

Ovaj gubitak definiran je kao pad entalpije zbog trenja između stražnje plohe rotora i kućišta koje nastaje zbog ulaska fluida u zazor između njih. Originalni model razvijen je u stručnoj literaturi [20], a u ovom radu se koristi modifikacija za radijalnu turbinu iz stručne literature [21], [22].

$\varepsilon_b = 0{,}02 b_4$ bazni zazor (2-190)

$\bar{\rho} = \frac{\rho_5 + \rho_4}{2}$ srednja gustoća fluida u rotoru (2-191)

$\bar{c} = \frac{c_4 + c_5}{2}$ srednja brzina toka u rotoru (2-192)

$\mu_4 = f(T_4, p_4)$ viskoznost na ulazu u rotor (2-193)

$\mu_5 = f(T_5, p_5)$ viskoznost na izlazu iz rotora (2-194)

$\bar{\mu} = \frac{\mu_4 + \mu_5}{2}$ srednja viskoznost u rotoru (2-195)

$Re = \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{c} \cdot r_4}{\bar{\mu}}$ Reynolds-ov broj (2-196)

$k_f = \frac{0{,}102\left(\frac{\varepsilon_b}{r_4}\right)^{0{,}2}}{Re^{0{,}2}}$ torzijski koeficijent za turbulentni tok ($Re > 10^5$) [21] (2-197)

$k_f = \frac{3{,}7\left(\frac{\varepsilon_b}{r_4}\right)^{0{,}1}}{Re^{0{,}5}}$ torzijski koeficijent za laminarni tok ($Re < 10^5$) [21] (2-198)

$\Delta h_w = k_f \frac{\bar{\rho} u_4^3 r_4^2}{2\dot{m}}$ gubitak trenja diska [22] (2-199)

2.3.1.5. Gubitak izlaznog ruba

Zbog naglog povećanja protočne površine na izlazu iz rotora dolazi do gubitaka koji su definirani izrazima iz stručne literature [23], [24].

$\Delta p_{0,rel} = \frac{1}{2} \rho_5 w_5^2 \left[\frac{Z_r \cdot 0{,}5 t_{b5}}{\pi (r_{s5} + r_{h5}) \cos(\beta_5)}\right]^2$ relativni gubitak tlaka [23] (2-200)

$\Delta h_{te} = \frac{\Delta p_{0,rel}}{\rho_5}$ gubitak izlaznog ruba [24] (2-201)

2.3.1.6. Gubitak izlazne kinetičke energije

Ovaj gubitak je definiran izrazom iz stručne literature [21] i predstavlja kinetičku energiju fluida na izlazu iz rotora koja nije pretvorena u koristan rad u rotoru.

$$\Delta h_e = \frac{c_5^2}{2} \qquad \text{gubitak izlazne kinetičke energije [21]} \qquad (2\text{-}202)$$

2.3.1.7. Ukupni gubitak u rotoru

$$\Delta h_{losses} = \Delta h_i + \Delta h_p + \Delta h_c + \Delta h_w + \Delta h_{te} + \Delta h_e \qquad \text{gubitak u rotoru} \qquad (2\text{-}203)$$

2.3.2. Gubitak u statorskim lopaticama

Gubici uslijed trenja prilikom prolaska kroz mlaznicu procijenjeni su jednadžbom (2-208) iz [25] koja je utemeljena na modelu iz [26].

$$\mu_2 = f(s_2, h_2) \qquad \text{viskoznost na ulazu u stator} \qquad (2\text{-}204)$$

$$\mu_3 = f(s_3, h_3) \qquad \text{viskoznost na izlazu iz statora} \qquad (2\text{-}205)$$

$$\overline{Re}_{stat} = 0{,}5\left(\frac{c_2 b_2 \rho_2}{\mu_2} + \frac{c_3 b_3 \rho_3}{\mu_3}\right) \qquad \text{prosječni Reynolds-ov broj u statoru} \qquad (2\text{-}206)$$

$$K_{st} = \frac{0{,}05}{\overline{Re}_{stat}^{0,2}}\left[3\frac{\tan(\alpha_3)}{\frac{s_{n3}}{c_{n3}}} + s_{n3}\frac{\cos(\alpha_3)}{b_3}\right] \qquad \text{koeficijent gubitka u statoru [25]} \qquad (2\text{-}207)$$

$$\Delta h_{st} = K_{st} \cdot \frac{c_3^2}{2} \qquad \text{gubitak u statorskim lopaticama [25]} \qquad (2\text{-}208)$$

2.3.3. Gubitak u ulaznom kanalu

Gubici u ulaznom kanalu su definirani kao pad entalpije prema izrazu iz stručne literature [8].

$$\Delta h_{vol} = 0{,}1 \cdot \frac{c_2^2}{2} \qquad \text{gubitak u ulaznom kanalu [8]} \qquad (2\text{-}209)$$

2.3.4. Ukupni gubitak u turbini

$$\Delta h_{losstot} = \Delta h_i + \Delta h_p + \Delta h_c + \Delta h_w + \Delta h_{te} + \Delta h_e + \Delta h_{st} + \Delta h_{vol} \qquad \text{ukupni gubitak} \qquad (2\text{-}210)$$

$$\eta_{ts,tot} = \frac{\Delta h_{act}}{\Delta h_{act} + \Delta h_{losstot}}$$ stupanj korisnosti turbine (2-211)

S novom vrijednosti stupnja korisnosti iz izraza (2-211) ponovno se provodi proračun, počevši od jednadžbe (2-18), do konvergencije na odgovarajuću vrijednost.

2.4. Ograničenja konstrukcije

Općenito se izvedivost konstrukcije provjerava CFD i FEA (Finite Element Analysis) analizom na dobivenom 3D modelu radijalne turbine. No i tijekom preliminarnog proračuna moguće je provjeriti zadovoljava li konstrukcija određene uvjete.

2.4.1. Elastično naprezanje u rotoru

Izrazom (2-212) iz stručne literature [27] izračunava se elastično naprezanje rotorskih lopatica uzrokovano centrifugalnom silom, gdje je ρ gustoća materijala rotora. Zatim se provjerava je li iznos naprezanja ispod dopuštene granice. Dopušteno naprezanje dano je izrazom (2-213) gdje je σ_γ granica elastičnosti materijala.

$$\sigma_r = 0{,}3\rho u_4^2$$ elastično naprezanje rotorskih lopatica [27] (2-212)

$$\sigma_{r,dop} = 0{,}9\sigma_\gamma$$ dopušteno naprezanje (2-213)

2.4.2. Vibracije

Kako se navodi u stručnoj literaturi [24], glavni uzrok vibracija je međudjelovanje statorskih i rotorskih lopatica čija je posljedica frekvencija pobude f_{nozzle} dana izrazom (2-214). Izlazni rub lopatice rotora smatra se najfleksibilnijim dijelom rotora i stoga najsklonijem vibracijama. Zato se prirodna frekvencija izlaznog ruba rotorske lopatice ω_{rotor} uspoređuje s frekvencijom pobude. Prirodna frekvencija rotora dan je izrazom (2-217) iz stručne literature [28]. U stručnoj literaturi [11] je preporučeno da omjer dan izrazom (2-218) bude veći od 4 kako bi se osiguralo da ne dođe do vibracija u rotoru.

$$f_{nozzle} = \frac{N \cdot Z_s}{60}$$ frekvencija pobude [24] (2-214)

$E = 2 \cdot 10^8$ kPa Youngov modul (2-215)

$\nu = 0{,}5$ Poissonov omjer (2-216)

$\omega_{rotor} = \frac{6{,}94}{2\pi b_5^2}\left[\frac{E \cdot t_{b5}^2}{12\rho_{steel}(1-\upsilon^2)}\right]^{0{,}5}$ prirodna frekvencija rotora [28] (2-217)

$control = \frac{f_{nozzle}}{\omega_{rotor}}$ kontrolni omjer (2-218)

2.4.3. Geometrijska ograničenja

Zbog jednostavnije proizvodnje, sprječavanja prevelike zakrivljenosti lopatica te sprječavanja preguste raspodijele lopatica na izlazu iz rotora u stručnoj literaturi [1], [6] su predložena slijedeća ograničenja:

$\frac{r_{s5}}{r_4} < 0{,}78$ [6] (2-219)

$\frac{r_{h5}}{r_{s5}} > 0{,}40$ [1] (2-220)

Ukoliko uvjet (2-20) nije zadovoljen, potrebno je mijenjati odnos između r_{h5} i r_4 definiran izrazom (2-55).

3. POSTAVKA ZADATKA

Zadatak završnog rada je preliminarna konstrukcija turbine s radijalnim ulazom radnog fluida (u daljnjem tekstu radijalna turbina) za potrebe geotermalne elektrane. Pretpostavka je da geotermalna elektrana radi na geotermalnom polju Rečica kod Karlovca. Tehničke karakteristike geotermalnog polja su sljedeće: temperatura geofluida iznosi 120°C, tlak geofluida iznosi 20 bara, dok maseni protok iznosi 94,38 kg/s.

Potrebno je opisati i verificirati matematički model za preliminarni dizajn radijalne turbine (u daljnjem tekstu VUKA model), te ga uključiti u model geotermalne elektrane.

Geotermalna elektrana je izvedena kao osnovna konfiguracija Rankine-ovog ciklusa sa organskim fluidom (u daljnjem tekstu ORC). Problem riješiti upotrebom programskog paket EES (Engineering Equation Solver), čiji je sastavni dio paket za optimiranje koji koristi genetski algoritam. Konstrukcija radijalne turbine zadovoljava maksimalnu vrijednost funkcije cilja. Optimiranje će se provesti za dvije funkcije cilja: eksergetski stupanj korisnosti postrojenja i neto dobivenu snaga postrojenja. Pretpostaviti da je kondenzator hlađen zrakom, a da je temperatura kondenzacije 30°C, dok je vrijednost minimalne temperaturne razlike (na engleskom: „pinch point“) kondenzatora 5°C. Proračuni će provesti za radne fluide R32, R134a, R143a, R290, R1234yf i propilen te naredne konfiguracije ORC-a:

1. Radni fluid u podkritičnom području, minimalna temperaturna razlika između geofluida i radnog fluida ΔT_{pp}=10°C, brzina vrtnje radijalne turbine N=3000 o/min
2. Radni fluid u podkritičnom području, minimalna temperaturna razlika između geofluida i radnog fluida ΔT_{pp}=5°C, brzina vrtnje radijalne turbine N=3000 o/min
3. Radni fluid u podkritičnom području, minimalna temperaturna razlika između geofluida i radnog fluida ΔT_{pp}=10°C, brzina vrtnje radijalne turbine $N\neq$3000 o/min
4. Radni fluid u podkritičnom području, minimalna temperaturna razlika između geofluida i radnog fluida ΔT_{pp}=5°C, brzina vrtnje radijalne turbine $N\neq$3000 o/min
5. Radni fluid u nadkritičnom području, minimalna temperaturna razlika između geofluida i radnog fluida ΔT_{pp}=5°C, brzina vrtnje radijalne turbine $N\neq$3000 o/min
6. Radni fluid u nadkritičnom području, minimalna temperaturna razlika između geofluida i radnog fluida ΔT_{pp}=5°C, brzina vrtnje radijalne turbine N=3000 o/min

Brzina vrtnje od 3000 o/min odabrana je zato što je to brzina vrtnje klasičnog generatora konstruiranog za električnu mrežu frekvencije 50 Hz. U tom slučaju nije potrebna primjena reduktora ili multiplikatora.

Vrijednosti kritičnih tlakova i temperatura te molarne mase za analizirane radne fluide navedeni su u tablici 1.

Tablica 1: Kritični tlak i temperatura te molarna masa radnih fluida

Radni fluid	T_{cr} (°C)	p_{cr} (bar)	M (g/mol)
R290	96,74	42,5	44,0
R1234yf	94,70	33,80	114,04
R134a	101,03	40,56	102
R143a	72,73	37,64	84,04
Propilen	92,42	46,65	42,08
R32	78,1	57,82	52,02

Potrebno je provesti detaljnu analizu dobivenih rezultata, te definirati odgovarajuće zaključke.

4. RAZRADA ZADATKA I ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

4.1. Usporedba matematičkog modela radijalne turbine s rezultatima objavljenim u stručnoj literaturi

Model turbine uspoređen je sa radovima [7] i [29]. Rezultati su prikazani tablično. U zagradama su navedena odstupanja od VUKA modela.

4.1.1. Usporedba VUKA modela s stručnom literaturom [7]

U tablici 2 je prikazana usporedba rezultata s [7]. Autor u [7] zadaje specifičnu brzinu N_s i omjer brzina ν_s dok je u danom modelu brzina vrtnje turbine ulazna veličina. U svrhu usporedbe zadana je brzina vrtnje koja odgovara specifičnoj brzini iz literature [7] prema izrazu (2-15), a omjer brzina je izračunat prema izrazu (2-16). Veliko odstupanje u vrijednosti stupnja korisnosti η_{ts} je zbog toga što autor [7] koristi noviji model gubitaka predložen u [1], dok se u VUKA modelu koristi kombinacija modela gubitaka navedena u poglavlju 2.

Zatim je VUKA model izmijenjen tako da su umjesto broja okreta ulazne veličine specifična brzina N_s i omjer brzina ν_s, te uspoređen s [7]. Tablica 3 prikazuje rezultate kada se za N_s i ν_s zadaju vrijednosti kao u [7]. Za sve veličine osim β_{5blade} odstupanje postaje manje od odstupanja prikazanih u prethodnoj tablici. Za neke veličine, kao što su polumjeri u karakterističnim točkama odstupanje postaje manje od 1%.

Nakon gore provedenih usporedbi, provedena je optimizacija genetskim algoritmom. Kao funkcija cilja zadan je stupanj djelovanja turbine, a kao nezavisne varijable N_s i ν_s. Ostale ulazne veličine su iste kao u slučaju usporedbe s [7]. Tablica 4 prikazuje rezultate optimiranja u usporedbi s rezultatima dobivenim sa zadanim vrijednostima N_s i ν_s.

Prema stručnoj literaturi [1], kako se navodi i u [7], najbolji stupanj djelovanja turbina ima za N_s u rasponu od 0,45 do 0,65, dok se u tom slučaju ν_s nalazi u uskom području oko 0,65. VUKA model se podudara s tim rezultatima.

Tablica 2: Usporedba VUKA modela s literaturom [7]

Ulazni podaci	Da Lio [7]	VUKA model
Radni fluid	R245fa	
$\dot{m}$ [kg/s]	20	
T_{01} [°C]	65	
p_{01} [bar]	4,63	
p_5 [bar]	1,976	
N_s	0,45	/
v_s	0,65	/
N [min^{-1}]	/	4479
Rezultati		
r_4[m]	0,246 (+3,58%)	0,2375
Z_r [-]	23 (0%)	23
β_{4blade}[°]	0 (0%)	0
k_{B4} [-]	0,85 (-0,42%)	0,8536
b_4[m]	0,032 (-4,99%)	0,03368
r_{s5}[m]	0,170 (+2,91%)	0,1652
r_{h5}[m]	0,068 (+3,59%)	0,06564
b_5[m]	0,102 (+2,41%)	0,0996
β_{5blade}[°]	58,5 (-1,88%)	59,62
Z [m]	0,153 (+2,42%)	0,1494
b_3[m]	0,032 (-4,99%)	0,03368
b_2[m]	0,032 (-4,99%)	0,03368
r_3[m]	0,260 (+2,6%)	0,2534
o_{n3}[m]	0,0122 (+11,52%)	0,01094
c_{n3}[m]	0,0752 (+6,26%)	0,07077
γ_3[°]	9,0 (-36,35%)	14,14
r_2[m]	0,28 (+4,48%)	0,268
γ_2[°]	24,3 (+3,32%)	23,52
β_2 [°]	24,3 (+3,32%)	23,52
Z_s	29 (-3,33%)	30
r_1[m]	0,377 (+5,31%)	0,358
A_1[m^2]	0,030 (+8,69%)	0,0276
SP[m]	0,12 (-1,72%)	0,1221
VR	2,3 (+1,1%)	2,275
η_{ts}[%]	88,9 (+10,92%)	80,15

Tablica 3:Usporedba VUKA modela i literature [7] sa N_s i v_s kao ulaznim parametrima

Ulazni podaci	Da Lio[7]	VUKA model
Radni fluid	R245fa	
$\dot{m}$ [kg/s]	20	
T_{01} [°C]	65	
p_{01} [bar]	4,63	
p_5 [bar]	1,976	
N_s	0,45	0,45
v_s	0,65	0,65
Rezultati		
r_4[m]	0,246 (-0,08%)	0,2462
Z_r [-]	23 (0%)	23
β_{4blade}[°]	0 (0%)	0
k_{B4} [-]	0,85 (-0,42%)	0,8536
b_4[m]	0,032 (-2,32%)	0,03276
r_{s5}[m]	0,170 (-0,76%)	0,1713
r_{h5}[m]	0,068 (-0,07%)	0,06805
b_5[m]	0,102 (-1,26%)	0,1033
β_{5blade}[°]	58,5 (-4,98%)	61,57
Z [m]	0,153 (-1,23%)	0,1549
b_3[m]	0,032 (-2,32%)	0,03276
b_2[m]	0,032 (-2,32%)	0,03276
r_3[m]	0,260 (-0,65%)	0,2617
o_{n3}[m]	0,0122 (+7,39%)	0,01136
c_{n3}[m]	0,0752 (+3,01%)	0,07308
γ_3[°]	9,0 (-36,66%)	14,21
r_2[m]	0,28 (+1,16%)	0,2768
γ_2[°]	24,3 (+2,97%)	23,6
β_2 [°]	24,3 (+2,97%)	23,6
Z_s	29 (-3,33%)	30
r_1[m]	0,377 (+2,78%)	0,3668
A_1[m^2]	0,030 (+8,58%)	0,02763
SP[m]	0,12 (-1,72%)	0,1221
VR	2,3 (+0,83%)	2,281
η_{ts}[%]	88,9 (+11,95%)	79,41

Tablica 4: Usporedba optimiziranog VUKA modela i modela sa zadanim parametrima

Ulazni podaci	VUKA model (optimiziran)	VUKA model
Radni fluid	R245fa	
$\dot{m}$[kg/s]	20	
T_{01} [°C]	65	
p_{01} [bar]	4,63	
p_5 [bar]	1,976	
N_s	0,6149	0,45
v_s	0,6549	0,65
Rezultati		
r_4[m]	0,1797	0,2462
Z_r [-]	20	23
β_{4blade}[°]	0	0
k_{B4} [-]	0,8727	0,8536
b_4[m]	0,03712	0,03276
r_{s5}[m]	0,1248	0,1713
r_{h5}[m]	0,04967	0,06805
b_5[m]	0,07512	0,1033
β_{5blade}[°]	54,47	61,57
Z [m]	0,1127	0,1549
b_3[m]	0,03712	0,03276
b_2[m]	0,03712	0,03276
r_3[m]	0,2004	0,2617
o_{n3}[m]	0,01173	0,01136
c_{n3}[m]	0,06456	0,07308
γ_3[°]	16,13	14,21
r_2[m]	0,216	0,2768
γ_2[°]	27,09	23,6
β_2 [°]	27,09	23,6
Z_s	26	30
r_1[m]	0,311	0,3668
A_1[m^2]	0,03093	0,02763
SP[m]	0,122	0,1221
VR	2,235	2,281
η_{ts}[%]	81,43	79,41

4.1.2. Usporedba VUKA modela s stručnom literaturom [29]

VUKA model uspoređen je sa modelom iz literature [29] te s još dva modela s kojima autor [29] uspoređuje svoj model. Tablica 5 prikazuje ulazne podatke navedene u literaturi [16] na kojima se temelji usporedba. Tablica 6 prikazuje rezultate usporedbe.

Tablica 5:Ulazni podaci za usporedbu s literaturom [29]

Radni fluid	Argon
N	38000 min^{-1}
T_{01}	810,2°C
P_{01}	0,9101 bar
$\dot{m}$	0,2771 kg/s
P_{01}/P_5	1,61
Z_s	16
Z_r	12

Tablica 6: Rezultati usporedbe s literaturom [29]

Parametar	Glassman [16]	RITAL [11]	Rahbar [29]	VUKA model
r_2[m]	0,09775 (-3,69%)	0,1033 (+1,77%)	0,09911 (-2,35%)	0,1015
b_2[m]	-	0,01221 (-42,02%)	0,01219 (-42,12%)	0,02106
r_3[m]	0,07983 (-9,23%)	0,08268 (-5,99%)	0,08133 (-7,53%)	0,08795
b_3[m]	-	0,01221 (-42,02%)	0,01219 (-42,12%)	0,02106
α_3[°]	72 (-1,22%)	63,39 (-13,03%)	68,11 (-6,56%)	72,89
r_4[m]	0,0777 (+3,36%)	0,07874 (+4,75%)	0,07888 (+4,93%)	0,07517
b_4[m]	-	0,01221 (-42,02%)	0,01219 (-42,12%)	0,02106
r_{h5}[m]	0,01936 (+3,36%)	0,02362 (+26,11%)	0,02312 (+23,44%)	0,01873
r_{s5}[m]	0,05542 (-2,36%)	0,05591 (-1,49%)	0,05546 (-2,29%)	0,05676
α_4[°]	71,92 (-0,58%)	63,13 (-12,73%)	63,51 (-12,21%)	72,34
β_4[°]	-31,50 (-35,13%)	-26,27 (-12,7%)	-26,64 (-14,28%)	-23,31
α_5[°]	0	-0,01	0	0
β_5[°]	-54,90 (-5,23%)	-55,58 (-6,54%)	-53,76 (-3,05%)	-52,17
η_{ts}	0,82 (+3,26%)	0,79 (-0,52%)	0,788 (-0,77%)	0,7941
W [kW]	22,371 (-0,04%)	22,371 (-0,04%)	22,371 (-0,04%)	22,38

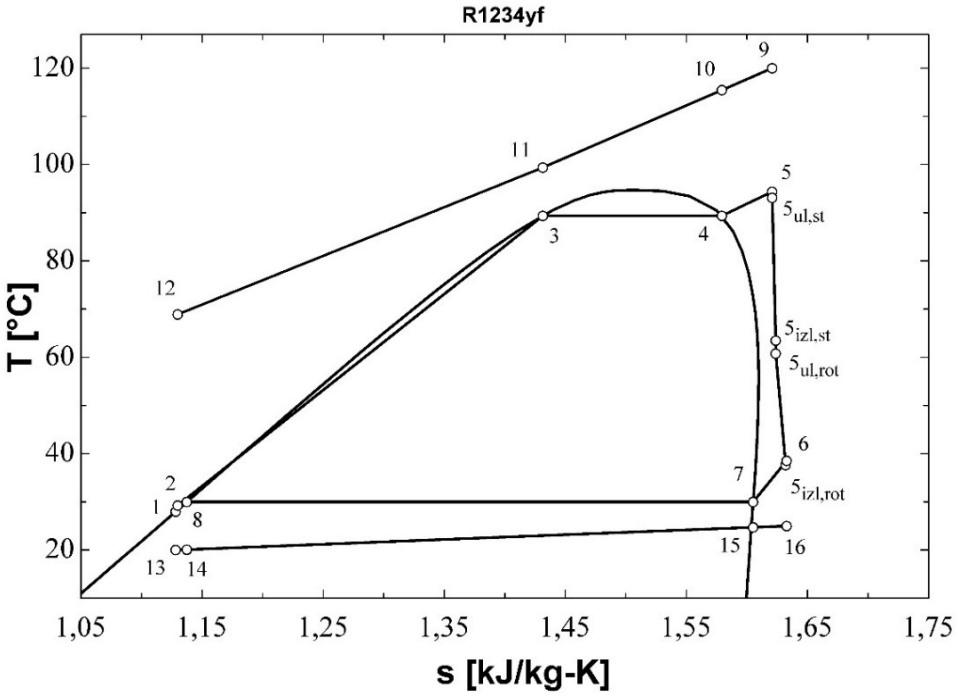
VUKA model se dobro slaže s promatranim modelima u dobivenoj snazi i stupnju korisnosti, dok postoje velika odstupanja u geometrijskim veličinama, pogotovo u odnosu na literaturu [11] i [29].

Bitno je napomenuti da se u VUKA modelu definiraju bezdimenzijski parametri N_s i ν_s preko kojih se definiraju veličine u trokutu brzina na ulazu u rotor (izrazi (2-22) i (2-23)) dok autori u [11] i [29] temelje svoj proračun na drugim bezdimenzijskim značajkama što pridonosi razlikama u geometrijskim veličinama.

4.2. Optimiranje parametara ORC ciklusa s radijalnom turbinom

U matematički model ORC ciklusa uključen je model radijalne turbine. U većini proračuna ORC ciklusa zadaje se fiksna vrijednost stupnja korisnosti turbine η_t, dok se u danom proračunu η_t proračunava zajedno sa parametrima ciklusa što daje realnije rezultate. Rezultati optimiranja će pokazati koji radni fluid i konfiguracija parametara ciklusa ima najbolje vrijednosti funkcija cilja. Jedan od ciljeva optimiranja je i vidjeti kakve su vrijednosti glavnih gabarita radijalne turbine u ovisnosti o parametrima ciklusa.

U narednim dijagramima i prikazima rezultata promijenjene su oznake karakterističnih točaka radijalne turbine. Točka 1 u proračunu turbine ima oznaku 5 u proračunu ciklusa. Točka 2 turbine ima oznaku $5_{ul,st}$ u proračunu ciklusa. Točka 3 turbine ima oznaku $5_{izl,st}$ u proračunu ciklusa. Točka 4 turbine ima oznaku $5_{ul,rot}$ u ciklusu. Točka 5 turbine ima oznaku $5_{izl,rot}$ u ciklusu. Oznaka točke 6 je nepromijenjena. Na slici 17 je prikazan primjer T-s dijagrama ORC ciklusa na kojemu se vide i promijenjene oznake.



Slika 17:*T-s* dijagram osnovnog podkritičnog ciklusa

Optimizacija se provela korištenjem genetskog algoritma u programskom paketu EES (Engineering Equation solver) sa narednim parametrima genetskog algoritma: broj jedinki je 16, broj generacija je 64, dok je stopa mutacije 0,2.

Za optimizaciju u podkritičnom području kao nezavisne varijable izabrane su tlak na ulazu u turbinu p_5 i stupanj pregrijanja ΔT_{SH} koji uz temperaturu zasićenja za pripadajući tlak (p_5) određuje temperaturu na ulazu u turbinu. U slučaju kad brzina vrtnje nije zadana, uzeta je kao nezavisna varijabla. Za nezavisne varijable zadane su sljedeće granice unutar kojih se tražila optimalna vrijednost:

p_5: od (p_{cond} + 1) do 0,9p_{cr}

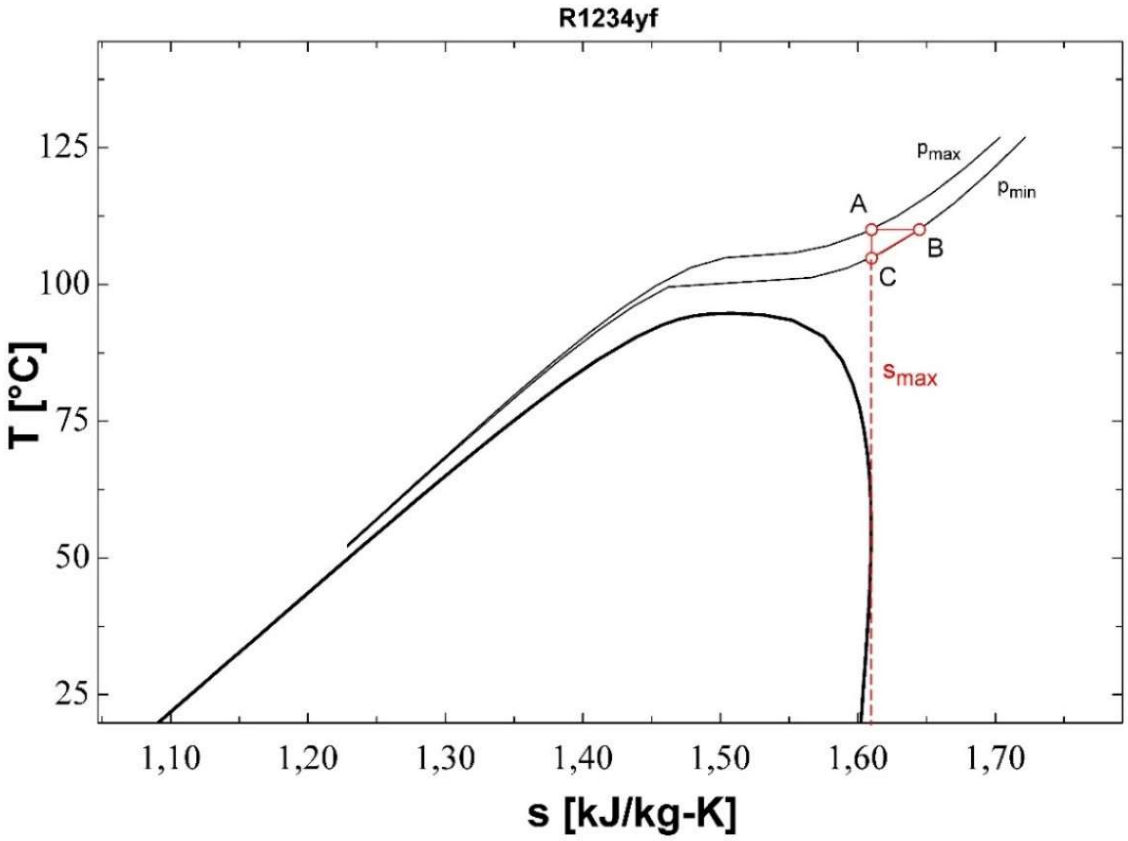
ΔT_{SH}: od 5°C do 15°C

N: od 1000 do 20000 o/min

Za nadkritično područje nezavisne varijable su tlak i temperatura na ulazu u turbinu te brzina vrtnje ukoliko nije zadana. Zadano je nekoliko ograničenja kojim se definiralo područje u kojem se traže optimalne vrijednosti. Zadan je minimalni tlak p_{min}=1,1p_{cr} kako bi se osiguralo da je fluid u nadkritičnom području. Određena je točka na krivulji zasićenja sa maksimalnom entropijom s_{max}.

Ta vrijednost entropije je uvedena kao ograničenje kako bi se osiguralo da se ekspanzija u turbini u potpunosti odvija u području pregrijane pare. Maksimalna temperatura je ograničena izrazom: T_{max}=T_{geo}-10°C. Za u ovom slučaju zadane karakteristike geotermalnog polja T_{max} = 110°C. Minimalna temperatura odgovara temperaturi u točki stanja sa entropijom s_{max} i tlakom p_{min}. Maksimalni dopušteni tlak je tlak koji odgovara točki stanja sa entropijom s_{max} i temperaturom T_{max}. Na slici 18 prikazano je područje u kojemu se moraju nalaziti optimalne vrijednosti tlaka i temperature za R1234yf, gdje je: A(s_{max}, T_{max}), B(p_{min}, T_{max}) i C(p_{min}, s_{max}).

Fiksni parametri ORC ciklusa su sljedeći: temperatura ($T_{geo,in}$) i tlak (p_{geo}) geotermalnog fluida, ulazna temperatura ($T_{air,in}$) i tlak (p_{atm}) zraka za hlađenje kondenzatora, temperatura kondenzacije T_{cond}, te minimalna temperaturna razlika (na engleskom: „pinch point“) kondenzatora ΔT_{cond}. Vrijednosti tih veličina prikazane su u tablici 7.



Slika 18: Dopušteno područje ulaznih tlakova i temperatura turbine za R1234yf

Tablica 7: Fiksni parametri ORC ciklusa

Veličina	Iznos
$T_{geo,in}$	120°C
p_{geo}	20 bar
$T_{air,in}$	20°C
p_{atm}	1 bar
T_{cond}	30°C
ΔT_{cond}	5°C

Optimizacija se provela za dvije funkcije cilja: eksergetski stupanj korisnosti postrojenja $\eta_{plant,ex}$ i neto dobivenu snagu postrojenja W_{net}. Funkcije cilja su maksimizirane za naredne konfiguracije ORC ciklusa:

1. Radni fluid u podkritičnom području, ΔT_{pp}=10°C, N=3000 o/min
2. Radni fluid u podkritičnom području, ΔT_{pp}=5°C, N=3000 o/min
3. Radni fluid u podkritičnom području, ΔT_{pp}=10°C, $N\neq$3000 o/min
4. Radni fluid u podkritičnom području, ΔT_{pp}=5°C, $N\neq$3000 o/min
5. Radni fluid u nadkritičnom području, ΔT_{pp}=5°C, $N\neq$3000 o/min
6. Radni fluid u nadkritičnom području, ΔT_{pp}=5°C, N=3000 o/min

Brzina vrtnje od 3000 o/min odabrana je zato što je to brzina vrtnje klasičnog generatora konstruiranog za električnu mrežu frekvencije 50 Hz. U tom slučaju nije potrebna primjena reduktora ili multiplikatora.

Optimizacija se provela za 6 navedenih fluida osim za nadkritično područje. U tom slučaju optimizacija se provela samo za R1234yf i R143a. Ostali fluidi nisu zadovoljili ograničenja koja moraju zadovoljiti veličine na ulazu u turbinu prilikom rada u nadkritičnom području.

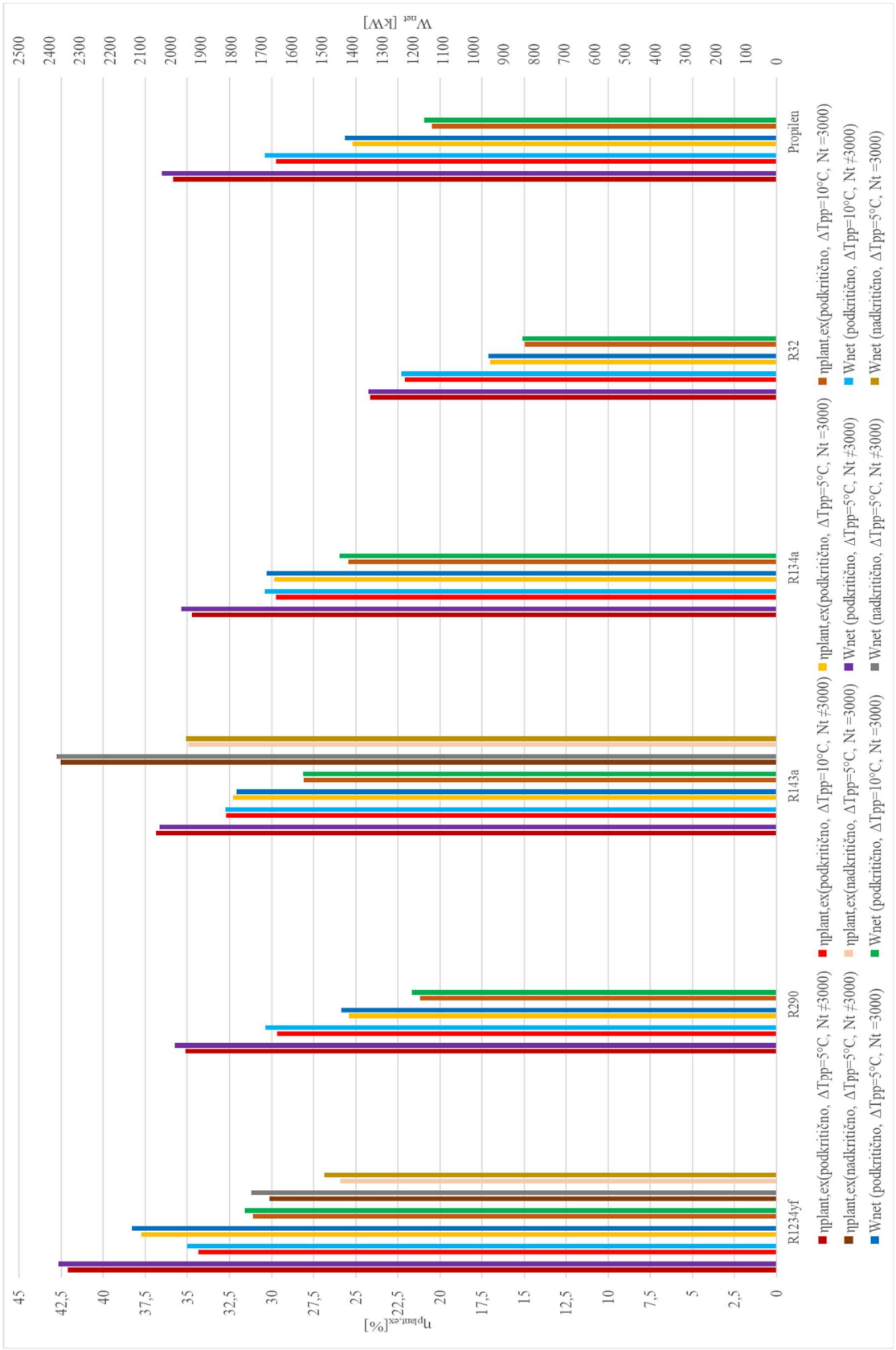
4.3. Analiza rezultata

Detaljne tablice i pripadajući T-s dijagrami rezultata optimizacije nalaze se u privitku.

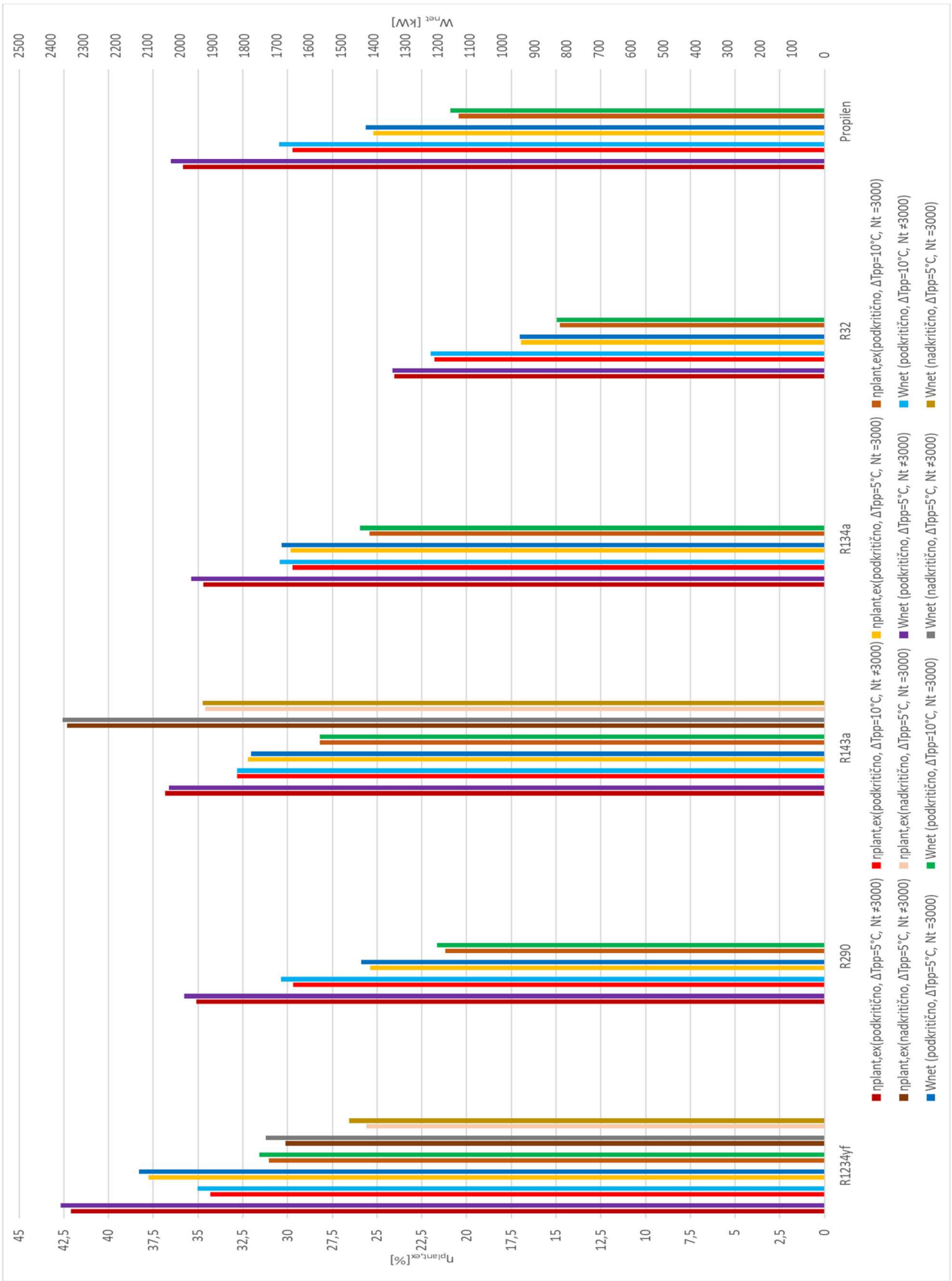
Slika 19 prikazuje iznose eksergetskog stupnja korisnosti postrojenja $\eta_{plant,ex}$ i neto dobivene snage W_{net} za sve konfiguracije, sa $\eta_{plant,ex}$ kao funkcijom cilja. Slika 20 prikazuje iste veličine sa W_{net} kao funkcijom cilja. Iz dobivenih rezultata se može primijetiti da se prilikom maksimiziranja $\eta_{plant,ex}$ dobije skoro potpuno isti W_{net} koji se dobije i maksimiziranjem W_{net}. Isto vrijedi i u obrnutom slučaju.

Rezultati pokazuju da uz iste ostale uvjete konfiguracije sa N=3000 o/min imaju manje $\eta_{plant,ex}$ i W_{net} nego konfiguracije sa $N \neq 3000$. Za sve analizirane fluide optimalna brzina vrtnje je veće od 3000. Kada je ΔT_{pp} =5°C dobiju se bolji $\eta_{plant,ex}$ i W_{net} nego sa ΔT_{pp} =10°C. Od dva fluida analizirana u nadkritičnom području, R143a ima bolje $\eta_{plant,ex}$ i W_{net} u odnosu na podkritično područje, dok R1234yf ima lošije.

Na slikama 21 – 25 tablično su prikazane konture rotora za određene funkcije cilja i konfiguracije parametara ORC-a. U tablicama su navedeni iznosi dvije funkcije cilja, visina rotora Z, ulazni promjer rotora d_4 te zadani, odnosno optimalna brzina vrtnje.



Slika 19: Dijagram za rezultate optimiranja; funkcija cilja $\eta_{plant,ex}$

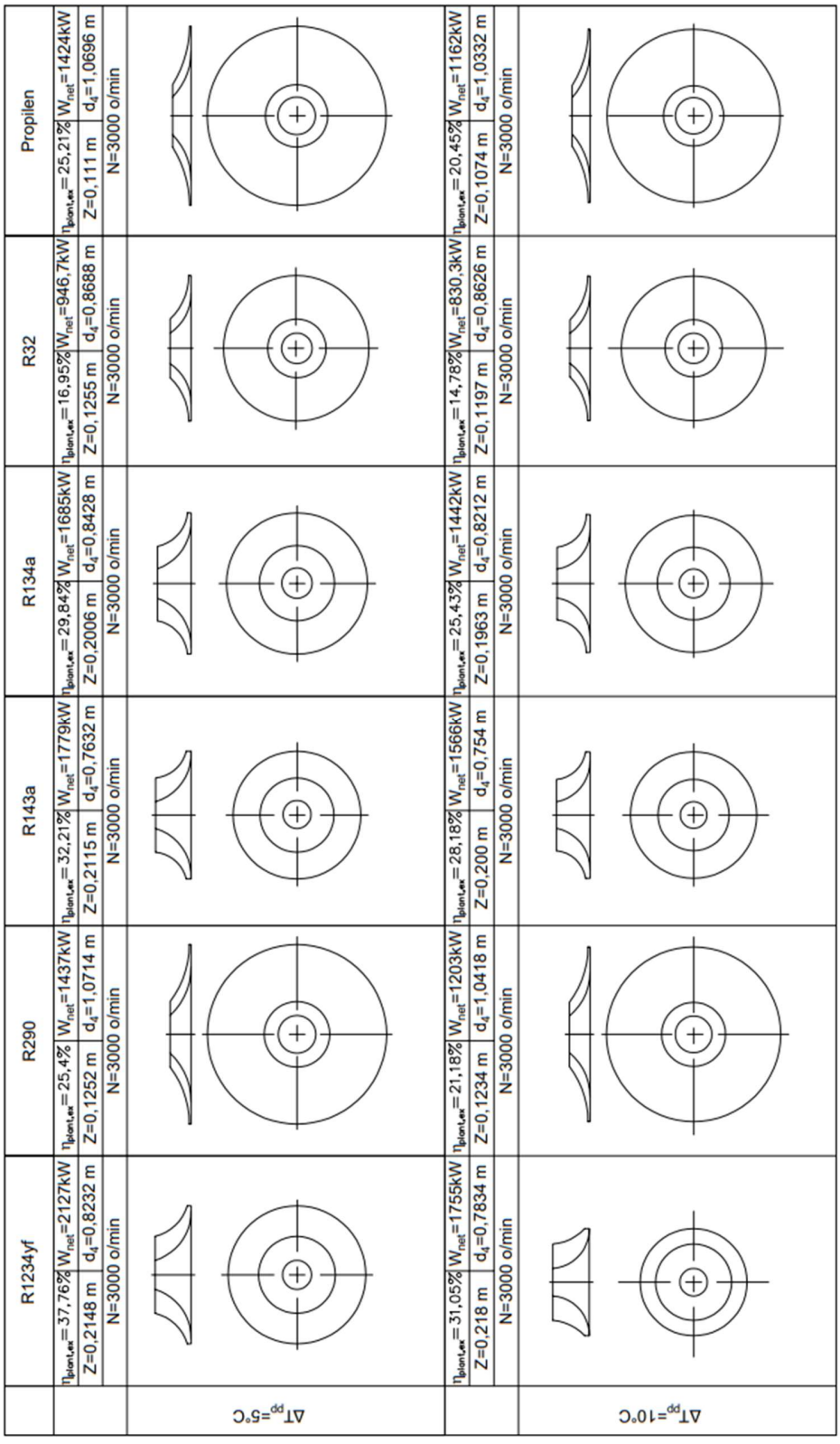


Slika 20:Dijagram za rezultate optimiranja, funkcija cilja W_{net}

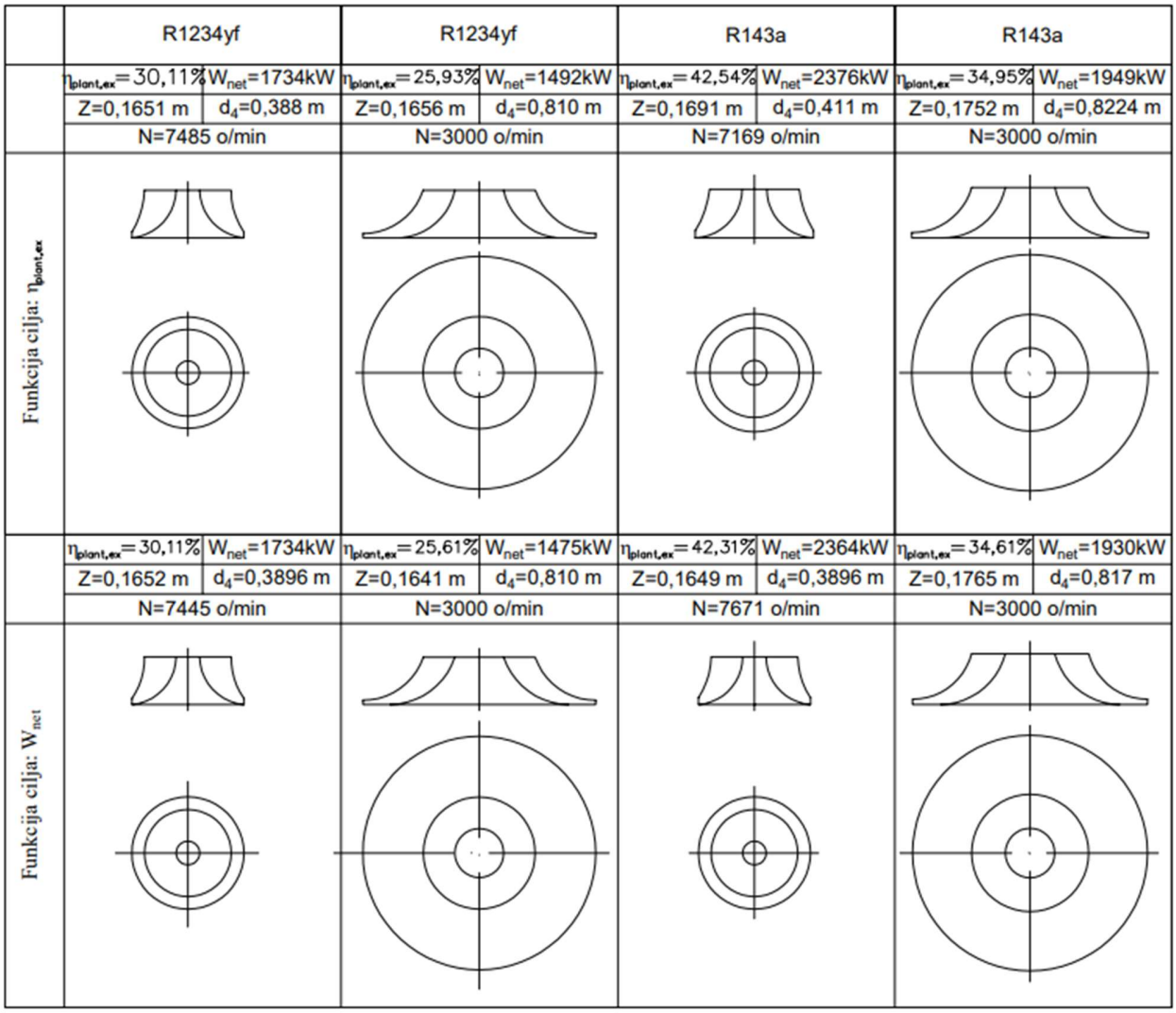
Slika 21: Tablični prikaz usporedba gabarita rotora, funkcija cilja $\eta_{plant,ex}$, $N \neq 3000$, podkritično

Slika 22: Tablični prikaz usporedbe gabarita rotora, funkcija cilja $\eta_{plant,ex}$, N=3000, podkritično

Slika 23: Tablični prikaz usporedbe gabarita rotora, funkcija cilja W_{net}, $N \neq 3000$, podkritično



Slika 24: Tablični prikaz usporedbe gabarita rotora, funkcija cilja W_{net}, N=3000, podkritično



Slika 25:Tablični prikaz usporedbe gabarita rotora za nadkritični slučaj

Rezultati pokazuju da za se isti radni fluid, zadavanjem broja okretaja na 3000 o/min dobivaju veće dimenzije rotora u odnosu na broj okretaja dobiven optimiranjem (koji je veći od 3000 o/min za sve radne fluide). Postavljanjem ΔT_{pp} na 10°C dobivaju se malo manje dimenzije rotora u odnosu na 5°C. Za nadkritični slučaj i $N \neq 3000$ dobivaju se manje dimenzije u odnosu na podkritični slučaj. Za nadkritični slučaj fluida R143a, uz N=3000 promjeri rotora se povećaju, a duljina Z se smanji u odnosu na podkritični slučaj.

Za konfiguraciju s radnim fluidom u podkritičnom području s ΔT_{pp}=10°C i N=3000 o/min najbolje rezultate ima R1234yf sa $\eta_{plant,ex}$=31,09% i W_{net}=1755 kW.

Za konfiguraciju s radnim fluidom u podkritičnom području s ΔT_{pp}=5°C i N=3000 o/min najbolje rezultate ima R1234yf sa $\eta_{plant,ex}$=37,76% i W_{net}=2127 kW.

Za konfiguraciju s radnim fluidom u podkritičnom području s ΔT_{pp}=5°C i N≠3000 o/min najbolje rezultate ima R1234yf sa $\eta_{plant,ex}$=42,1% i W_{net}=2371 kW.

Za konfiguraciju s radnim fluidom u podkritičnom području s ΔT_{pp}=10°C i N≠3000 o/min najbolje rezultate ima R1234yf sa $\eta_{plant,ex}$=34,34% i W_{net}=1945 kW.

Za konfiguraciju s radnim fluidom u nadkritičnom području s ΔT_{pp}=5°C i N≠3000 o/min najbolje rezultate ima R143a sa $\eta_{plant,ex}$=42,54% i W_{net}=2376 kW.

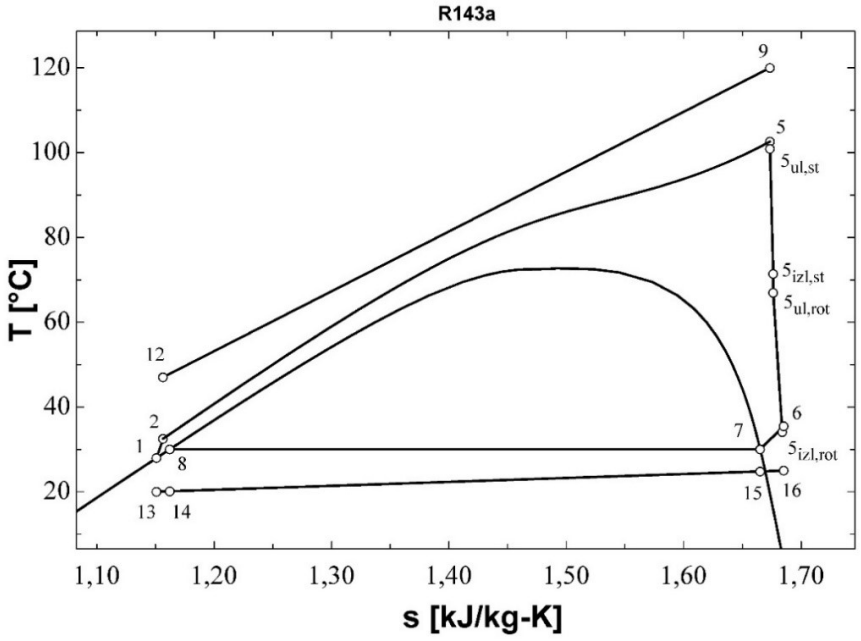
Za konfiguraciju s radnim fluidom u nadkritičnom području s ΔT_{pp}=5°C i N=3000 o/min najbolje rezultate ima R143a sa $\eta_{plant,ex}$=34,95% i W_{net}=1949 kW.

Od analiziranih konfiguracija najveći stupanj korisnosti ($\eta_{plant,ex}$=42,54%) i neto snagu (W_{net}=2376 kW) ima konfiguracija sa R143a kao radnim fluidom u nadkritičnom području uz ΔT_{pp}=5°C i N=7169 o/min. Iako ima neznatno veći stupanj korisnosti i neto snagu od iduće najbolje konfiguracije (R1234yf, podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=5689) ima znatno manje dimenzije turbine.

U tablicama 8 i 9 te na slici 26 su prikazane bitne geometrijske i pogonske veličine te parametri u karakterističnim točkama ciklusa za najbolji analizirani slučaj. To je slučaj maksimiziranja funkcije cilja $\eta_{plant,ex}$ sa R143a kao radnim fluidom u nadkritičnom području uz ΔT_{pp}=5°C i N ≠3000. Na slikama 27 - 29 prikazan je 3D-model rotora za najbolji slučaj konstruiran u programskom paketu SolidWorks. Za ostale kombinacije radnih fluida i parametara ciklusa tablice i pripadajući T-s dijagrami su dani u prilogu.

Tablica 8: Optimizirane veličine ORC ciklusa, funkcija cilja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (nadkritično, ΔTpp=5°C, N ≠3000)

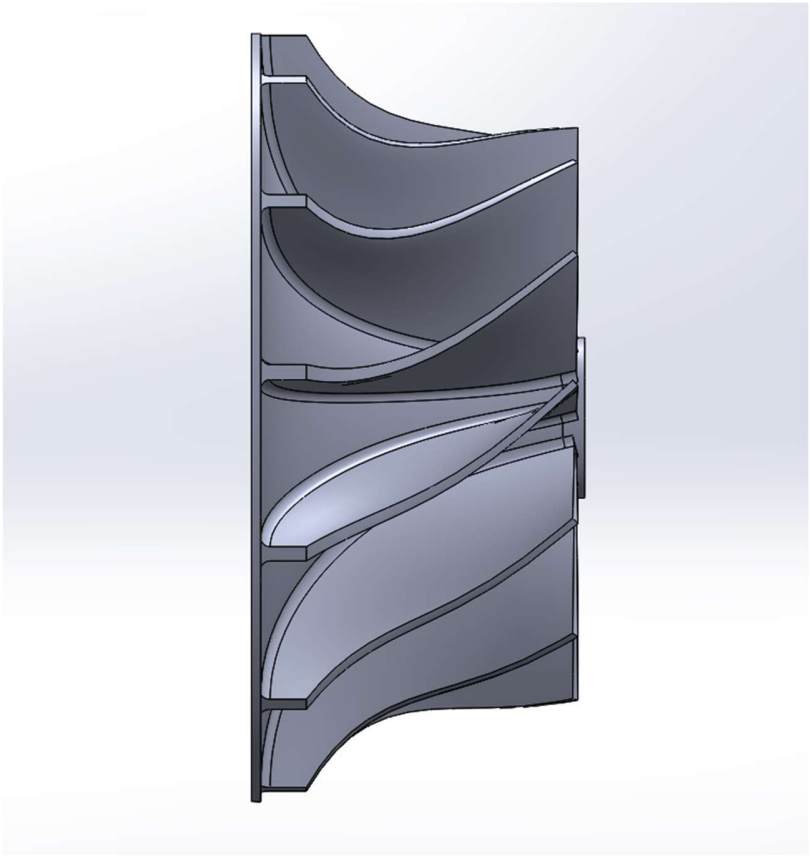
karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	N [o/min]
1	R143a	14,35	28	244,1	1,151	163,1	42,54	5,999	2376	7169
2	R143a	51,68	32,48	249,9	1,156	163,1				
5	R143a	51,68	102,6	428,7	1,673	163,1				
$5_{ul,st}$	R143a	50,25	100,9	428,1	1,673	163,1				
$5_{izl,st}$	R143a	30,41	71,39	419,4	1,676	163,1				
$5_{ul,rot}$	R143a	28,13	66,95	417,8	1,676	163,1				
$5_{izl,rot}$	R143a	14,35	34,07	405,8	1,684	163,1				
6	R143a	14,69	35,45	406,7	1,685	163,1				
7	R143a	14,35	30	400	1,665	163,1				
8	R143a	14,35	30	247,6	1,162	163,1				
9	Voda	20	120	505	1,673	94,38				
12	Voda	20	47	198,5	1,156	94,38				
13	Zrak	1	20	293,4	1,151	5269				
14	Zrak	1	20,11	293,5	1,162	5269				
15	Zrak	1	24,79	298,2	1,665	5269				
16	Zrak	1	25	298,4	1,685	5269				



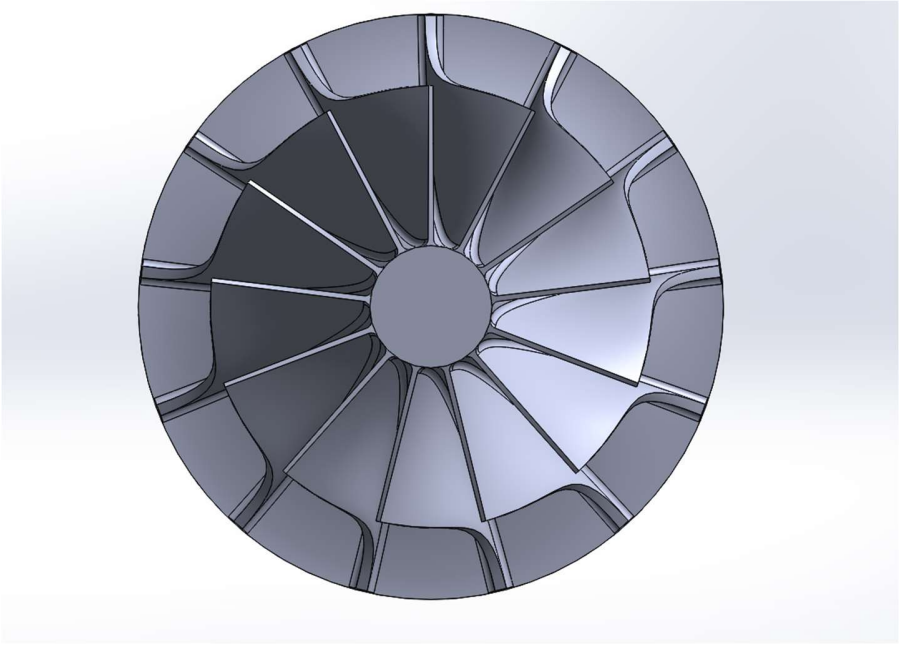
Slika 26: *T-s* dijagram za rezultate optimiranja iz tablice 8

Tablica 9: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

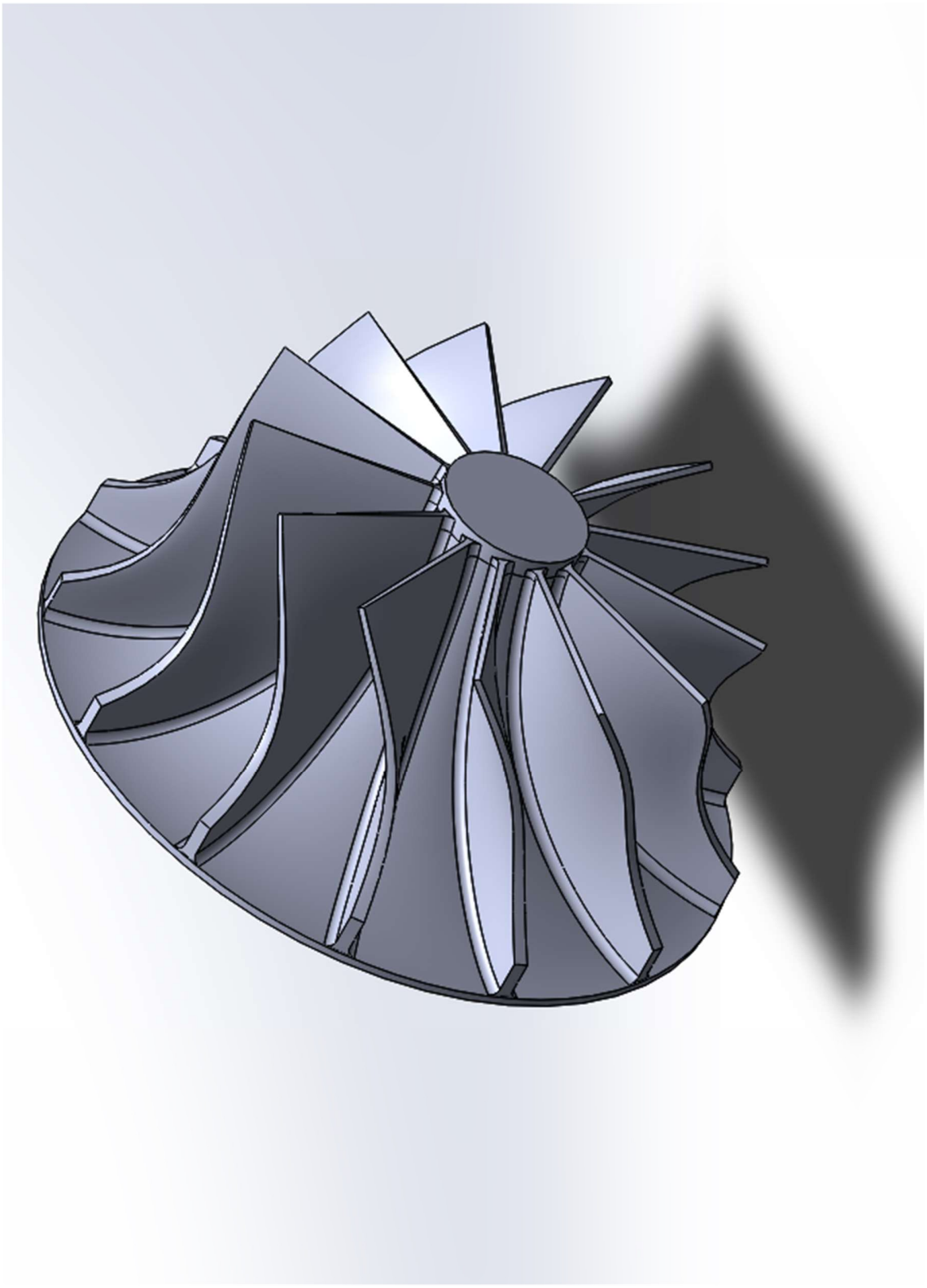
Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,2945
r_2 [m]	0,2417
r_3 [m]	0,2181
r_4 [m]	0,2055
r_{s5} [m]	0,1559
r_{h5} [m]	0,04315
r_{vol} [m]	0,05308
b_2 [m]	0,02453
b_3 [m]	0,02453
b_4 [m]	0,02453
Z [m]	0,1691
Z_r [-]	14
Z_s [-]	18
M_2 [-]	0,531
M_3 [-]	1,132
M_4 [-]	1,199
M_5 [-]	0,3028
η_t [%]	81,11



Slika 27: Rotor: pogled 1



Slika 28: Rotor: pogled 2



Slika 29: Rotor: pogled 3

5. ZAKLJUČAK

U završnom radu matematički model radijalne turbine opisan u poglavlju 2 napisan je u programskom paketu EES te uključen u model ORC ciklusa. Zatim je provedena optimizacija parametara turbine, odnosno ciklusa. Parametri za koje su se tražile optimalne vrijednosti su tlak p_5, stupanj pregrijanja ΔT_{SH} (za podkritični slučaj) i temperatura T_5 (nadkritični slučaj) te brzina vrtnje turbine N ukoliko nije zadana na 3000 o/min, dok su funkcije cilja koje su se maksimizirale eksergetski stupanj korisnosti postrojenja ($\eta_{plant,ex}$) te neto dobivena snaga (W_{net}).

Rezultati pokazuju da se maksimiziranjem $\eta_{plant,ex}$ ujedno dobije i maksimalni W_{net}. Postavljanjem temperaturne razlike ΔT_{pp} na 5°C dobiju se znatno veće vrijednosti funkcija cilja te dolazi do malog povećanja dimenzija turbine u odnosu na temperaturnu razliku od 10°C.

Konfiguracije u kojima je brzina vrtnje turbine zadana kao nezavisna varijabla optimizacije daju veće vrijednosti funkcija cilja nego konfiguracije u kojima je brzina vrtnje zadana na 3000 o/min. Optimalna vrijednost brzine vrtnje veća je od 3000 o/min za sve analizirane konfiguracije. Konfiguracije u kojima $N \neq 3000$ o/min, uz veći stupanj korisnosti i neto snagu, imaju i znatno manje gabarite turbine nego konfiguracije s N=3000 o/min, no zahtijevaju primjenu reduktora. Ekonomskom analizom trebalo bi odrediti jesu li troškovi ugradnje reduktora isplativi za dobiveno povećanje stupnja korisnosti i snage.

Za radni fluid R143a u nadkritičnom području rezultati pokazuju povećanje vrijednosti funkcija cilja te smanjenje dimenzija turbine, dok za R1234yf u nadkritičnom području dolazi do smanjenja dimenzija ali i smanjenja vrijednosti funkcija cilja u odnosu na podkritični slučaj. Za ostale radne fluide optimizacija u nadkritičnom području nije provedena jer nisu zadovoljili postavljene uvjete.

Za geotermalnu elektranu zadanih karakteristika, od razmatranih konfiguracija najveće vrijednosti stupnja korisnosti i neto snage ima konfiguracija sa R143a kao radnim fluidom u nadkritičnom području, uz ΔT_{pp}=5°C i N=7169 o/min. No ta konfiguracija zahtjeva primjenu reduktora. Ukoliko primjena reduktora nije prihvatljiva, najbolja konfiguracija je konfiguracija sa R1234yf kao radnim fluidom u podkritičnom području, uz ΔT_{pp}=5°C i N=3000 o/min.

LITERATURA

[1] Aungier, R. H.: *Turbine aerodynamics: Axial-flow and radial-inflow turbine design and analysis, 1st ed.*, New York, 2006.

[2] Balje, O. E.: *Turbomachines, A Guide to Design, Selection and Theory,* Wiley, New York, 1981.

[3] Wei, Z.: *Meanline analysis of radial inflow turbines at design and off-design conditions*, Carleton University, Ottawa, Ontario,Canada,2014, https://doi.org/10.22215/etd/2014-10546

[4] Rahbar, K.: *Development and optimization of small-scale radial inflow turbine for waste heat recovery with organic rankine cycle.* University of Birmingham. Ph.D., 2016.

[5] Glassman, A.: *Computer Program for Design Analysis of Radial-Inflow Turbines*, NASA, Washington, D. C., USA., 1976.

[6] Balje, O. E.: *Contribution to the Problem of Designing Radial Turbomachines,* Trans ASME 741451, 1952.

[7] Da Lio, L., Manente, G., Lazzaretto, A.: *A mean-line model to predict the design efficiency of radial inflow turbines in organic Rankine cycle (ORC) systems*, Applied Energy 205 (2017) 287 – 209, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.120

[8] Moustapha, H., Zelesky, M. F., Baines, N. C., Japikse, D.: *Axial and Radial Turbines, 1st ed.* White River Junction: Concepts NREC, 2003.

[9] Watanabe, I., Ariga, I., Mashimo, T.: *Effect of Dimensional Parameters of Impellers on Performance Characteristics of a Radial Inflow Turbine*, Paper No. 70-GT-90, ASME, New York, 1970.

[10] Li, S., Krivitzky, E. M., Qiu, X.: *Meanline Modeling of a Radial-Inflow Turbine Nozzle With Supersonic Expansion,* no. 49729. p. V02DT42A036, 2016.

[11] Ventura, C. A., Jacobs, P. A., Rowlands, A. S., Petrie-Repar, P., Sauret, E.: *Preliminary Design and Performance Estimation of Radial Inflow Turbines: An Automated Approach*, ASME. *J. Fluids Eng*. March 2012; 134(3): 031102. https://doi.org/10.1115/1.4006174

[12] Emery, J. C., Herrig, J., Erwin, J. R., Felix, A. R.: *Systematic two-dimensional cascade tests of NACA 65-series compressor blades at low speeds*, Technical report, NACA, Cranfiled, UK, 1957

[13] Nithesh, K.G., Chatterjee, D.: *Numerical prediction of the performance of radial inflow turbine designed for ocean thermal energy conversion system*, Applied Energy, Volume 167, 2016, Pages 1-16, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.033.

[14] Erbaş, M., Sofuoğlu, A., Biyikoglu, A., Uslan, I. (2013).: *Design and optimization of a low temperature organic rankine cycle and turbine,* ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). 6. 10.1115/IMECE2013-66727.

[15] Persky, R., Sauret, E.: *Loss models for on and off-design performance of radial inflow turbomachinery*, Applied Thermal Engineering, Volume 150, 2019, Pages 1066-1077, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.042

[16] Wasserbauer, C.A., Glassman, A.J.: *Fortran Program for Predicting Off-design Performance of Radial-inflow Turbines*, Tech. Rep., National Aeronautics and Space Administration, 1975.

[17] Dambach, R., Hodson, H.P., Huntsman, I.: *An experimental study of tip clearance flow in a radial inflow turbine*, ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, American Society of Mechanical Engineers, 1998, pp. V001T01A110–V001T01A110.

[18] Whitfield, A., Baines, N.C.: *Design of Radial Turbomachines*, Longman Scientific and Technical, Harlow, England, 1990.

[19] Baines, N. C.: *Radial Turbines, an integrated design approach*, 6th European conference on Turbomachinery- Fluid Dynamics and Thermodynamics., 2005.

[20] Daily, J.W., Nece, R.E.: *Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating disks*, J. Basic Eng. 82 (1) (1960) 217, https://doi.org/10.1115/1.3662532

[21] Suhrmann, J. F., Peitsch, D., Gugau, M., Heuer, T., Tomm, U.: *Validation and Development of Loss Models for Small Size Radial Turbines*, no. 44021. pp. 1937–1949, 2010.

[22] Vilim, R.B.: *Development and Validation of a Radial Inflow Turbine Model for Simulation of the SNL S-CO 2 Split-Flow Loop,* Nuclear Engineering Division, Tech. Rep. ANL-ARC-195, Argonne National Lab, 2011.

[23] Glassman, A. J.: *Enhanced Analysis and User Manual for Radial Inflow Turbine Design Code*, RTD NASA-CR-19545, 1995.

[24] Qi, J., Reddell, T., Qin, K., Hooman, K., Jahn, I. H. J.: *Supercritical CO_2 Radial Turbine Design Performance as a Function of Turbine Size Parameters*, ASME. *J. Turbomach*. August 2017; 139(8): 081008. https://doi.org/10.1115/1.4035920

[25] Deng, Q., Shao, S., Fu, L., Luan, H., Feng, Z.: *An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines—Part I: Automated Preliminary Design*, Appl. Sci. 2018*,* 8*, 2038*. https://doi.org/10.3390/app8112038

[26] Rodgers, C., and Geiser, R.: *Performance of a High-Efficiency Radial/Axial Turbine,* ASME, J.Turbomach., April 1987, 109(2):151154. https://doi.org/10.1115/1.3262077

[27] Marscher, W. D.: *Structural Analysis: Stresses due to Centrifugal, Pressure and Thermal Loads in Radial Turbines*, von Kármán Institute for Fluid Dynamics, VKI Lecture Series, Radial Turbines, 1992., SEE N93-10050 01-34.

[28] Blevins, R. D., Plunkett, R.: *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, ASME. *J. Appl. Mech*. June 1980; 47(2): 461–462. https://doi.org/10.1115/1.3153712

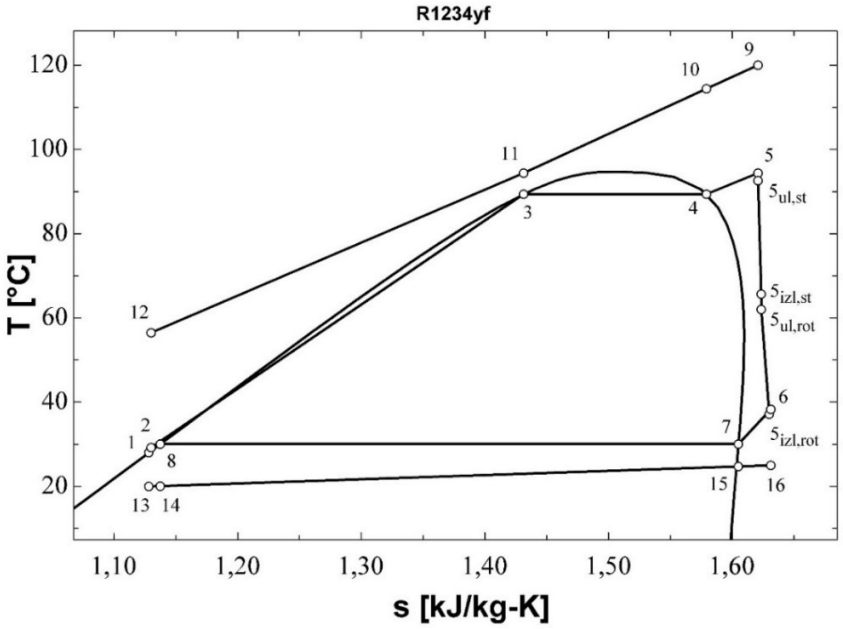
[29] Rahbar, K., Mahmoud, S., Al-Dadah, R. K., Moazami, N.: *Parametric analysis and optimization of a small-scale radial turbine for Organic Rankine Cycle*, Energy, Volume 83, 2015, Pages 696-711, ISSN 0360-5442, https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.079.

PRILOZI

1. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R1234yf

Tablica 10: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	148					
2	R1234yf	30,42	29,23	239,3	1,13	148					
3	R1234yf	30,42	89,37	340,5	1,431	148					
4	R1234yf	30,42	89,37	394,3	1,579	148					
5	R1234yf	30,42	94,38	409,5	1,621	148					
$5_{ul,st}$	R1234yf	29,5	92,6	409,1	1,621	148					
$5_{izl,st}$	R1234yf	17,28	65,67	401,6	1,624	148					
$5_{ul,rot}$	R1234yf	15,9	62	400,1	1,624	148					
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	37,12	389,4	1,63	148					
6	R1234yf	8,034	38,3	390,3	1,631	148	42,1	5,979	2371	5,004	5689
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	148					
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	148					
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38					
10	Voda	20	114,4	481,2	1,465	94,38					
11	Voda	20	94,37	396,8	1,241	94,38					
12	Voda	20	56,48	238,1	0,7858	94,38					
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	4490					
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	4490					
15	Zrak	1	24,72	298,2	6,863	4490					
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	4490					



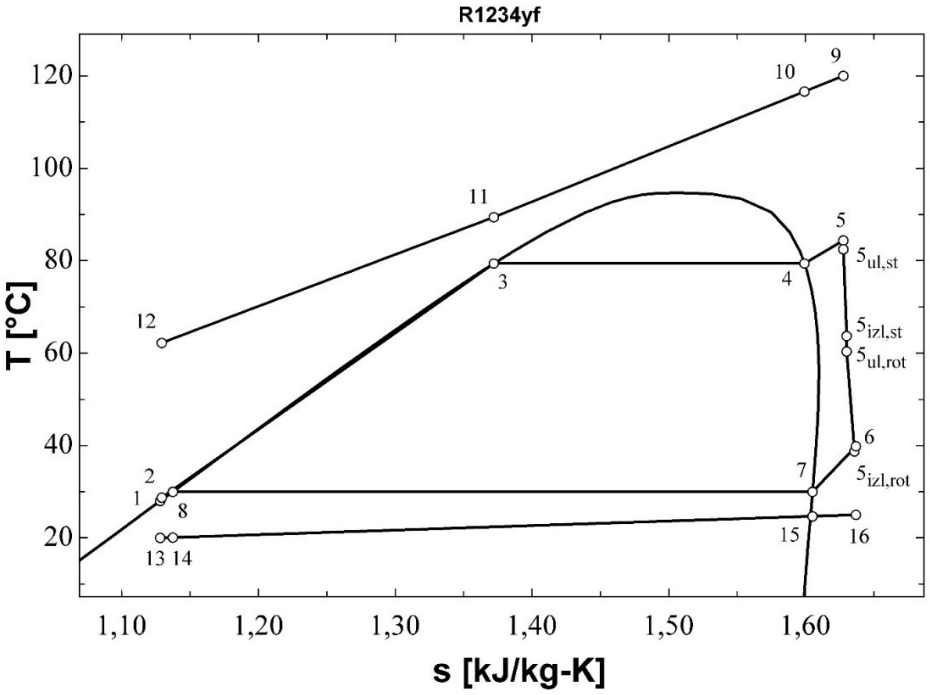
Slika 30: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 10

Tablica 11: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,3471
r_2 [m]	0,2881
r_3 [m]	0,2598
r_4 [m]	0,2445
r_{s5} [m]	0,1883
r_{h5} [m]	0,05134
r_{vol} [m]	0,0585
b_2 [m]	0,02925
b_3 [m]	0,02925
b_4 [m]	0,02925
Z [m]	0,2055
Z_r [-]	14
Z_s [-]	18
M_2 [-]	0,6511
M_3 [-]	1,179
M_4 [-]	1,239
M_5 [-]	0,3126
η_t [%]	80,84

Tablica 12: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (podkritično, ΔTpp=10°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	134,6	34,34	4,9	1945	5	5606
2	R1234yf	24,89	28,71	238,5	1,129	134,6					
3	R1234yf	24,89	79,4	318,4	1,372	134,6					
4	R1234yf	24,89	79,4	398,9	1,599	134,6					
5	R1234yf	24,89	84,4	408,9	1,628	134,6					
$5_{ul,st}$	R1234yf	23,98	82,46	408,4	1,628	134,6					
$5_{izl,st}$	R1234yf	15,94	63,72	402,4	1,63	134,6					
$5_{ul,rot}$	R1234yf	14,72	60,39	401	1,63	134,6					
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	38,77	391,2	1,636	134,6					
6	R1234yf	8,021	39,86	392	1,637	134,6					
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	134,6					
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	134,6					
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38					
10	Voda	20	116,6	490,7	1,489	94,38					
11	Voda	20	89,4	375,9	1,184	94,38					
12	Voda	20	62,22	262,1	0,8579	94,38					
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	4130					
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	4130					
15	Zrak	1	24,67	298,1	6,863	4130					
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	4130					



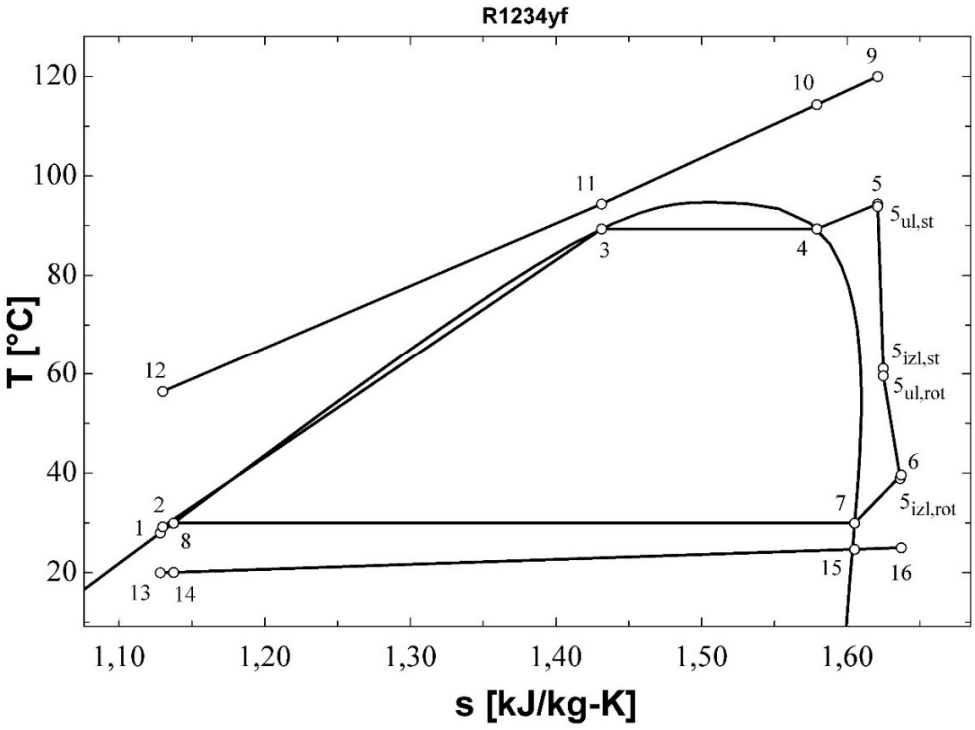
Slika 31: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 12

Tablica 13: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

Varijabla	Iznos
r_1 [m]	0,346
r_2 [m]	0,2835
r_3 [m]	0,2535
r_4 [m]	0,2367
r_{s5} [m]	0,1813
r_{h5} [m]	0,04971
r_{vol} [m]	0,06262
b_2 [m]	0,03165
b_3 [m]	0,03165
b_4 [m]	0,03165
Z [m]	0,1974
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0,6568
M_3 [-]	1,076
M_4 [-]	1,143
M_5 [-]	0,3025
η_t [%]	81,51

Tablica 14: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	148					
2	R1234yf	30,42	29,23	239,3	1,13	148					
3	R1234yf	30,42	89,37	340,5	1,431	148					
4	R1234yf	30,42	89,37	394,3	1,579	148					
5	R1234yf	30,42	94,37	409,5	1,621	148					
$5_{ul,st}$	R1234yf	30,16	93,88	409,4	1,621	148					
$5_{izl,st}$	R1234yf	15,48	61,16	400,1	1,625	148					
$5_{ul,rot}$	R1234yf	14,95	59,66	399,5	1,625	148					
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	38,95	391,4	1,636	148					
6	R1234yf	7,953	39,65	391,9	1,637	148					
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	148	37,76	5,363	2127	5,001	3000
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	148					
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38					
10	Voda	20	114,4	481,2	1,465	94,38					
11	Voda	20	94,37	396,8	1,241	94,38					
12	Voda	20	56,48	238,1	0,7857	94,38					
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	4593					
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	4593					
15	Zrak	1	24,67	298,1	6,863	4593					
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	4593					



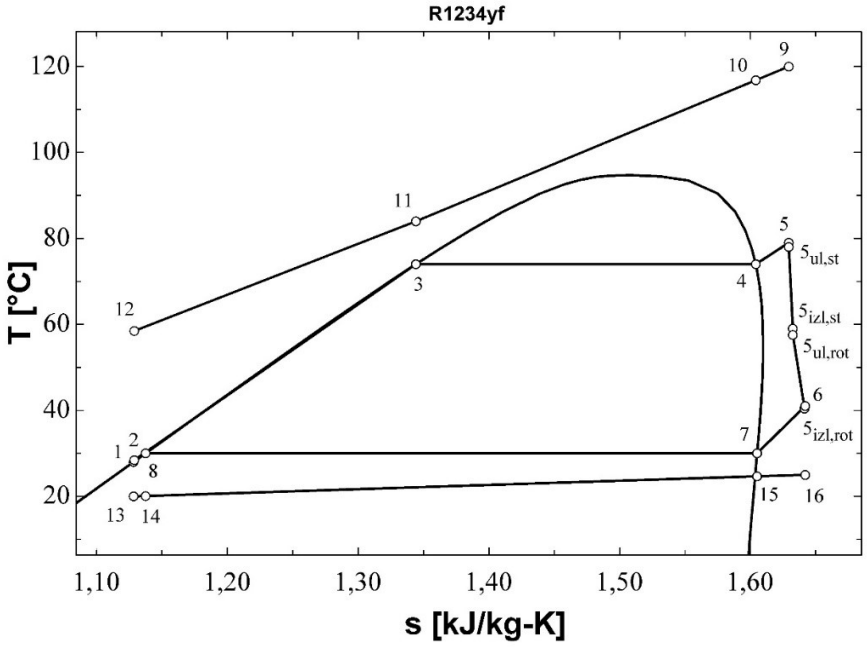
Slika 32: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 14

Tablica 15: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Varijabla	Iznos
r_1 [m]	0,5088
r_2 [m]	0,4538
r_3 [m]	0,4211
r_4 [m]	0,4116
r_{s5} [m]	0,2296
r_{h5} [m]	0,08644
r_{vol} [m]	0,05544
b_2 [m]	0,02278
b_3 [m]	0,02278
b_4 [m]	0,02278
Z [m]	0,2148
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0,6712
M_3 [-]	1,256
M_4 [-]	1,28
M_5 [-]	0,2454
η_t [%]	78,47

Tablica 16: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	143,9	31,09	4,423	1755	5,001	3000
2	R1234yf	22,25	28,45	238,2	1,129	143,9					
3	R1234yf	22,25	73,99	308,2	1,344	143,9					
4	R1234yf	22,25	73,99	398,9	1,604	143,9					
5	R1234yf	22,25	78,99	407,8	1,629	143,9					
$5_{ul,st}$	R1234yf	21,81	78	407,4	1,629	143,9					
$5_{izl,st}$	R1234yf	14,03	59,05	400,9	1,632	143,9					
$5_{ul,rot}$	R1234yf	13,51	57,55	400,3	1,632	143,9					
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	40,42	392,9	1,641	143,9					
6	R1234yf	7,94	41,04	393,4	1,642	143,9					
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	143,9					
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	143,9					
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38					
10	Voda	20	116,8	491,6	1,492	94,38					
11	Voda	20	83,99	353,2	1,121	94,38					
12	Voda	20	58,47	246,4	0,8109	94,38					
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	4457					
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	4457					
15	Zrak	1	24,63	298,1	6,863	4457					
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	4457					



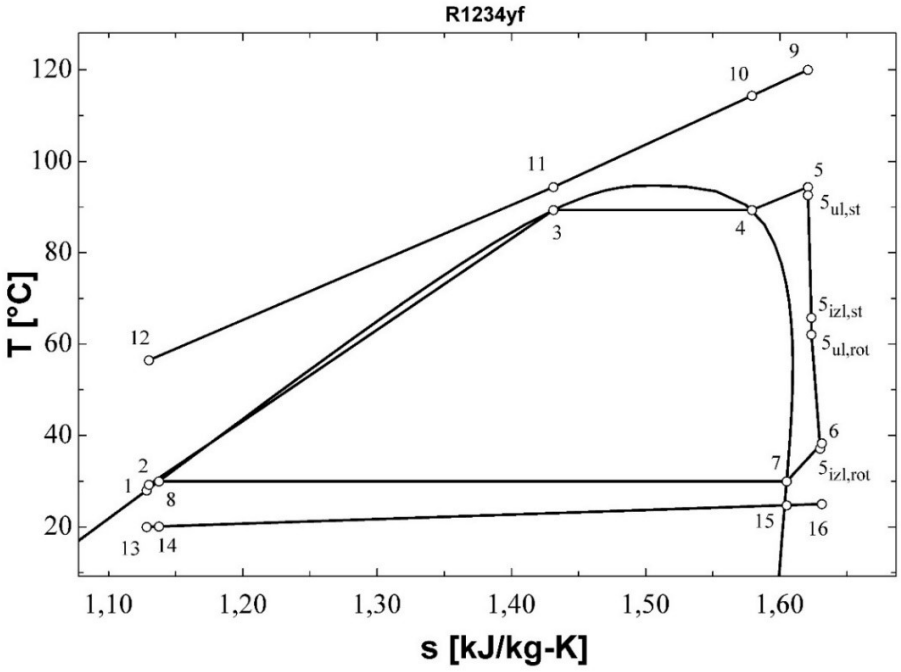
Slika 33: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 16

Tablica 17: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000)

Varijabla	Iznos
r_1 [m]	0,4986
r_2 [m]	0,4344
r_3 [m]	0,4008
r_4 [m]	0,3887
r_{s5} [m]	0,2281
r_{h5} [m]	0,08163
r_{vol} [m]	0,06405
b_2 [m]	0,02819
b_3 [m]	0,02819
b_4 [m]	0,02819
Z [m]	0,2198
Z_r [-]	15
Z_s [-]	20
M_2 [-]	0,7062
M_3 [-]	1,113
M_4 [-]	1,144
M_5 [-]	0,2329
η_t [%]	79,88

Tablica 18: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	148					
2	R1234yf	30,42	29,23	239,3	1,13	148					
3	R1234yf	30,42	89,37	340,5	1,431	148					
4	R1234yf	30,42	89,37	394,3	1,579	148					
5	R1234yf	30,42	94,38	409,5	1,621	148					
$5_{ul,st}$	R1234yf	29,5	92,6	409,1	1,621	148					
$5_{izl,st}$	R1234yf	17,32	65,79	401,6	1,624	148					
$5_{ul,rot}$	R1234yf	15,93	62,08	400,2	1,624	148					
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	37,13	389,4	1,63	148					
6	R1234yf	8,036	38,31	390,3	1,631	148					
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	148	42,09	5,979	2371	5,01	5739
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	148					
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38					
10	Voda	20	114,4	481,2	1,465	94,38					
11	Voda	20	94,37	396,8	1,241	94,38					
12	Voda	20	56,49	238,1	0,7859	94,38					
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	4490					
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	4490					
15	Zrak	1	24,72	298,2	6,863	4490					
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	4490					



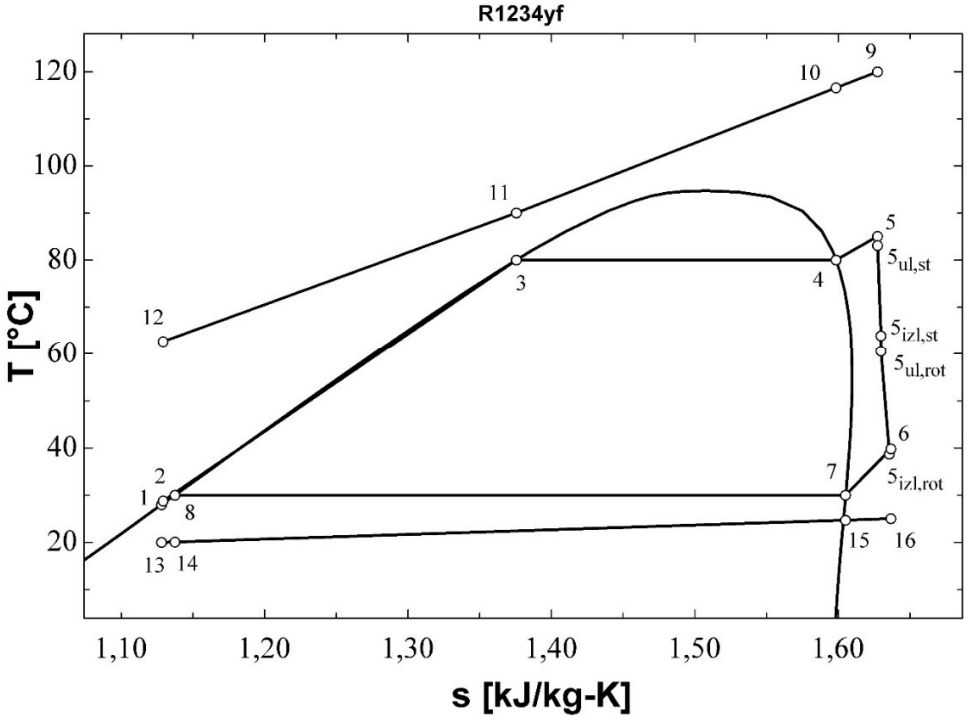
Slika 34: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 18

Tablica 19: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje *Wnet*; R1234yf (podkritično, ΔTpp=5°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,3453
r_2 [m]	0,2864
r_3 [m]	0,2581
r_4 [m]	0,2427
r_{s5} [m]	0,1877
r_{h5} [m]	0,05097
r_{vol} [m]	0,05857
b_2 [m]	0,02931
b_3 [m]	0,02931
b_4 [m]	0,02931
Z [m]	0,2052
Z_r [-]	14
Z_s [-]	18
M_2 [-]	0,6502
M_3 [-]	1,176
M_4 [-]	1,238
M_5 [-]	0,314
η_t [%]	80,8

Tablica 20: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	133,4					
2	R1234yf	25,22	28,74	238,6	1,129	133,4					
3	R1234yf	25,22	80,06	319,7	1,376	133,4					
4	R1234yf	25,22	80,06	398,8	1,598	133,4					
5	R1234yf	25,22	85,07	409,1	1,627	133,4					
$5_{ul,st}$	R1234yf	24,32	83,14	408,5	1,627	133,4					
$5_{izl,st}$	R1234yf	16,04	63,93	402,4	1,63	133,4					
$5_{ul,rot}$	R1234yf	14,81	60,57	401	1,63	133,4					
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	38,72	391,1	1,636	133,4					
6	R1234yf	8,023	39,82	391,9	1,637	133,4					
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	133,4	34,32	4,9	1945	5,01	5671
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	133,4					
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38					
10	Voda	20	116,6	490,5	1,489	94,38					
11	Voda	20	90,06	378,7	1,192	94,38					
12	Voda	20	62,7	264,1	0,8638	94,38					
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	4093					
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	4093					
15	Zrak	1	24,67	298,1	6,863	4093					
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	4093					



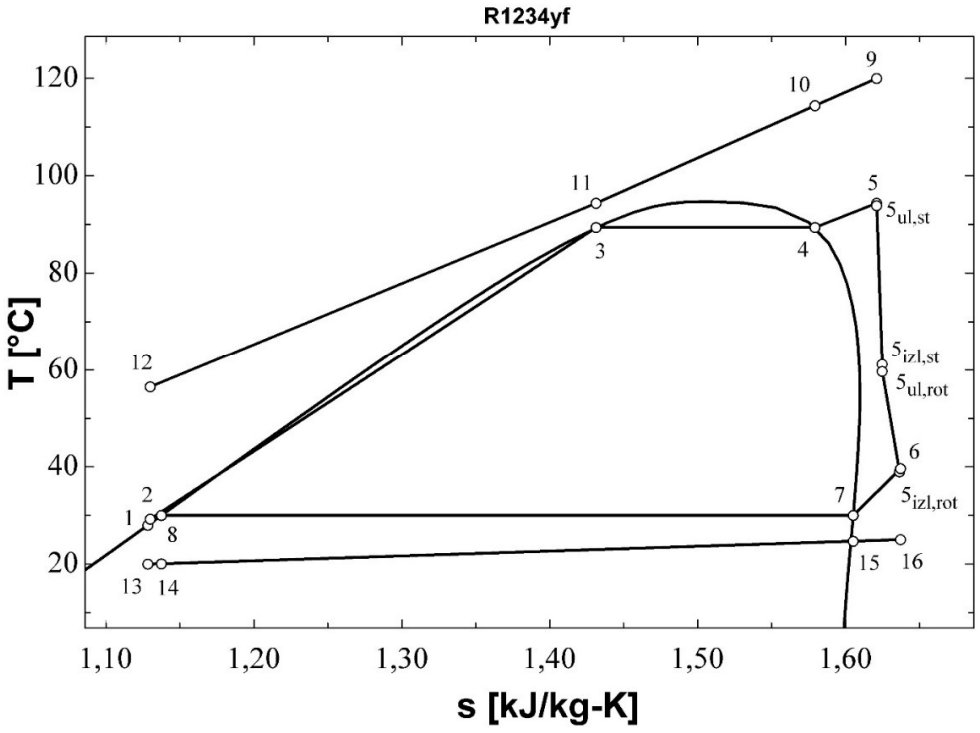
Slika 35: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 20

Tablica 21: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,3431
r_2 [m]	0,2814
r_3 [m]	0,2515
r_4 [m]	0,235
r_{s5} [m]	0,1877
r_{h5} [m]	0,04935
r_{vol} [m]	0,06193
b_2 [m]	0,03124
b_3 [m]	0,03124
b_4 [m]	0,03124
Z [m]	0,1962
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0,6559
M_3 [-]	1,082
M_4 [-]	1,149
M_5 [-]	0,3036
η_t [%]	81,5

Tablica 22: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	148					
2	R1234yf	30,42	29,23	239,3	1,13	148					
3	R1234yf	30,42	89,37	340,5	1,431	148					
4	R1234yf	30,42	89,37	394,3	1,579	148					
5	R1234yf	30,42	94,37	409,5	1,621	148					
$5_{ul,st}$	R1234yf	30,16	93,88	409,4	1,621	148					
$5_{izl,st}$	R1234yf	15,48	61,15	400,1	1,625	148					
$5_{ul,rot}$	R1234yf	14,95	59,66	399,5	1,625	148					
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	38,95	391,4	1,636	148					
6	R1234yf	7,953	39,65	391,9	1,637	148					
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	148	37,76	5,363	2127	5	3000
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	148					
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38					
10	Voda	20	114,4	481,2	1,465	94,38					
11	Voda	20	94,37	396,8	1,241	94,38					
12	Voda	20	56,48	238,1	0,7857	94,38					
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	4539					
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	4539					
15	Zrak	1	24,67	298,1	6,863	4539					
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	4539					



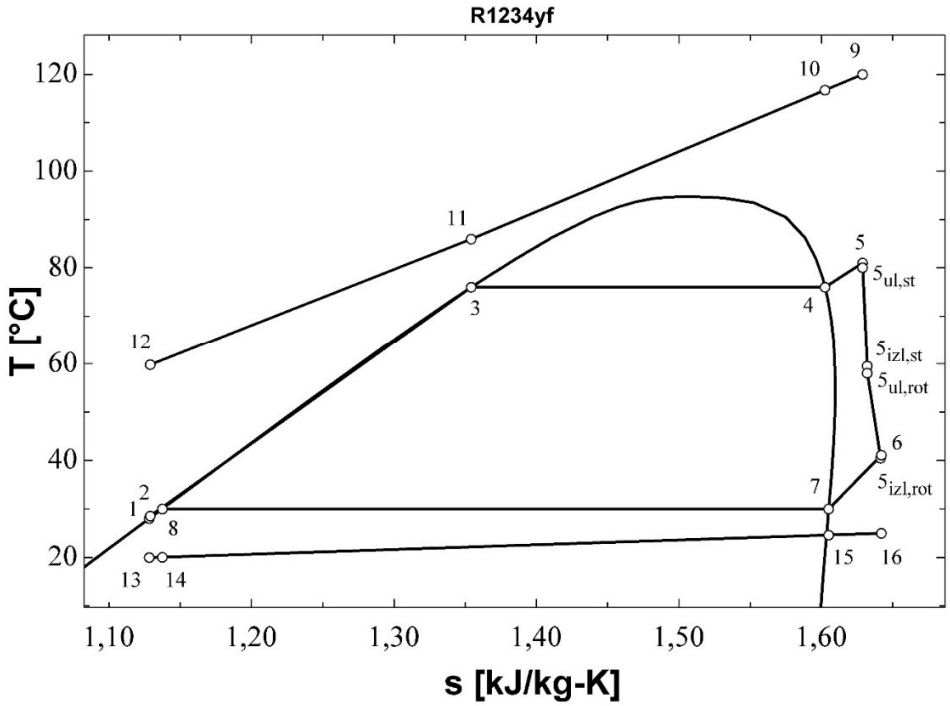
Slika 36: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 22

Tablica 23: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,5088
r_2 [m]	0,4538
r_3 [m]	0,4211
r_4 [m]	0,4116
r_{s5} [m]	0,2296
r_{h5} [m]	0,08664
r_{vol} [m]	0,05544
b_2 [m]	0,02278
b_3 [m]	0,02278
b_4 [m]	0,02278
Z [m]	0,2148
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0,6712
M_3 [-]	1,256
M_4 [-]	1,28
M_5 [-]	0,2454
η_t [%]	78,47

Tablica 24: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	140,5	31,05	4,422	1755	5	3000
2	R1234yf	23,18	28,54	238,3	1,129	140,5					
3	R1234yf	23,18	75,96	311,9	1,354	140,5					
4	R1234yf	23,18	75,96	399	1,603	140,5					
5	R1234yf	23,18	80,96	408,2	1,629	140,5					
$5_{ul,st}$	R1234yf	22,77	80,05	408	1,629	140,5					
$5_{izl,st}$	R1234yf	14,23	59,52	401,1	1,632	140,5					
$5_{ul,rot}$	R1234yf	13,71	58,04	400,4	1,632	140,5					
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	40,47	393	1,642	140,5					
6	R1234yf	7,941	41,1	393,5	1,642	140,5					
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	140,5					
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	140,5					
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38					
10	Voda	20	116,8	491,3	1,491	94,38					
11	Voda	20	85,96	361,5	1,144	94,38					
12	Voda	20	59,81	252	0,8277	94,38					
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	4354					
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	4354					
15	Zrak	1	24,62	298,1	6,863	4354					
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	4354					



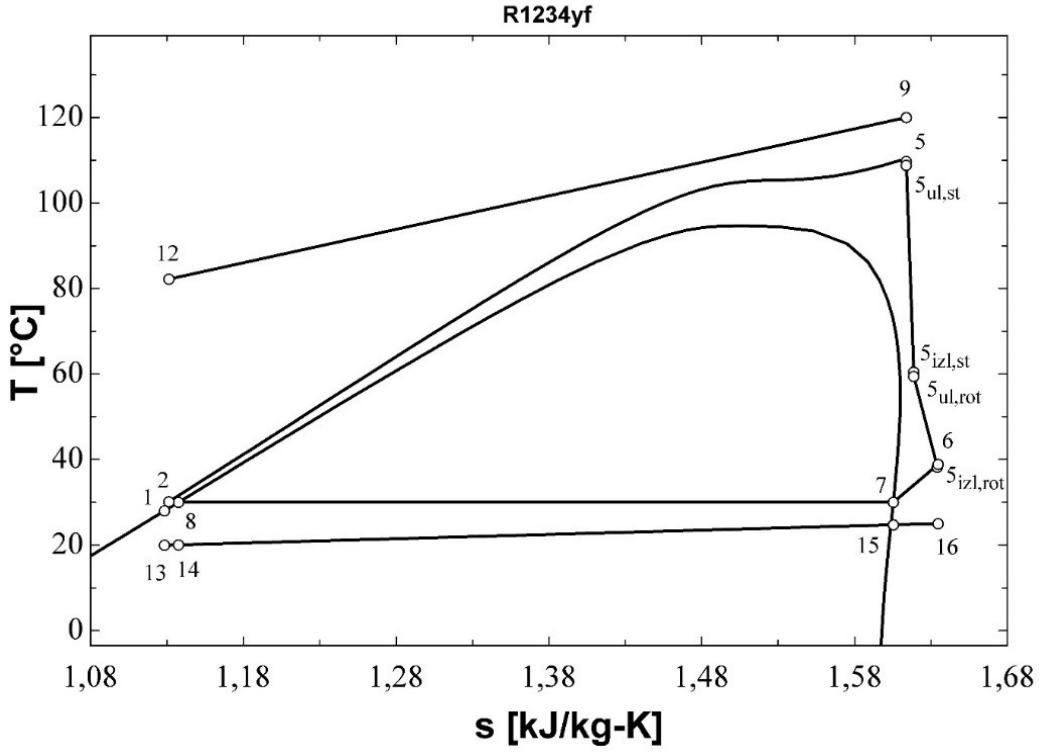
Slika 37: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 24

Tablica 25: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (podkritično, ΔTpp=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,4968
r_2 [m]	0,4348
r_3 [m]	0,4031
r_4 [m]	0,3917
r_{s5} [m]	0,2276
r_{h5} [m]	0,08226
r_{vol} [m]	0,06169
b_2 [m]	0,02684
b_3 [m]	0,02684
b_4 [m]	0,02684
Z [m]	0,218
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0,7087
M_3 [-]	1,135
M_4 [-]	1,165
M_5 [-]	0,2339
η_t [%]	79,12

Tablica 26: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	99,32				
2	R1234yf	40,23	30,15	240,5	1,131	99,32				
5	R1234yf	40,23	109,7	409,4	1,611	99,32				
$5_{ul,st}$	R1234yf	39,51	108,6	409,2	1,611	99,32				
$5_{izl,st}$	R1234yf	18,92	67,62	399,7	1,614	99,32				
$5_{ul,rot}$	R1234yf	17,34	63,5	398,3	1,614	99,32				
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	34,51	386,6	1,621	99,32				
6	R1234yf	8,051	35,78	387,5	1,622	99,32	30,11	4,358	1734	7485
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	99,32				
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	99,32				
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38				
12	Voda	20	78	328,1	1,05	94,38				
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	2959				
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	2959				
15	Zrak	1	24,81	298,3	6,863	2959				
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	2959				



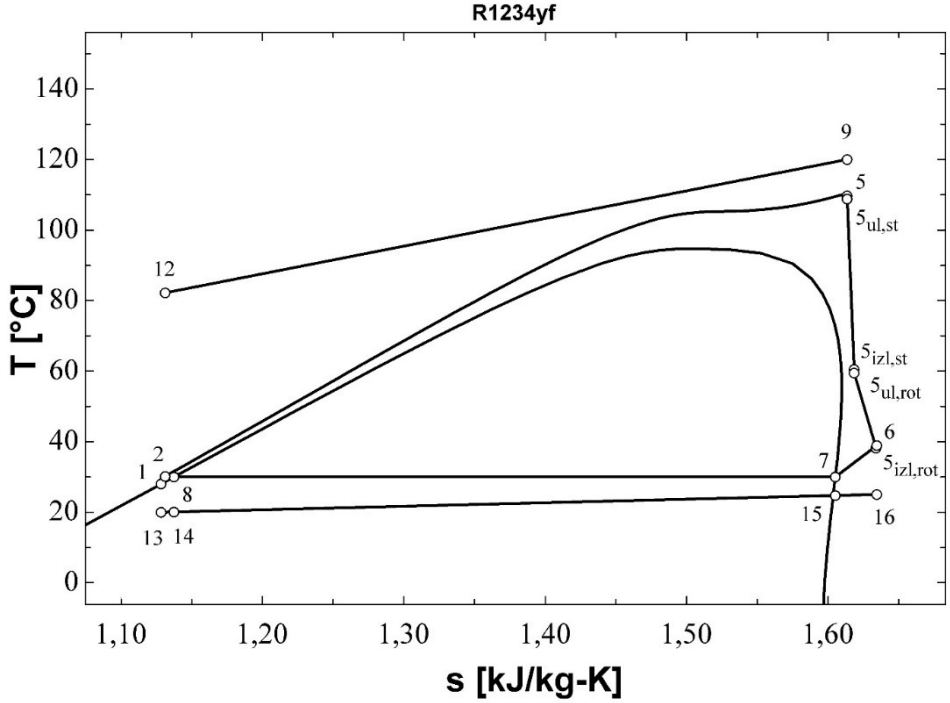
Slika 38: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 26

Tablica 27: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,2724
r_2 [m]	0,227
r_3 [m]	0,2048
r_4 [m]	0,194
r_{s5} [m]	0,1508
r_{h5} [m]	0,04073
r_{vol} [m]	0,04504
b_2 [m]	0,02081
b_3 [m]	0,02081
b_4 [m]	0,02081
Z [m]	0,1651
Z_r [-]	14
Z_s [-]	18
M_2 [-]	0,5052
M_3 [-]	1,292
M_4 [-]	1,346
M_5 [-]	0,3254
η_t [%]	80,73

Tablica 28: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	100,6				
2	R1234yf	40,02	30,13	240,5	1,131	100,6				
5	R1234yf	40,02	109,3	409,2	1,61	100,6				
$5_{ul,st}$	R1234yf	39,99	109,3	409,2	1,61	100,6				
$5_{izl,st}$	R1234yf	15,97	60,17	397,4	1,615	100,6				
$5_{ul,rot}$	R1234yf	15,57	59,03	397	1,615	100,6				
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	37,12	389,4	1,63	100,6				
6	R1234yf	7,952	37,82	389,9	1,631	100,6				
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	100,6	25,93	3,751	1492	3000
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	100,6				
9	Voda	20	120	505	1,526	94,38				
12	Voda	20	77,5	326	1,044	94,38				
13	Zrak	1	20	293,4	6,847	3046				
14	Zrak	1	20,06	293,5	6,847	3046				
15	Zrak	1	24,73	298,2	6,863	3046				
16	Zrak	1	25	298,4	6,864	3046				



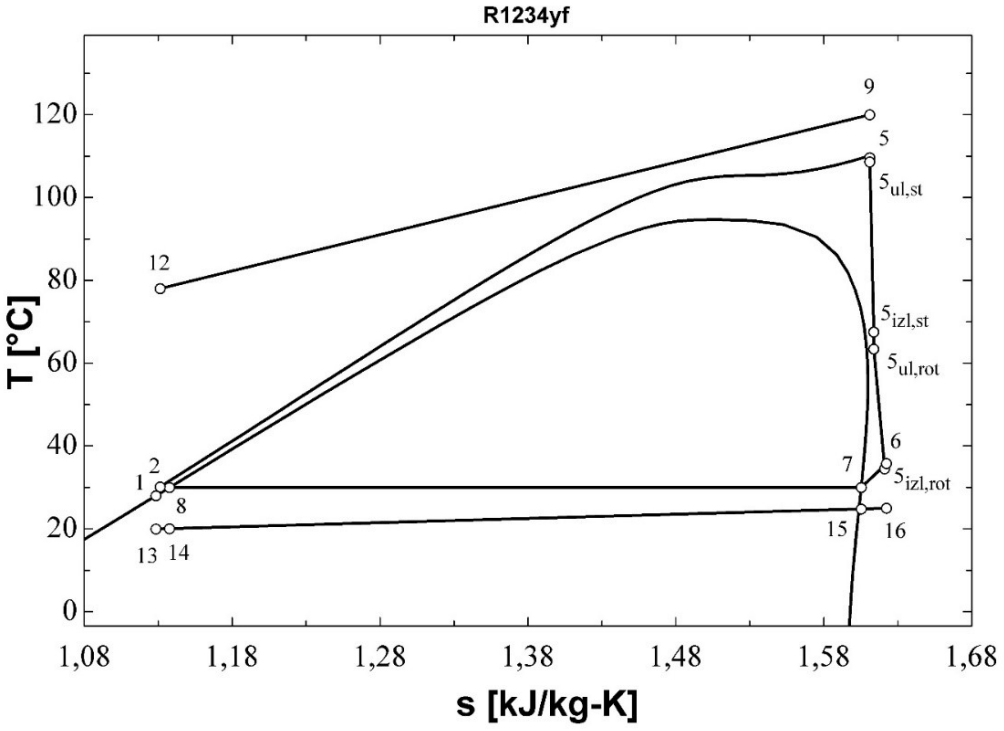
Slika 39: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 28

Tablica 29: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,4863
r_2 [m]	0,4418
r_3 [m]	0,4109
r_4 [m]	0,405
r_{s5} [m]	0,1954
r_{h5} [m]	0,08506
r_{vol} [m]	0,04468
b_2 [m]	0,01464
b_3 [m]	0,01464
b_4 [m]	0,01464
Z [m]	0,1656
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0,4745
M_3 [-]	1,354
M_4 [-]	1,369
M_5 [-]	0,2452
η_t [%]	76,44

Tablica 30: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	99,32	30,11	4,358	1734	7445
2	R1234yf	40,24	30,15	240,5	1,131	99,32				
5	R1234yf	40,24	109,7	409,4	1,611	99,32				
$5_{ul,st}$	R1234yf	39,52	108,6	409,2	1,611	99,32				
$5_{izl,st}$	R1234yf	18,89	67,53	399,7	1,614	99,32				
$5_{ul,rot}$	R1234yf	17,32	63,44	398,3	1,614	99,32				
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	34,51	386,6	1,621	99,32				
6	R1234yf	8,05	35,77	387,5	1,622	99,32				
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	99,32				
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	99,32				
9	Voda	20	120	505	1,611	94,38				
12	Voda	20	78	328,1	1,131	94,38				
13	Zrak	1	20	20	1,128	2959				
14	Zrak	1	20,06	20,06	1,137	2959				
15	Zrak	1	24,81	24,81	1,605	2959				
16	Zrak	1	25	25	1,622	2959				



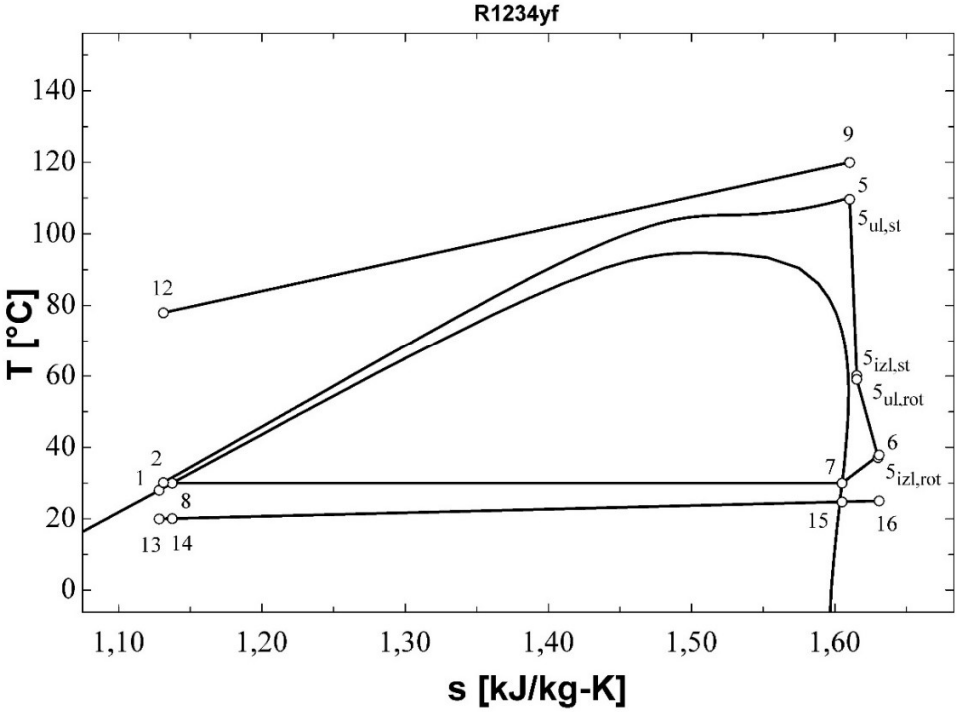
Slika 40: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 30

Tablica 31: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,2734
r_2 [m]	0,2278
r_3 [m]	0,2056
r_4 [m]	0,1948
r_{s5} [m]	0,151
r_{h5} [m]	0,04091
r_{vol} [m]	0,04504
b_2 [m]	0,02079
b_3 [m]	0,02079
b_4 [m]	0,02079
Z [m]	0,1652
Z_r [-]	14
Z_s [-]	18
M_2 [-]	0,5052
M_3 [-]	1,293
M_4 [-]	1,347
M_5 [-]	0,3246
η_t [%]	80,75

Tablica 32: Rezultati optimiziranja W_{net} za R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	N [o/min]
1	R1234yf	7,835	28	237,6	1,128	99,39				
2	R1234yf	40,3	30,16	240,6	1,131	99,39				
5	R1234yf	40,3	109,7	409,3	1,611	99,39				
$5_{ul,st}$	R1234yf	40,27	109,7	409,3	1,611	99,39				
$5_{izl,st}$	R1234yf	15,99	60,23	397,5	1,615	99,39				
$5_{ul,rot}$	R1234yf	15,59	59,1	397	1,615	99,39				
$5_{izl,rot}$	R1234yf	7,835	37,17	389,5	1,63	99,39				
6	R1234yf	7,952	37,87	390	1,631	99,39				
7	R1234yf	7,835	30	381,8	1,605	99,39	25,61	3,706	1475	3000
8	R1234yf	7,835	30	239,4	1,137	99,39				
9	Voda	20	120	505	1,611	94,38				
12	Voda	20	78	328,1	1,131	94,38				
13	Zrak	1	20	293,4	1,128	3010				
14	Zrak	1	20,06	293,5	1,137	3010				
15	Zrak	1	24,73	298,2	1,605	3010				
16	Zrak	1	25	298,4	1,631	3010				



Slika 41: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 32

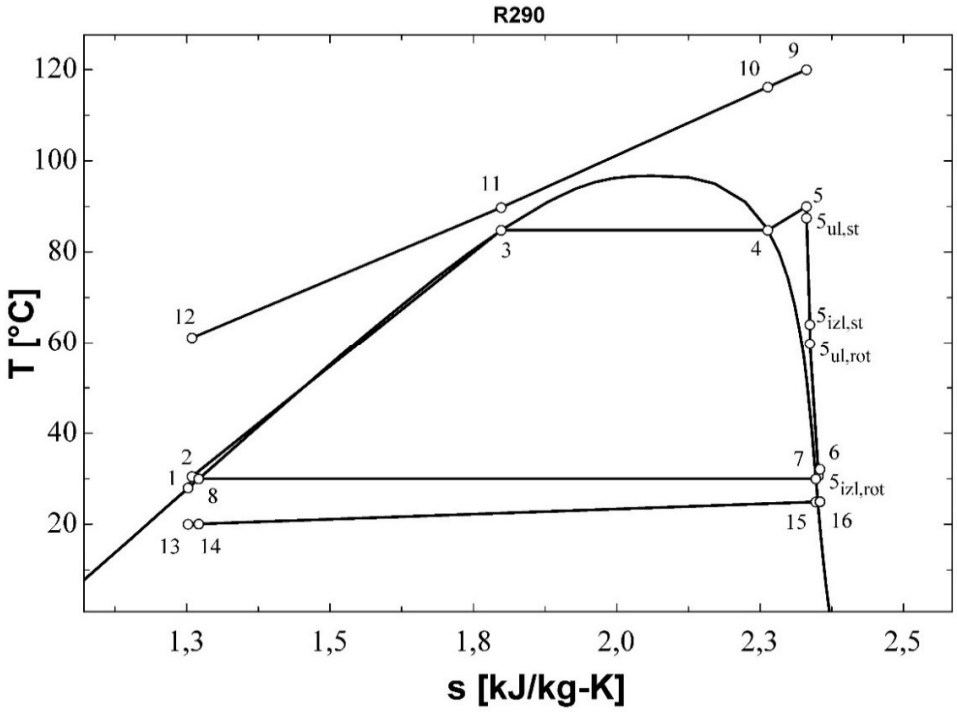
Tablica 33: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R1234yf (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0,4857
r_2 [m]	0,4416
r_3 [m]	0,4107
r_4 [m]	0,405
r_{s5} [m]	0,1945
r_{h5} [m]	0,08505
r_{vol} [m]	0,04427
b_2 [m]	0,01443
b_3 [m]	0,01443
b_4 [m]	0,01443
Z [m]	0,1641
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0,4726
M_3 [-]	1,357
M_4 [-]	1,372
M_5 [-]	0,2452
η_t [%]	76,36

2. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R290

Tablica 34: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R290	10.79	28	273.8	1.253	63.17					
2	R290	34.22	30.51	280.6	1.26	63.17					
3	R290	34.22	84.75	459.8	1.799	63.17					
4	R290	34.22	84.75	626.3	2.264	63.17					
5	R290	34.22	89.96	650.5	2.331	63.17					
$5_{ul,st}$	R290	32.91	87.43	648.9	2.331	63.17					
$5_{izl,st}$	R290	22.1	64.05	634.4	2.337	63.17					
$5_{ul,rot}$	R290	20.43	59.74	631	2.337	63.17					
$5_{izl,rot}$	R290	10.79	30.63	606.9	2.352	63.17					
6	R290	11.06	32.11	608.9	2.354	63.17					
7	R290	10.79	30	605.5	2.347	63.17	35.11	5.005	1986	5.211	11898
8	R290	10.79	30	279.3	1.271	63.17					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	116.2	488.8	1.485	94.38					
11	Voda	20	89.75	377.4	1.188	94.38					
12	Voda	20	61.12	257.5	0.8442	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4206					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4206					
15	Zrak	1	24.95	298.4	6.864	4206					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4206					



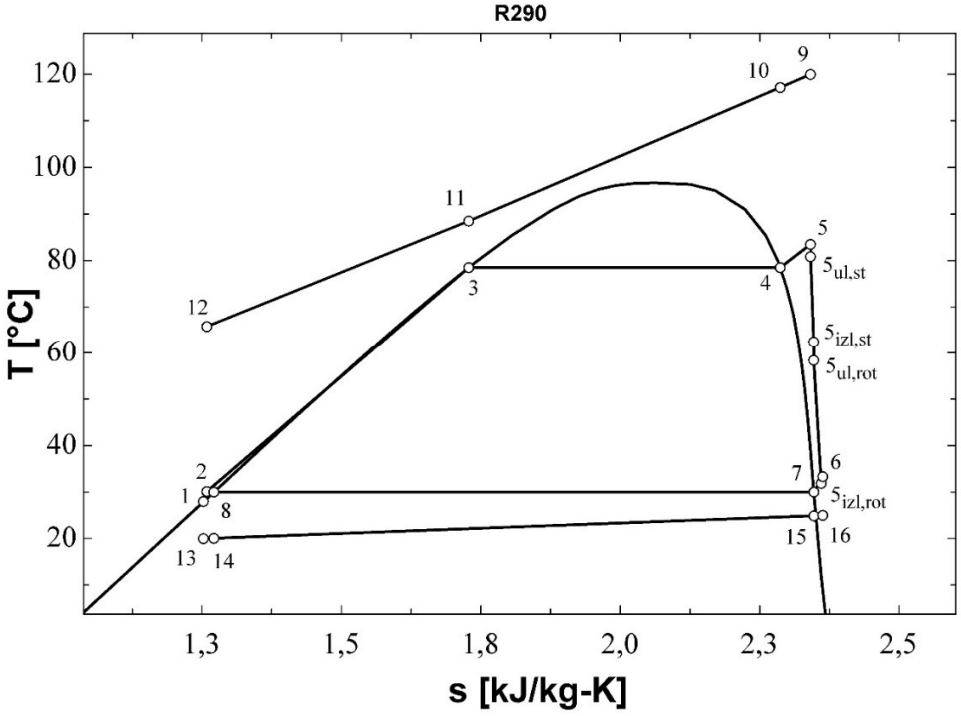
Slika 42: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 34

Tablica 35: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.253
r_2 [m]	0.2077
r_3 [m]	0.1871
r_4 [m]	0.1751
r_{s5} [m]	0.1335
r_{h5} [m]	0.03676
r_{vol} [m]	0.04525
b_2 [m]	0.02305
b_3 [m]	0.02305
b_4 [m]	0.02305
Z [m]	0.1451
Z_r [-]	14
Z_s [-]	18
M_2 [-]	0.6648
M_3 [-]	1.07
M_4 [-]	1.136
M_5 [-]	0.2975
η_t [%]	80.88

Tablica 36: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R290	10.79	28	273.8	1.253	58.22					
2	R290	30.44	30.11	279.5	1.258	58.22					
3	R290	30.44	78.47	433.9	1.729	58.22					
4	R290	30.44	78.47	630.3	2.287	58.22					
5	R290	30.44	83.48	649.5	2.341	58.22					
$5_{ul,st}$	R290	29.17	80.84	647.8	2.341	58.22					
$5_{izl,st}$	R290	20.99	62.45	635.6	2.347	58.22					
$5_{ul,rot}$	R290	19.45	58.38	632.2	2.347	58.22					
$5_{izl,rot}$	R290	10.79	31.87	609.5	2.36	58.22					
6	R290	11.05	33.3	611.4	2.363	58.22					
7	R290	10.79	30	605.5	2.347	58.22	29.68	4.248	1687	5.006	11959
8	R290	10.79	30	279.3	1.271	58.22					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.2	493.2	1.496	94.38					
11	Voda	20	88.47	372	1.173	94.38					
12	Voda	20	65.75	276.9	0.9017	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	3907					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	3907					
15	Zrak	1	24.91	298.4	6.864	3907					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	3907					



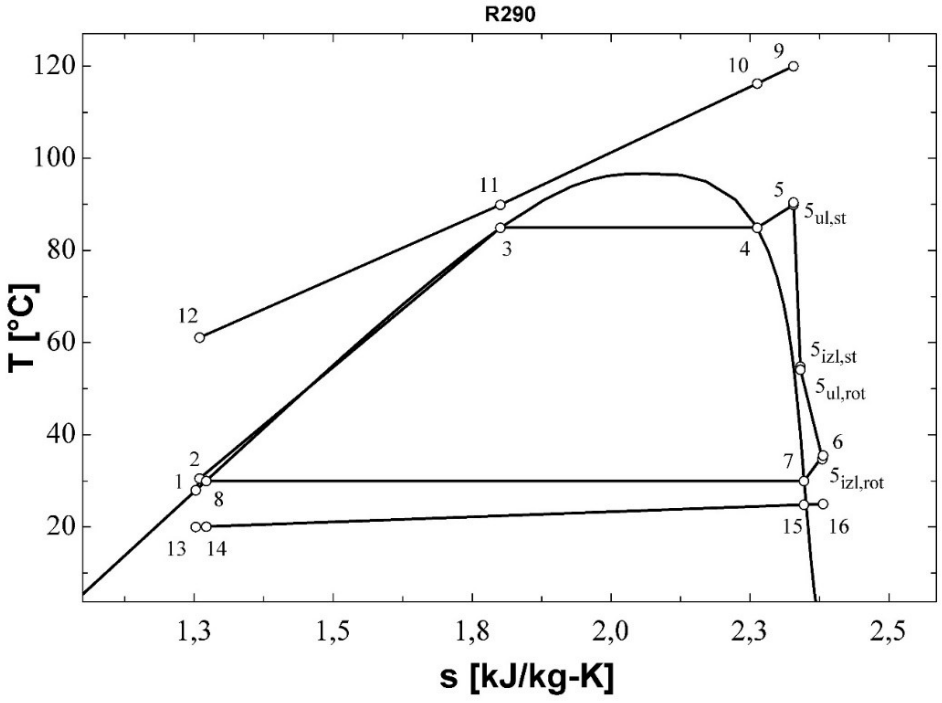
Slika 43: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 36

Tablica 37: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2498
r_2 [m]	0.2031
r_3 [m]	0.1814
r_4 [m]	0.1687
r_{s5} [m]	0.1284
r_{h5} [m]	0.03543
r_{vol} [m]	0.04668
b_2 [m]	0.02404
b_3 [m]	0.02404
b_4 [m]	0.02404
Z [m]	0.1394
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6604
M_3 [-]	1.003
M_4 [-]	1.073
M_5 [-]	0.292
η_t [%]	81.46

Tablica 38: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R290	10.79	28	273.8	1.253	63.35					
2	R290	34.33	30.52	280.6	1.26	63.35					
3	R290	34.33	84.93	460.6	1.801	63.35					
4	R290	34.33	84.93	626.1	2.263	63.35					
5	R290	34.33	89.94	649.6	2.328	63.35					
$5_{ul,st}$	R290	34.58	90.42	649.9	2.328	63.35					
$5_{izl,st}$	R290	18.45	54.81	627.7	2.34	63.35					
$5_{ul,rot}$	R290	18.22	54.15	627.2	2.34	63.35					
$5_{izl,rot}$	R290	10.79	34.73	615.6	2.38	63.35					
6	R290	10.93	35.51	616.6	2.382	63.35					
7	R290	10.79	30	605.5	2.347	63.35	25.4	3.622	1437	5.001	3000
8	R290	10.79	30	279.3	1.271	63.35					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	116.3	489.2	1.486	94.38					
11	Voda	20	89.93	378.2	1.19	94.38					
12	Voda	20	61.1	257.4	0.844	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4316					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4316					
15	Zrak	1	24.84	298.3	6.864	4316					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4316					



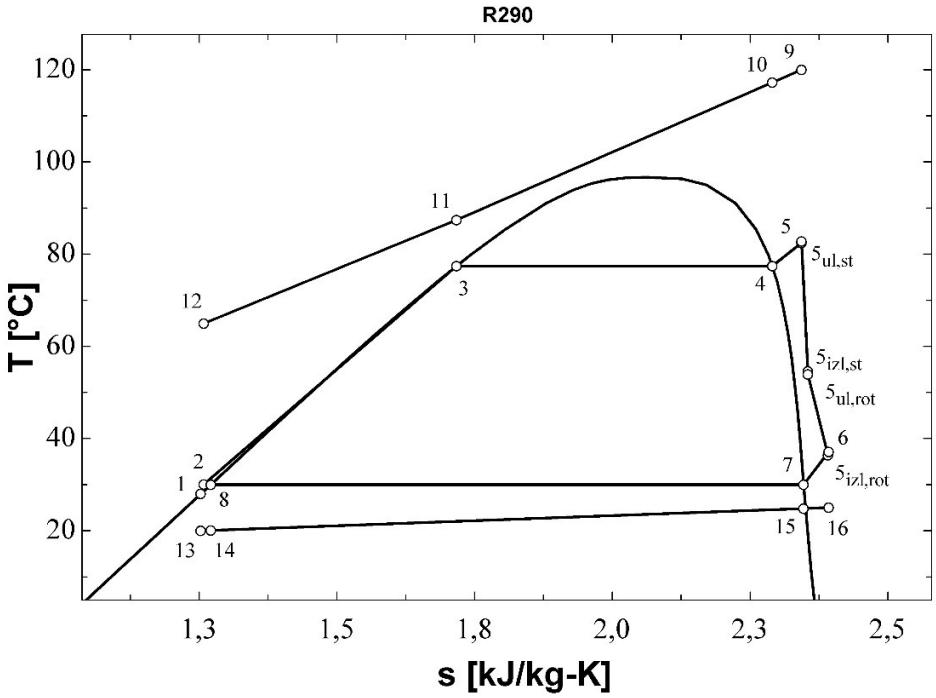
Slika 44: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 38

Tablica 39: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.619
r_2 [m]	0.5774
r_3 [m]	0.5398
r_4 [m]	0.5356
r_{s5} [m]	0.1961
r_{h5} [m]	0.1125
r_{vol} [m]	0.04208
b_2 [m]	0.01097
b_3 [m]	0.01097
b_4 [m]	0.01097
Z [m]	0.1254
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.6711
M_3 [-]	1.204
M_4 [-]	1.214
M_5 [-]	0.2164
η_t [%]	71.29

Tablica 40: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R290	10.79	28	273.8	1.253	59.11					
2	R290	29.83	30.05	279.3	1.258	59.11					
3	R290	29.83	77.41	429.8	1.717	59.11					
4	R290	29.83	77.41	630.7	2.29	59.11					
5	R290	29.83	82.41	649.3	2.343	59.11					
$5_{ul,st}$	R290	30	82.76	649.6	2.343	59.11					
$5_{izl,st}$	R290	17.72	54.55	630.6	2.355	59.11					
$5_{ul,rot}$	R290	17.5	53.92	630	2.355	59.11					
$5_{izl,rot}$	R290	10.79	36.35	619	2.391	59.11					
6	R290	10.92	37.07	620	2.392	59.11					
7	R290	10.79	30	605.5	2.347	59.11	21.19	3.03	1203	5.002	3000
8	R290	10.79	30	279.3	1.271	59.11					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.2	493.4	1.496	94.38					
11	Voda	20	87.41	367.5	1.161	94.38					
12	Voda	20	64.92	273.4	0.8914	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4066					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4066					
15	Zrak	1	24.79	298.2	6.863	4066					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4066					



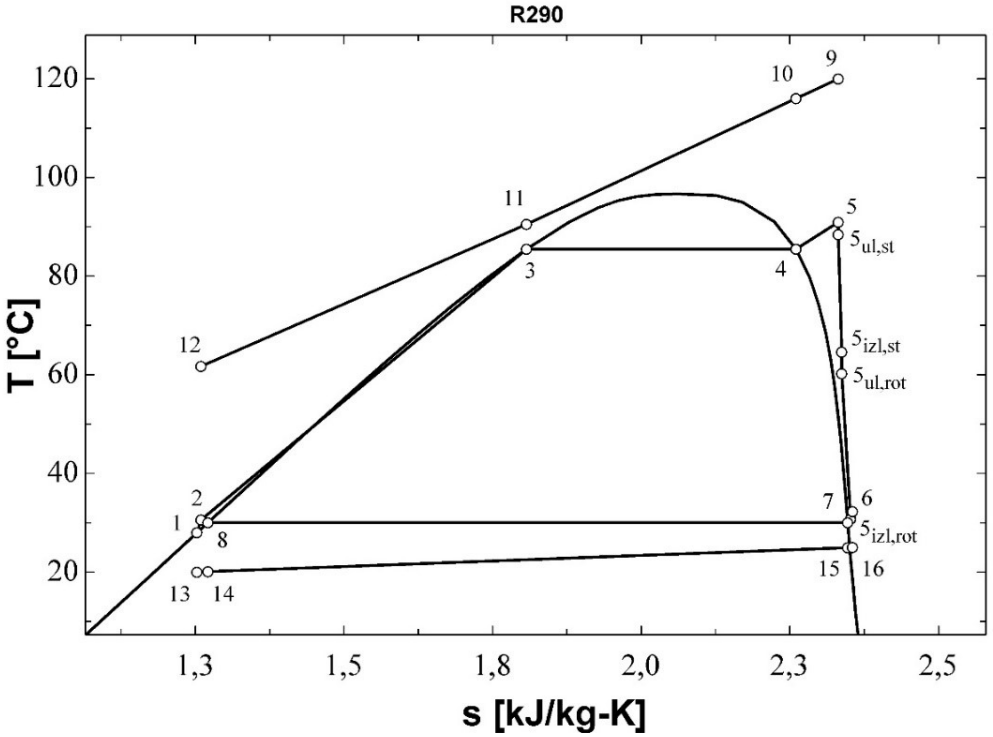
Slika 45: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 40

Tablica 41: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.6045
r_2 [m]	0.5611
r_3 [m]	0.5245
r_4 [m]	0.52
r_{s5} [m]	0.1925
r_{h5} [m]	0.1092
r_{vol} [m]	0.04334
b_2 [m]	0.01159
b_3 [m]	0.01159
b_4 [m]	0.01159
Z [m]	0.125
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.6923
M_3 [-]	1.142
M_4 [-]	1.152
M_5 [-]	0.2079
η_t [%]	71.68

Tablica 42: Rezultati optimiziranja W_{net} za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R290	10.79	28	273.8	1.253	62.48					
2	R290	34.67	30.55	280.7	1.26	62.48					
3	R290	34.67	85.47	463	1.807	62.48					
4	R290	34.67	85.47	625.5	2.26	62.48					
5	R290	34.67	90.89	651.2	2.332	62.48					
$5_{ul,st}$	R290	33.37	88.38	649.7	2.332	62.48					
$5_{izl,st}$	R290	22.29	64.62	635	2.337	62.48					
$5_{ul,rot}$	R290	20.58	60.23	631.5	2.337	62.48					
$5_{izl,rot}$	R290	10.79	30.73	607.1	2.352	62.48					
6	R290	11.06	32.25	609.1	2.355	62.48					
7	R290	10.79	30	605.5	2.347	62.48	35.11	5.007	1987	5.42	12287
8	R290	10.79	30	279.3	1.271	62.48					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	116	488	1.483	94.38					
11	Voda	20	90.47	380.4	1.197	94.38					
12	Voda	20	61.68	259.8	0.8512	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4163					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4163					
15	Zrak	1	24.95	298.4	6.864	4163					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4163					



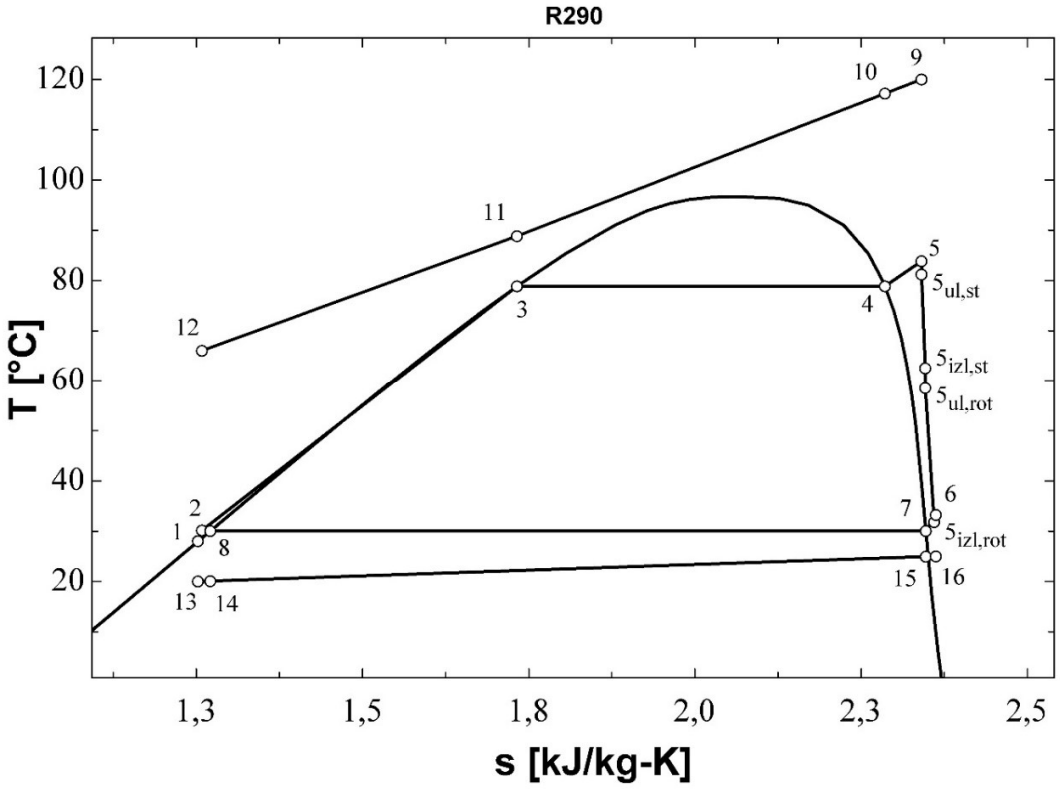
Slika 46: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 42

Tablica 43: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2497
r_2 [m]	0.2045
r_3 [m]	0.1828
r_4 [m]	0.1707
r_{s5} [m]	0.1307
r_{h5} [m]	0.03585
r_{vol} [m]	0.04519
b_2 [m]	0.02277
b_3 [m]	0.02277
b_4 [m]	0.02277
Z [m]	0.1423
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6525
M_3 [-]	1.068
M_4 [-]	1.136
M_5 [-]	0.3014
η_t [%]	81.44

Tablica 44: Rezultati optimiziranja W_{net} za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq$3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R290	10.79	28	273.8	1.253	57.9					
2	R290	30.66	30.13	279.6	1.259	57.9					
3	R290	30.66	78.85	435.4	1.733	57.9					
4	R290	30.66	78.85	630.2	2.286	57.9					
5	R290	30.66	83.87	649.6	2.341	57.9					
$5_{ul,st}$	R290	29.39	81.23	647.9	2.341	57.9					
$5_{izl,st}$	R290	21.07	62.57	635.5	2.346	57.9					
$5_{ul,rot}$	R290	19.52	58.48	632.1	2.346	57.9					
$5_{izl,rot}$	R290	10.79	31.8	609.4	2.36	57.9					
6	R290	11.05	33.23	611.3	2.363	57.9					
7	R290	10.79	30	605.5	2.347	57.9	29.67	4.248	1687	5.013	12045
8	R290	10.79	30	279.3	1.271	57.9					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.2	493.1	1.496	94.38					
11	Voda	20	88.85	373.6	1.178	94.38					
12	Voda	20	66.05	278.1	0.9053	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	3884					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	3884					
15	Zrak	1	24.91	298.4	6.864	3884					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	3884					



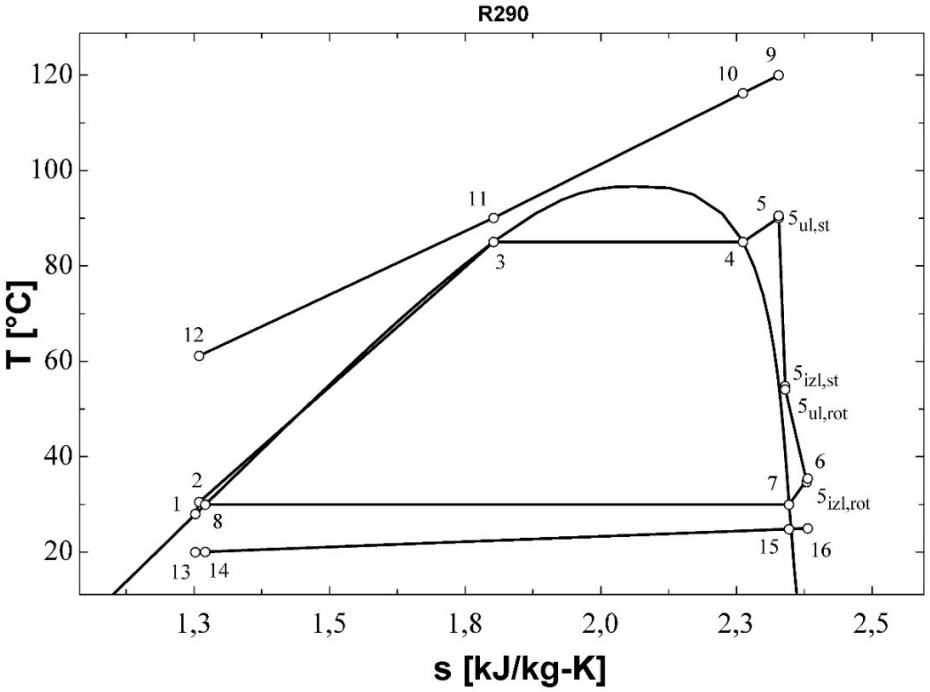
Slika 47: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 44

Tablica 45: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2485
r_2 [m]	0.2021
r_3 [m]	0.1805
r_4 [m]	0.1679
r_{s5} [m]	0.1279
r_{h5} [m]	0.03526
r_{vol} [m]	0.04639
b_2 [m]	0.02386
b_3 [m]	0.02386
b_4 [m]	0.02386
Z [m]	0.1389
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.66
M_3 [-]	1.007
M_4 [-]	1.076
M_5 [-]	0.2927
η_t [%]	81.46

Tablica 46: Rezultati optimiziranja W_{net} za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R290	10.79	28	273.8	1.253	63.27	25.4	3.622	1437	5	3000
2	R290	34.42	30.53	280.7	1.26	63.27					
3	R290	34.42	85.07	461.2	1.802	63.27					
4	R290	34.42	85.07	625.9	2.262	63.27					
5	R290	34.42	90.07	649.6	2.328	63.27					
$5_{ul,st}$	R290	34.67	90.56	649.9	2.328	63.27					
$5_{izl,st}$	R290	18.46	54.8	627.7	2.34	63.27					
$5_{ul,rot}$	R290	18.23	54.13	627.1	2.34	63.27					
$5_{izl,rot}$	R290	10.79	34.7	615.5	2.38	63.27					
6	R290	10.93	35.47	616.6	2.381	63.27					
7	R290	10.79	30	605.5	2.347	63.27					
8	R290	10.79	30	279.3	1.271	63.27					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	116.3	489.2	1.486	94.38					
11	Voda	20	90.07	378.7	1.192	94.38					
12	Voda	20	61.18	257.8	0.845	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4310					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4310					
15	Zrak	1	24.84	298.3	6.864	4310					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4310					



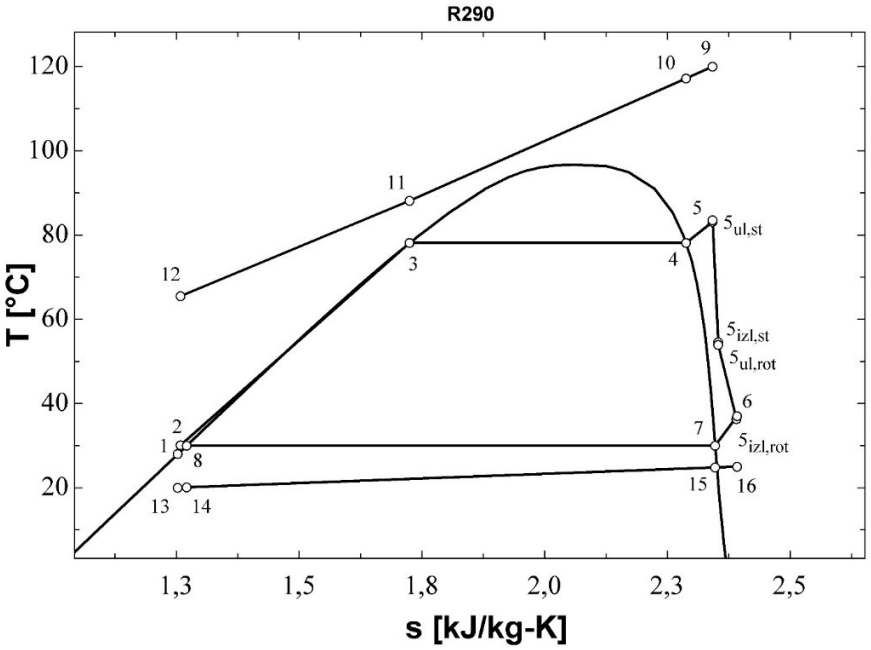
Slika 48: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 46

Tablica 47: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.6191
r_2 [m]	0.5775
r_3 [m]	0.5399
r_4 [m]	0.5357
r_{s5} [m]	0.1959
r_{h5} [m]	0.1125
r_{vol} [m]	0.04201
b_2 [m]	0.01094
b_3 [m]	0.01094
b_4 [m]	0.01094
Z [m]	0.1252
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.6707
M_3 [-]	1.206
M_4 [-]	1.215
M_5 [-]	0.2166
η_t [%]	71.27

Tablica 48: Rezultati optimiziranja W_{net} za R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R290	10.79	28	273.8	1.253	58.49					
2	R290	30.25	30.09	279.5	1.258	58.49					
3	R290	30.25	78.15	432.7	1.725	58.49					
4	R290	30.25	78.15	630.5	2.288	58.49					
5	R290	30.25	83.16	649.5	2.342	58.49					
$5_{ul,st}$	R290	30.44	83.53	649.7	2.342	58.49					
$5_{izl,st}$	R290	17.78	54.57	630.4	2.354	58.49					
$5_{ul,rot}$	R290	17.56	53.94	629.8	2.354	58.49					
$5_{izl,rot}$	R290	10.79	36.26	618.8	2.391	58.49					
6	R290	10.92	36.98	619.8	2.392	58.49					
7	R290	10.79	30	605.5	2.347	58.49	21.18	3.031	1203	5.01	3000
8	R290	10.79	30	279.3	1.271	58.49					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.2	493.2	1.496	94.38					
11	Voda	20	88.15	370.6	1.17	94.38					
12	Voda	20	65.5	275.8	0.8985	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4022					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4022					
15	Zrak	1	24.79	298.2	6.863	4022					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4022					



Slika 49: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 48

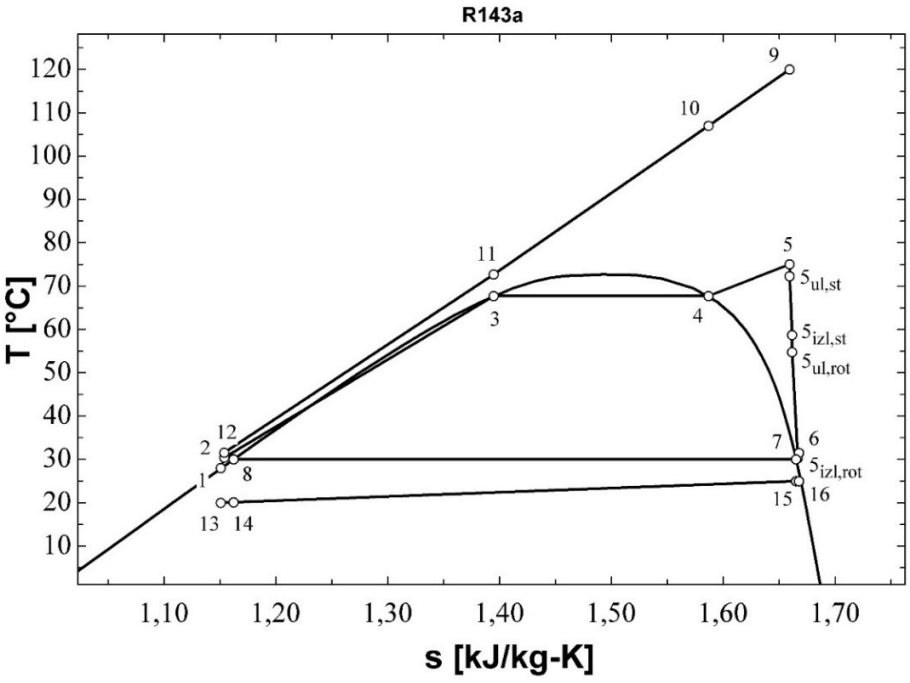
Tablica 49: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R290 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.6047
r_2 [m]	0.5618
r_3 [m]	0.5252
r_4 [m]	0.5209
r_{s5} [m]	0.1917
r_{h5} [m]	0.1094
r_{vol} [m]	0.04284
b_2 [m]	0.01135
b_3 [m]	0.01135
b_4 [m]	0.01135
Z [m]	0.1234
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.69
M_3 [-]	1.149
M_4 [-]	1.159
M_5 [-]	0.2088
η_t [%]	71.54

3. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R143a

Tablica 50: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	207.6	36.87	5.149	2037	7.356	5462
2	R143a	33.88	30.41	247.2	1.154	207.6					
3	R143a	33.88	67.71	325.2	1.395	207.6					
4	R143a	33.88	67.71	390.7	1.587	207.6					
5	R143a	33.88	75.06	415.7	1.659	207.6					
$5_{ul,st}$	R143a	32.36	72.32	414.8	1.659	207.6					
$5_{izl,st}$	R143a	25.45	58.74	410.9	1.662	207.6					
$5_{ul,rot}$	R143a	23.69	54.77	409.4	1.662	207.6					
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	30.32	400.5	1.667	207.6					
6	R143a	14.65	31.51	401.3	1.668	207.6					
7	R143a	14.35	30	400	1.665	207.6					
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	207.6					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	107	450.1	1.384	94.38					
11	Voda	20	72.71	305.9	0.9866	94.38					
12	Voda	20	31.55	134	0.4573	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	6482					
14	Zrak	1	20.11	293.5	6.847	6482					
15	Zrak	1	24.96	298.4	6.864	6482					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	6482					



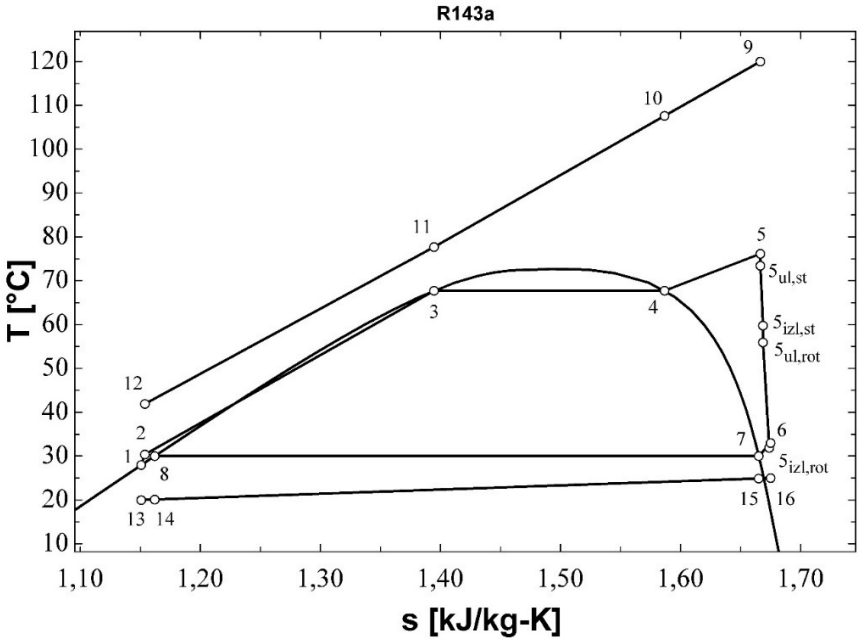
Slika 50: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 50

Tablica 51: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje *ηplant,ex*; R143a (podkritično, ΔTpp=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.3517
r_2 [m]	0.2822
r_3 [m]	0.2513
r_4 [m]	0.2313
r_{s5} [m]	0.1776
r_{h5} [m]	0.04857
r_{vol} [m]	0.06965
b_2 [m]	0.03692
b_3 [m]	0.03692
b_4 [m]	0.03692
Z [m]	0.1935
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.648
M_3 [-]	0.9236
M_4 [-]	1
M_5 [-]	0.2851
η_t [%]	81.4

Tablica 52: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	28	1.151	180.9					
2	R143a	33.88	30.41	30.41	1.154	180.9					
3	R143a	33.88	67.71	67.71	1.395	180.9					
4	R143a	33.88	67.71	67.71	1.587	180.9					
5	R143a	33.88	76.13	76.13	1.666	180.9					
$5_{ul,st}$	R143a	32.37	73.42	73.42	1.666	180.9					
$5_{izl,st}$	R143a	25.35	59.77	59.77	1.669	180.9					
$5_{ul,rot}$	R143a	23.65	55.95	55.95	1.669	180.9					
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	31.86	31.86	1.674	180.9					
6	R143a	14.64	33.02	33.02	33.02	180.9					
7	R143a	14.35	30	30	30	180.9	32.71	4.597	1820	8.425	5732
8	R143a	14.35	30	30	30	180.9					
9	Voda	20	120	120	120	94.38					
10	Voda	20	107.6	107.6	107.6	94.38					
11	Voda	20	77.71	77.71	77.71	94.38					
12	Voda	20	41.89	41.89	41.89	94.38					
13	Zrak	1	20	20	20	5726					
14	Zrak	1	20.11	20.11	20.11	5726					
15	Zrak	1	24.89	24.89	24.89	5726					
16	Zrak	1	25	25	25	5726					



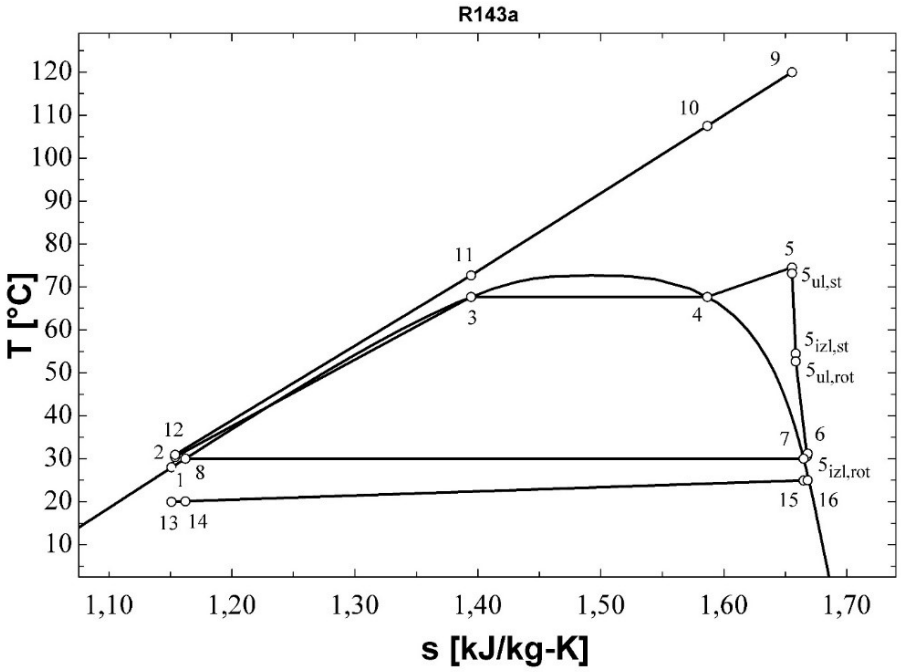
Slika 51: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 52

Tablica 53: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.3339
r_2 [m]	0.2689
r_3 [m]	0.2399
r_4 [m]	0.2217
r_{s5} [m]	0.168
r_{h5} [m]	0.04655
r_{vol} [m]	0.06484
b_2 [m]	0.03428
b_3 [m]	0.03428
b_4 [m]	0.03428
Z [m]	0.1822
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6535
M_3 [-]	0.9307
M_4 [-]	1.004
M_5 [-]	0.2802
η_t [%]	81.52

Tablica 54: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	210.6	32.3	4.509	1783	6.808	3000
2	R143a	33.88	30.41	247.2	1.154	210.6					
3	R143a	33.88	67.71	325.2	1.395	210.6					
4	R143a	33.88	67.71	390.7	1.587	210.6					
5	R143a	33.88	74.51	414.4	1.656	210.6					
$5_{ul,st}$	R143a	33.12	73.15	413.9	1.656	210.6					
$5_{izl,st}$	R143a	23.78	54.48	408.6	1.659	210.6					
$5_{ul,rot}$	R143a	23.01	52.66	407.9	1.659	210.6					
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	30.58	400.9	1.668	210.6					
6	R143a	14.51	31.24	401.3	1.668	210.6					
7	R143a	14.35	30	400	1.665	210.6					
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	210.6					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	107.5	452.2	1.39	94.38					
11	Voda	20	72.71	305.9	0.9866	94.38					
12	Voda	20	30.94	131.4	0.4489	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	6579					
14	Zrak	1	20.11	293.5	6.847	6579					
15	Zrak	1	24.96	298.4	6.864	6579					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	6579					



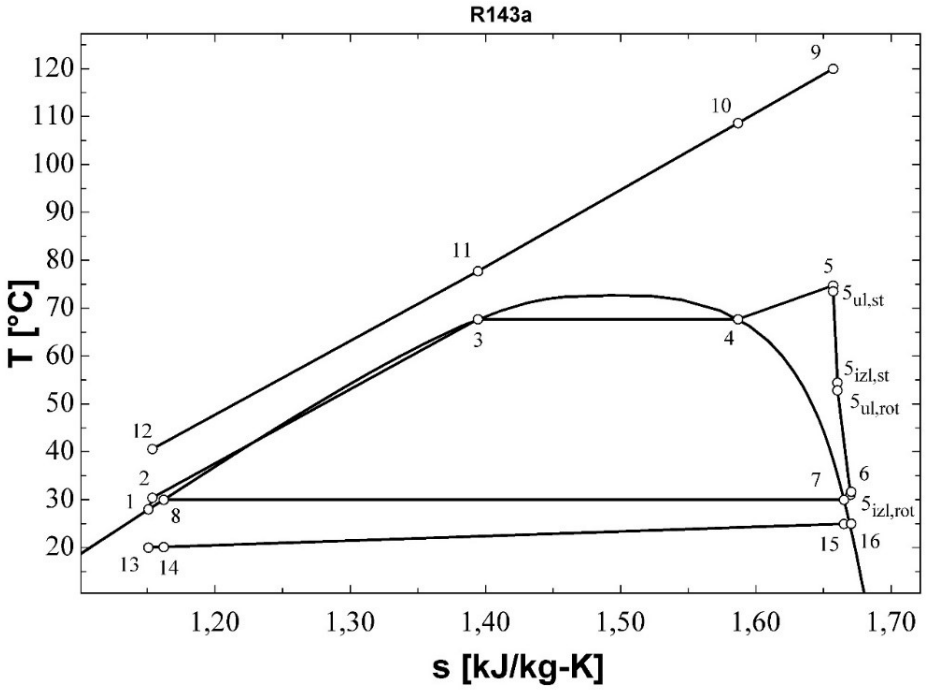
Slika 52: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 54

Tablica 55: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.4877
r_2 [m]	0.4242
r_3 [m]	0.3931
r_4 [m]	0.381
r_{s5} [m]	0.2214
r_{h5} [m]	0.08002
r_{vol} [m]	0.06362
b_2 [m]	0.0284
b_3 [m]	0.0284
b_4 [m]	0.0284
Z [m]	0.2121
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.7161
M_3 [-]	1.045
M_4 [-]	1.076
M_5 [-]	0.2177
η_t [%]	79.25

Tablica 56: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	187.5					
2	R143a	33.88	30.41	247.2	1.154	187.5					
3	R143a	33.88	67.71	325.2	1.395	187.5					
4	R143a	33.88	67.71	390.7	1.587	187.5					
5	R143a	33.88	74.72	414.9	1.657	187.5					
$5_{ul,st}$	R143a	33.2	73.5	414.5	1.657	187.5					
$5_{izl,st}$	R143a	23.67	54.47	409	1.66	187.5					
$5_{ul,rot}$	R143a	22.96	52.81	408.3	1.66	187.5					
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	31.02	401.5	1.67	187.5					
6	R143a	14.51	31.66	401.9	1.671	187.5					
7	R143a	14.35	30	400	1.665	187.5	28.11	3.946	1562	7.01	3000
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	187.5					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	108.7	457.1	1.402	94.38					
11	Voda	20	77.71	326.9	1.047	94.38					
12	Voda	20	40.57	171.7	0.5792	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5879					
14	Zrak	1	20.11	293.5	6.847	5879					
15	Zrak	1	24.94	298.4	6.864	5879					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5879					



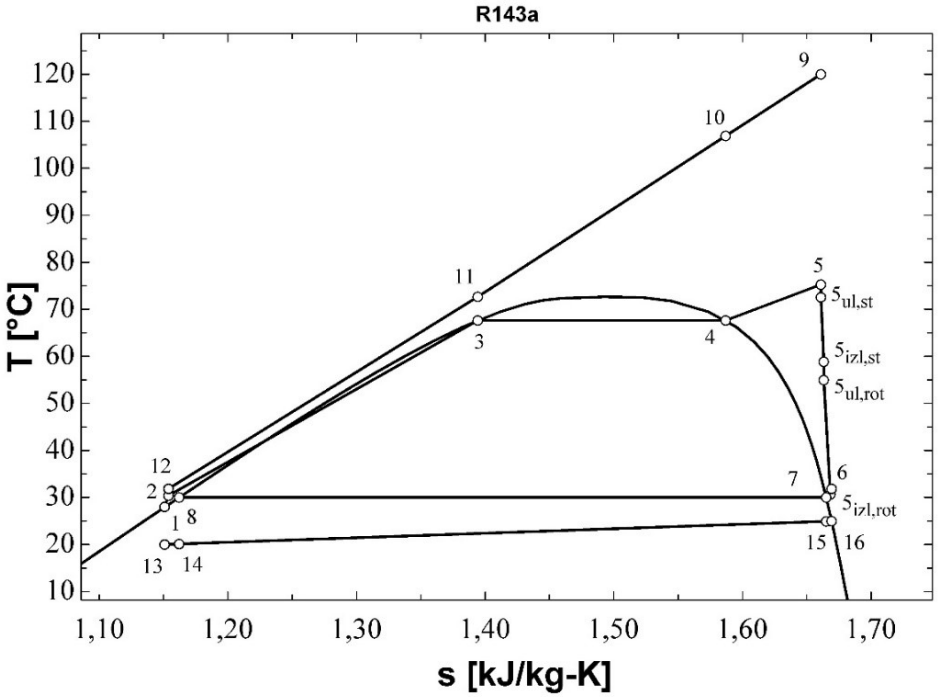
Slika 53: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 56

Tablica 57: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.4788
r_2 [m]	0.4189
r_3 [m]	0.3884
r_4 [m]	0.3776
r_{s5} [m]	0.2122
r_{h5} [m]	0.07929
r_{vol} [m]	0.05994
b_2 [m]	0.02591
b_3 [m]	0.02591
b_4 [m]	0.02591
Z [m]	0.1994
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.7152
M_3 [-]	1.049
M_4 [-]	1.077
M_5 [-]	0.2143
η_t [%]	78.94

Tablica 58: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	206.3	36.83	5.143	2034	7.581	5403
2	R143a	33.85	30.41	247.2	1.154	206.3					
3	R143a	33.85	67.67	325.1	1.394	206.3					
4	R143a	33.85	67.67	390.8	1.587	206.3					
5	R143a	33.85	75.25	416.2	1.661	206.3					
$5_{ul,st}$	R143a	32.35	72.54	415.4	1.661	206.3					
$5_{izl,st}$	R143a	25.38	58.85	411.3	1.663	206.3					
$5_{ul,rot}$	R143a	23.65	54.96	409.9	1.663	206.3					
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	30.67	401	1.668	206.3					
6	R143a	14.64	31.83	401.8	1.669	206.3					
7	R143a	14.35	30	400	1.665	206.3					
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	206.3					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	106.9	449.4	1.382	94.38					
11	Voda	20	72.67	305.8	0.9862	94.38					
12	Voda	20	31.84	135.2	0.4612	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	6461					
14	Zrak	1	20.11	293.5	6.847	6461					
15	Zrak	1	24.95	298.4	6.864	6461					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	6461					



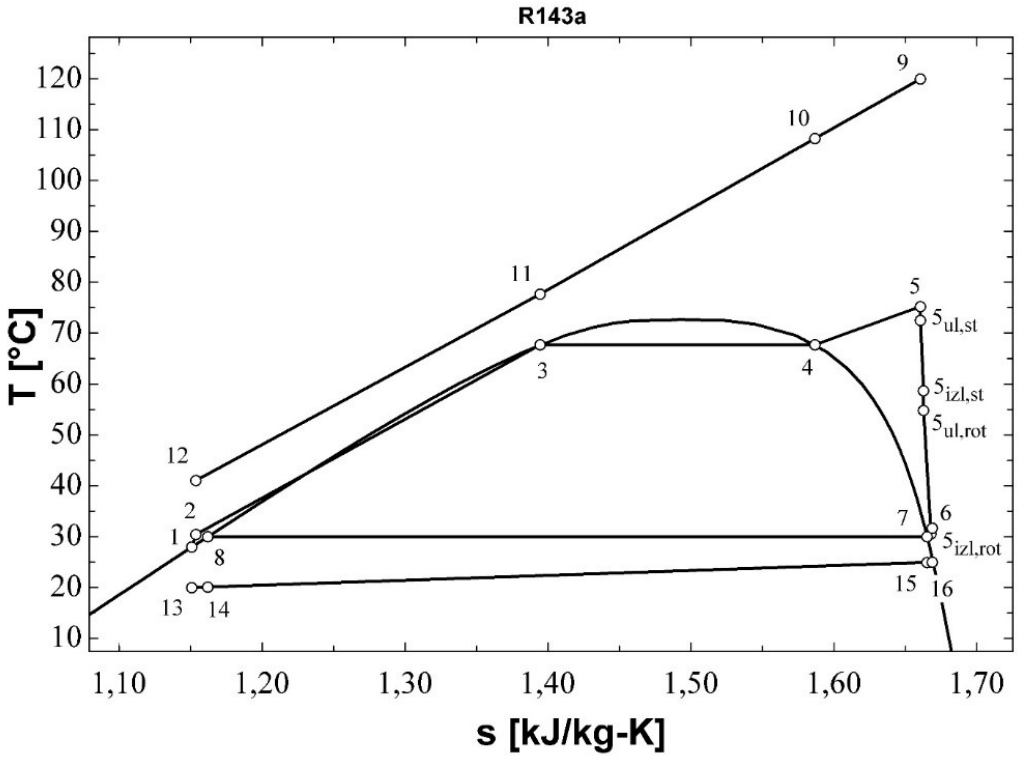
Slika 54: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 58

Tablica 59: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.3531
r_2 [m]	0.2843
r_3 [m]	0.2535
r_4 [m]	0.2338
r_{s5} [m]	0.1782
r_{h5} [m]	0.04909
r_{vol} [m]	0.06921
b_2 [m]	0.03665
b_3 [m]	0.03665
b_4 [m]	0.03665
Z [m]	0.1937
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6513
M_3 [-]	0.9862
M_4 [-]	1.003
M_5 [-]	0.2823
η_t [%]	81.48

Tablica 60: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	185.1	32.8	4.607	1824	7.509	5653
2	R143a	33.88	30.41	247.2	1.154	185.1					
3	R143a	33.88	67.7	325.2	1.395	185.1					
4	R143a	33.88	67.7	390.7	1.587	185.1					
5	R143a	33.88	75.21	416	1.66	185.1					
$5_{ul,st}$	R143a	32.37	72.5	415.2	1.66	185.1					
$5_{izl,st}$	R143a	25.34	58.67	411.1	1.663	185.1					
$5_{ul,rot}$	R143a	23.63	54.82	409.7	1.663	185.1					
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	30.56	400.8	1.668	185.1					
6	R143a	14.64	31.7	401.6	1.669	185.1					
7	R143a	14.35	30	400	1.665	185.1					
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	185.1					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	108.3	455.4	1.398	94.38					
11	Voda	20	77.7	326.9	1.047	94.38					
12	Voda	20	41.06	173.7	0.5856	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5790					
14	Zrak	1	20.11	293.5	6.847	5790					
15	Zrak	1	24.95	298.4	6.864	5790					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5790					



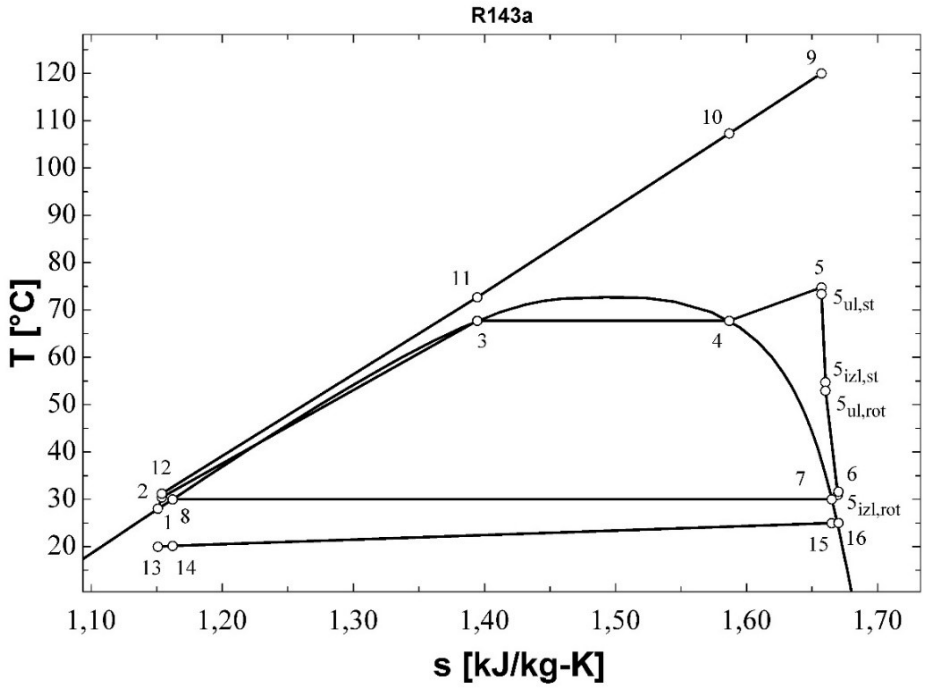
Slika 55: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 61

Tablica 61: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.3362
r_2 [m]	0.2707
r_3 [m]	0.2415
r_4 [m]	0.223
r_{s5} [m]	0.1693
r_{h5} [m]	0.04683
r_{vol} [m]	0.0654
b_2 [m]	0.03458
b_3 [m]	0.03458
b_4 [m]	0.03458
Z [m]	0.1838
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6531
M_3 [-]	0.9324
M_4 [-]	1.006
M_5 [-]	0.2808
η_t [%]	81.51

Tablica 62: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	209.3	32.21	4.498	1779	7.042	3000
2	R143a	33.88	30.41	247.2	1.154	209.3					
3	R143a	33.88	67.71	325.2	1.395	209.3					
4	R143a	33.88	67.71	390.7	1.587	209.3					
5	R143a	33.88	74.75	414.9	1.657	209.3					
$5_{ul,st}$	R143a	33.13	73.4	414.5	1.657	209.3					
$5_{izl,st}$	R143a	23.79	54.77	409.1	1.66	209.3					
$5_{ul,rot}$	R143a	23.01	52.96	408.4	1.66	209.3					
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	30.95	401.4	1.67	209.3					
6	R143a	14.51	31.61	401.8	1.67	209.3					
7	R143a	14.35	30	400	1.665	209.3					
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	209.3					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	107.3	451.3	1.387	94.38					
11	Voda	20	72.71	305.9	0.9866	94.38					
12	Voda	20	31.21	132.5	0.4525	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	6560					
14	Zrak	1	20.11	293.5	6.847	6560					
15	Zrak	1	24.94	298.4	6.864	6560					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	6560					



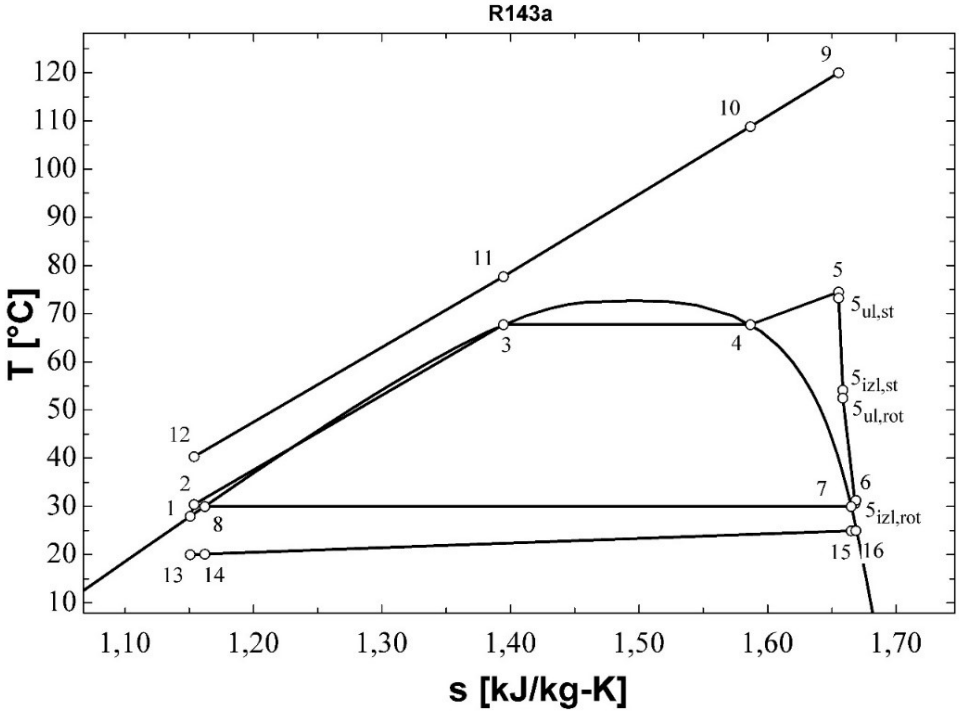
Slika 56: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 62

Tablica 63: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.488
r_2 [m]	0.4247
r_3 [m]	0.3936
r_4 [m]	0.3816
r_{s5} [m]	0.2212
r_{h5} [m]	0.08013
r_{vol} [m]	0.06346
b_2 [m]	0.02825
b_3 [m]	0.02825
b_4 [m]	0.02825
Z [m]	0.2115
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.7162
M_3 [-]	1.044
M_4 [-]	1.075
M_5 [-]	0.2174
η_t [%]	79.23

Tablica 64: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	188.7					
2	R143a	33.88	30.41	247.2	1.154	188.7					
3	R143a	33.88	67.71	325.2	1.395	188.7					
4	R143a	33.88	67.71	390.7	1.587	188.7					
5	R143a	33.88	74.48	414.3	1.655	188.7					
$5_{ul,st}$	R143a	33.2	73.26	413.9	1.655	188.7					
$5_{izl,st}$	R143a	23.66	54.19	408.4	1.659	188.7					
$5_{ul,rot}$	R143a	22.95	52.5	407.8	1.659	188.7					
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	30.66	401	1.668	188.7					
6	R143a	14.51	31.3	401.4	1.669	188.7					
7	R143a	14.35	30	400	1.665	188.7	28.18	3.956	1566	6.778	3000
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	188.7					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	108.9	457.9	1.404	94.38					
11	Voda	20	77.71	326.9	1.047	94.38					
12	Voda	20	40.34	170.7	0.576	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5896					
14	Zrak	1	20.11	293.5	6.847	5896					
15	Zrak	1	24.96	298.4	6.864	5896					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5896					



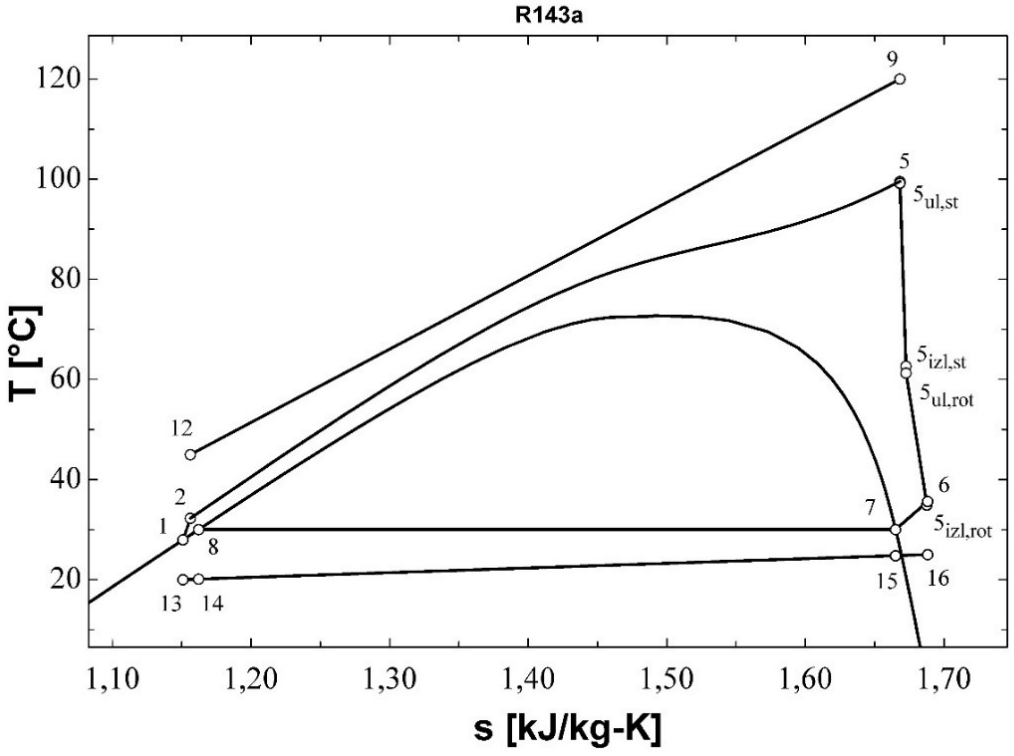
Slika 57: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 64

Tablica 65: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje *Wnet*; R143a (podkritično, ΔTpp=10°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.4785
r_2 [m]	0.4184
r_3 [m]	0.3879
r_4 [m]	0.377
r_{s5} [m]	0.2125
r_{h5} [m]	0.07918
r_{vol} [m]	0.06009
b_2 [m]	0.02604
b_3 [m]	0.02604
b_4 [m]	0.02604
Z [m]	0.2
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.7151
M_3 [-]	1.049
M_4 [-]	1.078
M_5 [-]	0.2145
η_t [%]	78.97

Tablica 66: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	169.8	34.95	4.922	1949	3000
2	R143a	49.71	32.25	249.6	1.156	169.8				
5	R143a	49.71	99.52	426	1.668	169.8				
$5_{ul,st}$	R143a	49.43	99.18	425.9	1.668	169.8				
$5_{izl,st}$	R143a	26.37	62.67	415.3	1.673	169.8				
$5_{ul,rot}$	R143a	25.72	61.28	414.8	1.673	169.8				
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	34.9	406.9	1.688	169.8				
6	R143a	14.53	35.65	407.4	1.688	169.8				
7	R143a	14.35	30	400	1.665	169.8				
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	169.8				
9	Voda	20	120	505	1.668	94.38				
12	Voda	20	45	190.2	1.156	94.38				
13	Zrak	1	20	293.4	1.151	5510				
14	Zrak	1	20.1	293.5	1.162	5510				
15	Zrak	1	24.77	298.2	1.665	5510				
16	Zrak	1	25	298.4	1.688	5510				



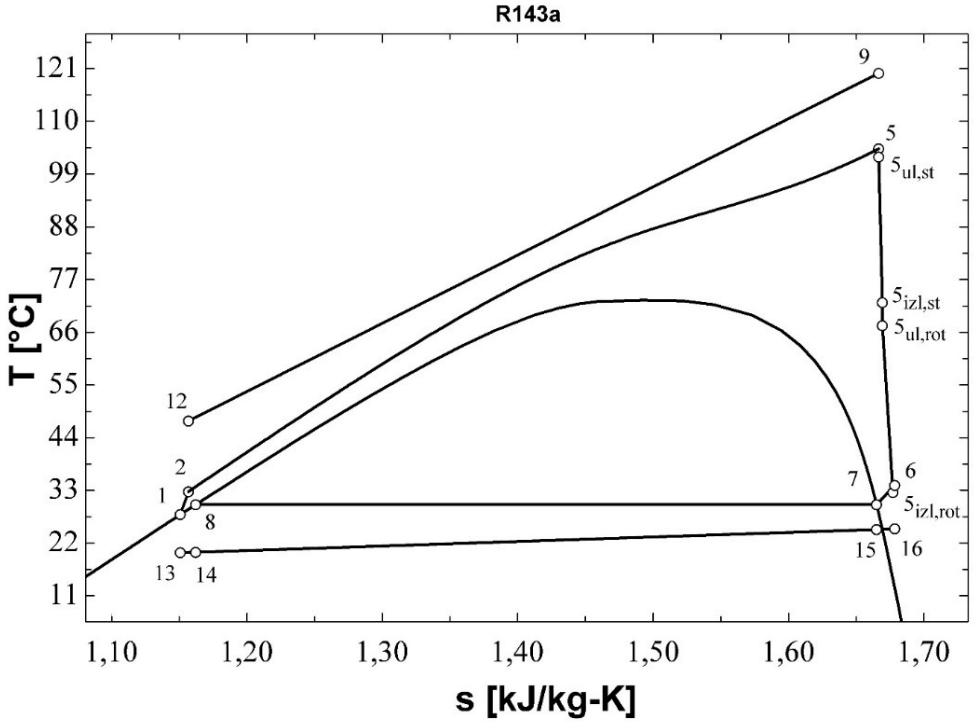
Slika 58: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 66

Tablica 67: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5029
r_2 [m]	0.45
r_3 [m]	0.4183
r_4 [m]	0.4112
r_{s5} [m]	0.2031
r_{h5} [m]	0.08634
r_{vol} [m]	0.05293
b_2 [m]	0.01774
b_3 [m]	0.01774
b_4 [m]	0.01774
Z [m]	0.1752
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.523
M_3 [-]	1.205
M_4 [-]	1.225
M_5 [-]	0.2274
η_t [%]	77.4

Tablica 68: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	162.7				
2	R143a	54.06	32.75	250.2	1.157	162.7				
5	R143a	54.06	104.3	426.9	1.667	162.7				
$5_{ul,st}$	R143a	52.53	102.6	426.4	1.667	162.7				
$5_{izl,st}$	R143a	31.44	72.19	417.7	1.669	162.7				
$5_{ul,rot}$	R143a	28.95	67.39	416.1	1.669	162.7				
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	32.57	403.7	1.677	162.7				
6	R143a	14.72	34.04	404.7	1.678	162.7				
7	R143a	14.35	30	400	1.665	162.7	42.31	5.968	2364	7671
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	162.7				
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38				
12	Voda	20	47.5	200.6	0.6704	94.38				
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5191				
14	Zrak	1	20.11	293.5	6.847	5191				
15	Zrak	1	24.86	298.3	6.864	5191				
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5191				



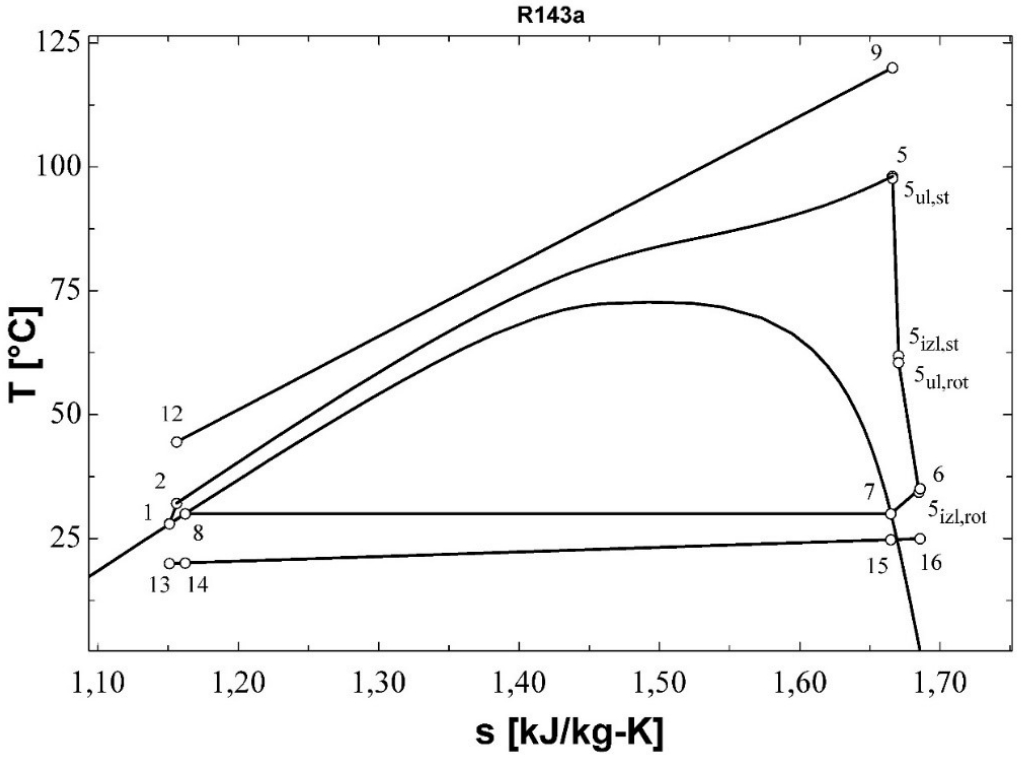
Slika 59: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 68

Tablica 69: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2838
r_2 [m]	0.2319
r_3 [m]	0.2074
r_4 [m]	0.1948
r_{s5} [m]	0.1508
r_{h5} [m]	0.0409
r_{vol} [m]	0.05202
b_2 [m]	0.02374
b_3 [m]	0.02374
b_4 [m]	0.02374
Z [m]	0.1649
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.5182
M_3 [-]	1.142
M_4 [-]	1.214
M_5 [-]	0.3141
η_t [%]	81.48

Tablica 70: Rezultati optimiziranja W_{net} za R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	N [o/min]
1	R143a	14.35	28	244.1	1.151	170.6				
2	R143a	48.76	32.15	249.4	1.156	170.6				
5	R143a	48.76	98.09	424.9	1.666	170.6				
$5_{ul,st}$	R143a	48.46	97.71	424.8	1.666	170.6				
$5_{izl,st}$	R143a	26.18	61.91	414.5	1.671	170.6				
$5_{ul,rot}$	R143a	25.53	60.5	413.9	1.671	170.6				
$5_{izl,rot}$	R143a	14.35	34.35	406.2	1.685	170.6				
6	R143a	14.53	35.08	406.7	1.686	170.6				
7	R143a	14.35	30	400	1.665	170.6	34.61	4.873	1930	3000
8	R143a	14.35	30	247.6	1.162	170.6				
9	Voda	20	120	505	1.666	94.38				
12	Voda	20	44.5	188.1	1.156	94.38				
13	Zrak	1	20	293.4	1.151	5511				
14	Zrak	1	20.11	293.5	1.162	5511				
15	Zrak	1	24.8	298.2	1.665	5511				
16	Zrak	1	25	298.4	1.686	5511				



Slika 60: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 70

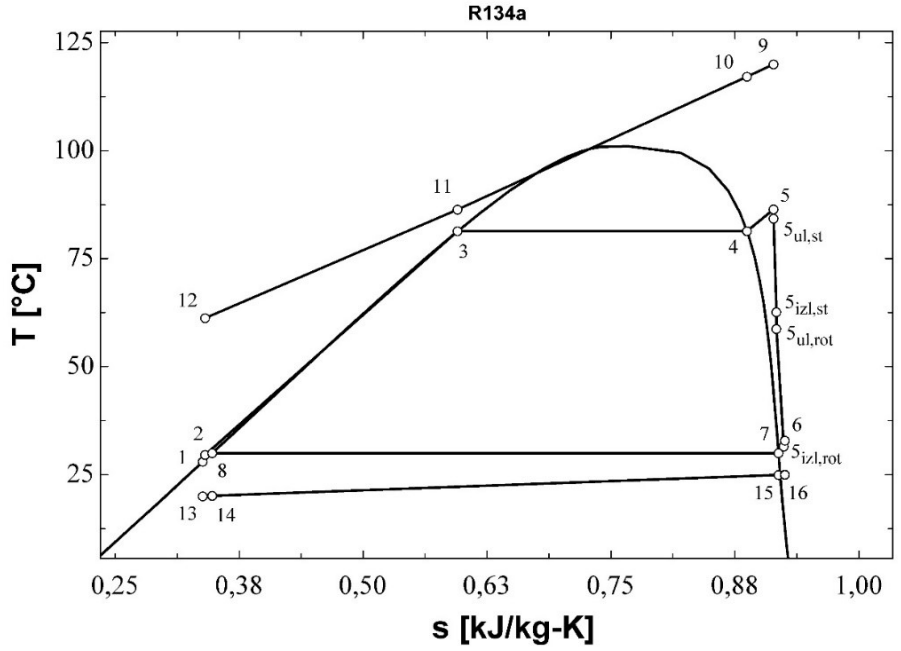
Tablica 71: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R143a (nadkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.501
r_2 [m]	0.4474
r_3 [m]	0.4158
r_4 [m]	0.4085
r_{s5} [m]	0.2034
r_{h5} [m]	0.08578
r_{vol} [m]	0.05354
b_2 [m]	0.01814
b_3 [m]	0.01814
b_4 [m]	0.01814
Z [m]	0.1765
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.5256
M_3 [-]	1.196
M_4 [-]	1.216
M_5 [-]	0.2265
η_t [%]	77.56

4. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R134a

Tablica 72: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R134a	7.706	28	90.69	0.3383	118.4	34.73	4.952	1965	5.038	6612
2	R134a	27.14	29.6	93.01	0.3406	118.4					
3	R134a	27.14	81.38	176.9	0.5952	118.4					
4	R134a	27.14	81.38	280.4	0.8872	118.4					
5	R134a	27.14	86.42	289.9	0.9138	118.4					
$5_{ul,st}$	R134a	26.11	84.28	289.2	0.9138	118.4					
$5_{izl,st}$	R134a	16.87	62.6	281.9	0.9168	118.4					
$5_{ul,rot}$	R134a	15.52	58.7	280.2	0.9168	118.4					
$5_{izl,rot}$	R134a	7.706	31.51	268.3	0.9241	118.4					
6	R134a	7.912	32.9	269.2	0.9254	118.4					
7	R134a	7.706	30	266.7	0.9188	118.4					
8	R134a	7.706	30	93.58	0.3479	118.4					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.2	493.1	1.496	94.38					
11	Voda	20	86.38	363.2	1.149	94.38					
12	Voda	20	61.26	258.1	0.8459	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4200					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4200					
15	Zrak	1	24.93	298.4	6.864	4200					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4200					



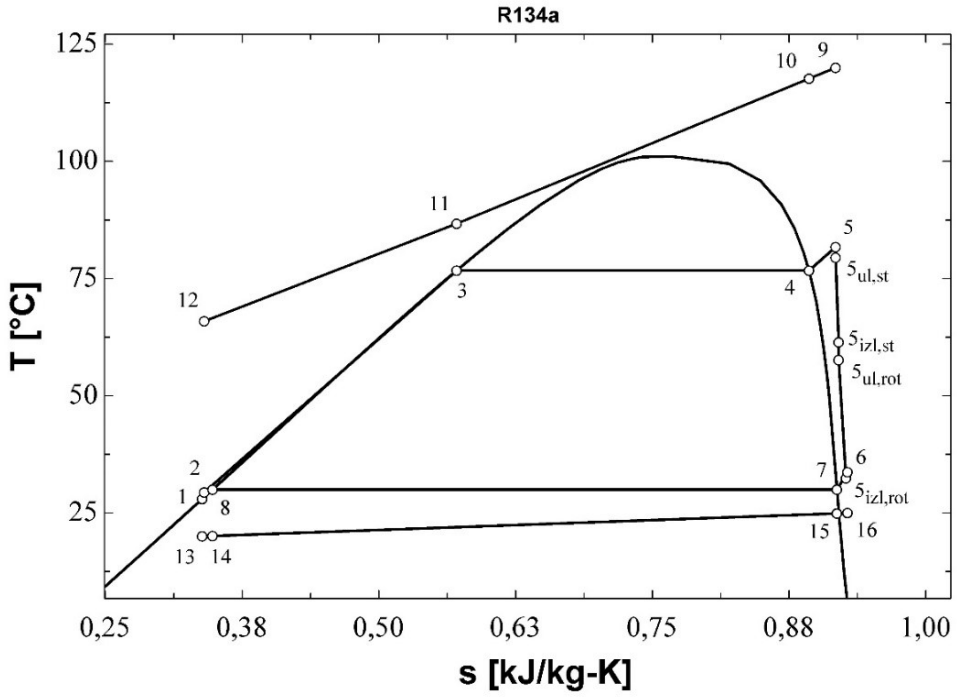
Slika 61: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 72

Tablica 73: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.3228
r_2 [m]	0.2654
r_3 [m]	0.2372
r_4 [m]	0.2221
r_{s5} [m]	0.1709
r_{h5} [m]	0.04664
r_{vol} [m]	0.05749
b_2 [m]	0.02856
b_3 [m]	0.02856
b_4 [m]	0.02856
Z [m]	0.1864
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6497
M_3 [-]	1.089
M_4 [-]	1.159
M_5 [-]	0.3117
η_t [%]	81.35

Tablica 74: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R134a	7.706	28	90.69	0.3383	109.2					
2	R134a	24.56	29.39	92.7	0.3403	109.2					
3	R134a	24.56	76.72	168.1	0.5711	109.2					
4	R134a	24.56	76.72	280.8	0.8932	109.2					
5	R134a	24.56	81.74	289.4	0.9176	109.2					
$5_{ul,st}$	R134a	23.54	79.48	288.6	0.9176	109.2					
$5_{izl,st}$	R134a	16.12	61.37	282.2	0.9203	109.2					
$5_{ul,rot}$	R134a	14.86	57.64	280.5	0.9203	109.2					
$5_{izl,rot}$	R134a	7.706	32.39	269.2	0.9271	109.2					
6	R134a	7.904	33.73	270.1	0.9284	109.2					
7	R134a	7.706	30	266.7	0.9188	109.2	29.73	4.256	1690	5.019	6624
8	R134a	7.706	30	93.58	0.3479	109.2					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.7	495.1	1.501	94.38					
11	Voda	20	86.72	364.7	1.153	94.38					
12	Voda	20	65.9	277.5	0.9036	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	3894					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	3894					
15	Zrak	1	24.9	298.4	6.864	3894					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	3894					



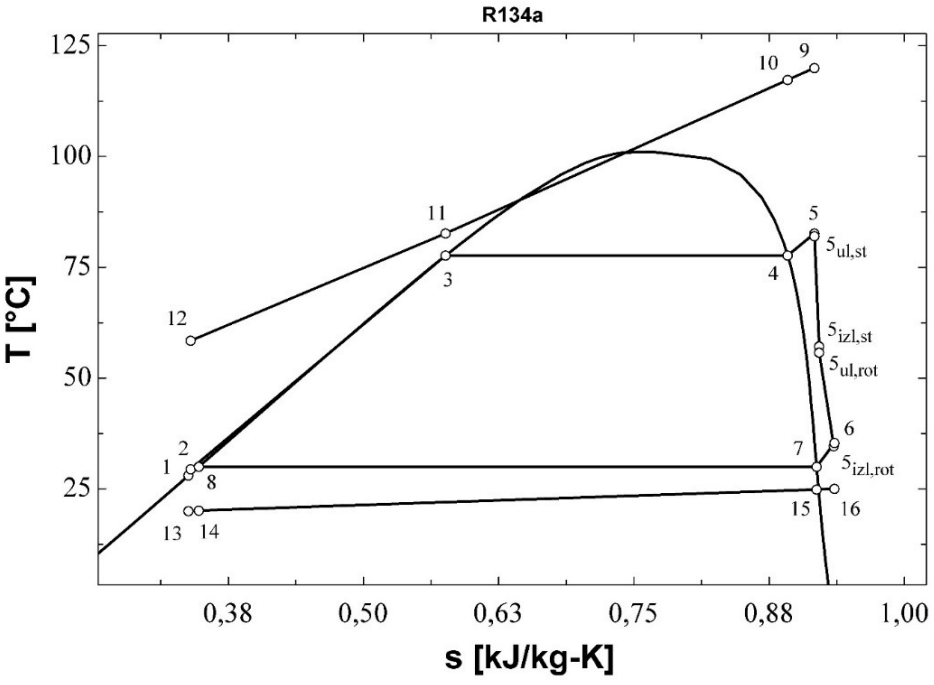
Slika 62: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 74

Tablica 75: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.3178
r_2 [m]	0.2591
r_3 [m]	0.2314
r_4 [m]	0.2157
r_{s5} [m]	0.1658
r_{h5} [m]	0.0453
r_{vol} [m]	0.05828
b_2 [m]	0.02941
b_3 [m]	0.02941
b_4 [m]	0.02941
Z [m]	0.1808
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6532
M_3 [-]	1.04
M_4 [-]	1.112
M_5 [-]	0.3057
η_t [%]	81.35

Tablica 76: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R134a	7.706	28	90.69	0.3383	124.1					
2	R134a	25.07	29.43	92.76	0.3404	124.1					
3	R134a	25.07	77.66	169.9	0.5759	124.1					
4	R134a	25.07	77.66	280.8	0.8921	124.1					
5	R134a	25.07	82.66	289.5	0.9168	124.1					
$5_{ul,st}$	R134a	24.77	82.02	289.3	82.02	124.1					
$5_{izl,st}$	R134a	14.64	57.16	280.5	57.16	124.1					
$5_{ul,rot}$	R134a	14.19	55.78	279.9	55.78	124.1					
$5_{izl,rot}$	R134a	7.706	34.61	271.5	34.61	124.1					
6	R134a	7.816	35.36	272	35.36	124.1					
7	R134a	7.706	30	266.7	30	124.1	29.85	4.246	1684	5	3000
8	R134a	7.706	30	93.58	30	124.1					
9	Voda	20	120	505	120	94.38					
10	Voda	20	117.3	493.6	117.3	94.38					
11	Voda	20	82.66	347.6	82.66	94.38					
12	Voda	20	58.45	246.3	58.45	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	20	4473					
14	Zrak	1	20.08	293.5	20.08	4473					
15	Zrak	1	24.85	298.3	24.85	4473					
16	Zrak	1	25	298.4	25	4473					



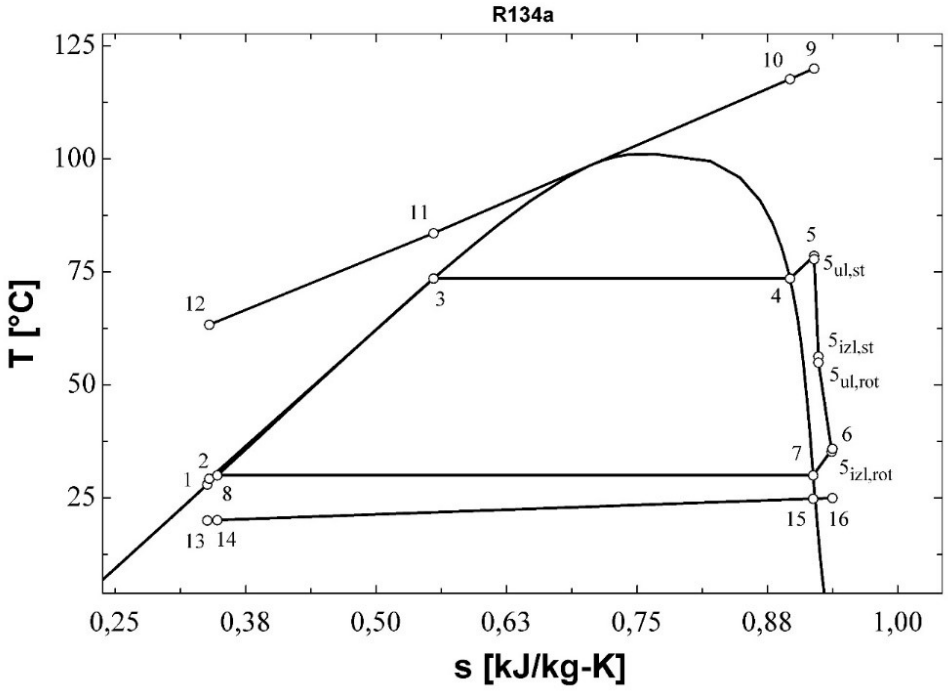
Slika 63: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 76

Tablica 77: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5197
r_2 [m]	0.4627
r_3 [m]	0.4296
r_4 [m]	0.4205
r_{s5} [m]	0.2234
r_{h5} [m]	0.0883
r_{vol} [m]	0.05672
b_2 [m]	0.02228
b_3 [m]	0.02228
b_4 [m]	0.02228
Z [m]	0.2026
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.6971
M_3 [-]	1.161
M_4 [-]	1.186
M_5 [-]	0.2327
η_t [%]	77.97

Tablica 78: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R134a	7.706	28	90.69	0.3383	114.7					
2	R134a	22.92	29.26	92.51	0.3401	114.7					
3	R134a	22.92	73.56	162.4	0.5552	114.7					
4	R134a	22.92	73.56	280.8	0.8966	114.7					
5	R134a	22.92	78.56	288.8	0.9197	114.7					
$5_{ul,st}$	R134a	22.61	77.84	288.6	0.9197	114.7					
$5_{izl,st}$	R134a	14.13	56.32	280.7	0.9239	114.7					
$5_{ul,rot}$	R134a	13.72	55	280.1	0.9239	114.7					
$5_{izl,rot}$	R134a	7.706	35.2	272.1	0.9367	114.7					
6	R134a	7.81	35.91	272.6	0.9374	114.7					
7	R134a	7.706	30	266.7	0.9188	114.7	25.43	3.632	1442	5	3000
8	R134a	7.706	30	93.58	0.3479	114.7					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.7	495.2	1.501	94.38					
11	Voda	20	83.56	351.4	1.116	94.38					
12	Voda	20	63.3	266.6	0.8713	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4145					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4145					
15	Zrak	1	24.84	298.3	6.864	4145					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4145					



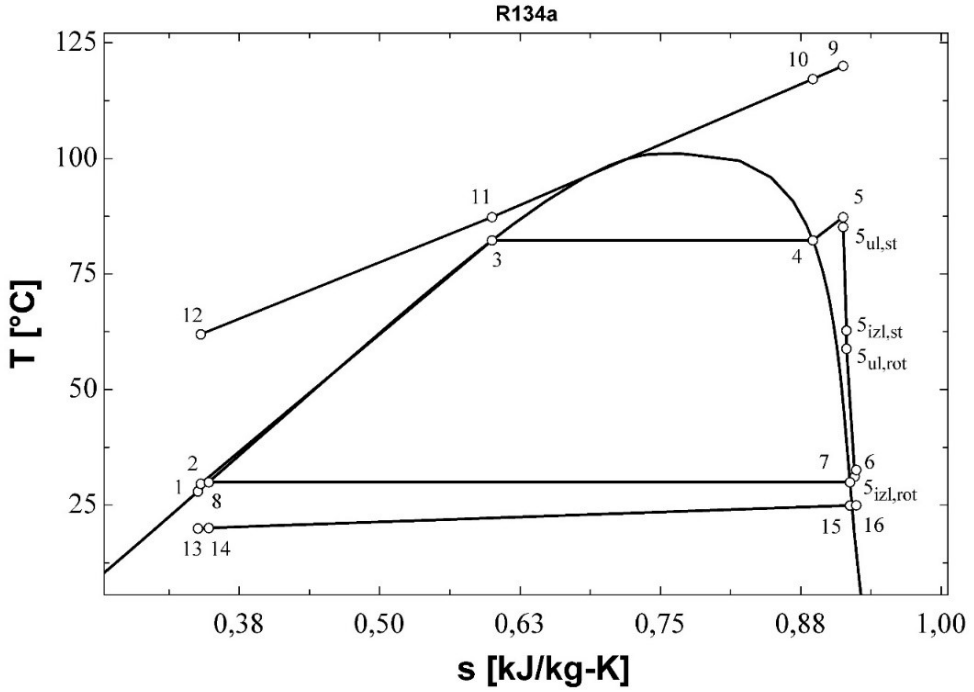
Slika 64: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 78

Tablica 79: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5087
r_2 [m]	0.4516
r_3 [m]	0.4193
r_4 [m]	0.4101
r_{s5} [m]	0.2177
r_{h5} [m]	0.08611
r_{vol} [m]	0.05686
b_2 [m]	0.02258
b_3 [m]	0.02258
b_4 [m]	0.02258
Z [m]	0.1974
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.7048
M_3 [-]	1.123
M_4 [-]	1.148
M_5 [-]	0.2267
η_t [%]	78.05

Tablica 80: Rezultati optimiziranja W_{net} za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R134a	7.706	28	90.69	0.3383	117					
2	R134a	27.67	29.64	93.07	0.3407	117					
3	R134a	27.67	82.29	178.7	0.6001	117					
4	R134a	27.67	82.29	280.2	0.8858	117					
5	R134a	27.67	87.29	289.9	0.9128	117					
$5_{ul,st}$	R134a	26.64	85.18	289.2	0.9128	117					
$5_{izl,st}$	R134a	17.02	62.77	281.7	0.9158	117					
$5_{ul,rot}$	R134a	15.65	58.84	280.1	0.9158	117					
$5_{izl,rot}$	R134a	7.706	31.24	268	0.9231	117					
6	R134a	7.914	32.65	268.9	0.9245	117					
7	R134a	7.706	30	266.7	0.9188	117	34.71	4.952	1966	5	6703
8	R134a	7.706	30	93.58	0.3479	117					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.2	493	1.495	94.38					
11	Voda	20	87.29	367.1	1.16	94.38					
12	Voda	20	61.96	261	0.8546	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4146					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4146					
15	Zrak	1	24.94	298.4	6.864	4146					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4146					



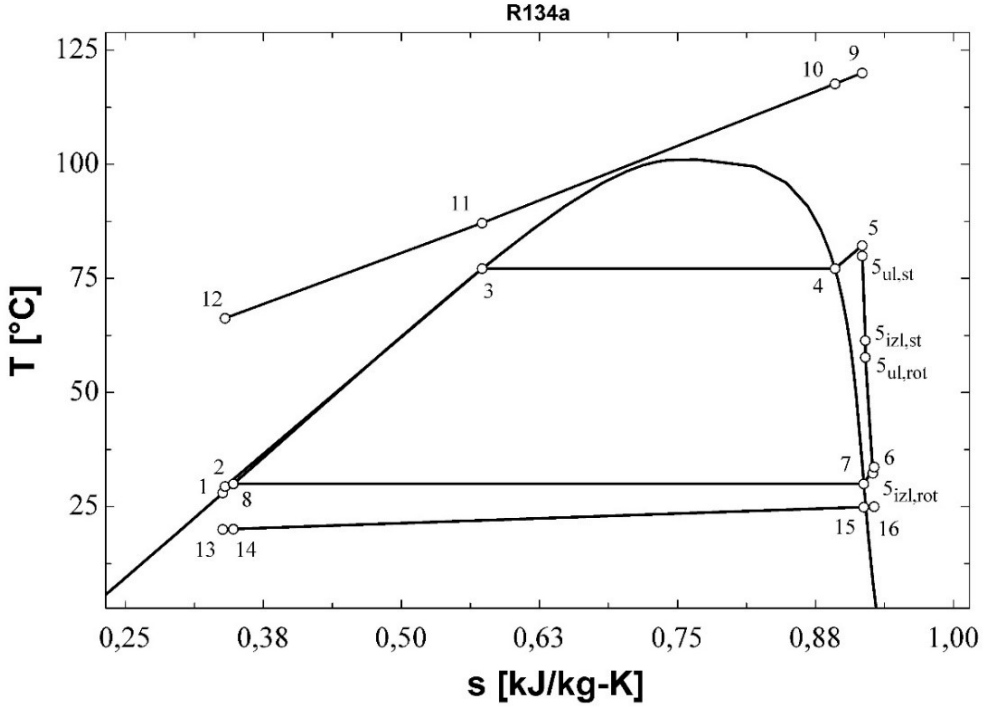
Slika 65: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 80

Tablica 81: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.3192
r_2 [m]	0.2628
r_3 [m]	0.2349
r_4 [m]	0.2201
r_{s5} [m]	0.1695
r_{h5} [m]	0.04622
r_{vol} [m]	0.05657
b_2 [m]	0.02803
b_3 [m]	0.02803
b_4 [m]	0.02803
Z [m]	0.185
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6487
M_3 [-]	1.098
M_4 [-]	1.167
M_5 [-]	0.313
η_t [%]	81.34

Tablica 82: Rezultati optimiziranja W_{net} za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R134a	7.706	28	90.69	0.3383	108.5	29.73	4.257	1691	5.032	6617
2	R134a	24.79	29.41	92.73	0.3404	108.5					
3	R134a	24.79	77.15	168.9	0.5733	108.5					
4	R134a	24.79	77.15	280.8	0.8927	108.5					
5	R134a	24.79	82.18	289.5	0.9173	108.5					
$5_{ul,st}$	R134a	23.77	79.94	288.7	0.9173	108.5					
$5_{izl,st}$	R134a	16.16	61.41	282.1	0.9201	108.5					
$5_{ul,rot}$	R134a	14.9	57.7	280.5	0.9201	108.5					
$5_{izl,rot}$	R134a	7.706	32.34	269.1	0.9269	108.5					
6	R134a	7.903	33.67	270.1	0.9282	108.5					
7	R134a	7.706	30	266.7	0.9188	108.5					
8	R134a	7.706	30	93.58	0.3479	108.5					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.7	495.1	1.501	94.38					
11	Voda	20	87.15	366.4	1.158	94.38					
12	Voda	20	66.27	279	0.9081	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	3866					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	3866					
15	Zrak	1	24.91	298.4	6.864	3866					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	3866					



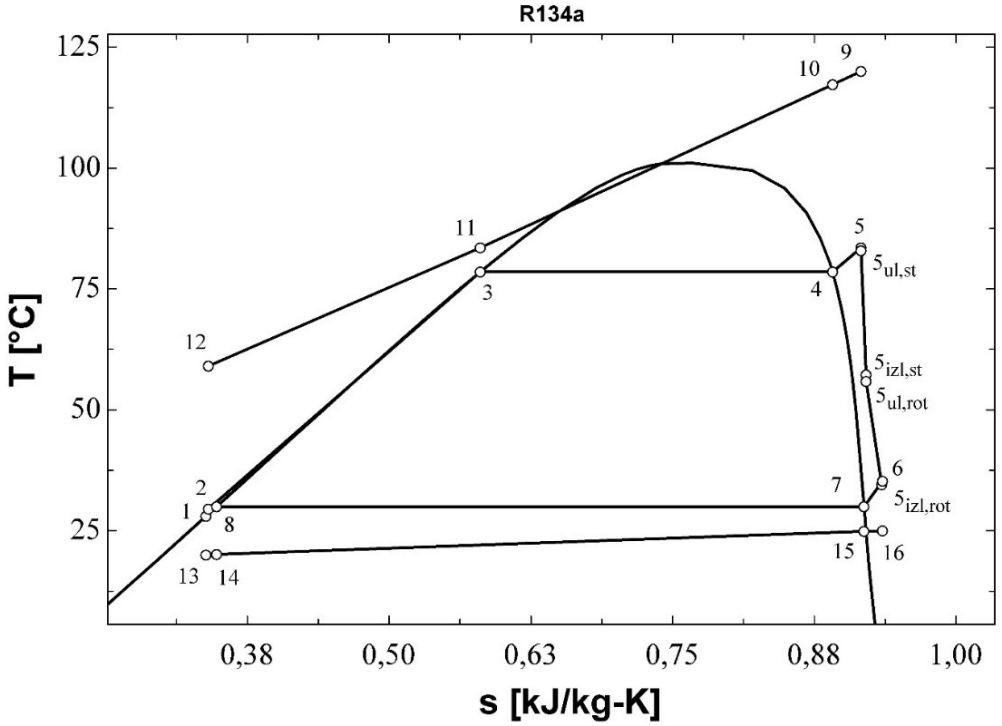
Slika 66: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 82

Tablica 83: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.3173
r_2 [m]	0.2592
r_3 [m]	0.2316
r_4 [m]	0.2163
r_{s5} [m]	0.1656
r_{h5} [m]	0.04541
r_{vol} [m]	0.05771
b_2 [m]	0.02905
b_3 [m]	0.02905
b_4 [m]	0.02905
Z [m]	0.1803
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.654
M_3 [-]	1.047
M_4 [-]	1.118
M_5 [-]	0.3048
η_t [%]	81.39

Tablica 84: Rezultati optimiziranja W_{net} za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R134a	7.706	28	90.69	0.3383	122.8					
2	R134a	25.53	29.47	92.82	0.3405	122.8					
3	R134a	25.53	78.53	171.5	0.5804	122.8					
4	R134a	25.53	78.53	280.7	0.8911	122.8					
5	R134a	25.53	83.53	289.6	0.9161	122.8					
$5_{ul,st}$	R134a	25.25	82.93	289.4	0.9161	122.8					
$5_{izl,st}$	R134a	14.72	57.25	280.4	0.9206	122.8					
$5_{ul,rot}$	R134a	14.28	55.88	279.8	0.9206	122.8					
$5_{izl,rot}$	R134a	7.706	34.51	271.4	0.9344	122.8					
6	R134a	7.817	35.27	271.9	0.9351	122.8	29.84	4.247	1685	5	3000
7	R134a	7.706	30	266.7	0.9188	122.8					
8	R134a	7.706	30	93.58	0.3479	122.8					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	117.3	493.5	1.497	94.38					
11	Voda	20	83.53	351.3	1.116	94.38					
12	Voda	20	59.08	249	0.8186	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4424					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4424					
15	Zrak	1	24.85	298.3	6.864	4424					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4424					



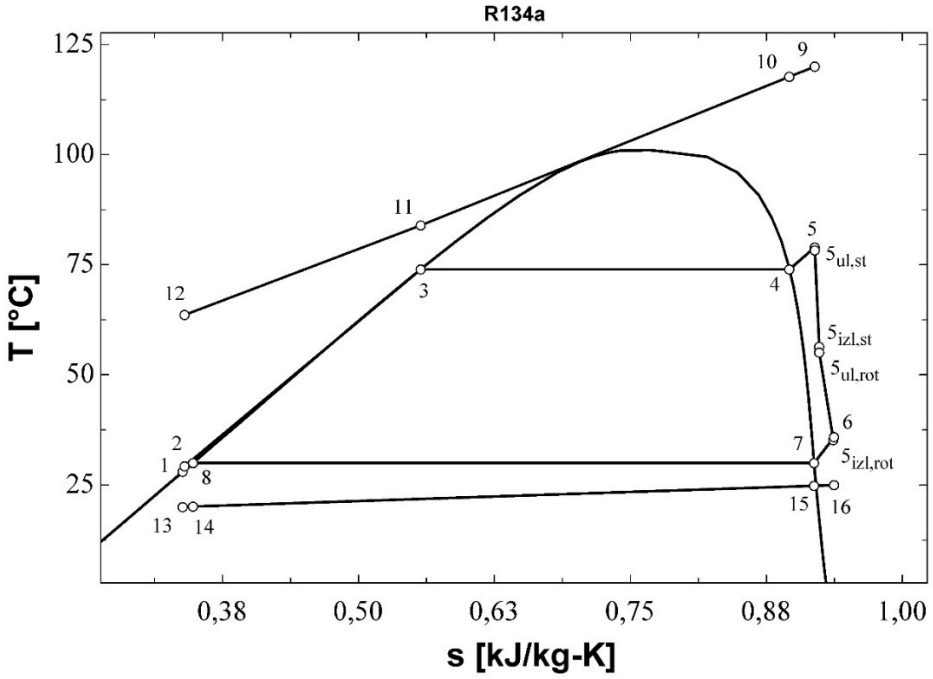
Slika 67: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 84

Tablica 85: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5196
r_2 [m]	0.4634
r_3 [m]	0.4303
r_4 [m]	0.4214
r_{s5} [m]	0.2223
r_{h5} [m]	0.0885
r_{vol} [m]	0.05592
b_2 [m]	0.02176
b_3 [m]	0.02176
b_4 [m]	0.02176
Z [m]	0.2006
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.695
M_3 [-]	1.17
M_4 [-]	1.194
M_5 [-]	0.2333
η_t [%]	77.86

Tablica 86: Rezultati optimiziranja W_{net} za R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N =3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R134a	7.706	28	90.69	0.3383	114					
2	R134a	23.13	29.27	92.53	0.3402	114					
3	R134a	23.13	73.98	163.1	0.5573	114					
4	R134a	23.13	73.98	280.8	0.8962	114					
5	R134a	23.13	78.98	288.9	0.9194	114					
$5_{ul,st}$	R134a	22.83	78.28	288.7	78.28	114					
$5_{izl,st}$	R134a	14.17	56.39	280.7	56.39	114					
$5_{ul,rot}$	R134a	13.76	55.07	280.1	55.07	114					
$5_{izl,rot}$	R134a	7.706	35.17	272.1	35.17	114					
6	R134a	7.811	35.89	272.6	35.89	114					
7	R134a	7.706	30	266.7	30	114	25.43	3.633	1442	5	3000
8	R134a	7.706	30	93.58	30	114					
9	Voda	20	120	505	120	94.38					
10	Voda	20	117.7	495.2	117.7	94.38					
11	Voda	20	83.98	353.1	83.98	94.38					
12	Voda	20	63.63	268	63.63	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	20	4119					
14	Zrak	1	20.08	293.5	20.08	4119					
15	Zrak	1	24.84	298.3	24.84	4119					
16	Zrak	1	25	298.4	25	4119					



Slika 68: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 86

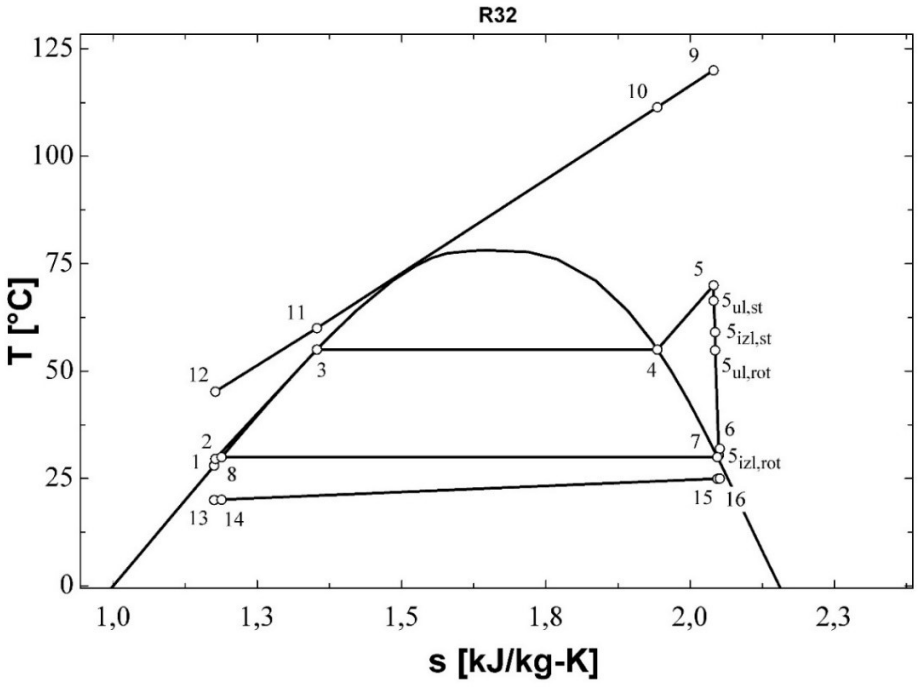
Tablica 87: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R134a (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5087
r_2 [m]	0.452
r_3 [m]	0.4197
r_4 [m]	0.4106
r_{s5} [m]	0.2171
r_{h5} [m]	0.08622
r_{vol} [m]	0.05644
b_2 [m]	0.02229
b_3 [m]	0.02229
b_4 [m]	0.02229
Z [m]	0.1963
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.7037
M_3 [-]	1.127
M_4 [-]	1.152
M_5 [-]	0.227
η_t [%]	77.99

5. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za R32

Tablica 88: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R32	19.28	28	251.3	1.175	105.1	24.16	3.403	1348	14.98	8489
2	R32	35.21	29.6	253.7	1.177	105.1					
3	R32	35.21	55.01	309.3	1.353	105.1					
4	R32	35.21	55.01	502.9	1.943	105.1					
5	R32	35.21	69.99	535.6	2.041	105.1					
$5_{ul,st}$	R32	33.51	66.41	533.7	2.041	105.1					
$5_{izl,st}$	R32	30	59.07	530.6	2.044	105.1					
$5_{ul,rot}$	R32	28.26	54.88	528.4	2.044	105.1					
$5_{izl,rot}$	R32	19.28	30.48	516.5	2.05	105.1					
6	R32	19.64	31.97	517.7	2.051	105.1					
7	R32	19.28	30	515.7	2.047	105.1					
8	R32	19.28	30	255.3	1.188	105.1					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	111.4	468.7	1.433	94.38					
11	Voda	20	60.01	252.9	0.8303	94.38					
12	Voda	20	45.22	191.1	0.6405	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5563					
14	Zrak	1	20.07	293.5	6.847	5563					
15	Zrak	1	24.96	298.4	6.864	5563					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5563					



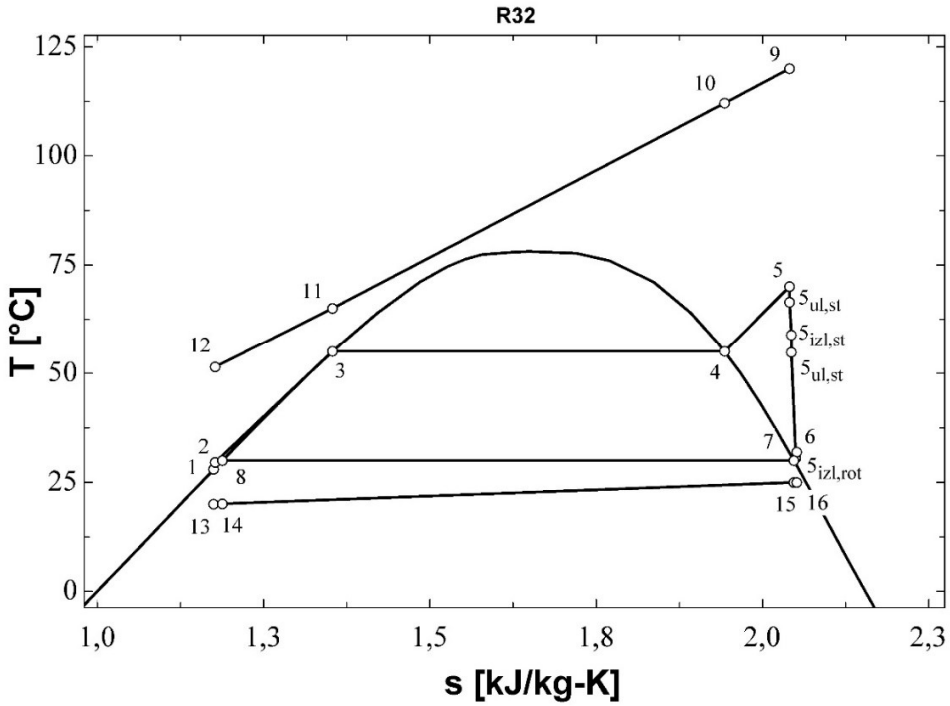
Slika 69: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 88

Tablica 89: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2728
r_2 [m]	0.2127
r_3 [m]	0.1888
r_4 [m]	0.1705
r_{s5} [m]	0.1265
r_{h5} [m]	0.03581
r_{vol} [m]	0.06
b_2 [m]	0.03374
b_3 [m]	0.03374
b_4 [m]	0.03374
Z [m]	0.136
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.537
M_3 [-]	0.6625
M_4 [-]	0.7394
M_5 [-]	0.2439
η_t [%]	81.48

Tablica 90: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N ≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R32	19.28	28	251.3	1.175	96.36					
2	R32	35.25	29.6	253.7	1.177	96.36					
3	R32	35.25	55.06	309.4	1.354	96.36					
4	R32	35.25	55.06	502.9	1.943	96.36					
5	R32	35.25	70.06	535.6	2.041	96.36					
$5_{ul,st}$	R32	33.54	66.48	533.7	2.041	96.36					
$5_{izl,st}$	R32	29.95	58.94	530.5	2.043	96.36					
$5_{ul,rot}$	R32	28.27	54.88	528.4	2.043	96.36					
$5_{izl,rot}$	R32	19.28	30.5	516.6	2.05	96.36					
6	R32	19.62	31.93	517.7	2.051	96.36					
7	R32	19.28	30	515.7	2.047	96.36	22.08	3.124	1238	15	8614
8	R32	19.28	30	255.3	1.188	96.36					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	112.1	471.6	1.44	94.38					
11	Voda	20	65.06	274	0.8932	94.38					
12	Voda	20	51.48	217.2	0.7219	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5100					
14	Zrak	1	20.07	293.5	6.847	5100					
15	Zrak	1	24.96	298.4	6.864	5100					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5100					



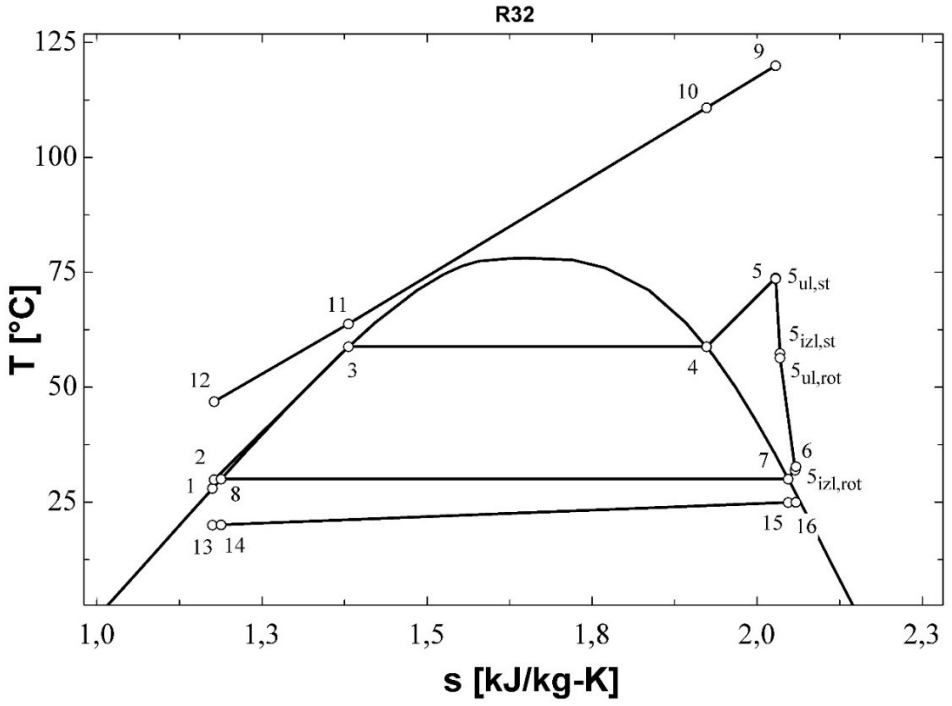
Slika 70: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 90

Tablica 91: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2642
r_2 [m]	0.2075
r_3 [m]	0.1847
r_4 [m]	0.1678
r_{s5} [m]	0.1229
r_{h5} [m]	0.03524
r_{vol} [m]	0.05652
b_2 [m]	0.0317
b_3 [m]	0.0317
b_4 [m]	0.0317
Z [m]	0.1315
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.5492
M_3 [-]	0.6762
M_4 [-]	0.7495
M_5 [-]	0.2382
η_t [%]	81.61

Tablica 92: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R32	19.28	28	251.3	1.175	103.4	17.01	2.399	950.2	14.99	3000
2	R32	38.32	29.9	254.2	1.178	103.4					
3	R32	38.32	58.82	318.8	1.381	103.4					
4	R32	38.32	58.82	498.9	1.923	103.4					
5	R32	38.32	73.81	534.3	2.028	103.4					
$5_{ul,st}$	R32	38.22	73.63	534.2	2.028	103.4					
$5_{izl,st}$	R32	29.96	57.35	527.6	2.035	103.4					
$5_{ul,rot}$	R32	29.56	56.39	527.1	2.035	103.4					
$5_{izl,rot}$	R32	19.28	31.94	519	2.058	103.4					
6	R32	19.47	32.75	519.6	2.059	103.4					
7	R32	19.28	30	515.7	2.047	103.4					
8	R32	19.28	30	255.3	1.188	103.4					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	110.8	466.2	1.426	94.38					
11	Voda	20	63.82	268.8	0.8777	94.38					
12	Voda	20	46.88	198	0.6623	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5512					
14	Zrak	1	20.07	293.5	6.847	5512					
15	Zrak	1	24.93	298.4	6.864	5512					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5512					



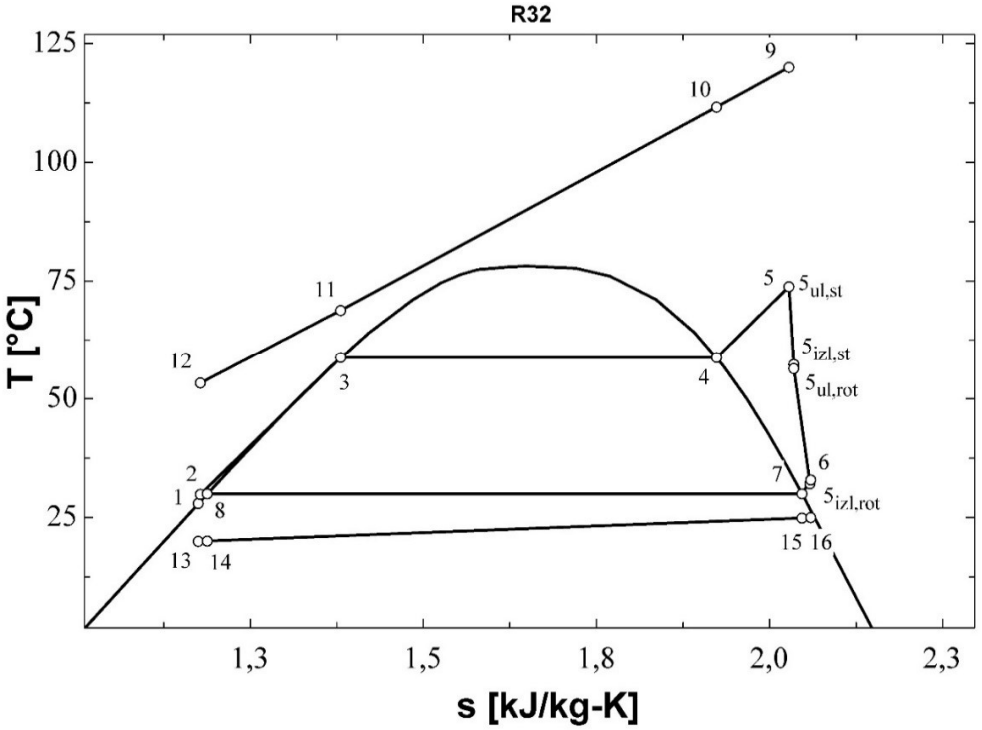
Slika 71: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 92

Tablica 93: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5184
r_2 [m]	0.4731
r_3 [m]	0.4403
r_4 [m]	0.4349
r_{s5} [m]	0.1748
r_{h5} [m]	0.09132
r_{vol} [m]	0.04521
b_2 [m]	0.01413
b_3 [m]	0.01413
b_4 [m]	0.01413
Z [m]	0.1252
Z_r [-]	16
Z_s [-]	21
M_2 [-]	0.7113
M_3 [-]	0.912
M_4 [-]	0.9257
M_5 [-]	0.1809
η_t [%]	73.96

Tablica 94: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R32	19.28	28	251.3	1.175	94.29					
2	R32	38.29	29.9	254.2	1.178	94.29					
3	R32	38.29	58.78	318.7	1.381	94.29					
4	R32	38.29	58.78	498.9	1.923	94.29					
5	R32	38.29	73.78	534.4	2.028	94.29					
$5_{ul,st}$	R32	38.28	73.77	534.4	2.028	94.29					
$5_{izl,st}$	R32	29.92	57.33	527.7	2.035	94.29					
$5_{ul,rot}$	R32	29.54	56.41	527.2	2.035	94.29					
$5_{izl,rot}$	R32	19.28	32.13	519.3	2.059	94.29					
6	R32	19.47	32.94	519.9	2.06	94.29					
7	R32	19.28	30	515.7	2.047	94.29	14.94	2.117	839.3	15	3000
8	R32	19.28	30	255.3	1.188	94.29					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	111.6	469.7	1.435	94.38					
11	Voda	20	68.78	289.5	0.9389	94.38					
12	Voda	20	53.37	225.1	0.7462	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5032					
14	Zrak	1	20.07	293.5	6.847	5032					
15	Zrak	1	24.92	298.4	6.864	5032					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5032					



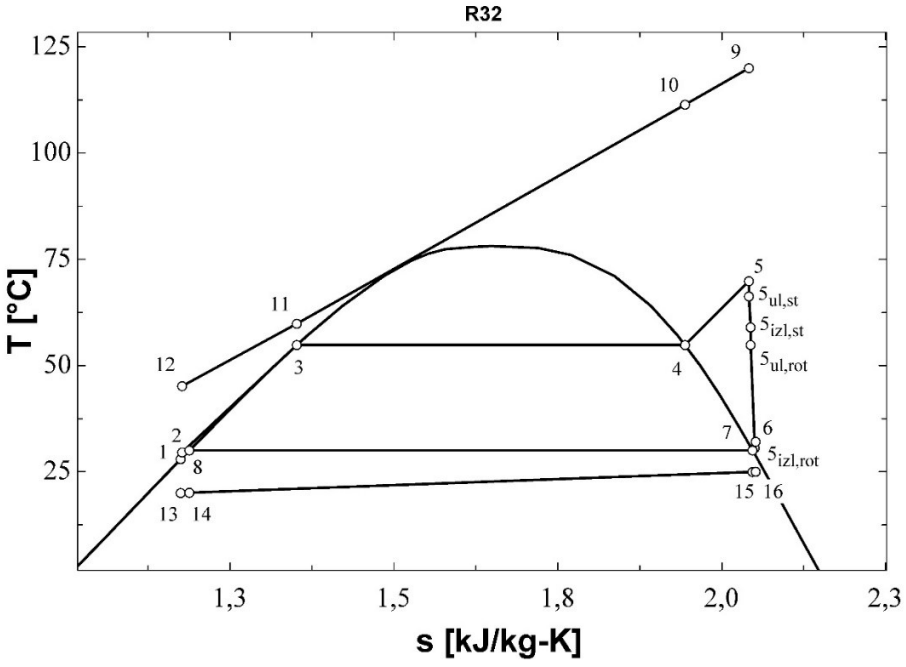
Slika 72: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 94

Tablica 95: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.511
r_2 [m]	0.468
r_3 [m]	0.4373
r_4 [m]	0.4322
r_{s5} [m]	0.17
r_{h5} [m]	0.09077
r_{vol} [m]	0.04287
b_2 [m]	0.01302
b_3 [m]	0.01302
b_4 [m]	0.01302
Z [m]	0.1188
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.7191
M_3 [-]	0.9192
M_4 [-]	0.9323
M_5 [-]	0.1813
η_t [%]	72.77

Tablica 96: Rezultati optimiziranja W_{net} za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R32	19.28	28	251.3	1.175	105.2					
2	R32	35.07	29.58	253.7	1.177	105.2					
3	R32	35.07	54.84	308.9	1.352	105.2					
4	R32	35.07	54.84	503.1	1.944	105.2					
5	R32	35.07	69.84	535.7	2.041	105.2					
$5_{ul,st}$	R32	33.38	66.27	533.8	2.041	105.2					
$5_{izl,st}$	R32	29.91	58.97	530.7	2.044	105.2					
$5_{ul,rot}$	R32	28.19	54.82	528.5	2.044	105.2					
$5_{izl,rot}$	R32	19.28	30.59	516.7	2.05	105.2					
6	R32	19.63	32.07	517.9	2.052	105.2					
7	R32	19.28	30	515.7	2.047	105.2	24.03	3.385	1341	15	8395
8	R32	19.28	30	255.3	1.188	105.2					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	111.4	468.8	1.433	94.38					
11	Voda	20	59.84	252.1	0.8281	94.38					
12	Voda	20	45.14	190.7	0.6395	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5570					
14	Zrak	1	20.07	293.5	6.847	5570					
15	Zrak	1	24.96	298.4	6.864	5570					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5570					



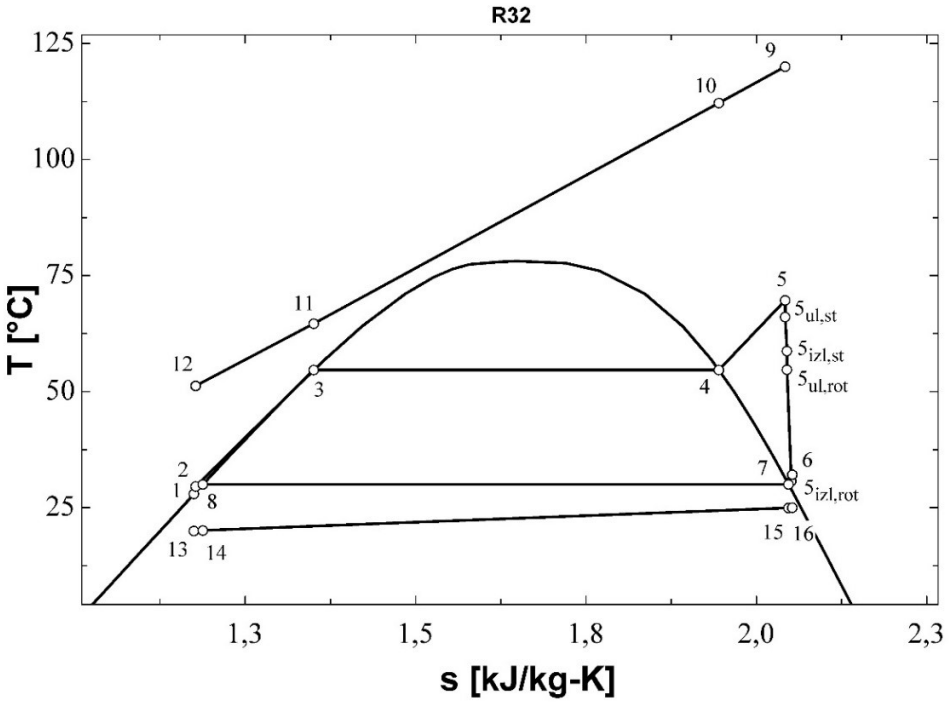
Slika 73: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 96

Tablica 97: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2742
r_2 [m]	0.2141
r_3 [m]	0.1902
r_4 [m]	0.1719
r_{s5} [m]	0.1271
r_{h5} [m]	0.0361
r_{vol} [m]	0.06002
b_2 [m]	0.03376
b_3 [m]	0.03376
b_4 [m]	0.03376
Z [m]	0.1365
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.5382
M_3 [-]	0.6631
M_4 [-]	0.7391
M_5 [-]	0.242
η_t [%]	81.51

Tablica 98: Rezultati optimiziranja W_{net} za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R32	19.28	28	251.3	1.175	96.59					
2	R32	34.93	29.57	253.7	1.177	96.59					
3	R32	34.93	54.66	308.5	1.351	96.59					
4	R32	34.93	54.66	503.3	1.945	96.59					
5	R32	34.93	69.66	535.7	2.042	96.59					
$5_{ul,st}$	R32	33.25	66.11	533.9	2.042	96.59					
$5_{izl,st}$	R32	29.76	58.74	530.7	2.045	96.59					
$5_{ul,rot}$	R32	28.1	54.73	528.6	2.045	96.59					
$5_{izl,rot}$	R32	19.28	30.72	516.9	2.051	96.59					
6	R32	19.62	32.13	518	2.053	96.59					
7	R32	19.28	30	515.7	2.047	96.59	21.8	3.084	1222	15	8507
8	R32	19.28	30	255.3	1.188	96.59					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	112.2	471.8	1.441	94.38					
11	Voda	20	64.66	272.3	0.8882	94.38					
12	Voda	20	51.27	216.4	0.7192	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5119					
14	Zrak	1	20.07	293.5	6.847	5119					
15	Zrak	1	24.96	298.4	6.864	5119					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5119					



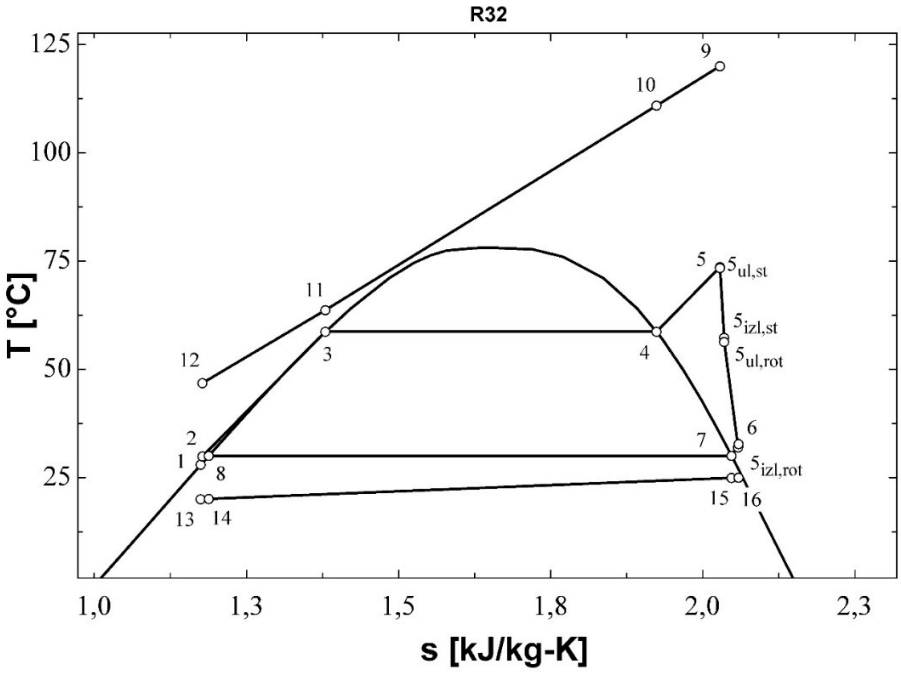
Slika 74: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 98

Tablica 99: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.266
r_2 [m]	0.2089
r_3 [m]	0.1859
r_4 [m]	0.1688
r_{s5} [m]	0.1235
r_{h5} [m]	0.03546
r_{vol} [m]	0.05703
b_2 [m]	0.03203
b_3 [m]	0.03203
b_4 [m]	0.03203
Z [m]	0.1321
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.5462
M_3 [-]	0.671
M_4 [-]	0.7441
M_5 [-]	0.2367
η_t [%]	81.26

Tablica 100: Rezultati optimiziranja W_{net} za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R32	19.28	28	251.3	1.175	103.5	16.95	2.39	946.7	14.93	3000
2	R32	38.21	29.89	254.2	1.178	103.5					
3	R32	38.21	58.69	318.5	1.38	103.5					
4	R32	38.21	58.69	499	1.924	103.5					
5	R32	38.21	73.62	534.3	2.028	103.5					
$5_{ul,st}$	R32	38.11	73.42	534.2	2.028	103.5					
$5_{izl,st}$	R32	29.93	57.28	527.6	2.035	103.5					
$5_{ul,rot}$	R32	29.52	56.33	527.1	2.035	103.5					
$5_{izl,rot}$	R32	19.28	31.93	519	2.058	103.5					
6	R32	19.47	32.74	519.6	2.059	103.5					
7	R32	19.28	30	515.7	2.047	103.5					
8	R32	19.28	30	255.3	1.188	103.5					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	110.9	466.4	1.427	94.38					
11	Voda	20	63.69	268.2	0.8761	94.38					
12	Voda	20	46.82	197.7	0.6614	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	5518					
14	Zrak	1	20.07	293.5	6.847	5518					
15	Zrak	1	24.93	298.4	6.864	5518					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	5518					



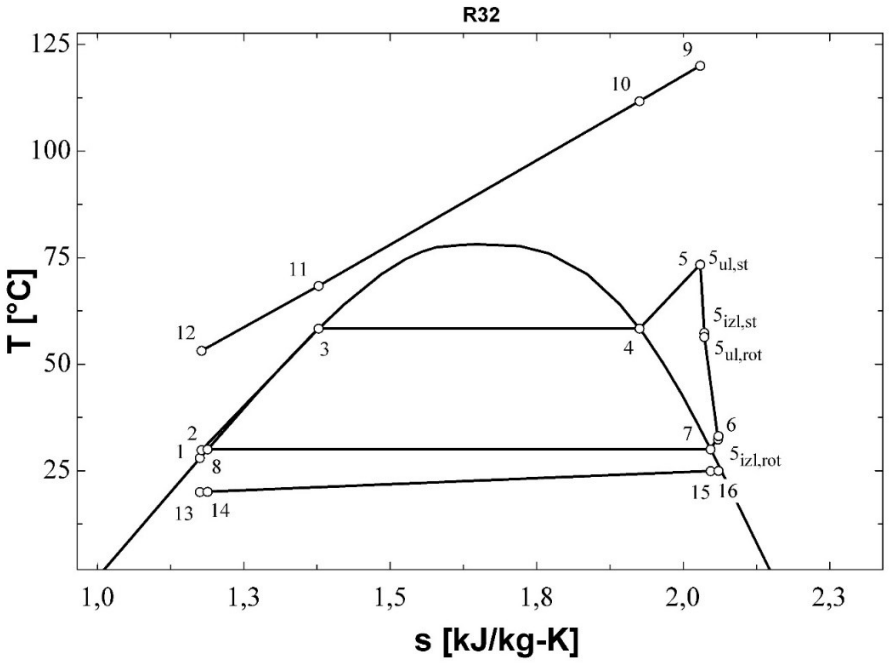
Slika 75: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 100

Tablica 101: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5181
r_2 [m]	0.4727
r_3 [m]	0.4399
r_4 [m]	0.4344
r_{s5} [m]	0.1749
r_{h5} [m]	0.09123
r_{vol} [m]	0.0453
b_2 [m]	0.0142
b_3 [m]	0.0142
b_4 [m]	0.0142
Z [m]	0.1255
Z_r [-]	16
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.7112
M_3 [-]	0.9103
M_4 [-]	0.9241
M_5 [-]	0.1807
η_t [%]	73.99

Tablica 102: Rezultati optimiziranja W_{net} za R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	R32	19.28	28	251.3	1.175	94.5	14.78	2.094	830.3	15	3000
2	R32	37.95	29.87	254.2	1.178	94.5					
3	R32	37.95	58.38	317.7	1.378	94.5					
4	R32	37.95	58.38	499.4	1.926	94.5					
5	R32	37.95	73.38	534.5	2.029	94.5					
$5_{ul,st}$	R32	37.93	73.33	534.5	2.029	94.5					
$5_{izl,st}$	R32	29.82	57.32	528	2.036	94.5					
$5_{ul,rot}$	R32	29.43	56.4	527.5	2.036	94.5					
$5_{izl,rot}$	R32	19.28	32.32	519.6	2.06	94.5					
6	R32	19.47	33.13	520.2	33.13	94.5					
7	R32	19.28	30	515.7	30	94.5					
8	R32	19.28	30	255.3	30	94.5					
9	Voda	20	120	505	120	94.38					
10	Voda	20	111.7	469.9	111.7	94.38					
11	Voda	20	68.38	287.8	68.38	94.38					
12	Voda	20	53.17	224.3	53.17	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	20	5049					
14	Zrak	1	20.07	293.5	20.07	5049					
15	Zrak	1	24.92	298.4	24.92	5049					
16	Zrak	1	25	298.4	25	5049					



Slika 76: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 102

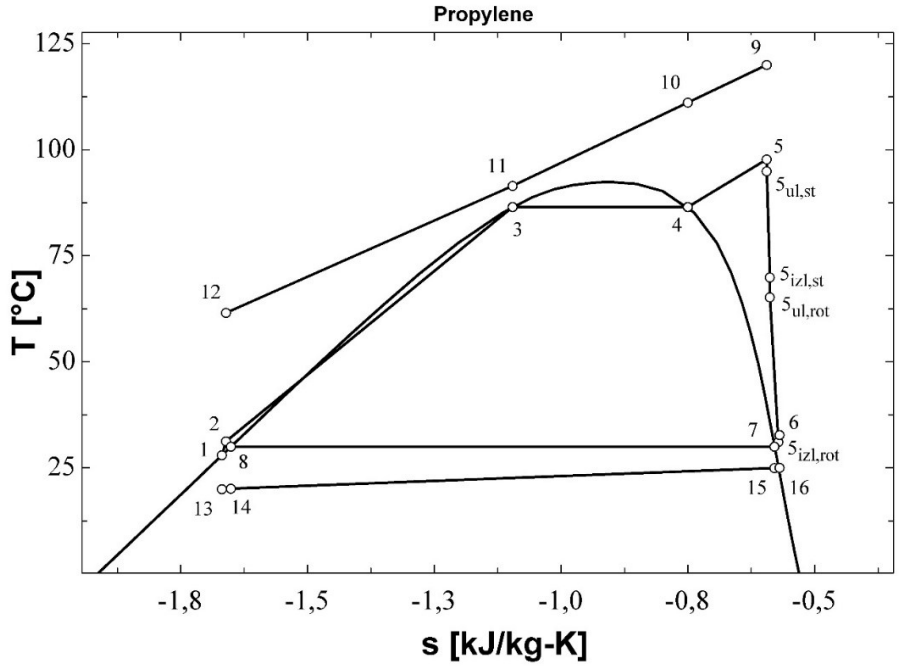
Tablica 103: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; R32 (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5104
r_2 [m]	0.4671
r_3 [m]	0.4364
r_4 [m]	0.4313
r_{s5} [m]	0.1704
r_{h5} [m]	0.09056
r_{vol} [m]	0.04314
b_2 [m]	0.0132
b_3 [m]	0.0132
b_4 [m]	0.0132
Z [m]	0.1197
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.719
M_3 [-]	0.914
M_4 [-]	0.9271
M_5 [-]	0.1805
η_t [%]	72.86

6. Tablice i dijagrami rezultata optimiranja za propilen

Tablica 104: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	Propilen	13.07	28	-364.1	-1.669	62.65	35.84	5.112	2029	11.21	13218
2	Propilen	41.99	31.27	-355.9	-1.661	62.65					
3	Propilen	41.99	86.53	-166.6	-1.096	62.65					
4	Propilen	41.99	86.53	-42.22	-0.7499	62.65					
5	Propilen	41.99	97.74	14.42	-0.5945	62.65					
$5_{ul,st}$	Propilen	40.31	94.95	12.67	-0.5945	62.65					
$5_{izl,st}$	Propilen	27.22	69.91	-2.6	-0.5884	62.65					
$5_{ul,rot}$	Propilen	25.21	65.21	-6.094	-0.5884	62.65					
$5_{izl,rot}$	Propilen	13.07	31.09	-31.57	-0.5719	62.65					
6	Propilen	13.4	32.77	-29.53	-0.569	62.65					
7	Propilen	13.07	30	-33.76	-0.5791	62.65					
8	Propilen	13.07	30	-358.7	-1.651	62.65					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	111.1	467.4	1.429	94.38					
11	Voda	20	91.53	384.9	1.209	94.38					
12	Voda	20	61.55	259.3	0.8495	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4165					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4165					
15	Zrak	1	24.94	298.4	6.864	4165					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4165					



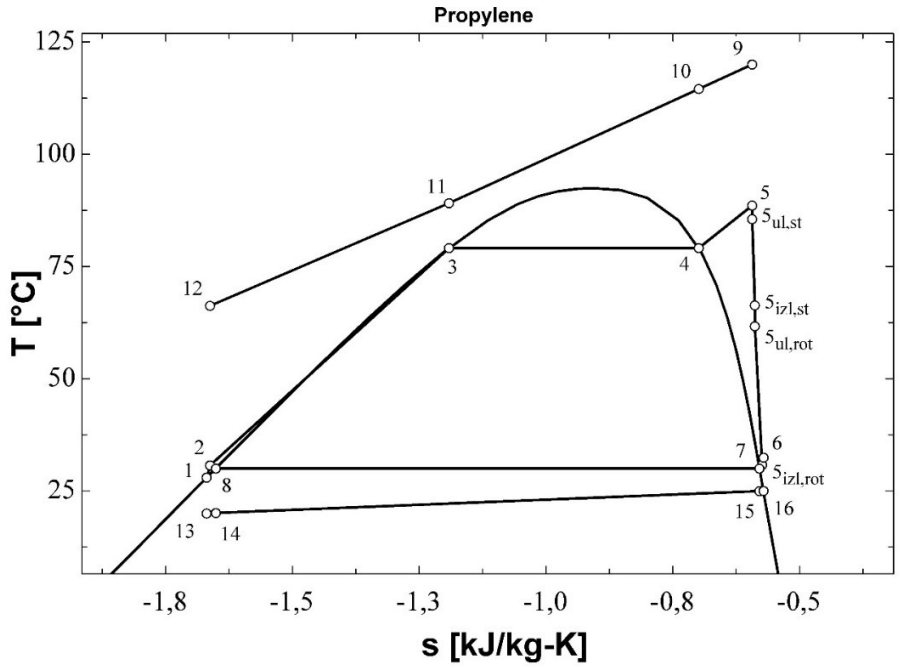
Slika 77: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 104

Tablica 105: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2321
r_2 [m]	0.1914
r_3 [m]	0.1726
r_4 [m]	0.1621
r_{s5} [m]	0.1218
r_{h5} [m]	0.03405
r_{vol} [m]	0.04063
b_2 [m]	0.02048
b_3 [m]	0.02048
b_4 [m]	0.02048
Z [m]	0.1317
Z_r [-]	14
Z_s [-]	18
M_2 [-]	0.6622
M_3 [-]	1.064
M_4 [-]	1.131
M_5 [-]	0.2942
η_t [%]	80.89

Tablica 106: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	Propilen	13.07	28	-364.1	-1.669	58.33					
2	Propilen	36.66	30.68	-357.4	-1.662	58.33					
3	Propilen	36.66	79.1	-202.1	-1.191	58.33					
4	Propilen	36.66	79.1	-28.55	-0.6985	58.33					
5	Propilen	36.66	88.58	8.856	-0.5936	58.33					
$5_{ul,st}$	Propilen	35.03	85.53	6.858	-0.5936	58.33					
$5_{izl,st}$	Propilen	25.66	66.34	-5.151	-0.588	58.33					
$5_{ul,rot}$	Propilen	23.77	61.7	-8.667	-0.588	58.33					
$5_{izl,rot}$	Propilen	13.07	30.79	-32.18	-0.5739	58.33					
6	Propilen	13.39	32.44	-30.18	32.44	58.33					
7	Propilen	13.07	30	-33.76	30	58.33	29.73	4.256	1690	9.483	13411
8	Propilen	13.07	30	-358.7	30	58.33					
9	Voda	20	120	505	120	94.38					
10	Voda	20	114.5	481.9	114.5	94.38					
11	Voda	20	89.1	374.6	89.1	94.38					
12	Voda	20	66.21	278.8	66.21	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	20	3871					
14	Zrak	1	20.08	293.5	20.08	3871					
15	Zrak	1	24.95	298.4	24.95	3871					
16	Zrak	1	25	298.4	25	3871					



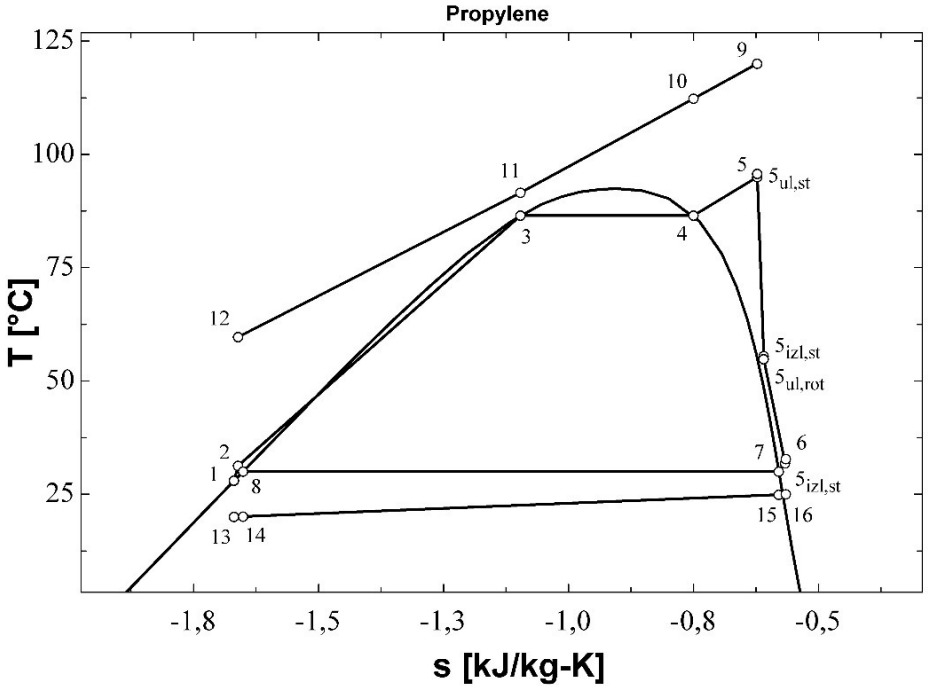
Slika 78: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 106

Tablica 107: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2275
r_2 [m]	0.1847
r_3 [m]	0.1649
r_4 [m]	0.1532
r_{s5} [m]	0.1166
r_{h5} [m]	0.03218
r_{vol} [m]	0.04272
b_2 [m]	0.02201
b_3 [m]	0.02201
b_4 [m]	0.02201
Z [m]	0.1267
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6549
M_3 [-]	0.9821
M_4 [-]	1.055
M_5 [-]	0.2919
η_t [%]	81.4

Tablica 108: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	ṁ[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	Propilen	13.07	28	-364.1	-1.669	66.45					
2	Propilen	41.99	31.27	-355.9	-1.661	66.45					
3	Propilen	41.99	86.53	-166.6	-1.096	66.45					
4	Propilen	41.99	86.53	-42.22	-0.7499	66.45					
5	Propilen	41.99	95.01	4.07	-0.6225	66.45					
$5_{ul,st}$	Propilen	42.4	95.71	4.476	-0.6225	66.45					
$5_{izl,st}$	Propilen	22.46	55.51	-18.43	-0.6097	66.45					
$5_{ul,rot}$	Propilen	22.19	54.81	-18.95	-0.6097	66.45					
$5_{izl,rot}$	Propilen	13.07	31.86	-30.03	-0.5668	66.45					
6	Propilen	13.25	32.76	-28.93	-0.5653	66.45					
7	Propilen	13.07	30	-33.76	-0.5791	66.45	25.2	3.588	1424	8.474	3000
8	Propilen	13.07	30	-358.7	-1.651	66.45					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	112.3	472.5	1.442	94.38					
11	Voda	20	91.53	384.9	1.209	94.38					
12	Voda	20	59.72	251.7	0.8266	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4426					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4426					
15	Zrak	1	24.93	298.4	6.864	4426					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4426					



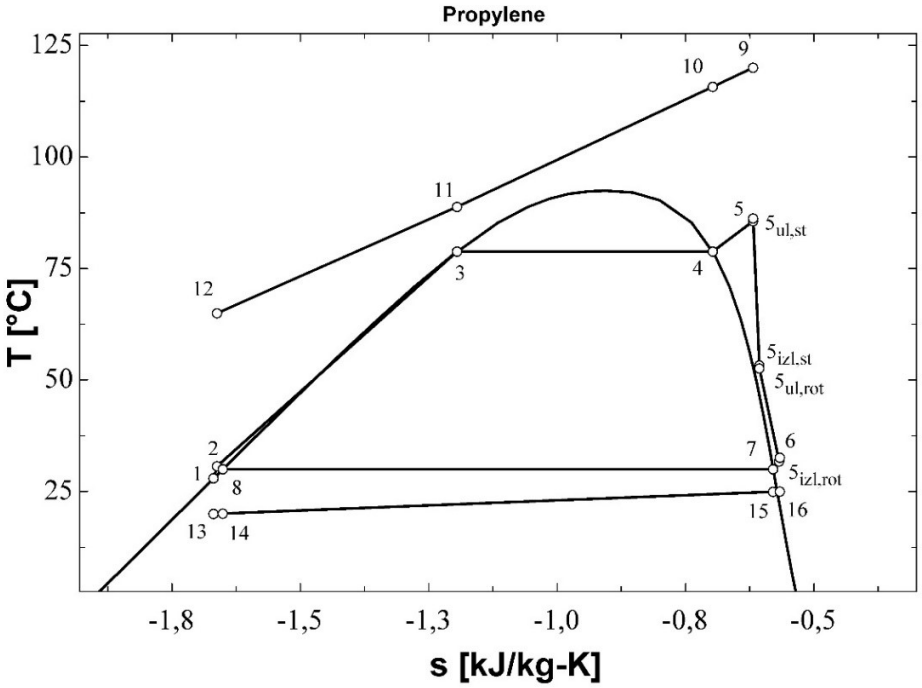
Slika 79: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 108

Tablica 109: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N =3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.6145
r_2 [m]	0.5759
r_3 [m]	0.5385
r_4 [m]	0.5349
r_{s5} [m]	0.1863
r_{h5} [m]	0.1123
r_{vol} [m]	0.03864
b_2 [m]	0.009347
b_3 [m]	0.009347
b_4 [m]	0.009347
Z [m]	0.1109
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.6645
M_3 [-]	1.213
M_4 [-]	1.222
M_5 [-]	0.218
η_t [%]	70

Tablica 110: Rezultati optimiziranja $\eta_{plant,ex}$ za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	Propilen	13.07	28	-364.1	-1.669	61.71					
2	Propilen	36.45	30.66	-357.5	-1.662	61.71					
3	Propilen	36.45	78.78	-203.4	-1.195	61.71					
4	Propilen	36.45	78.78	-28.2	-0.6969	61.71					
5	Propilen	36.45	85.61	-0.2109	-0.6181	61.71					
$5_{ul,st}$	Propilen	36.76	86.19	0.1467	-0.6181	61.71					
$5_{izl,st}$	Propilen	21.47	53.3	-19.32	-0.6062	61.71					
$5_{ul,rot}$	Propilen	21.23	52.63	-19.83	-0.6062	61.71					
$5_{izl,rot}$	Propilen	13.07	31.77	-30.21	-0.5674	61.71					
6	Propilen	13.23	32.59	-29.21	-0.566	61.71					
7	Propilen	13.07	30	-33.76	-0.5791	61.71	20.46	2.926	1162	6.825	3000
8	Propilen	13.07	30	-358.7	-1.651	61.71					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	115.7	486.9	1.48	94.38					
11	Voda	20	88.78	373.3	1.177	94.38					
12	Voda	20	64.96	273.6	0.892	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4071					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4071					
15	Zrak	1	24.93	298.4	6.864	4071					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4071					



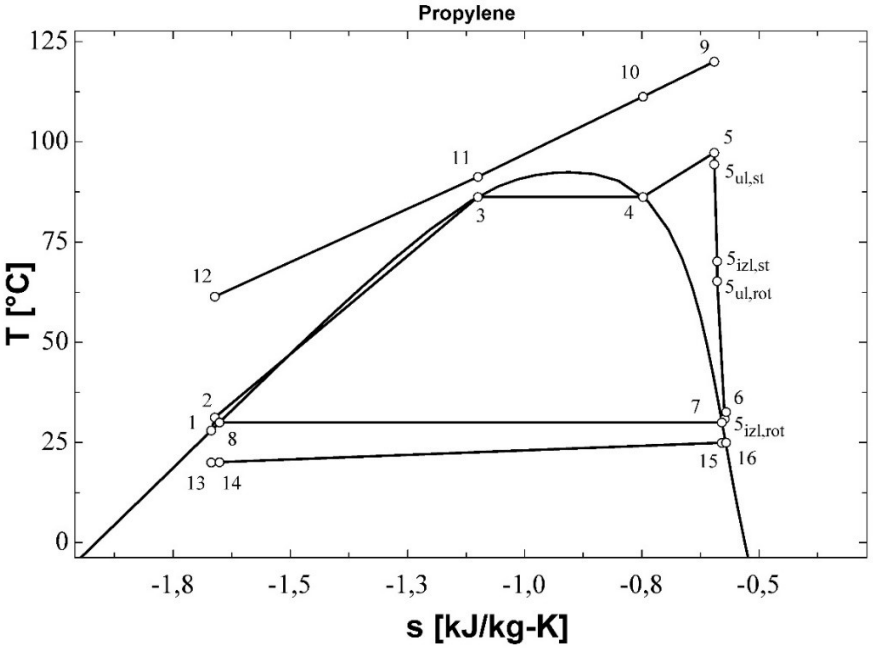
Slika 80: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 110

Tablica 111: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje $\eta_{plant,ex}$; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5939
r_2 [m]	0.5545
r_3 [m]	0.5185
r_4 [m]	0.5147
r_{s5} [m]	0.1814
r_{h5} [m]	0.1081
r_{vol} [m]	0.03955
b_2 [m]	0.009846
b_3 [m]	0.009846
b_4 [m]	0.009846
Z [m]	0.1099
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.6844
M_3 [-]	1.15
M_4 [-]	1.159
M_5 [-]	0.2087
η_t [%]	70.48

Tablica 112: Rezultati optimiziranja W_{net} za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, $N \neq$3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	Propilen	13.07	28	-364.1	-1.669	62.9	35.85	5.112	2029	11.04	13704
2	Propilen	41.78	31.25	-355.9	-1.661	62.9					
3	Propilen	41.78	86.26	-168.1	-1.1	62.9					
4	Propilen	41.78	86.26	-41.45	-0.7473	62.9					
5	Propilen	41.78	97.31	13.85	-0.5955	62.9					
$5_{ul,st}$	Propilen	40.04	94.38	12.02	-0.5955	62.9					
$5_{izl,st}$	Propilen	27.41	70.22	-2.633	-0.5894	62.9					
$5_{ul,rot}$	Propilen	25.29	65.27	-6.29	-0.5894	62.9					
$5_{izl,rot}$	Propilen	13.07	30.86	-32.03	-0.5734	62.9					
6	Propilen	13.41	32.61	-29.91	-0.5704	62.9					
7	Propilen	13.07	30	-33.76	-0.5791	62.9					
8	Propilen	13.07	30	-358.7	-1.651	62.9					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	111.3	468.2	1.431	94.38					
11	Voda	20	91.26	383.7	1.206	94.38					
12	Voda	20	61.39	258.6	0.8475	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4178					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4178					
15	Zrak	1	24.94	298.4	6.864	4178					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4178					



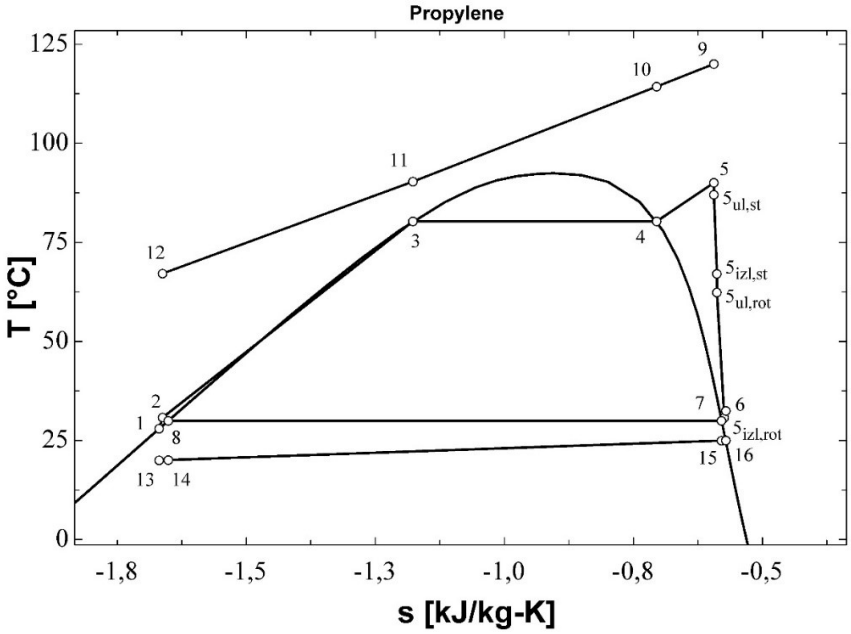
Slika 81: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 112

Tablica 113: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; Propilen (podkritično, ΔTpp=5°C, $N \neq 3000$)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2279
r_2 [m]	0.1867
r_3 [m]	0.168
r_4 [m]	0.1571
r_{s5} [m]	0.1204
r_{h5} [m]	0.03299
r_{vol} [m]	0.0411
b_2 [m]	0.02086
b_3 [m]	0.02086
b_4 [m]	0.02086
Z [m]	0.1311
Z_r [-]	14
Z_s [-]	18
M_2 [-]	0.6579
M_3 [-]	1.049
M_4 [-]	1.12
M_5 [-]	0.3006
η_t [%]	80.75

Tablica 114: Rezultati optimiziranja W_{net} za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, $N \neq 3000$)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	Propilen	13.07	28	-364.1	-1.669	57.21	29.72	4.259	1692	9.75	13758
2	Propilen	37.49	30.78	-357.2	-1.662	57.21					
3	Propilen	37.49	80.31	-196.9	-1.177	57.21					
4	Propilen	37.49	80.31	-30.03	-0.705	57.21					
5	Propilen	37.49	90.06	9.731	-0.5939	57.21					
$5_{ul,st}$	Propilen	35.84	87.03	7.761	-0.5939	57.21					
$5_{izl,st}$	Propilen	25.98	67.06	-4.668	-0.5883	57.21					
$5_{ul,rot}$	Propilen	24.04	62.35	-8.225	-0.5883	57.21					
$5_{izl,rot}$	Propilen	13.07	30.8	-32.16	-0.5738	57.21					
6	Propilen	13.4	32.48	-33.76	-0.571	57.21					
7	Propilen	13.07	30	-358.7	-0.5791	57.21					
8	Propilen	13.07	30	505	-1.651	57.21					
9	Voda	20	120	480.9	1.526	94.38					
10	Voda	20	114.3	379.7	1.464	94.38					
11	Voda	20	90.31	282.7	1.195	94.38					
12	Voda	20	67.16	293.4	0.919	94.38					
13	Zrak	1	20	293.5	6.847	3797					
14	Zrak	1	20.08	298.4	6.847	3797					
15	Zrak	1	24.95	298.4	6.864	3797					
16	Zrak	1	25		6.864	3797					



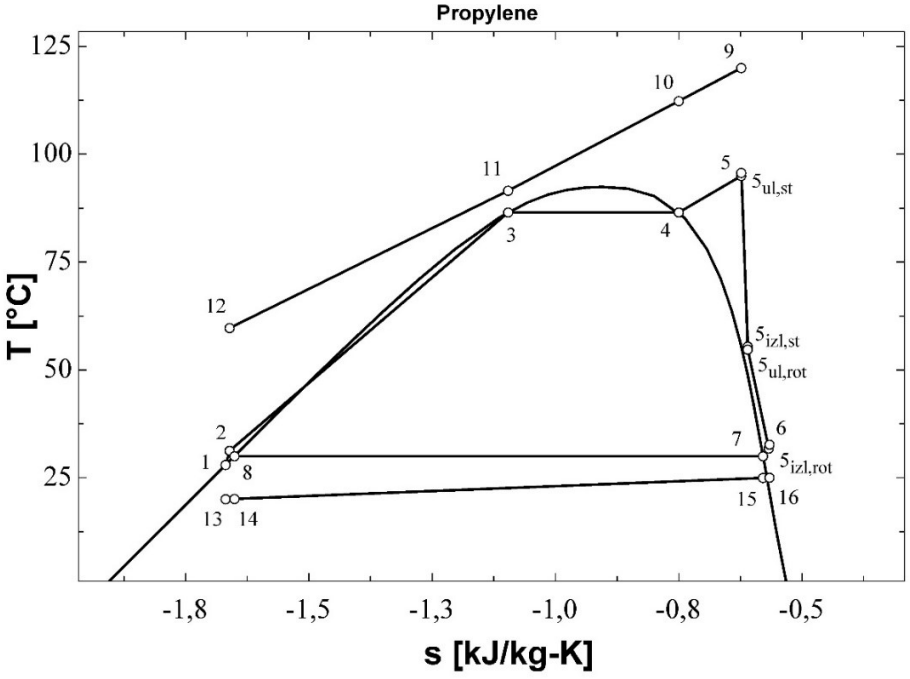
Slika 82: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 114

Tablica 115: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N≠3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.2235
r_2 [m]	0.1816
r_3 [m]	0.1621
r_4 [m]	0.1507
r_{s5} [m]	0.115
r_{h5} [m]	0.03165
r_{vol} [m]	0.04185
b_2 [m]	0.02147
b_3 [m]	0.02147
b_4 [m]	0.02147
Z [m]	0.1251
Z_r [-]	13
Z_s [-]	17
M_2 [-]	0.6536
M_3 [-]	0.9918
M_4 [-]	1.065
M_5 [-]	0.2943
η_t [%]	81.38

Tablica 116: Rezultati optimiziranja W_{net} za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	Propilen	13.07	28	-364.1	-1.669	66.53	25.21	3.59	1424	8.423	3000
2	Propilen	41.99	31.27	-355.9	-1.661	66.53					
3	Propilen	41.99	86.53	-166.6	-1.096	66.53					
4	Propilen	41.99	86.53	-42.22	-0.7499	66.53					
5	Propilen	41.99	94.96	3.864	-0.6231	66.53					
$5_{ul,st}$	Propilen	42.4	95.65	4.27	-0.6231	66.53					
$5_{izl,st}$	Propilen	22.46	55.43	-18.61	-0.6102	66.53					
$5_{ul,rot}$	Propilen	22.19	54.74	-19.14	-0.6102	66.53					
$5_{izl,rot}$	Propilen	13.07	31.76	-30.22	-0.5675	66.53					
6	Propilen	13.25	32.67	-29.12	-0.5659	66.53					
7	Propilen	13.07	30	-33.76	-0.5791	66.53					
8	Propilen	13.07	30	-358.7	-1.651	66.53					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	112.3	472.6	1.443	94.38					
11	Voda	20	91.53	384.9	1.209	94.38					
12	Voda	20	59.68	251.5	0.8262	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	4429					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	4429					
15	Zrak	1	24.93	298.4	6.864	4429					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	4429					



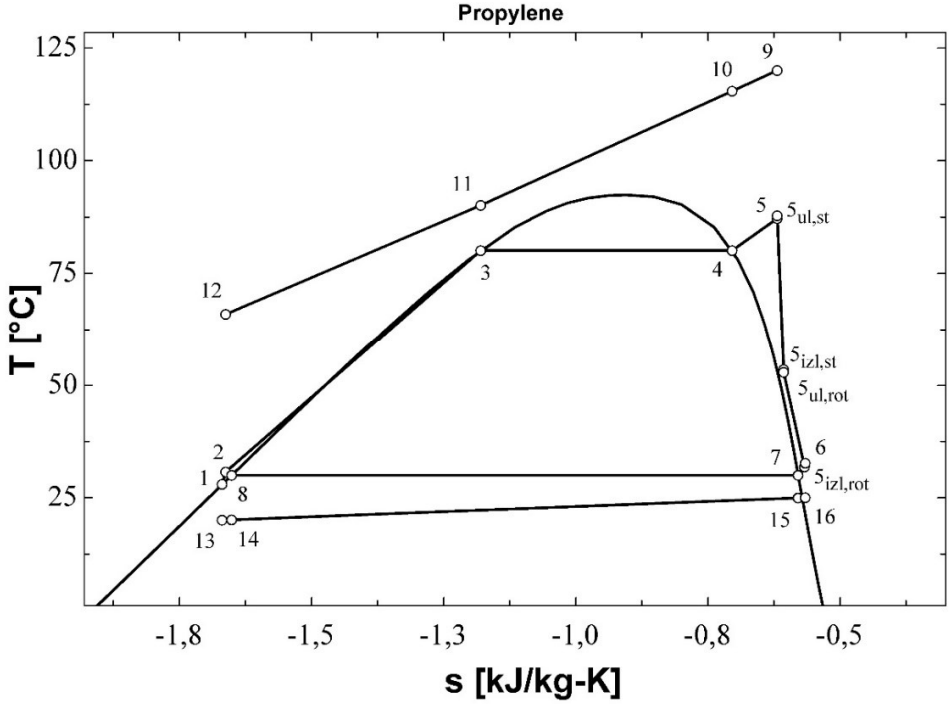
Slika 83: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 116

Tablica 117: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=5°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.6144
r_2 [m]	0.5758
r_3 [m]	0.5384
r_4 [m]	0.5348
r_{s5} [m]	0.1863
r_{h5} [m]	0.1123
r_{vol} [m]	0.03865
b_2 [m]	0.009357
b_3 [m]	0.009357
b_4 [m]	0.009357
Z [m]	0.111
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.6644
M_3 [-]	1.213
M_4 [-]	1.222
M_5 [-]	0.218
η_t [%]	70.01

Tablica 118: Rezultati optimiziranja W_{net} za Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

karakteristična točka	radni fluid	p[bar]	T[°C]	h[kJ/kg]	s[kJ/kg-K]	$\dot{m}$[kg/s]	$\eta_{plant,ex}$ [%]	$\eta_{plant,en}$ [%]	W_{net} [kW]	ΔT_{SH} [°C]	N [o/min]
1	Propilen	13.07	28	-364.1	-1.669	60.02	20.45	2.927	1162	7.106	3000
2	Propilen	37.35	30.76	-357.2	-1.662	60.02					
3	Propilen	37.35	80.1	-197.8	-1.18	60.02					
4	Propilen	37.35	80.1	-29.76	-0.7039	60.02					
5	Propilen	37.35	87.21	0.5542	-0.6188	60.02					
$5_{ul,st}$	Propilen	37.69	87.84	0.9366	-0.6188	60.02					
$5_{izl,st}$	Propilen	21.59	53.55	-19.24	-0.6067	60.02					
$5_{ul,rot}$	Propilen	21.35	52.89	-19.74	-0.6067	60.02					
$5_{izl,rot}$	Propilen	13.07	31.82	-30.09	-0.567	60.02					
6	Propilen	13.23	32.67	-29.07	-0.5656	60.02					
7	Propilen	13.07	30	-33.76	-0.5791	60.02					
8	Propilen	13.07	30	-358.7	-1.651	60.02					
9	Voda	20	120	505	1.526	94.38					
10	Voda	20	115.5	485.8	1.477	94.38					
11	Voda	20	90.1	378.9	1.192	94.38					
12	Voda	20	65.93	277.6	0.9039	94.38					
13	Zrak	1	20	293.4	6.847	3996					
14	Zrak	1	20.08	293.5	6.847	3996					
15	Zrak	1	24.93	298.4	6.864	3996					
16	Zrak	1	25	298.4	6.864	3996					



Slika 84: *T-s* dijagram za rezultate iz tablice 118

Tablica 119: Bitne geometrijske i pogonske veličine turbine; Optimiziranje W_{net}; Propilen (podkritično, ΔT_{pp}=10°C, N=3000)

Veličina	Iznos
r_1 [m]	0.5949
r_2 [m]	0.5563
r_3 [m]	0.5202
r_4 [m]	0.5166
r_{s5} [m]	0.1801
r_{h5} [m]	0.1085
r_{vol} [m]	0.03875
b_2 [m]	0.009481
b_3 [m]	0.009481
b_4 [m]	0.009481
Z [m]	0.1074
Z_r [-]	17
Z_s [-]	22
M_2 [-]	0.6805
M_3 [-]	1.162
M_4 [-]	1.171
M_5 [-]	0.2104
η_t [%]	70.19