

Matematički model Bloka K u TE-TO Zagreb

Rajaković, Zoran

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:155266>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zoran Rajaković

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil

Student:

Zoran Rajaković

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr.sc. Mislavu Čehilu i asistentu dipl. ing. Stjepku Katuliću, na pruženoj pomoći, korisnim savjetima i podršci tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem svim profesorima koji su mi omogućili stečeno znanje za izradu samog diplomskog rada. Zahvaljujem se svim prijateljima i kolegama na pomoći i podršci tokom cijelog studija, također želim zahvaliti i radnim kolegama na strpljenju i razumijevanju pri izostancima s posla.

Najviše se želim zahvaliti svojoj obitelji, roditeljima i sestri na strpljenju, razumijevanju i neizmjerne podršci tijekom cijelog studija.

Posebna zahvala nažalost prerano preminulom prijatelju i kolegi univ.bacc.ing.mech. Josipu Radetiću.

Zoran Rajaković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Zoran Rajaković

Mat. br.: 0035168867

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Matematički model Bloka K u TE-TO Zagreb**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of unit K of power plant "TE-TO Zagreb"**

Opis zadatka:

TE-TO Zagreb je kogeneracijsko postrojenje u sklopu područnog grijanja Grada Zagreba koje opskrbljuje toplinskom energijom dio istočnog i južnog Zagreba. Uz električnu i toplinsku energiju, postrojenje isporučuje i tehnološku paru za potrebe industrije. Postrojenje se sastoji od tri proizvodna bloka: blok C, blok K i blok L.

U diplomskom radu potrebno je:

1. Napraviti matematički model bloka K. Model treba obuhvatiti proračun generatora pare na otpadnu toplinu s dva kruga pare, proračun plinske i parne turbine te proračun izmjenjivača topline C5 i C6 za područno grijanje.
2. Prikazati rezultate proračuna u ovisnosti o vanjskoj temperaturi i opterećenju plinske turbine.

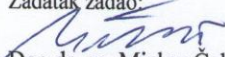
Detaljniji podaci potrebni za izradu proračuna nalaze se kod mentora.

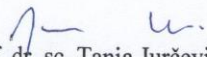
U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć prilikom izrade rada.

Zadatak zadan:
5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2016.

Predviđeni datumi obrane:
13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Doc.dr. sc. Mislav Čehil

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS OZNAKA | V |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Termoelektrana – toplana (TE – TO) Zagreb | 1 |
| 1.1.1. TE – TO Zagreb K- blok..... | 6 |
| 1.2. Termodinamičke osnove | 7 |
| 1.2.1. Carnotov proces | 8 |
| 1.2.2. Jouleov (Braytonov) proces | 9 |
| 1.2.3. Rankineov proces..... | 12 |
| 1.3. Termoenergetska postrojenja | 12 |
| 1.3.1. Kombinirano postrojenje | 13 |
| 1.3.2. Kogeneracijsko postrojenje..... | 15 |
| 1.3.2.1. Postrojenje protutlačne turbine | 16 |
| 1.3.2.2. Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare..... | 17 |
| 1.3.2.3. Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova . | 18 |
| 2. VISUAL BASIC FOR APPLICATION | 19 |
| 3. REZULTATI MATEMATIČKIH MODELA ZA BLOK K TE –TO ELEKTRANE ZAGREB | 20 |
| 3.1. Proračun plinskih turbina | 24 |
| 3.1.1. Jednadžbe matematičkog modela plinskih turbina | 25 |
| 3.1.2. Prikaz rezultata matematičkog modela plinskih turbina | 26 |
| 3.2. Proračun kotlova na otpadnu toplinu | 33 |
| 3.2.1. Jednadžbe matematičkog modela za kotlove na otpadnu toplinu | 34 |
| 3.2.2. Prikaz rezultata matematičkog modela kotlova za otpadnu toplinu | 37 |
| 3.3. Proračun parne turbine | 46 |
| 3.3.1. Jednadžbe matematičkog modela za parnu turbinu | 47 |
| 3.3.2. Prikaz rezultata matematičkog modela za parnu turbinu | 48 |
| 3.4. Proračun izmjenjivača topline..... | 60 |
| 4. ANALIZA REZULTATA | 63 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 68 |
| LITERATURA..... | 69 |
| PRILOZI..... | 70 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. TE – TO elektrana Zagreb (2003.godine) [1] | 1 |
| Slika 2. Model TE – TO Zagreb 2003.godine [1] | 2 |
| Slika 3. Presjek sheme kroz kombi – kogeneracijski blok K ili L [1]..... | 4 |
| Slika 4. Kružni proces [4] | 7 |
| Slika 5. Carnotov proces [4]..... | 8 |
| Slika 6. T – s, dijagram idealnog i stvarnog Braytonovog procesa [5] | 10 |
| Slika 7. a) Zatvoreni Braytonov ciklus; b) Otvoreni Braytonov ciklus | 11 |
| Slika 8. T – s, dijagram Rankineova procesa [4] | 12 |
| Slika 9. Shematski prikaz kombiniranog postrojenja [1] | 14 |
| Slika 10. T – s, dijagram kombiniranog procesa..... | 14 |
| Slika 11. Shema kogeneracijskog postrojenja..... | 16 |
| Slika 12. Shema kogeneracijskog postrojenja s protutlačnom parnom turbinom [8] | 17 |
| Slika 13. Shema kogeneracijskog postrojena s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare [8]..... | 18 |
| Slika 14. Shema kogeneracijskog postrojenja s kotlom na otpadnu toplinu [8] | 18 |
| Slika 15. Shema bloka K TE – TO Zagreb (opterećenja 100% i 100%)..... | 20 |
| Slika 16. Shema bloka K TE – TO Zagreb (opterećenja 100% i 60%)..... | 21 |
| Slika 17. Shema bloka K TE – TO Zagreb (opterećenja 60% i 100%)..... | 22 |
| Slika 18. Shema bloka K TE – TO Zagreb (opterećenja 60% i 60%)..... | 23 |
| Slika 19. Primjer plinske turbine | 24 |
| Slika 20. Shematski prikaz plinske turbine | 25 |
| Slika 21. Potrošnja goriva plinske turbine | 26 |
| Slika 22. Rezultati dobivenih snaga plinskih turbina | 27 |
| Slika 23. Izlazna temperatura kompresora Tz(2) | 28 |
| Slika 24. Rezultati temperature dimnih plinova na ulazu u PT | 29 |
| Slika 25. Izlazna temperatura dimnih plinova iz plinske turbine | 30 |
| Slika 26. Iskoristivost postrojenja plinske turbine na okolišnoj temperaturi od -24°C | 31 |
| Slika 27. Iskoristivost postrojenja plinske turbine na okolišnoj temperaturi od 15°C..... | 32 |
| Slika 28. Iskoristivost postrojenja plinske turbine na okolišnoj temperaturi od 37°C..... | 32 |
| Slika 29. Kotao na otpadnu toplinu (HRSG) [9] | 34 |
| Slika 30. Korisnost kotla na otpadnu toplinu (HRSG)..... | 37 |
| Slika 31. Protok visokotlačne pare Dk(24) | 38 |
| Slika 32. Protok niskotlačne pare Dk(12) | 39 |
| Slika 33. Temperatura visokotlačne turbine Twi(24) (°C)..... | 40 |
| Slika 34. Temperatura niskotlačne turbine Twi(12) (°C)..... | 41 |
| Slika 35. Temperatura na izlazu iz kotla Tgi(9) (°C) (0MW)..... | 42 |
| Slika 36. Temperatura na izlazu iz kotla Tgi(9) (°C) (80MW)..... | 43 |
| Slika 37. Količina ubrizgavanja za industrijsku paru (0MW)..... | 44 |
| Slika 38. Količina ubrizgavanja za industrijsku paru (80MW)..... | 44 |
| Slika 39. Temperaturni presjek kotla na otpadnu toplinu | 46 |
| Slika 40. Parna turbina [10]..... | 47 |
| Slika 41. Temperatura pare na ulazu u parnu turbinu Tt(1) (°C) | 48 |
| Slika 42. Tlak pare na ulazu u parnu turbinu PT(10) (bar) | 49 |
| Slika 43. Temperatura pare na I.oduzimanju Tt(2) (°C) (0MW) | 50 |
| Slika 44. Temperatura pare na I.oduzimanju Tt(2) (°C) (80MW) | 50 |

| | |
|---|----|
| Slika 45. Tlak pare na I.oduzimanju PT(11) (bar) | 51 |
| Slika 46. Tlak pare na ulazu u srednjotlačni dio turbine PT(20) (0MW) (bar)..... | 52 |
| Slika 47. Tlak pare na ulazu u srednjotlačni dio turbine PT(20) (snaga 80MW) (bar)..... | 52 |
| Slika 48. Temperatura pare na II.oduzimanju Tt(3) (snaga 0MW) (°C)..... | 53 |
| Slika 49. Temperatura pare na II.oduzimanju Tt(3) (snaga 80MW) (°C)..... | 54 |
| Slika 50. Tlak pare na II.oduzimanju PT(21)..... | 55 |
| Slika 51. Tlak pare na ulazu u niskotlačni dio turbine PT(30) (snaga 0MW) (bar)..... | 55 |
| Slika 52. Tlak pare na ulazu u niskotlačni dio turbine PT(30) (snaga 80MW) (bar)..... | 56 |
| Slika 53. Temperatura pare na ulazu u kondenzator Tt(4) (snaga 0MW) (°C)..... | 57 |
| Slika 54. Temperatura pare na ulazu u kondenzator Tt(4) (snaga 80MW) (°C)..... | 57 |
| Slika 55. Tlak pare u kondenzatoru PT(31) (snaga 0MW) (bar) | 58 |
| Slika 56. Tlak pare u kondenzatoru PT(31) (snaga 80MW) (bar) | 59 |
| Slika 57. Izmjenjivač topline..... | 61 |
| Slika 58. Toplinska snaga 80MW | 62 |
| Slika 59. Ukupna električna snaga s minimalnom toplinskom snagom..... | 64 |
| Slika 60. Ukupna električna snaga s toplinskom snagom 80 MW | 65 |
| Slika 61. Električna korisnost postrojenja s minimalnom toplinskom snagom | 65 |
| Slika 62. Električna korisnost postrojenja s toplinskom snagom 80 MW | 66 |
| Slika 63. Ukupna korisnost postrojenjas toplinskom snagom 80 MW | 67 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Godišnja proizvodnja TE – TO Zagreb [3] | 5 |
| Tablica 2. Popis proizvodnih jedinica TE – TO Zagreb [3] | 6 |
| Tablica 3. Rezultati potrošnje goriva plinske turbine [kg/s] | 27 |
| Tablica 4. Rezultati snage plinskih turbina [MW] | 28 |
| Tablica 5. Rezultati izlazne temperature kompresora Tz(2) | 29 |
| Tablica 6. Rezultati temperature dimnih plinova na ulazu u PT [°C] | 30 |
| Tablica 7. Rezultati izlazne temperature dimnih plinova iz plinske turbine Tdp(4) | 31 |
| Tablica 8. Iskoristivost postrojenja plinske turbine | 33 |
| Tablica 9. Korisnost kotla na otpadnu toplinu ETA KOTLA (HRSG) | 38 |
| Tablica 10. Protok visokotlačne pare Dk(24) | 39 |
| Tablica 11. Protok niskotlačne pare Dk(12) | 40 |
| Tablica 12. Temperatura visokotlačne turbine Twi(24) (°C) | 41 |
| Tablica 13. Temperatura niskotlačne turbine Twi(12) (°C) | 42 |
| Tablica 14. Temperatura na izlazu iz kotla Tgi(9) (°C) | 43 |
| Tablica 15. Količina ubrizgavanja za industrijsku paru (kg/s) | 45 |
| Tablica 16. Temperaturni presjek kotla na otpadnu toplinu (°C) | 46 |
| Tablica 17. Temperatura pare na ulazu u parnu turbinu Tt(1) (°C) | 48 |
| Tablica 18. Tlak pare na ulazu u parnu turbinu PT(10) (bar) | 49 |
| Tablica 19. Temperatura pare na I.oduzimanju Tt(2) (°C) | 51 |
| Tablica 20. Tlak pare na ulazu u srednjotlačni dio turbine PT(20) (bar) | 53 |
| Tablica 21. Temperatura pare na II.oduzimanju Tt(3) (°C) | 54 |
| Tablica 22. Tlak pare na ulazu u niskotlačni dio turbine PT(30) (bar) | 56 |
| Tablica 23. Temperatura pare na ulazu u kondenzator Tt(4) (°C) | 58 |
| Tablica 24. Tlak pare u kondenzatoru PT(31) (bar) | 59 |
| Tablica 25. Toplinska snaga 80MW | 62 |
| Tablica 26. Rezultati blok K (100%-100%) | 63 |
| Tablica 27. Ukupna električna snaga s minimalnom toplinskom snagom | 64 |
| Tablica 28. Ukupna električna snaga s toplinskom snagom 80 MW | 64 |
| Tablica 29. Električna korisnost postrojenja s minimalnom toplinskom snagom | 65 |
| Tablica 30. Električna korisnost postrojenja s toplinskom snagom 80 MW | 66 |
| Tablica 31. Ukupna korisnost postrojenja s toplinskom snagom 80MW | 67 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-------------------|------------------------|---|
| η_C | [-] | Carnotov stupanj djelovanja |
| T_H | [K] | temperatura dovođenja topline |
| T_C | [K] | temperatura odvođenja topline |
| T_g | [K] | temperatura ogrjevnog spremnika |
| T_h | [K] | temperatura rashladnog spremnika |
| η_{Cid} | [-] | idealni Carnotov stupanj djelovanja |
| t_z | [°C] | temperatura zraka |
| η_K | [-] | stupanj iskoristivosti kompresora |
| W_K | [W] | snaga kompresora |
| L | [kg/s] | maseni protok zraka |
| H_Z | [J/kg] | specifična entalpija zraka |
| H_{dp} | [J/kg] | specifična entalpija dimnih plinova |
| B | [kg/s] | maseni protok goriva |
| G | [kg/s] | maseni protok dimnih plinova |
| t_{dp} | [°C] | temperatura dimnih plinova |
| η_t | [-] | stupanj iskoristivosti turbine |
| W_t | [W] | snaga turbine |
| W_{kor} | [W] | korisna snaga |
| W_{el} | [W] | električna snaga |
| η_{el} | [-] | stupanj iskoristivosti generatora |
| η_{meh} | [-] | mehanički stupanj iskoristivosti |
| η_{red} | [-] | stupanj iskoristivosti reduktora |
| Q_{ZMV} | [W] | toplinska snaga zagrijača mrežne vode |
| η_{zr} | [-] | stupanj iskoristivosti topline zračenjem |
| D_{ZMV} | [kg/s] | maseni protok mrežne vode kroz HRSG |
| H_W | [J/kg] | specifična entalpija mrežne vode |
| k_{ZMV} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline zagrijača mrežne vode |
| A_{ZMV} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u zagrijaču mrežne vode |
| ΔT_{mZMV} | [K] | srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u zagrijaču mrežne vode |
| Q_{ZK} | [W] | toplinska snaga zagrijača kondenzata |
| H_{ZK} | [J/kg] | specifična entalpija kondenzata |
| D_{ZK} | [kg/s] | maseni protok kondenzata kroz HRSG |
| k_{ZK} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline zagrijača kondenzata |
| A_{ZK} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u zagrijaču kondenzata |

| | | |
|-------------------|------------------------|--|
| ΔT_{mZK} | [K] | srednja razlika temperatura vode i dimnih plinova u zagrijaču kondenzata |
| W_{NT} | [W] | snaga pumpe vode u niskotlačnom krugu pare |
| D_{NT} | [kg/s] | maseni protok vode kroz niskotlačni krug pare |
| H_{V1} | [J/kg] | stvarna specifična entalpija vode nakon pumpe |
| H_{V0} | [J/kg] | specifična entalpija vode na ulazu u pumpu |
| Q_{ECO} | [W] | toplinska snaga ekonomajzera |
| G_1 | [kg/s] | maseni protok dimnih plinova koji zagrijava ekonomajzer |
| H_{NT} | [J/kg] | specifična entalpija vode u niskotlačnom krugu |
| D_{NT} | [kg/s] | maseni protok vode kroz niskotlačni krug pare |
| k_{ECO} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline ekonomajzera |
| A_{ECO} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u ekonomajzeru |
| ΔT_{mECO} | [K] | srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u ekonomajzeru |
| Q_{ISP} | [W] | toplinska snaga isparivača |
| D_{PNT} | [kg/s] | maseni protok kroz azsebni niskotlačni krug pare isparivača i separatora |
| k_{ISP} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline isparivača |
| A_{ISP} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u isparivač |
| ΔT_{mISP} | [K] | srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u isparivaču |
| Q_{PR} | [W] | toplinska snaga pregrijača |
| k_{PR} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline pregrijača |
| A_{PR} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u pregrijaču |
| ΔT_{mPR} | [K] | srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u pregrijaču |
| D_{VT} | [kg/s] | maseni protok kroz visokotlačni krug pare |
| w | [kg/s] | maseni protok ubrizgavajuće vode za hlađenje pare |
| H_{vt5} | [J/kg] | specifična entalpija pare na izlazu iz visokotlačnog pregrijača |
| H_{vt1} | [J/kg] | specifična entalpija ubrizgavajuće vode za hlađenje pare |
| H_{VTw5} | [J/kg] | specifična entalpija pare na ulazu u visokotlačni pregrijač2 |
| W_{ptVT5} | [W] | izentropska snaga visokotlačnog stupnja parne turbine |
| D_p | [kg/s] | maseni protok pare iz turbine koja ulazi u otplinjač |
| W_{ptNTS} | [W] | izentropska snaga niskotlačnog stupnja parne turbine |
| D_{HRSG} | [kg/s] | maseni protok napojne vode za proizvodnju pare u HRSG |
| D_K | [kg/s] | maseni protok iz niskotlačnog stupnja parne turbine u kondenzatoru |
| W_{pt} | [W] | snaga parne turbine |

SAŽETAK

U diplomskom radu napravljen je matematički model Bloka K u termoelektrani – toplani (TE - TO) Zagreb. Model obuhvaća proračun dvije plinske turbine jednakih karakteristika, proračun dva generatora pare na otpadnu toplinu s dva kruga pare jednakih karakteristika, proračun parne turbine te proračun izmjenjivača topline C4 i C6 za područno grijanje.

Matematički model izrađen je u programskom jeziku Visual Basic for Application (VBA) za program Microsoft Excel. Razradom proračuna omogućeno je da sva rješenja budu fizikalno moguća te da rješenja budu u postavljenim uvjetovanim granicama.

Prikazani su rezultati za tri odabrane temperature (-24°C , 15°C , 37°C) na opterećenjima od 60% do 100%.

Ključne riječi:

Matematički model, TE – TO Zagreb, Blok K, kogeneracija, iskoristivost postrojenja

SUMMARY

This thesis presents a mathematical model of unit K in cogeneration plant TE – TO Zagreb. The mathematical model includes calculation of two gas turbines with the same characteristics, calculation of two heat recovery steam generators with two steam pressure levels, calculation of the steam turbine and the calculation of two heat exchangers C4 and C6 for district heating.

A mathematical model was developed in Visual Basic for Application (VBA) for Microsoft Excel. Development of the model allowed for all solutions to be physically possible and that the solutions are within the set of boundary conditions.

Results are shown at three environmental temperatures (-24°C, 15°C, 37°C) and for loads from 60% to 100%.

Key words:

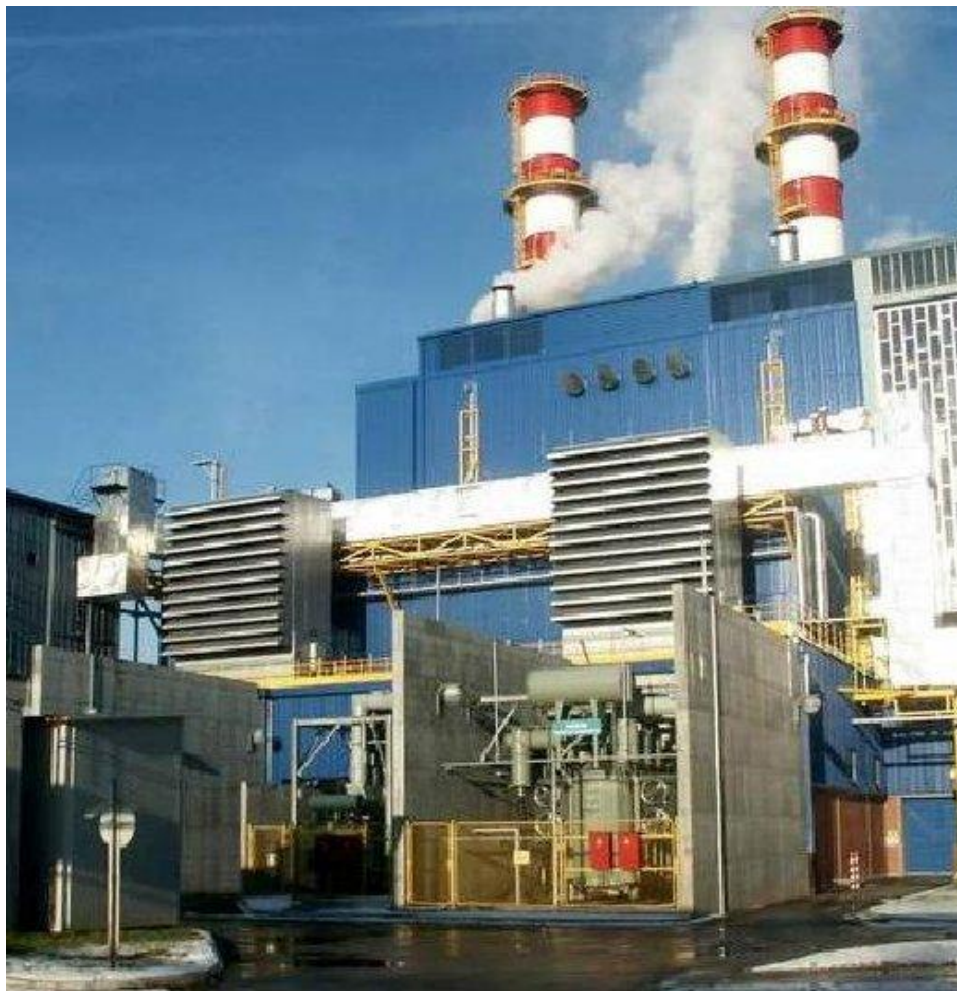
Mathematical model, TE – TO Zagreb, Unit K, cogeneration, plant efficiency

1. UVOD

Svakoj zemlji je potrebna proizvodnja i distribucija energije, kako električne tako i toplinske energije. Povećanjem potrošnje energije pojavljuju se i novi stroži ekološki zahtjevi koji se moraju zadovoljiti pri samom projektiranju i izgradnji pojedine elektrane. Najveća potreba je za električnom energijom. Proizvodnja električne energije se neprestano mora prilagođavati novim potrebama za električnom energijom. Pošto još uvijek u potpunosti nije razvijeno skladištenje električne energije potrebna je trenutna proizvodnja i distribucija električne energije koju korisnik zahtijeva.

Jedan od odgovora na potraživanja za istovremenom proizvodnjom električne energije, topline za zagrijavanje mrežne vode i industrijske pare je gradnja lokalnih kogeneracijskih elektrana s kombiniranim ciklusom u više manjih blokova (npr. TE – TO Zagreb).

1.1. Termoelektrana – toplana (TE – TO) Zagreb



Slika 1. TE – TO elektrana Zagreb (2003.godine) [1]



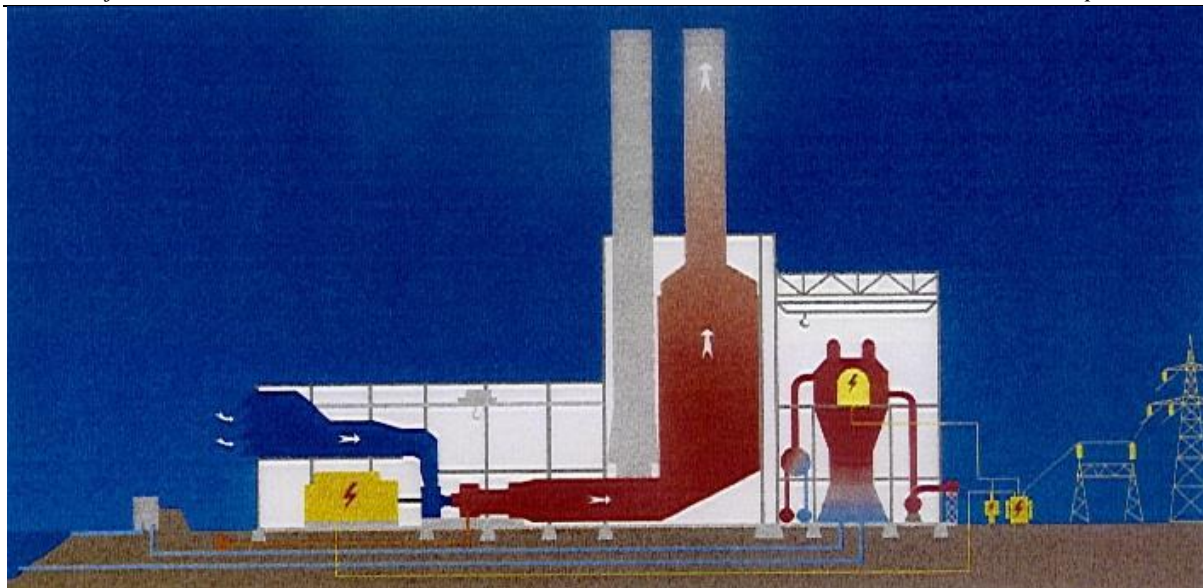
Slika 2. Model TE – TO Zagreb 2003.godine [1]

Termoelektrana – toplana Zagreb prva je elektrana u našoj zemlji koja je izgrađena za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije. Puštena je u pogon 1962. godine s dva bloka u spojnom procesu, električne snage 2×32 MW i ukupne toplinske snage 80 MW. Smještena je na lijevoj obali rijeke Save, u industrijskoj zoni grada Zagreba, naselju Žitnjak. Energetsku bazu TE-TO Zagreb trebali su predstavljati rudnici lignita u Zagorju i viškovi zemnog plina iz obližnjih naftnih polja. No, radi smanjivanja proizvodnje iz zagorskih rudnika i nemogućnosti osiguranja trajne dobave plina, TE-TO Zagreb preorijentirala se na tekuće gorivo i plin. U Zagrebu, tisuće stanova i poslovnih prostora priključeno je na vrelvodnu mrežu te se griju toplinom iz TE-TO Zagreb. Također mnoštvo industrijskih postrojenja za svoje proizvodne procese koristi industrijsku paru iz TE-TO Zagreb. Prateći porast potrošnje i potražnje za toplinom, 1979. godine pušten je u rad novi proizvodni blok u spojnom procesu električne snage 120 MW i toplinske snage 200 MW. Sukcesivno su građene nove vrelvodne i parne kotlovnice za pokrivanje vršnih opterećenja. Također radi dotrajalosti starih blokova, te pogodnosti lokacije TE-TO Zagreb, donešena je odluka za

izgradnju novog većeg i tehnološki suvremenijeg izvora električne energije i topline. Analiza je pokazala kako je najbolje napraviti supstituciju dotrajalih blokova 2x32 MW s novim kombi – kogeneracijskim, plinsko - parnim postrojenjem s ukupnom električnom snagom od 200 MW i toplinskom snagom 140 MW. Takva je kombinacija predstavljala učinkovito postrojenje za spojni proces proizvodnje električne i toplinske energije. Kombi – kogeneracijski blok zadovoljio je potrebe dijelove grada opskrbom topline u jednom vremenskom periodu, a i povećao je pouzdanost opskrbe električnom energijom. 1985. godine, radi potrebe pouzdane opskrbe industrijskog parnog konzuma i za slučaj smetnje na jedinicama spojnog procesa, izgrađena je pomoćna parna kotlovnica. Daljnje potrebe za novim izvorima toplinske i električne energije dovele su za izgradnjom novog pogona kombi – kogeneracijskog, plinsko – parnog Bloka K, 208 MWe, 140 MWt i to 2001. godine.

TE – TO elektrana se sastoji od slijedećih blokova [2]:

- Blok A je oduzimno – kondenzacijski, bio je poprečno vezan s blokom B koji je predviđen kao hladna rezerva;
- Blok C je oduzimno – kondenzacijski sa dva oduzimanja s automatskom regulacijom na jednom oduzimanju, a izvedeno je i oduzimanje tehnološke pare;
- Pomoćna kotlovnica Blok D služi za proizvodnju toplinske energije, 64/80 t/h tehnološke pare, za slučaj smetnje na jedinicama spojnog procesa;
- Vrelovodne kotlovnice Blok E, F, G i H služe za proizvodnju toplinske energije za potrebe vrelovodnog sustava, ukupne snage 300 MWt, a kao potpora u slučaju kvara na osnovnim jedinicama ili u slučaju ekstremno niskih vanjskih temperatura;
- Blok K je nova kombi – kogeneracijska jedinica;
- Blok L je najnovija kombi – kogeneracijska jedinica.



Slika 3. Presjek sheme kroz kombi – kogeneracijski blok K ili L [1]

U takvim velikim sustavima je uvijek moguće doći do nesreća na radu, kao i u samom pogonu. Spremnost TE-TO Zagreb u provođenju politike sprječavanju velikih nesreća vidljiva je izgrađenom sustavu sigurnosti, koji uključuje:

- Uspostavljeni sustav upravljanja okolišem prema normi ISO 14001:2004 i sustav upravljanja kvalitetom prema normi ISO 9001:2000;
- Prepoznavanje rizičnih postrojenja i procesa;
- Zadovoljavanje svih zakonskih propisa iz područja zaštite okoliša, zaštite zraka i zaštite voda, gospodarenja s otpadom, gospodarenja s kemikalijama te zaštite i spašavanja;
- Provedbu monitoringa te redovitim prijavama emisija nadležnim državnim i lokalnim tijelima;
- Redovito provođenje preventivnih tehničkih i organizacijskih mjera kojima se sprječava pojava i velikih nesreća;
- Definirane odgovorne osobe i sheme obavješćivanja i postupaka u slučaju pojave velikih nesreća kojima se sprečava njihovo širenje i posljedice, te obavještavaju nadležne službe i javnost;
- Definirane odgovorne osobe u slučaju iznenadnog zagađenja voda, te u slučaju požara i tehnoloških eksplozija;
- Redovite provjere donesenih operativnih planova intervencija i edukacija radnika;

- Suradnja s Gradom Zagrebom na provedbi preventivnih i interventnih vježbi te zaštite okoliša i prirodnih vrijednosti.

Pogon, osim tehnoloških uvjeta, ima:

- Izrađene potrebne planove, procedure i upute u slučaju izvanrednih stanja, odnosno nesreća, požara, eksplozija, zatim evakuacije i spašavanja;
- Oformljene stručne timove, službe i dežurstva, te imenovane odgovorne osobe;
- Propisane preventivne tehnološke i organizacijske mjere propisane mjere i aktivnosti koje se poduzimaju u slučaju izvanrednih stanja;
- Definirane načine obavješćivanja unutar i izvan tvrtke u slučaju izvanrednih stanja i eventualnog širenja opasnih/štetnih tvari u okoliš;
- Provedene ostale potrebne mjere zaštite na radu i zaštite od požara;
- Opremu za vatrodjavu i protupožarnu zaštitu te ostalu opremu u slučaju izvanrednih stanja;
- Uspostavljen sustav upravljanja kvalitetom prema normi ISO 9001:2000 i sustav upravljanja okolišem prema normi ISO 14001:2004, te zadovoljeni zahtjevi norme [3].

Na lokaciji pogona izgrađena je mreža za sanitarne, protupožarne i tehnološke potrebe procesa proizvodnje te posebni sustav rashladne vode. U normalnim uvjetima eksploatacije vode, mreža je zatvaranjem zasuna u zasunskim komorama podijeljena u dva dijela: jednim dijelom mreža je spojena na stari kopani zdenac, a drugim dijelom na sustav novih, bušenih zdenaca. Za snabdijevanje sustava hlađenja kondenzatora izveden je poseban vodoopskrbni cjevovod od vodozahvata na rijeci Savi.

Tablica 1. Godišnja proizvodnja TE – TO Zagreb [3]

| Godišnja proizvodnja | 2010. | 2011. | 2012. | 2013. | 2014. |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Toplinska energija | 939.610 MWh | 880.046 MWh | 849.649 MWh | 859.344 MWh | 734.605 MWh |
| Tehnološka para | 256.889 t | 258.827 t | 255.523 t | 249.128 t | 203.032 t |
| Električna energija-prag | 2.028 GWh | 2.057 GWh | 1.936 GWh | 1.363 GWh | 389,8 GWh |

U tablici 2. su popisane proizvodne jedinice s raspoloživom snagom i gorivom koje se koriste:

- g1 – prirodni plin
- g2 – ekstra lako loživo ulje
- g3 – loživo ulje

Tablica 2. Popis proizvodnih jedinica TE – TO Zagreb [3]

| Snaga proizvodnih jedinica | | Tip | Gorivo | Godina izgradnje |
|----------------------------|-----------------------------------|---|---------|------------------|
| Blok C | 120 MWe/200 MWt | Toplifikacijski blok | g1 i g3 | 1979. |
| Blok D | 52 MWt | Pomoćna parna kotlovnica PK-3 | g1 i g3 | 1985. |
| Blok E | 58 MWt | Vrelvodni kotao VK-3 | g1 | 1977. |
| Blok F | 58 MWt | Vrelvodni kotao VK-4 | g1 | 1978. |
| Blok G | 116MWt | Vrelvodni kotao VK-5 | g1 i g3 | 1982. |
| Blok H | 116MWt | Vrelvodni kotao VK-6 | g1 i g3 | 1990. |
| Blok K | 208 MWe/140 MWt (71+71+66 MWe) | Kombi kogeneracijski blok s dvije plinske turbine | g1 i g2 | 2003. |
| Blok L | 112 MWe/110 MWt (75+37 MWe) | Kombi kogeneracijski blok s jednom plinskom i parnom turbinom | g1 | 2009. |

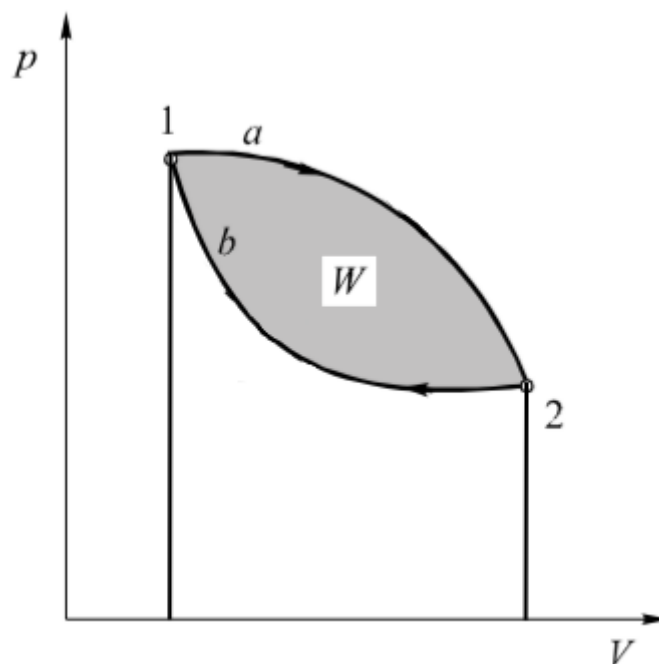
1.1.1. TE – TO Zagreb K- blok

Blok K sastoji se od: dvije plinske turbine PT1 i PT2, dva generatora pare na otpadnu toplinu HRSG1 i HRSG2, te jedne parne turbine TA K. Zrak iz okoline se usisava, te komprimira. Zrak ulazi u komoru za izgaranje gdje se ubrizgava gorivo koje izgara. Nastali dimni plinovi ulaze u plinsku turbinu PT1 ili PT2. Nazivna snaga PT1 i PT2 je 71 MW. Nastali ispušni

plinovi nakon toga idu u generator pare na otpadnu toplinu HRSG1 i HRSG2 gdje se proizvodi para od 10 bara i 95 bara, te se izmjenjuje toplina s mrežnom vodom. Para od 10 bara odlazi u cjevovod za industrijsku paru, dok para od 95 bara odlazi ili ventilom u cjevovod za industrijsku paru ili u visokotlačni dio parne turbine gdje ekspandira do tlaka od 10 bara. Dio pare može ići cjevovod za industrijsku paru, dok ostatak ide u niskotlačni dio turbine. Nazivna snaga parne turbine TA K je 66 MW [2].

1.2. Termodinamičke osnove

Unutar termoenergetskih postrojenja se odvijaju transformacije energije pomoću kružnih procesa. Kružnim procesom se dobiva trajni mehanički rad, što se događa samo kada radnu tvar vraćamo u početno stanje (isti tlak i temperatura), po različitoj promjeni stanja u odnosu na početnu liniju promjene stanja (slika 4).

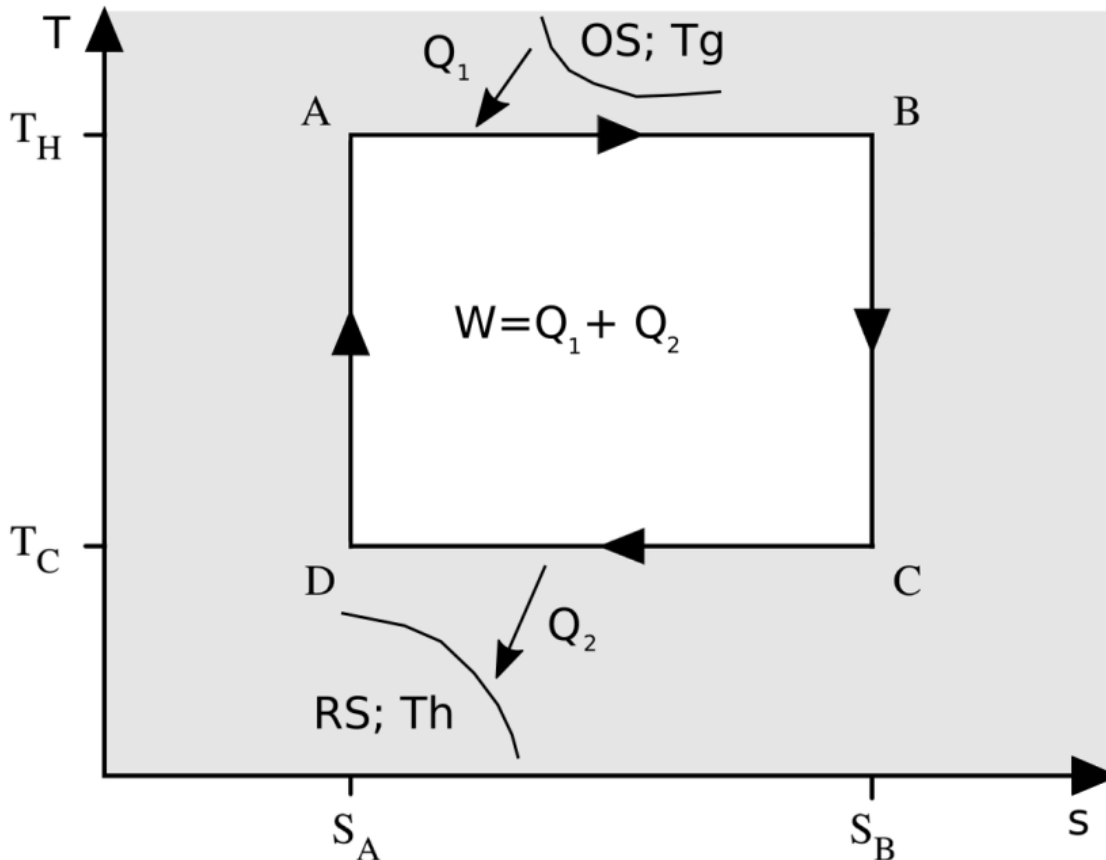


Slika 4. Kružni proces [4]

Od toplinskog stanja **1** radna tvar ekspandira po promjeni stanja **a** do stanja **2**, te se zatim po promjeni stanja **b** komprimira do početnog stanja **1**. Tijekom ekspanzijske promjene **a** dobiven je mehanički rad, dok je tijekom kompresije utrošen mehanički rad. Prema p,V dijagramu sa slike 4, s obzirom da je dobiveni mehanički rad veći od rada kompresije, nastaje pozitivna razlika radova W koja je predočena površinom koju zatvara kružni proces [4].

1.2.1. Carnotov proces

Carnotov proces su promjene stanja radne tvari povratne i ravnotežne tj. bez mehaničkih gubitaka i nepovratno izmijenjene topline, te se postiže najveći mogući termički stupanj djelovanja za zadane toplinske spremnike. Sastoji se o dvije izotermne i izentropske promjene stanja (slika 5)



Slika 5. Carnotov proces [4]

Stupanj djelovanja Carnotovog procesa je definiran kao [4]:

$$\eta_c = \frac{T_H - T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (1)$$

iz kojega je vidljivo kako će termički stupanj djelovanja Carnotovog procesa biti veći što je viša temperatura radne tvari pri kojoj se toplina dovodi, odnosno što je niža temperatura radne tvari pri kojoj se temperatura odvodi.

Idealni Carnotov proces bi se dogodio kada bi temperatura ogrjevnog spremnika bila jednaka temperaturi dovođenja topline ($T_g = T_H$), te kada bi temperatura rashadnog spremnika bila jednaka temperaturi odvođenja topline ($T_h = T_C$), tada bi se dogodio najveći mogući termički stupanj djelovanja.

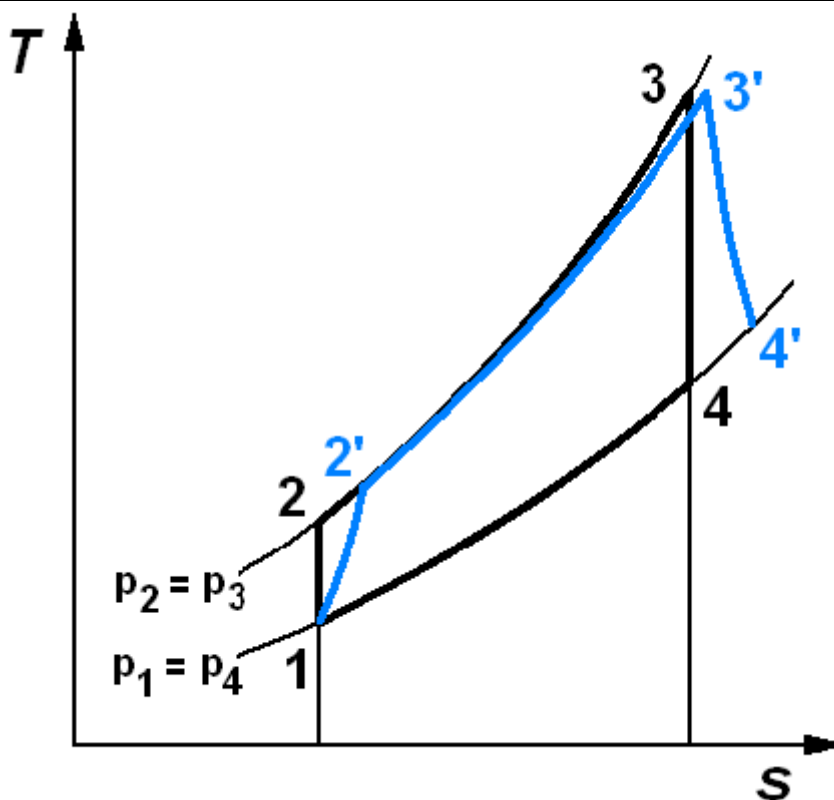
$$\eta_{cid} = 1 - \frac{T_h}{T_g} \quad (2)$$

Idealni Carnotov proces je tehnički neprimjenjiv, međutim od naročitog je značaja za termodinamiku. Pokazuje nam da termički stupanj djelovanja ovisi samo o temperaturama toplinskih spremnika te da se nikakvim načinom, ni izborom bilo koje radne tvari, ne može postići bolji termički stupanj djelovanja. Zbog toga je Carnotov proces izuzetno važan u termodinamici jer služi kao etalon za ocjenjivanje efikasnosti ostalih kružnih procesa [4].

1.2.2. Jouleov (Braytonov) proces

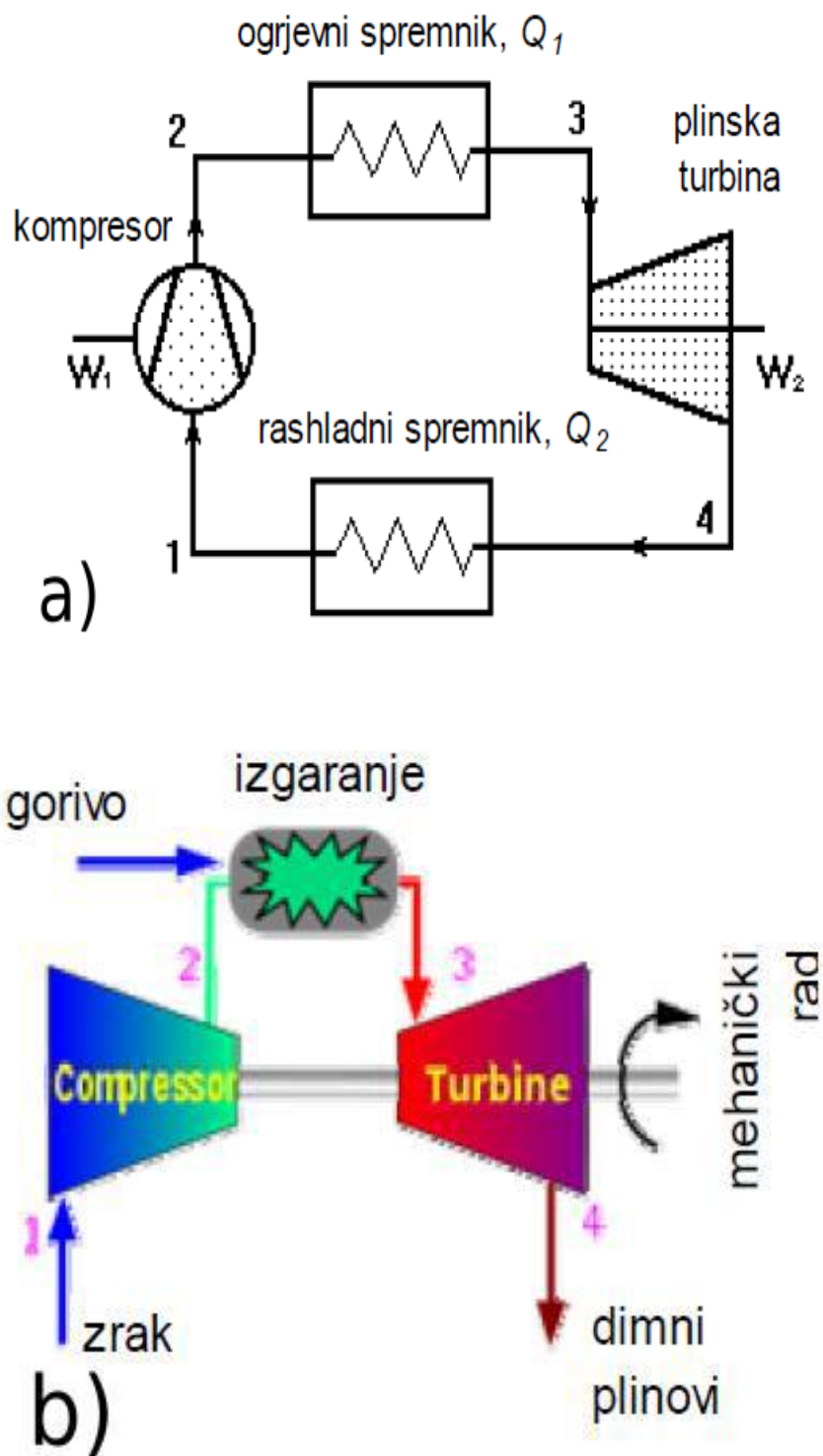
Jouleov proces se sastoji od dvije izoterme i od dvije izobare. Kompresijski cilindar komprimira zrak koji se zatim vodi u izmjenjivač topline gdje mu se dovodi toplina i zagrijava ga, nakon čega u ekspanzijskom cilindru ekspandira izentropski i predaje mehanički rad rotoru turbine. Nakon ekspanzije, plin odlazi u izmjenjivač topline gdje se hladi na početnu temperaturu, čime je proces zatvoren [4].

1870. godine George Brayton razvio je plinsko – turbinski proces po uzoru na Jouleov proces. Umjesto kompresijskog i ekspanzijskog cilindra, uveo je turbo - zračni kompresor i plinsku turbinu. Izobarno dovođenje topline uređeno je izgaranjem goriva u komori za izgaranje, dok je izobarno odvođenje topline realizirano u izmjenjivaču topline (crne linije – promjene stanja, slika 6). Postoji i prirast entropije za vrijeme kompresije i ekspanzije radne tvari te pad tlaka tijekom procesa dovođenja i odvođenja topline (plava linija, slika 6), dok linija 4 – 1 ne postoji jer se dimni plinovi ispuštaju u atmosferu.



Slika 6. T – s, dijagram idealnog i stvarnog Braytonovog procesa [5]

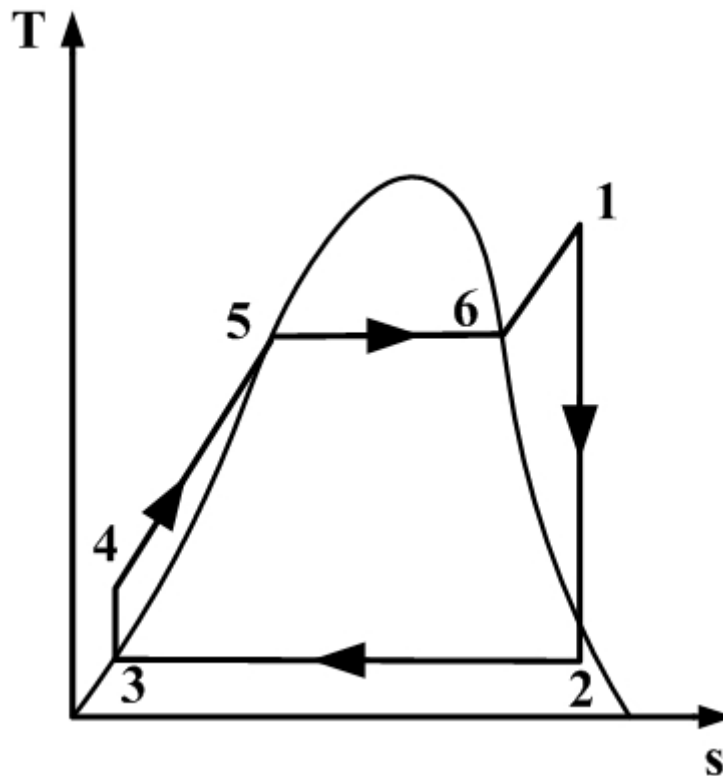
Može biti otvorene izvedbe procesa gdje se dimni plinovi nakon plinske turbine puštaju u atmosferu (slika 7b) ili zatvorene gdje se radna tvar vraća u krug procesa nakon hlađenja u izmjenjivaču (slika 7a). Kompresor i turbina su spojeni na isto vratilo kako bi se dio rada koje se dobije u turbini utrošio na komprimiranje zraka u kompresoru [4].



Slika 7. a) Zatvoreni Braytonov ciklus; b) Otvoreni Braytonov ciklus

1.2.3. Rankineov proces

Razlika između Carnotovog i Rankienovog procesa je ta što kod Rankienevog procesa para u kondenzatoru potpuno kondenzira, te se zatim nastali kondenzat pumpom ubacuje natrag u kotao.



Slika 8. T – s, dijagram Rankineova procesa [4]

Radna tvar je vodena para (stanje 1), nastala izobarnim isparavanjem u generatoru pare (promjena stanja od 4 do 1), izentropa expandira u turbini te proizvodi mehanički rad (1-2), nakon čega izobarno kondenzira u kondenzatoru (2-3) te se izentropskom kompresijom vraća u generator pare (3-4).[4]

Mjere za poboljšavanje Rankineovog procesa su regenerativno zagrijavanje napojne vode i međupregrijavanje pare.

1.3. Termoenergetska postrojenja

Termoenergetska postrojenja služe za proizvodnju električne i/ili toplinske energije. Sagorijevanjem goriva u termoenergetskim postrojenjima dolazi do oslobađanja pohranjene kemijske energije u toplinsku energiju u obliku dimnih plinova visokih temperatura (tipično 1400-1600 °C), koji imaju sposobnost proizvodnje pare visokih parametara (u generatorima pare) ili rada (u plinskim turbinama i motorima). Termoenergetska postrojenja se, kada

proizvode električnu energiju, popularno nazivaju termoelektranama. U termoenergetska postrojenja ubrajamo sljedeća konvencionalna postrojenja [6]:

- Parno – turbinska postrojenja;
- Plinsko – turbinska postrojenja;
- Kombinirana postrojenja;
- Kogeneracijska postrojenja;
- Motore s unutarnjim izgaranjem;
- Nuklearna postrojenja

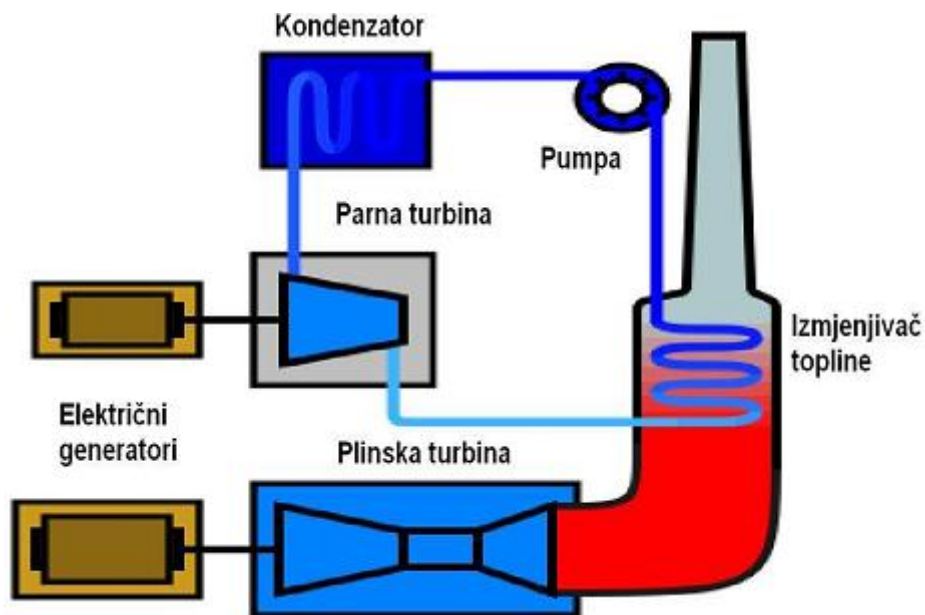
U nastavku je detaljnije objašnjeni kombinirano i kogeneracijsko postrojenje jer oni ujedno sadrže parno – turbinsko i plinsko – turbinsko postrojenje.

1.3.1. Kombinirano postrojenje

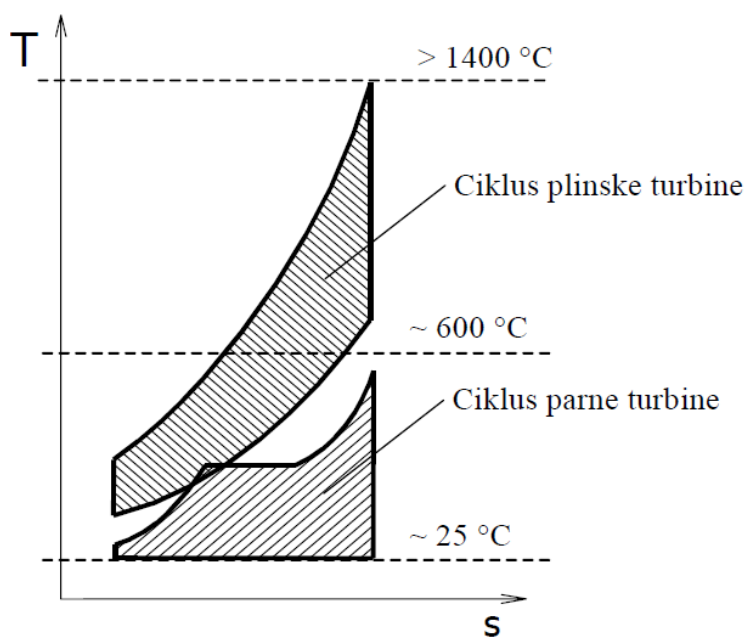
Kombinirano postrojenje ima oboje: plinske turbine ložene prirodnim plinom, parni kotao te parnu turbinu koja koristi iscrpljeni plin iz plinske turbine kako bi se proizveo elektricitet, tj. to je ciklus koji se sastoji od plinsko-turbinskog i parno-turbinskog dijela. Glavne sastavnice su naravno plinska i parna turbina. Osnovna namjena ovakvih postrojenja je da se iskoristi toplina nastala na izlazu iz plinske turbine. Pošto ispušni plinovi koji izlaze iz plinske turbine imaju izuzetno visoke temperature, oko 600°C mogu se iskoristiti kao sredstvo koje će grijati vodu i proizvoditi vodenu paru za parnu turbinu. Time povećavamo iskoristivost samog procesa pošto je toplina koju bi inače izgubili iskorištena za daljnju proizvodnju pare.

Iskoristivost takvog postrojenja iznosi do 60%. U kombiniranom postrojenju kompresor komprimira zrak i šalje ga u komoru izgaranja gdje se istovremeno dovodi gorivo za izgaranje. Plinovi izgaranja vrlo visoke temperature vode se iz komore izgaranja u plinsku turbinu, gdje ekspandiraju dajući koristan rad na vratilu spojenom na rotor plinske turbine. Vratilo pokreće generator električne struje i proizvodi električnu energiju koja se šalje u mrežu. Nakon ekspanzije, ispušni se plinovi iz plinske turbine vode u utilizator (generator pare na otpadnu toplinu). Jedna od vrlo dobrih karakteristika plinske turbine je ta što je kod nje prisutan vrlo visoki omjer zrak/gorivo budući se dodaje nekoliko puta više zraka zbog hlađenja lopatica plinske turbine. Zbog toga na izlazu iz plinske turbine ostaje još dosta neiskorištenog zraka te se taj višak zraka koristi za izgaranje dodatnog goriva u utilizatoru. U utilizatoru se napojna voda zagrijava do isparavanja i pregrijava na zadane parametre. Pregrijava para odlazi iz generatora pare u parnu turbinu gdje ekspandira i predaje mehanički rad generatoru električne struje. Nakon toga para, sada već niskih parametara, odlazi u

kondenzator gdje kondenzira. Nakon kondenzacije, voda se napojnom pumpom vraća u ulaznik na ponovno zagrijavanje [6].



Slika 9. Shematski prikaz kombiniranog postrojenja [1]



Slika 10. T – s, dijagram kombiniranog procesa

Osim izvrsne iskoristivosti, postrojenja s kombiniranim procesom posjeduju i druge prednosti [7]:

- Ekološki su prihvatljivija od svih ostalih postrojenja na fosilna goriva jer praktično ne emitiraju SO_2 ni prašinu. Emisije NO_x su manje od 25 ppm, zahvaljujući naprednoj tehnologiji izgaranja.

- Emisija CO₂ je daleko niža nego kod konvencionalnih termoenergetskih postrojenja na ugljen zbog visoke iskoristivosti i posljedično niže potrošnje goriva, kao i zbog niskog sadržaja ugljika u prirodnom plinu.
- Specifični investicijski troškovi te prostorni zahtjevi su značajno niži nego kod ostalih postrojenja.
- Vrijeme izgradnje postrojenja je vrlo kratko. Na primjer, 800 MW postrojenje gradi se 22 mjeseca, a teži se dodatnom skraćanju tog roka na 20 mjeseci.

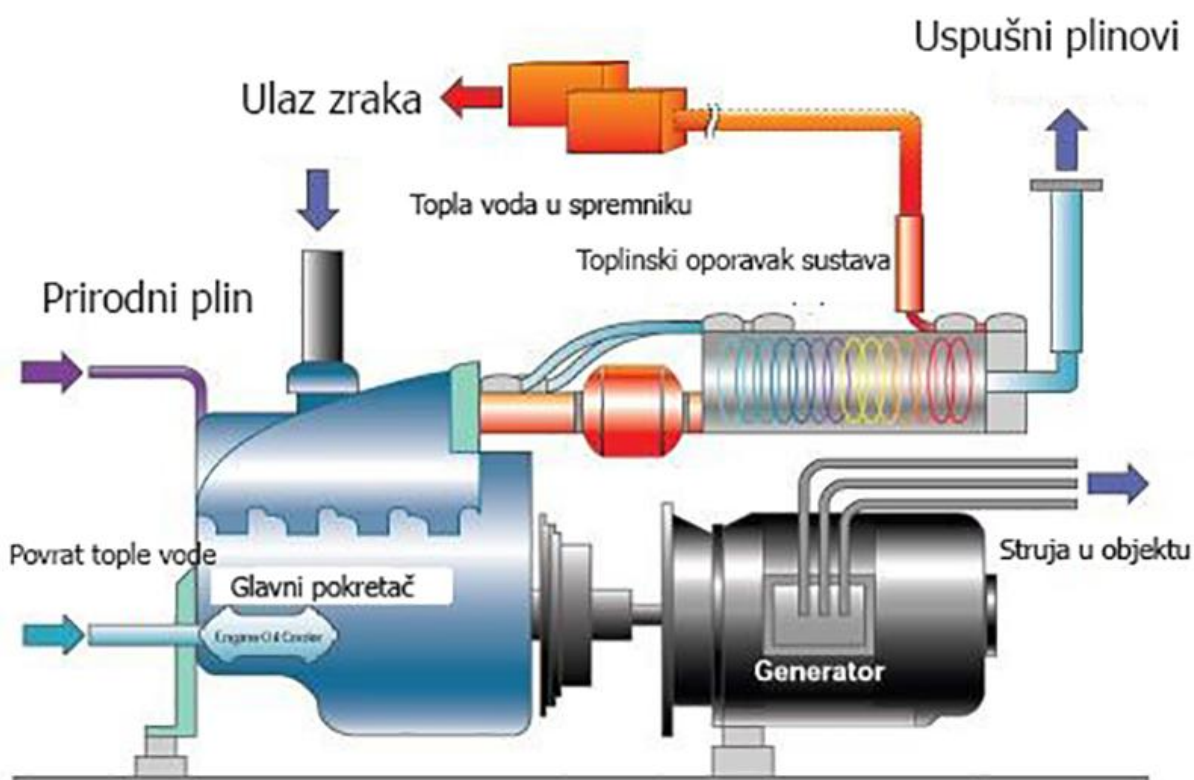
Troškovi proizvodnje električne energije su općenito niži nego kod ostalih postrojenja.

1.3.2. Kogeneracijsko postrojenje

Kogeneracija (CHP) je proces kombinirane proizvodnje dva korisna oblika energije iz jednog energetskeg izvora. U većini kogeneracijskih sustava kemijska energija se pretvara u mehaničku i toplinsku energiju. Mehanička energija koristi se za proizvodnju električne struje, dok se toplinska energija koristi za proizvodnju pare, zagrijavanje vode ili zraka. Osnovna prednost kogeneracije je veća iskoristivost energenta u odnosu na standardne elektrane koje služe samo za proizvodnju struje, te industrijske sustave koji služe samo za proizvodnju pare ili vruće vode za tehničke procese. Glavni razlozi gradnje kogeneracijskih postrojenja je mogućnost proizvodnje jeftinije struje u odnosu na cijenu struje u električnoj mreži, čime kogeneracijska postrojenja sama sebe isplaćuju. Osim toga, industrijskim postrojenjima kogeneracijski sustavi pružaju autonomiju u slučaju ispada glavne mreže. Za neke industrijske procese, ekonomski gubici u slučaju zaustavljanja procesa zbog nestanka električne struje su iznimno veliki. Toplinska se energija koristi za tehnološke potrebe u industriji ili za zagrijavanje prostorija (centralno grijanje). U pravilu se za tu svrhu koristi para ili topla voda koje se proizvodi u generatorima pare ili generatorima tople vode, izgaranjem goriva. Parametri takve pare su relativno niski jer su potrebne temperature u rasponu od 70 do 200 °C. Međutim, izgaranjem goriva u ložištu razvijaju se temperature od 1500 do 1600 °C. Zbog velikih temperaturnih razlika, gubici nepovrativosti (prirast entropije) bili bi veliki. Zbog toga se nameće rješenje po kojemu se proizvodi para visokih parametara pogodnih za ostvarivanje parnoturbinskog kružnog procesa (temperaturna razlika je 1500-500=1000 °C), a odvođenje topline iz procesa odvija se na onim temperaturama koje su pogodne za traženo zagrijavanje (od 70°C do 200°C). Ovo vrijedi onda kada postoji istovremena potreba za električnom i toplinskom energijom.

Tipovi postrojenja za proizvodnju toplinske i električne energije [6]:

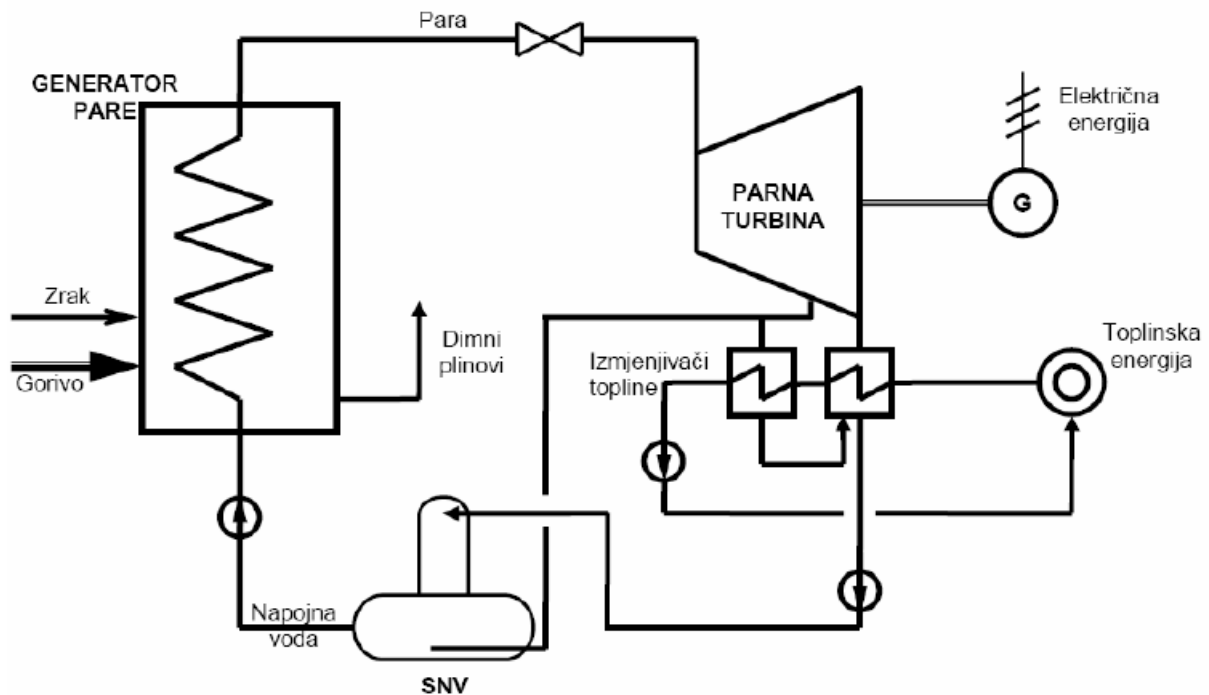
- Postrojenje protutlačne turbine;
- Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare;
- Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova;
- Motori s unutarnjim izgaranjem s iskorištavanjem otpadne topline.



Slika 11. Shema kogeneracijskog postrojenja

1.3.2.1. Postrojenje protutlačne turbine

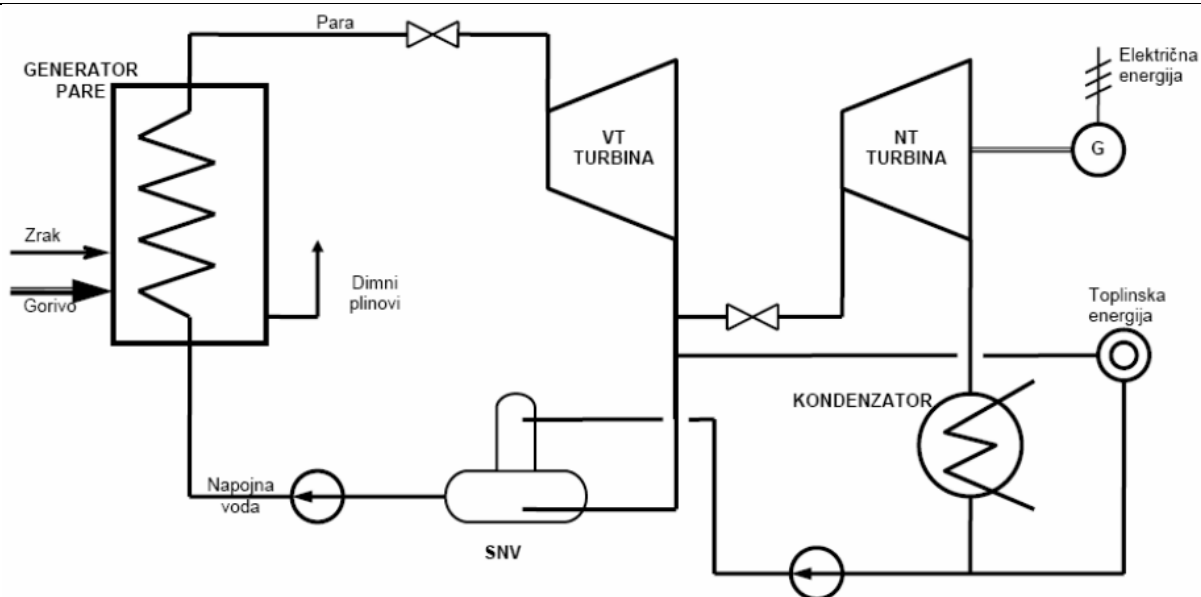
Najklasičniji sustav za kombiniranu proizvodnju mehaničke i toplinske energije sastoji se od proizvodnje pare u loženim generatorima pare, ekspanzije u turbini do određenog tlaka te njezina razvođenja u sustav za iskorištenje toplinske energije (slika 12). Protutlačne turbine su obično manjih snaga, jednostavnije izvedbe, a time i jeftinije te se koriste ponajviše u industrijskim energanama za proizvodnju toplinske i električne energije. Osnovni nedostatak ovakve vezane proizvodnje mehaničke i toplinske energije sastoji se u nemogućnosti bilanciranja proizvedene električne energije i topline s potrebama korisnika u pojedinom trenutku. Stoga se proces podešava tako da zadovolji potrebe za toplinskom energijom, a proizvodnja električne energije ovisi o promjenjivoj potrošnji toplinske energije te protutlaku pare koji je određen zahtjevima potrošača [6].



Slika 12. Shema kogeneracijskog postrojenja s protutlačnom parnom turbinom [8]

1.3.2.2. Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare

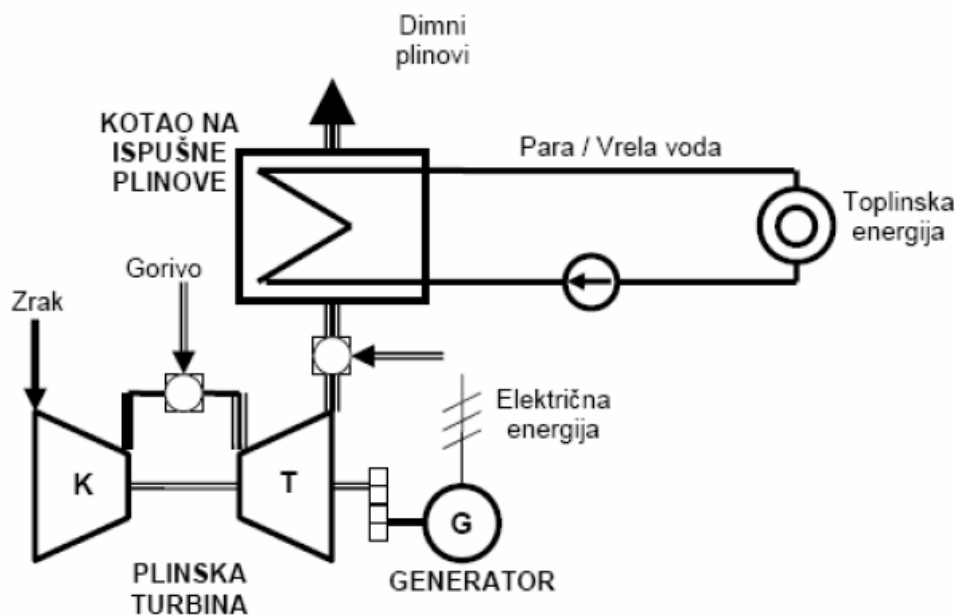
Najčešća uporaba ovog tipa postrojenja je u gradskim toplanama. Također se koristi gdje je potreban, zbog osiguranja stalne i sigurne opskrbe električnom energijom, nužan autonoman izvor, kao npr. u rafinerijskim, petrokemijskim i sličnim pogonima koji su vrlo osjetljivi na prekide u opskrbi energijom. Proizvodnja električne energije ovisi o promjenjivoj potrošnji toplinske energije i tlaku kondenzacije koji ovisi o temperaturi i raspoloživoj količini rashladnog medija (vode ili zraka). S većim udjelom rada kondenzacijskog djela turbine, smanjuje se iskoristivost procesa [6].



Slika 13. Shema kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare [8]

1.3.2.3. Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova

Ovakvo postrojenje je zapravo kombinirano postrojenje s proizvodnjom električne i toplinske energije. Jedan od najjednostavnijih načina kogeneracije je opskrbljivanje plinske turbine kotlom na ispušne plinove koji proizvodi paru i/ili toplu vodu za primjenu u procesnoj industriji i/ili za grijanje (slika 14). Također, starom postrojenju s plinskim kotlom, zamjenom plamenika s plinskom turbinom je efektivan način, uz male investicijske troškove, da se omoguće proizvodnja dodatne električne energije [6].



Slika 14. Shema kogeneracijskog postrojenja s kotlom na otpadnu toplinu [8]

2. VISUAL BASIC FOR APPLICATION

Za proračun matematičkog modela korišten je programski jezik za Microsoft Excel Visual Basic for Application. Visual Basic for Application je integriran u Microsoft office i prilagođen specifičnim mogućnostima i namjeni svake aplikacije Microsoft paketa. Prikaz rezultata proračunatih u VBA-u prikazani su u Microsoft Excel-u i u nastavku će biti opisano što se nalazi u programu.

Sheet „Shema Blok K“ prikazuje shemu sustava koja je prikazana na slikama 15, 16, 17 i 18. Shema prikazuje raspored elemenata postrojenja i spojeve među njima. Moguće je mijenjanje parametara (crveno označeni) te pritiskom na gumb START pokreće se program te nakon n iteracija u slijedećim sheetovima prikazuju se rezultati.

Sheet „Gorivo“ prikazuje kemijski sastav zemnog plina, molarnu masu, gustoću, donju ogrjevnu vrijednost H_d , kemijski sastav dimnih plinova i vrijednosti entalpija.

Sheet „Tablice“ prikazuju podatke za različita toplinska stanja vode i dimnih plinova.

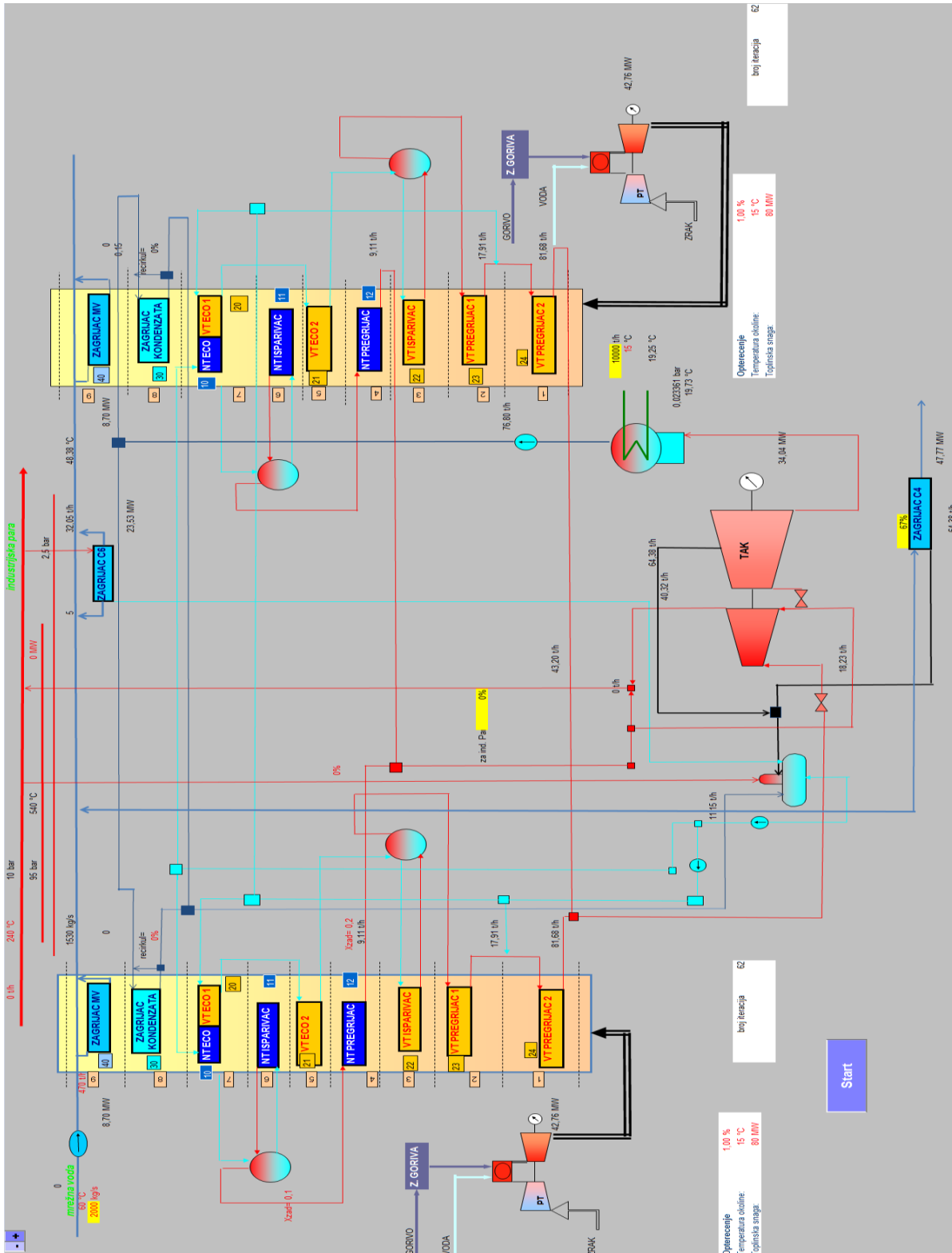
Sheetovi „PTA (-24°C)“, „PTA“ i „PTA (37°C)“ prikazuju rezultate za plinsku turbinu. Rezultati se prikazuju na osnovi različitih postrojenja i tri okolišne temperature (-24°C, 15°C i 37°C) i prikazani su u odgovarajućim tablicama i dijagramima.

Sheetovi „Rezultati“, „Rezultati2“ i „Rezultati3“ prikazuju izračunate temperature za dimne plinove i vodu i dijagrame koji prikazuju toplinska stanja.

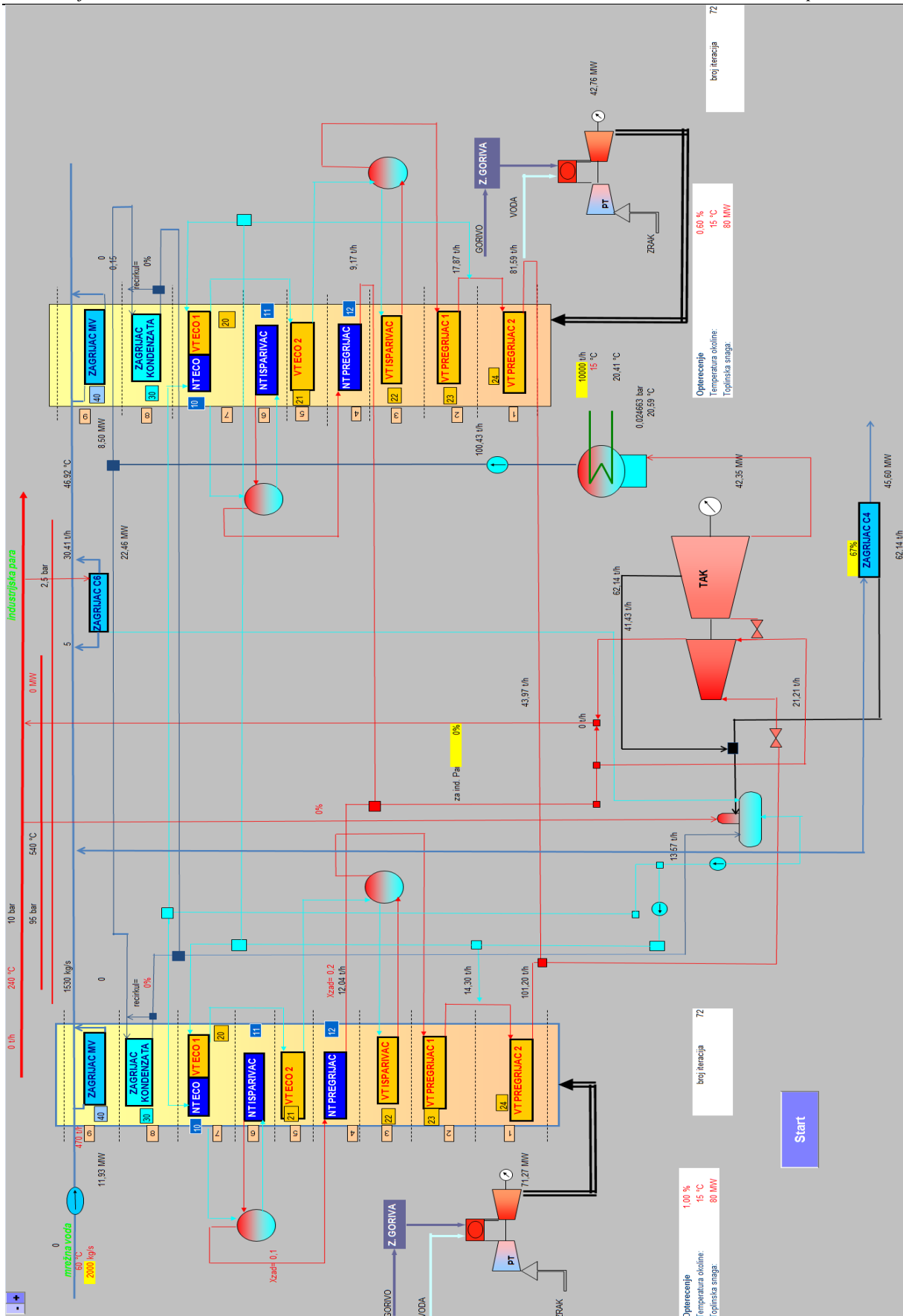
Sheet „Rezultati1“ prikazuju ovisnost o opterećenju plinske turbine u odnosu na temperaturu okoliša i određenu ukupnu električnu snagu plinske i parne turbine na osnovu različite toplinske snage.

Sheet „Analiza rezultata“ prikazuje analizu ukupnu električnu snagu u ovisnosti o različitoj toplinskoj snazi.

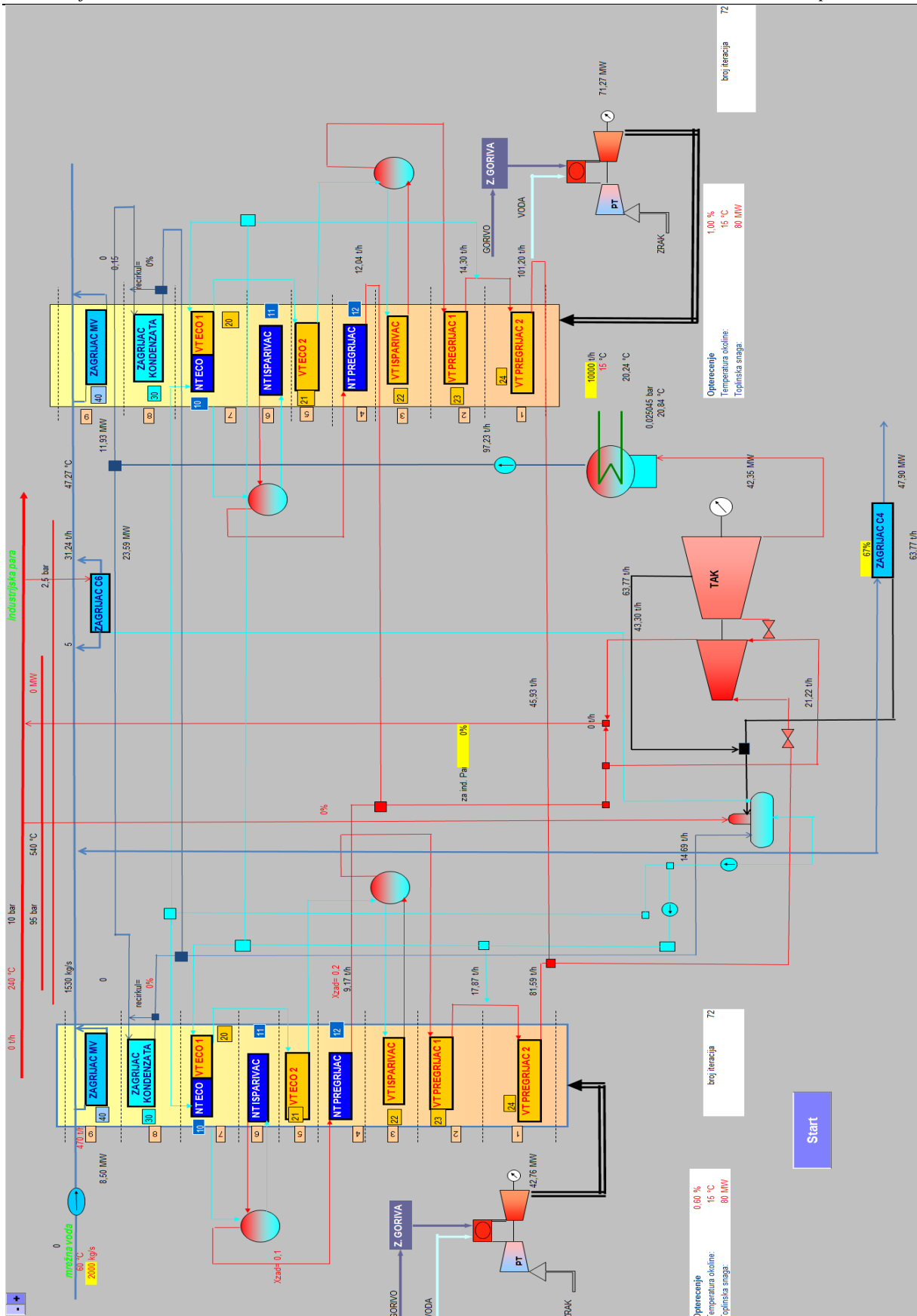
3. REZULTATI MATEMATIČKIH MODELA ZA BLOK K TE – TO ELEKTRANE ZAGREB



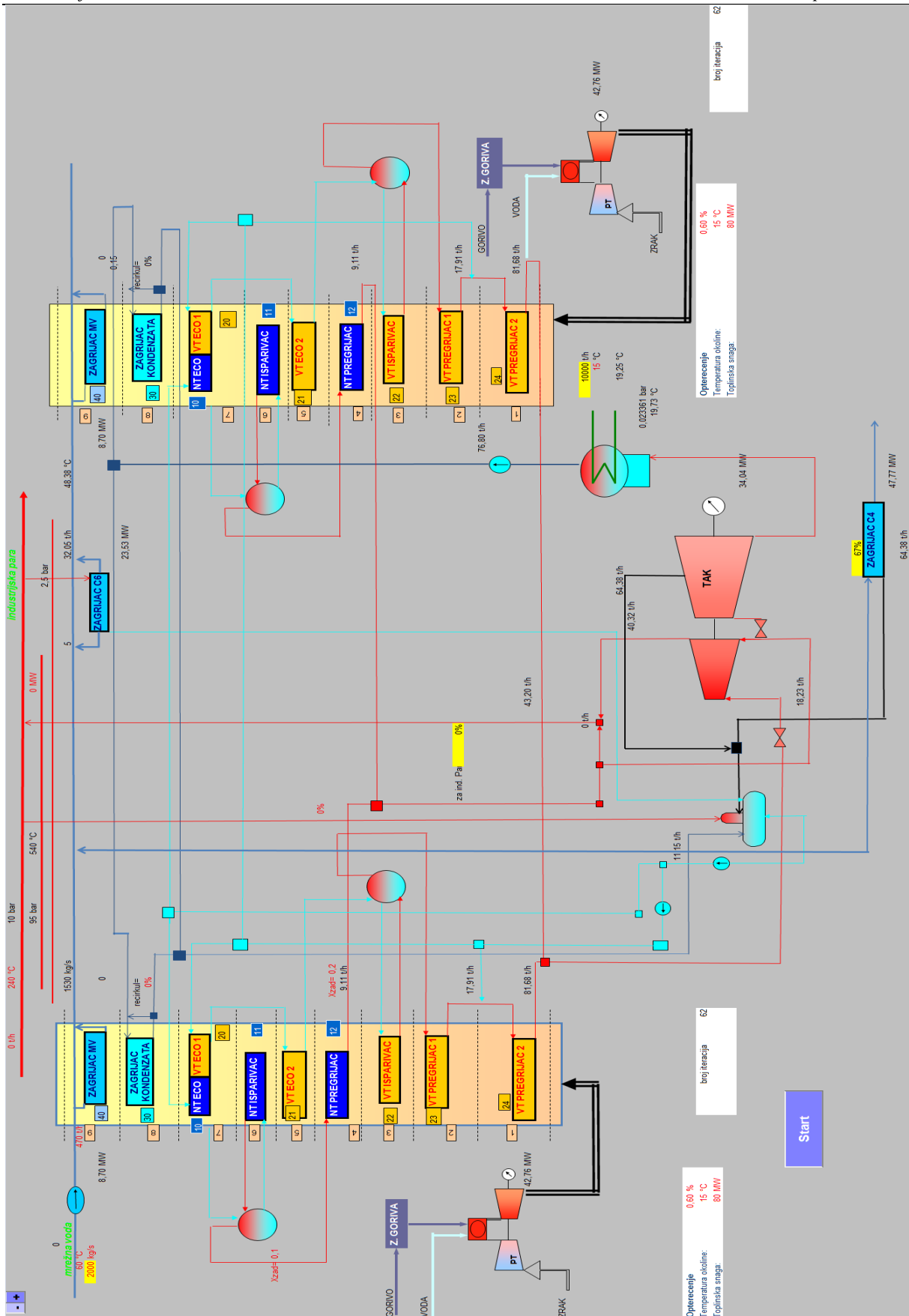
Slika 15. Shema bloka K TE – TO Zagreb (opterećenja 100% i 100%)



Slika 16. Shema bloka K TE – TO Zagreb (opterećenja 100% i 60%)



Slika 17. Shema bloka K TE – TO Zagreb (opterećenja 60% i 100%)



Slika 18. Shema bloka K TE – TO Zagreb (opterećenja 60% i 60%)

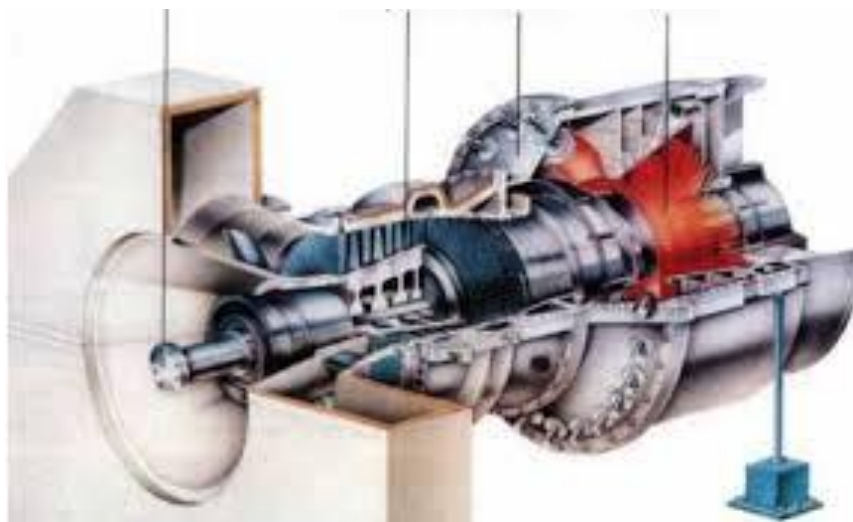
U slikama iznad prikazane su blok sheme bloka K termoelektrane toplane (TE-TO) Zagreb sa različitim zadanim opterećenjima, kao dokaz da matematički model radi u svim kombinacijama opterećenja.

3.1. Proračun plinskih turbina

Postrojenje blok K TE – TO elektrane Zagreb sastoji se od dvije plinske turbine (PT1 i PT2). Postrojenje sa plinskom turbinom radi na način da dimni plinovi iz plinske turbine ulaze u kotao na otpadnu toplinu (generator pare) HRSG (heat recovery steam generator) i pritom se iskorištava njihova toplinska vrijednost, prenoseći toplinu bez dodatnog izgaranja radnom mediju (vodi), od pregrijača pare, pa sve do zagrijača mrežne vode.

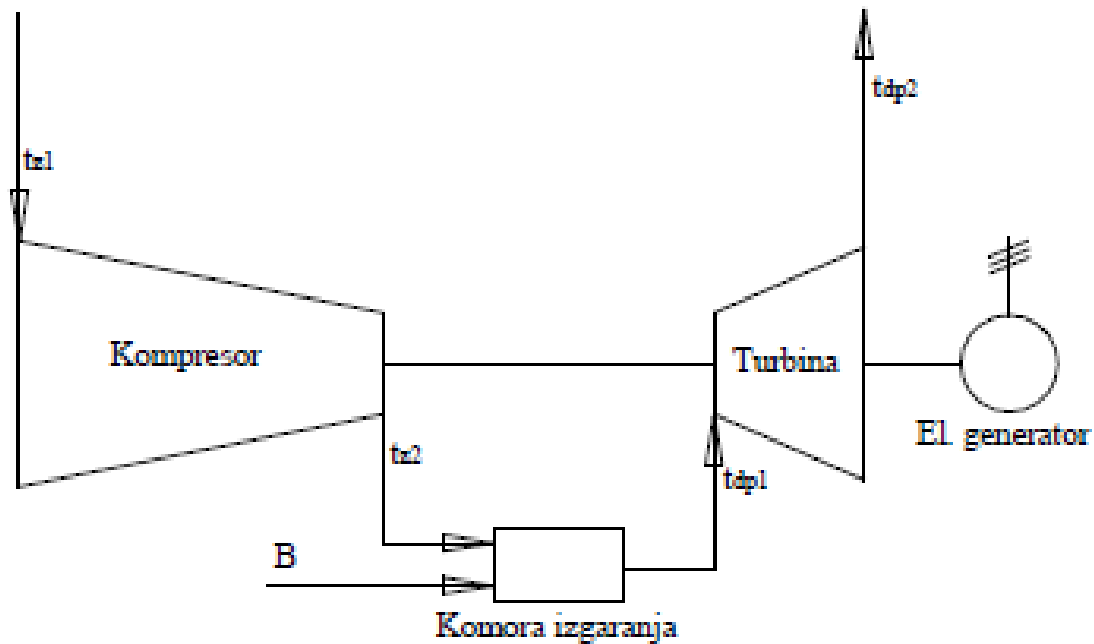
Plinska turbina je jedini element postrojenja u kojem se vrši izgaranje u komori izgaranja i to tako da kompresor usisava okolišni zrak koji se komprimira na viši tlak i odvodi u komoru izgaranja gdje gorivo u kontaktu s kisikom iz zraka vrši proces izgaranja do temperature približno 1200 °C, ovisno o opterećenju plinske turbine.

Pri toj temperaturi dimni plinovi kao produkti izgaranja ekspandiraju u turbini i pri temperaturi od približno 600 °C, ovisno o opterećenju plinske turbine napuštaju plinsku turbinu i odlaze u utilizator s ciljem maksimalne iskoristivosti otpadne topline, koja bi se inače odbacila u okoliš, što bi naravno utjecalo na smanjenje termodinamičkog stupnja iskoristivosti postrojenja [6].



Slika 19. Primjer plinske turbine

Na slici 20 je shematski prikaz plinske turbine sa svim njenim komponentama kao što su kompresor, komora izgaranja, električni generator te sama turbina.



Slika 20. Shematski prikaz plinske turbine

3.1.1. Jednadžbe matematičkog modela plinskih turbina

Stvarna izlazna temperatura iz kompresora iznosi:

$$t_{z2} = t_{z1} - \frac{t_{z2iz} - t_{z1}}{\eta_k} \quad (3)$$

Snaga potrebna za komprimiranje masenog zraka iznosi:

$$W_k = L \cdot (H_{z2} - H_{z1}) \quad (4)$$

Specifična entalpija dimnih plinova izračunata je po slijedećoj jednadžbi:

$$H_{dp1} = \frac{B \cdot H_d + L \cdot (H_{z2} - H_{z0})}{G} + H_{dp0} \quad (5)$$

Pomoću poznate entalpije može se odrediti temperatura dimnih plinova t_{dp1} koja ekspandira do temperature t_{dp2} , koja se računa iz slijedećeg izraza:

$$t_{dp2} = t_{dp1} - \eta_t (t_{dp1} - t_{dp2iz}) \quad (6)$$

Snaga dobivena ekspanzijom dimnih plinova:

$$W_t = G \cdot (H_{dp1} - H_{dp2}) \quad (7)$$

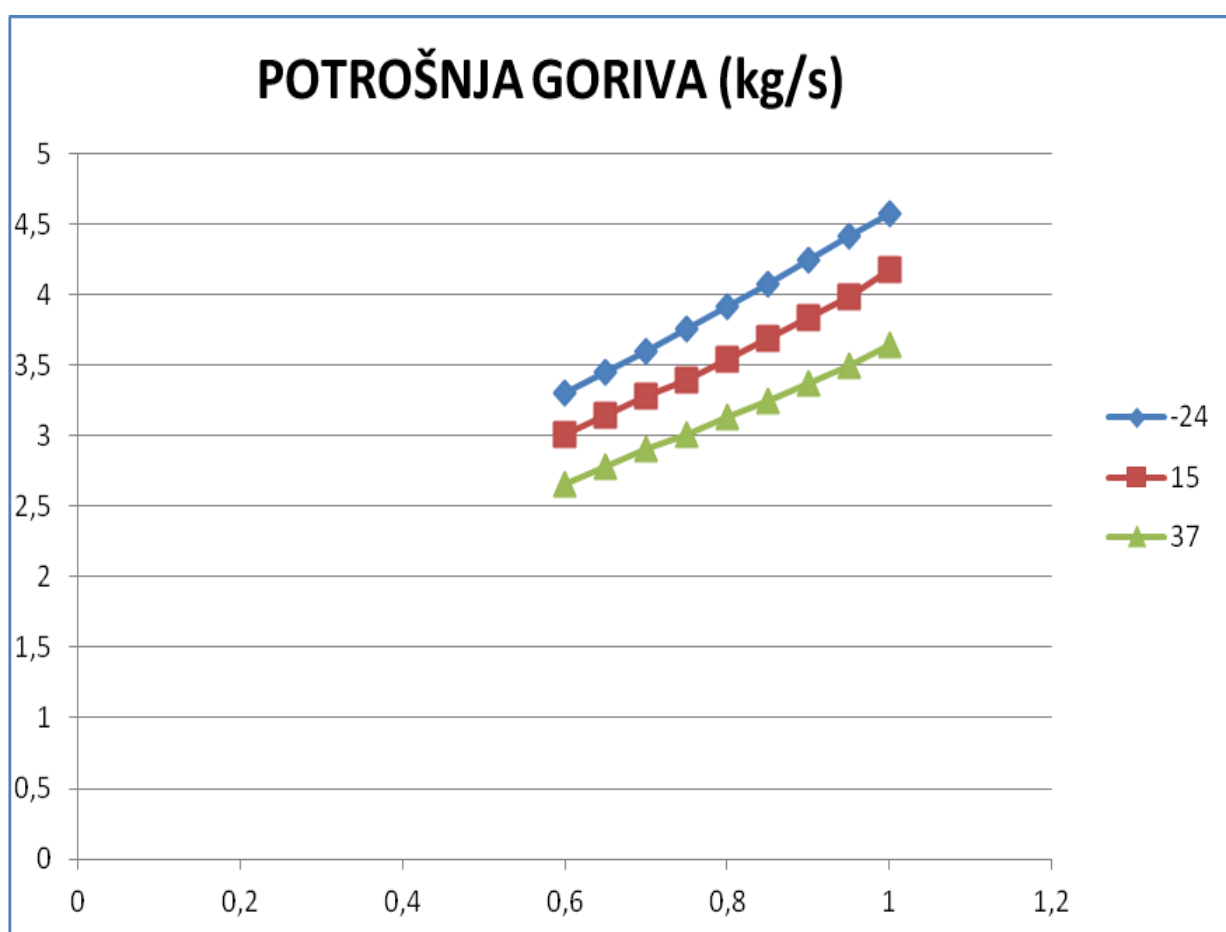
Korisna snaga se dobije ako se od snage dobivene ekspanzijom dimnih plinova oduzme snaga kompresora:

$$W_{kor} = W_t - W_k \quad (8)$$

Snaga električnog generatora se dobije kada korisnu snagu pomnožimo sa stupnjem iskoristivosti generatora, mehaničkim stupnjem iskoristivosti i sa stupnjem iskoristivosti reduktora:

$$W_{el} = \eta_{el} \cdot \eta_{meh} \cdot \eta_{red} W_{kor} \quad (9)$$

3.1.2. Prikaz rezultata matematičkog modela plinskih turbina



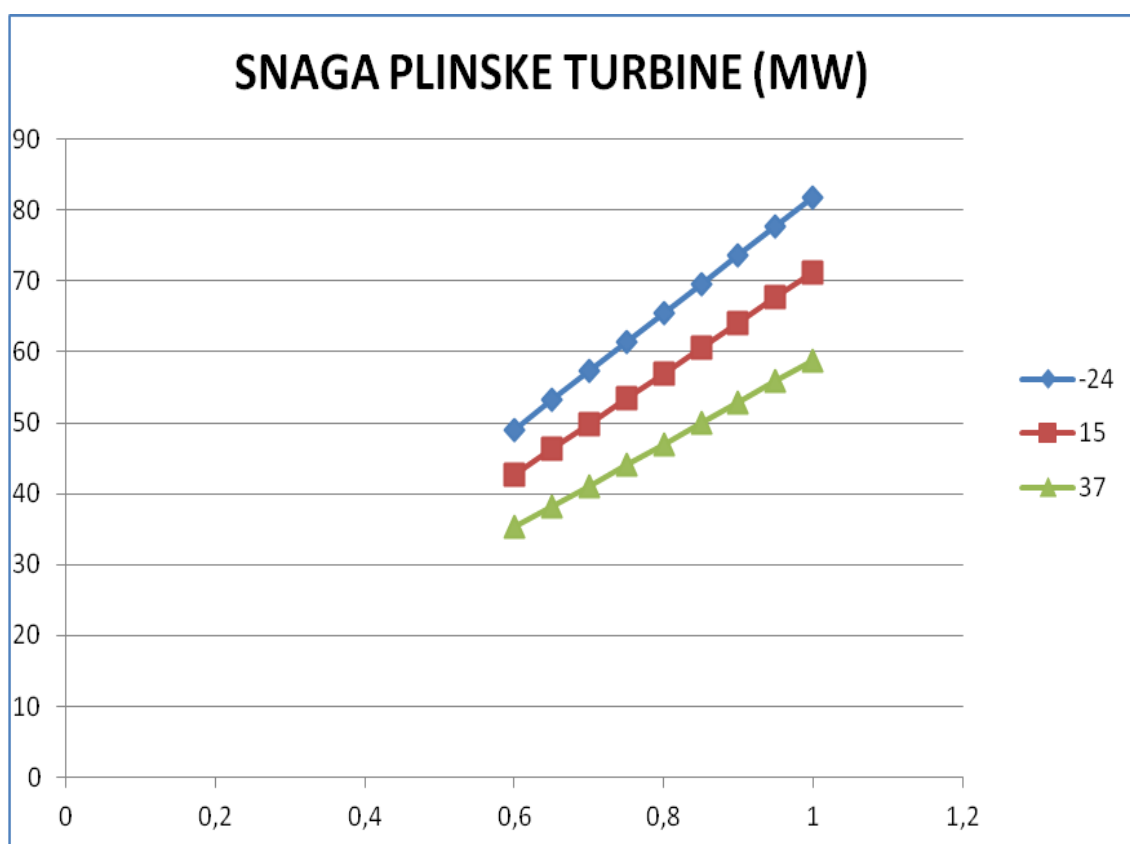
Slika 21. Potrošnja goriva plinske turbine

Na slici 21 je prikazana potrošnja goriva plinske turbine sa minimalnom toplinskom snagom (jednaki rezultati i sa toplinskom snagom od 80MW) na tri različite temperature (-24°C, 15°C, 37°C), te na opterećenjima od 60% do 100%, u tablici 3 su prikazani rezultati. Pošto su dvije plinske turbine jednake na slici 21 i tablici 3 su prikazani rezultati jedne turbine. Iz slike 21 i tablice 3 se vidi kako potrošnja goriva pada porastom temperature, ali raste povećanjem opterećenja plinske turbine.

Tablica 3. Rezultati potrošnje goriva plinske turbine [kg/s]

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|----------------------------|-------|------|------|
| 60% | 3,30 | 3,00 | 2,66 |
| 65% | 3,45 | 3,14 | 2,78 |
| 70% | 3,60 | 3,28 | 2,91 |
| 75% | 3,76 | 3,40 | 3,01 |
| 80% | 3,91 | 3,54 | 3,13 |
| 85% | 4,07 | 3,69 | 3,25 |
| 90% | 4,24 | 3,84 | 3,37 |
| 95% | 4,42 | 3,98 | 3,50 |
| 100% | 4,58 | 4,17 | 3,65 |

Na slici 22 i tablici 4 prikazani su rezultati snage plinskih turbina (jednake karakteristike) na tri različite temperature (-24°C, 15°C, 37°C) i opterećenjima od 60% do 100%.

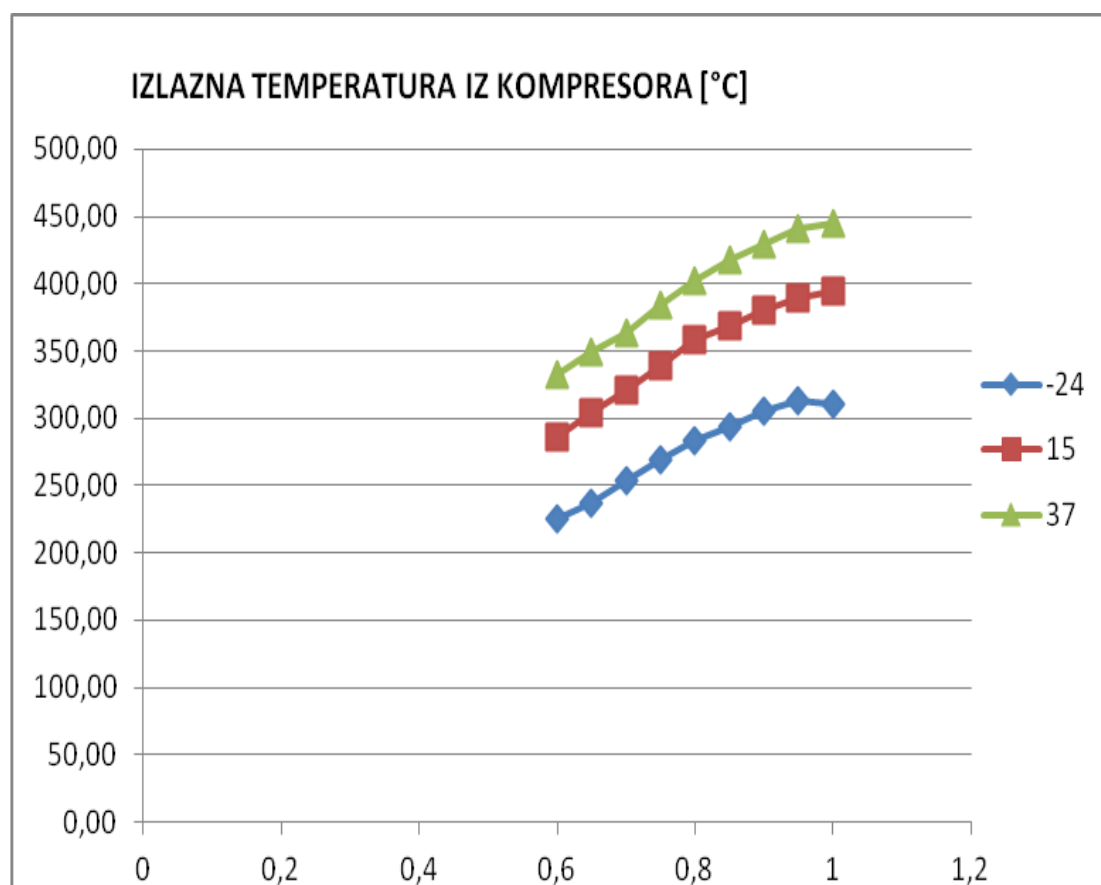


Slika 22. Rezultati dobivenih snaga plinskih turbina

Tablica 4. Rezultati snage plinskih turbina [MW]

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| 60% | 49,084 | 42,759 | 35,258 |
| 65% | 53,174 | 46,322 | 38,195 |
| 70% | 57,264 | 49,886 | 41,133 |
| 75% | 61,354 | 53,449 | 44,071 |
| 80% | 65,445 | 57,012 | 47,009 |
| 85% | 69,535 | 60,575 | 49,947 |
| 90% | 73,625 | 64,139 | 52,885 |
| 95% | 77,716 | 67,702 | 55,823 |
| 100% | 81,806 | 71,265 | 58,761 |

Slika 22 i tablica 4 prikazuje smanjenje snage plinske turbine sa porastom temperature, ali i povećanje snage povećanjem opterećenja same turbine.

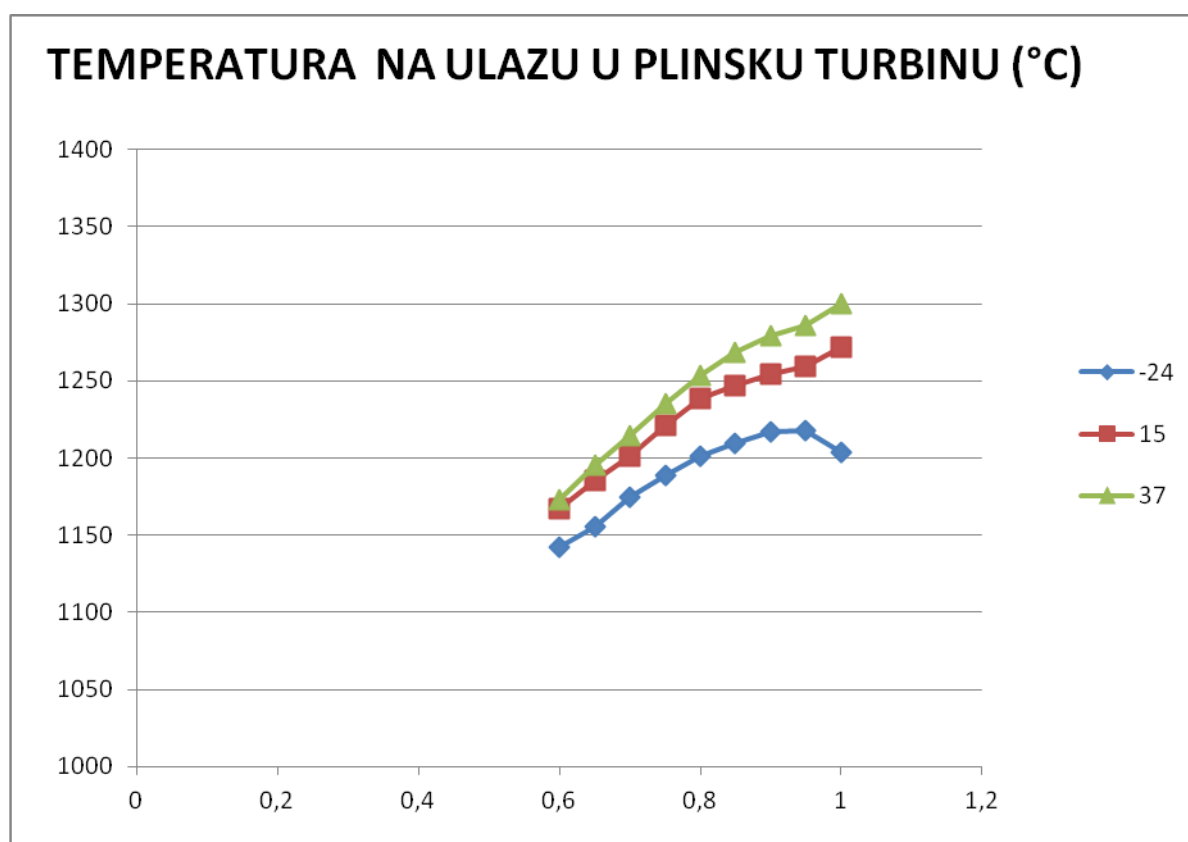


Slika 23. Izlazna temperatura kompresora Tz(2)

Tablica 5. Rezultati izlazne temperature kompresora Tz(2)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| 60% | 225,17 | 285,40 | 332,25 |
| 65% | 236,50 | 304,48 | 349,14 |
| 70% | 254,02 | 320,95 | 363,89 |
| 75% | 269,84 | 338,32 | 383,74 |
| 80% | 283,82 | 358,17 | 402,70 |
| 85% | 293,12 | 368,99 | 418,00 |
| 90% | 304,77 | 380,60 | 429,82 |
| 95% | 312,55 | 388,99 | 440,77 |
| 100% | 310,61 | 394,66 | 445,28 |

Slika 23 i tablica 5 prikazuju rast izlazne temperature kompresora sa porastom okolišne temperature, kao i sa porastom samog opterećenja turbine.

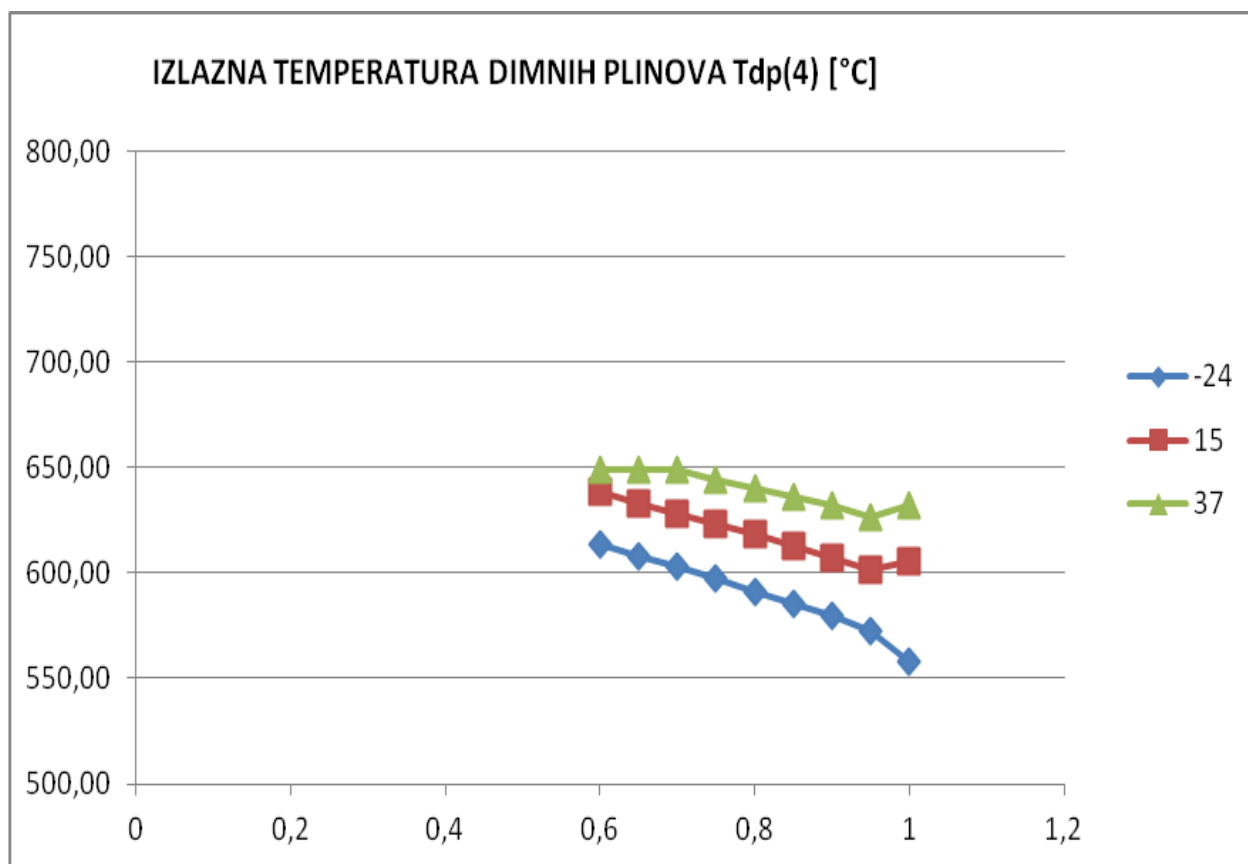


Slika 24. Rezultati temperature dimnih plinova na ulazu u PT

Tablica 6. Rezultati temperature dimnih plinova na ulazu u PT [°C]

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| 60% | 1142,13 | 1167,25 | 1172,74 |
| 65% | 1155,65 | 1185,64 | 1195,50 |
| 70% | 1174,36 | 1201,59 | 1214,94 |
| 75% | 1189,10 | 1221,08 | 1235,55 |
| 80% | 1201,62 | 1238,85 | 1253,25 |
| 85% | 1209,55 | 1246,74 | 1268,75 |
| 90% | 1217,13 | 1254,55 | 1279,55 |
| 95% | 1218,23 | 1259,08 | 1285,64 |
| 100% | 1203,66 | 1271,53 | 1300,16 |

Slika 24 i tablica 6 prikazuju porast temperature dimnih plinova na ulazu u PT (plinsku turbinu) porastom temperature okoliša i porastom opterećenja turbine.

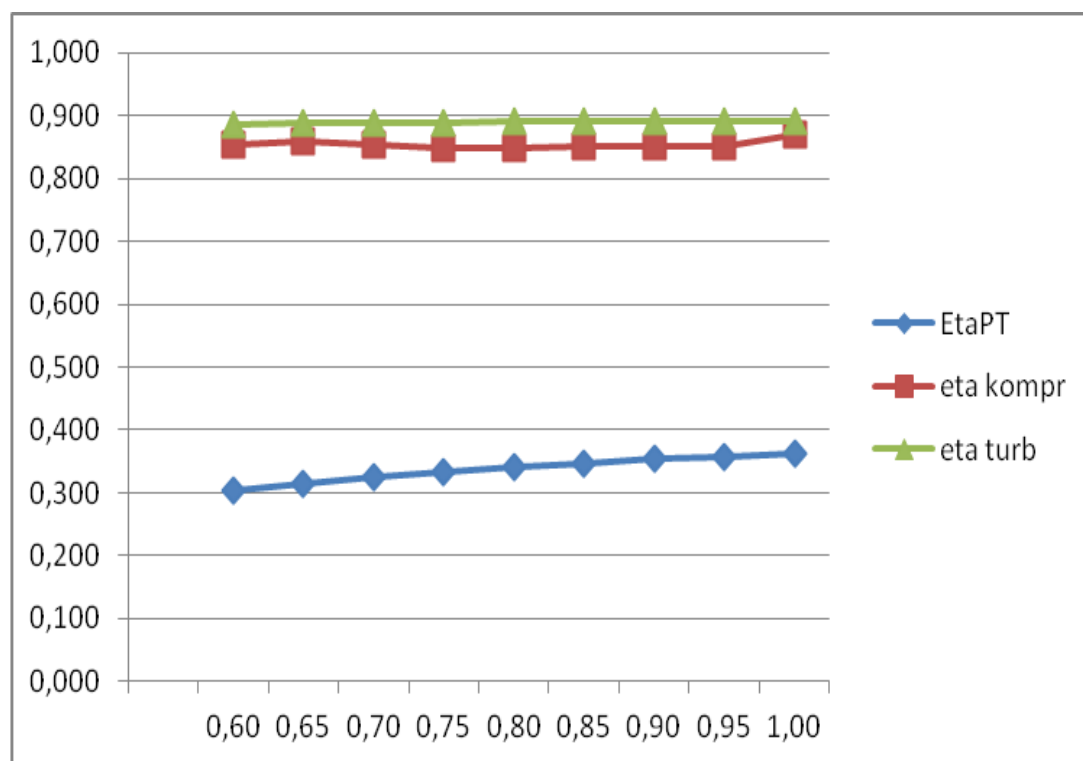


Slika 25. Izlazna temperatura dimnih plinova iz plinske turbine

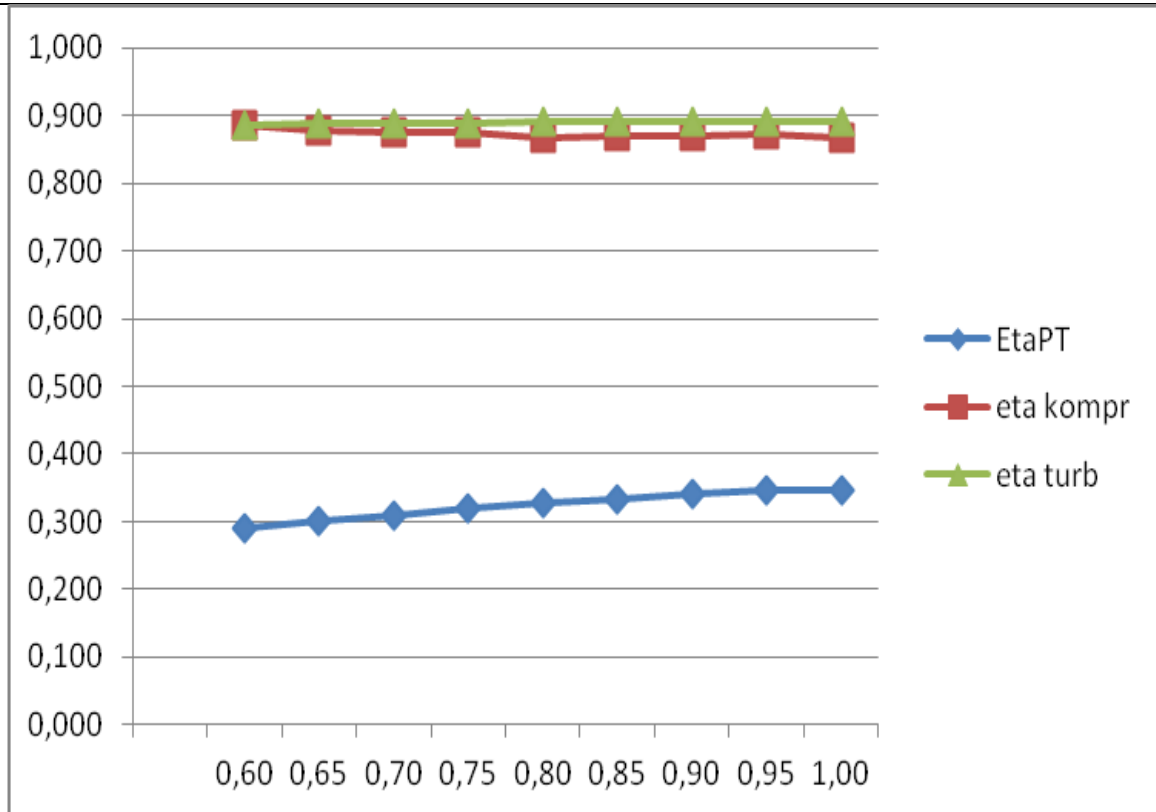
Tablica 7. Rezultati izlazne temperature dimnih plinova iz plinske turbine Tdp(4)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| 60% | 613,90 | 638,90 | 648,90 |
| 65% | 608,30 | 633,30 | 648,61 |
| 70% | 603,30 | 628,30 | 648,90 |
| 75% | 597,80 | 623,30 | 644,40 |
| 80% | 591,10 | 618,30 | 640,00 |
| 85% | 585,60 | 612,80 | 636,10 |
| 90% | 579,40 | 607,20 | 631,70 |
| 95% | 572,20 | 601,10 | 626,10 |
| 100% | 558,30 | 605,60 | 631,70 |

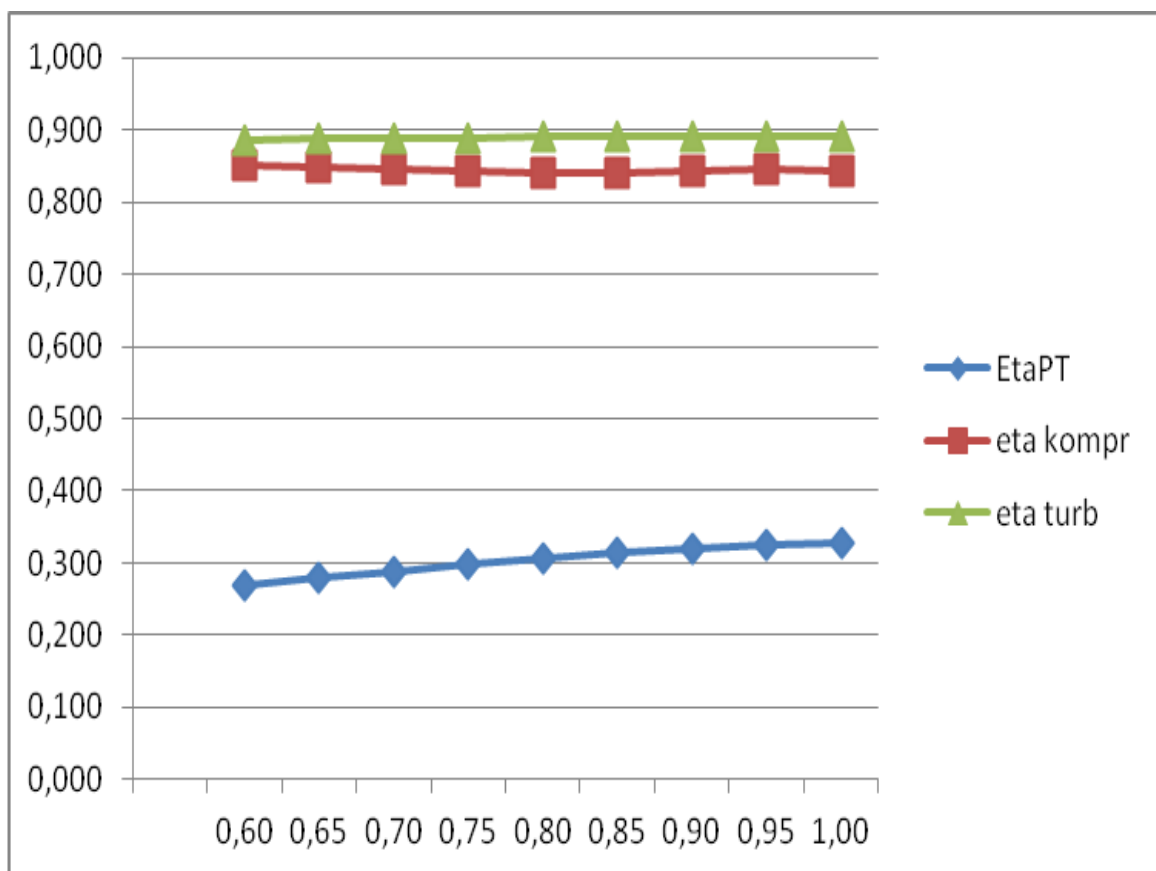
Izlazne temperature dimnih plinova Tdp(4) iz plinske turbine kao što je prikazano na slici 25 i tablici 7 rastu porastom temperature okoline ali padaju povećanjem opterećenja plinske turbine.



Slika 26. Iskoristivost postrojenja plinske turbine na okolišnoj temperaturi od -24°C



Slika 27. Iskoristivost postrojenja plinske turbine na okolišnoj temperaturi od 15°C



Slika 28. Iskoristivost postrojenja plinske turbine na okolišnoj temperaturi od 37°C

Tablica 8. Iskoristivost postrojenja plinske turbine

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | | 15°C | | | 37°C | | |
|----------------------------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
| | EtaPT | Etakom | Etaturb | EtaPT | Etakom | Etaturb | EtaPT | Etakom | Etaturb |
| 60% | 0,302 | 0,85 | 0,89 | 0,290 | 0,88 | 0,89 | 0,270 | 0,85 | 0,89 |
| 65% | 0,313 | 0,86 | 0,89 | 0,300 | 0,88 | 0,89 | 0,280 | 0,85 | 0,89 |
| 70% | 0,324 | 0,85 | 0,89 | 0,309 | 0,87 | 0,89 | 0,288 | 0,84 | 0,89 |
| 75% | 0,332 | 0,85 | 0,89 | 0,320 | 0,88 | 0,89 | 0,298 | 0,84 | 0,89 |
| 80% | 0,340 | 0,85 | 0,89 | 0,328 | 0,87 | 0,89 | 0,306 | 0,84 | 0,89 |
| 85% | 0,347 | 0,85 | 0,89 | 0,334 | 0,87 | 0,89 | 0,313 | 0,84 | 0,89 |
| 90% | 0,353 | 0,85 | 0,89 | 0,340 | 0,87 | 0,89 | 0,320 | 0,84 | 0,89 |
| 95% | 0,358 | 0,85 | 0,89 | 0,346 | 0,87 | 0,89 | 0,325 | 0,84 | 0,89 |
| 100% | 0,364 | 0,87 | 0,89 | 0,347 | 0,87 | 0,89 | 0,328 | 0,84 | 0,89 |

U tablici 8 je prikazano kako iskoristivost EtaPT (postrojenja plinske turbine) raste s povećanjem opterećenja turbine, ali pada sa zagrijavanjem okolišne temperature. Najbolja iskoristivost plinske turbine je pri okolišnoj temperaturi od -24°C.

Etakom (iskoristivost kompresora) je više manje jednako za svaku temperaturu i opterećenje zasebno. Za okolišnu temperaturu od -24°C je oko 0,85, za 15°C 0,87 i za 37°C iznosi oko 0,84.

Etaturb (iskoristivost turbine) je konstantna za svako pojedino opterećenje i za svaku okolišnu temperaturu i iznosi 0,89.

Možemo zaključiti da plinska turbina najbolje radi u zimskim uvjetima rada zbog najniže okolišne temperature koja dovodi do najbolje iskoristivosti postrojenja.

3.2. Proračun kotlova na otpadnu toplinu

U termoelektrani toplani (TE – TO) Zagreb izgrađen je kombi kogeneracijski blok K sa dvije plinske turbine, jednom parnom turbinom koristeći za gorivo prirodni plin i ekstra lako loživo ulje. Kogeneracijski blok K u sebi sadrži dva kotla na otpadnu toplinu HRSG1 i HRSG2. Navedeni kotlovi se sastoje od dva glavna kruga vode gdje se vrši isparavanje vode na niskom i visokom tlaku i dva zasebna kruga. Zasebni krugovi se sastoje od zagrijača kondenzata i zagrijača mrežne vode koji zagrijava vodu iz mreže. Kako su oba kotla na otpadnu toplinu jednaka, točnije imaju jednake komponente ovo kratko objašnjenje vrijedi kako za prvi, tako i za drugi kotao na otpadnu toplinu.



Slika 29. Kotao na otpadnu toplinu (HRSG) [9]

U ulaznici ulaze dimni plinovi ovisni o opterećenju plinskih turbina (od 60% do 100%), i temperaturi okoliša (-24°C, 15°C, 37°C) sa temperaturom od oko 600°C. Prvo se prenosi toplina na cijevni snop pregrijača pare u visokotlačnom dijelu na približno 100 bara, pa preko isparivača i dva ekonomajzera prenose toplinu u visokotlačnom dijelu, a isto tako zagrijavaju pregrijač, isparivač i ekonomajzer u niskotlačnom dijelu na 11 bara. Također dimni plinovi predaju toplinu zagrijaču kondenzata i zagrijaču mrežne vode. Nakon prolaska kroz cijeli ulaznik dimni plinovi odlaze u okoliš s temperaturom oko 100°C. S kotlom na otpadnu toplinu bitno su smanjeni gubici u odnosu na kotao u kojem izgara ugljen.

3.2.1. *Jednadžbe matematičkog modela za kotlove na otpadnu toplinu*

Zagrijač mrežne vode:

$$Q_{ZMV} = G \cdot (H_{dp10} - H_{dp11}) \cdot \eta_{zr} \quad (10.1.)$$

$$Q_{ZMV} = D_{ZMV} \cdot (H_{w1} - H_{w2}) \quad (10.2.)$$

$$Q_{ZMV} = k_{ZMV} \cdot A_{ZMV} \cdot \Delta T_{mZMV} \quad (10.3.)$$

Gdje su:

| | | |
|-----------|--------|---------------------------------------|
| Q_{zmv} | [W] | toplinska snaga zagrijača mrežne vode |
| G | [kg/s] | maseni protok dimnih plinova |

| | | |
|-------------------|------------------------|---|
| H_{dp} | [J/kg] | specifična entalpija dimnih plinova |
| η_{zr} | | stupanj iskoristivosti topline zračenjem |
| D_{ZMV} | [kg/s] | maseni protok mrežne vode kroz HRSG |
| H_w | [J/kg] | specifična entalpija mrežne vode |
| k_{zmv} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza zagrijača mrežne vode |
| A_{zmv} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u ZMV |
| ΔT_{mZMV} | [K] | srednja razlika temperature vode i dim. plinova u ZMV |

Zagrijač kondenzata:

$$Q_{ZK} = G \cdot (H_{dp9} - H_{dp10}) \cdot \eta_{zr} \quad (11.1.)$$

$$Q_{ZK} = D_{ZK} \cdot (H_{ZK2} - H_{ZK1}) \quad (11.2.)$$

$$Q_{ZK} = k_{ZK} \cdot A_{ZK} \cdot \Delta T_{mZK} \quad (11.3.)$$

Gdje su:

| | | |
|------------------|------------------------|--|
| Q_{ZK} | [W] | toplinska snaga zagrijača kondenzata |
| H_{ZK} | [J/kg] | specifična entalpija kondenzata |
| D_{ZK} | [kg/s] | maseni protok kondenzata kroz HRSG |
| K_{ZK} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline zagrijača kondenzata |
| A_{ZK} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u ZK |
| ΔT_{mZK} | [K] | srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u ZK |

NT pumpa:

$$W_{NT} = D_{NT} \cdot (H_{V1} - H_{V0}) \quad (12)$$

Gdje su:

| | | |
|----------|--------|---|
| W_{NT} | [W] | snaga pumpe vode u NT krugu pare |
| D_{NT} | [kg/s] | maseni protok vode kroz NT krug pare |
| H_{V1} | [J/kg] | stvarna specifična entalpija vode nakon pumpe |
| H_{V0} | [J/kg] | specifična entalpija vode na ulazu u pumpu |

NT ekonomajzer:

$$Q_{ECO} = G_1 \cdot (H_{dp8} - H_{dp9}) \cdot \eta_{zr} \quad (13.1.)$$

$$Q_{ECO} = D_{NT} \cdot (H_{NT2} - H_{NT1}) \quad (13.2.)$$

$$Q_{ECO} = k_{ECO} \cdot A_{ECO} \cdot \Delta T_{mECO} \quad (13.3.)$$

Gdje su:

| | | |
|-------------------|------------------------|---|
| Q_{ECO} | [W] | toplinska snaga ekonomajzera |
| G_1 | [kg/s] | maseni protok dimnih plinova koji zagrijava ECO |
| H_{NT} | [J/kg] | specifična entalpija vode u niskotlačnom krugu |
| D_{NT} | [kg/s] | maseni protok vode kroz NT krug pare |
| k_{ECO} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline ekonomajzera |
| A_{ECO} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u ECO |
| ΔT_{mECO} | [K] | srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u ECO |

NT isparivač:

$$Q_{ISP} = G \cdot (H_{dp7} - H_{dp8}) \cdot \eta_{zr} \quad (14.1.)$$

$$Q_{ISP} = D_{PNT} \cdot (H_{NT3} - H_{NT2}) \quad (14.2.)$$

$$Q_{ISP} = k_{ISP} \cdot A_{ISP} \cdot \Delta T_{mISP} \quad (14.3.)$$

Gdje su:

| | | |
|-------------------|------------------------|--|
| Q_{ISP} | [W] | toplinska snaga isparivača |
| D_{PNT} | [kg/s] | maseni protok kroz zasebni NT krug pare isp i separatora |
| k_{ISP} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline isparivača |
| A_{ISP} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u ISP |
| ΔT_{mISP} | [K] | srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u ISP |

NT pregrijač:

$$Q_{PR} = G \cdot (H_{NT5} - H_{NT6}) \cdot \eta_{zr} \quad (15.1.)$$

$$Q_{PR} = D_{NT} \cdot (H_{NT4} - H_{NT3}) \quad (15.2.)$$

$$Q_{PR} = k_{PR} \cdot A_{PR} \cdot \Delta T_{mPR} \quad (15.3.)$$

Gdje su:

| | | |
|----------|-----|----------------------------|
| Q_{PR} | [W] | toplinska snaga pregrijača |
|----------|-----|----------------------------|

| | | |
|------------------|------------------------|--|
| k_{PR} | [W/(m ² K)] | koeficijent prolaza topline pregrijača |
| A_{PR} | [m ²] | površina stijenke za izmjenjivanje topline u PR |
| ΔT_{mPR} | [K] | srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u PR |

Za visokotlačni dio kotla na otpadnu toplinu koriste se iste jednadžbe za izračun matematičkog modela jedino visokotlačni dio kotla ima dio gdje se ubrizgava voda za hlađenje.

Voda za hlađenje:

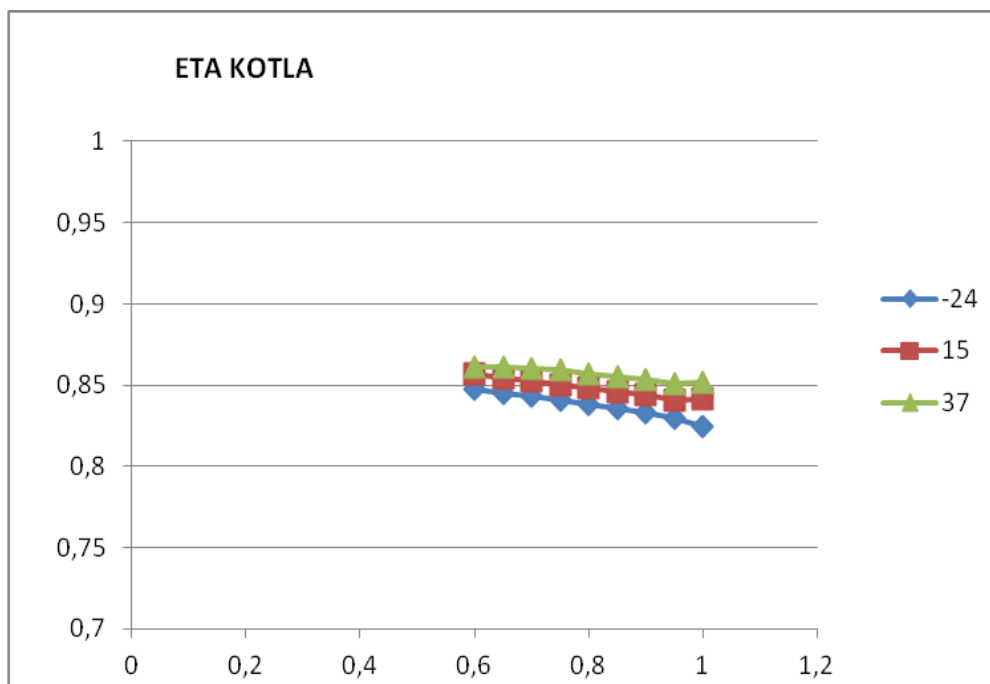
$$(D_{VT} - w) \cdot H_{vt5} + w \cdot H_{VT1} = D_{VT} \cdot H_{VTw5} \quad (16)$$

Gdje su:

| | | |
|------------|--------|--|
| D_{VT} | [kg/s] | maseni protok kroz VT krug pare |
| w | [kg/s] | maseni protok ubrizgavajuće vode za hlađenje pare |
| H_{vt5} | [J/kg] | specifična entalpija pare na izlazu iz VT pregrijača 1 |
| H_{VT1} | [J/kg] | specifična entalpija ubrizgavajuće vode za hlađenje pare |
| H_{VTw5} | [J/kg] | specifična entalpija pare na ulazu u VT pregrijač 2 |

3.2.2. Prikaz rezultata matematičkog modela kotlova za otpadnu toplinu

U daljnjem tekstu prikazani su rezultati kotla na otpadnu toplinu izračunati na svim opterećenjima (od 60% do 100%) i na temperaturama -24°C, 15°C i 37°C.

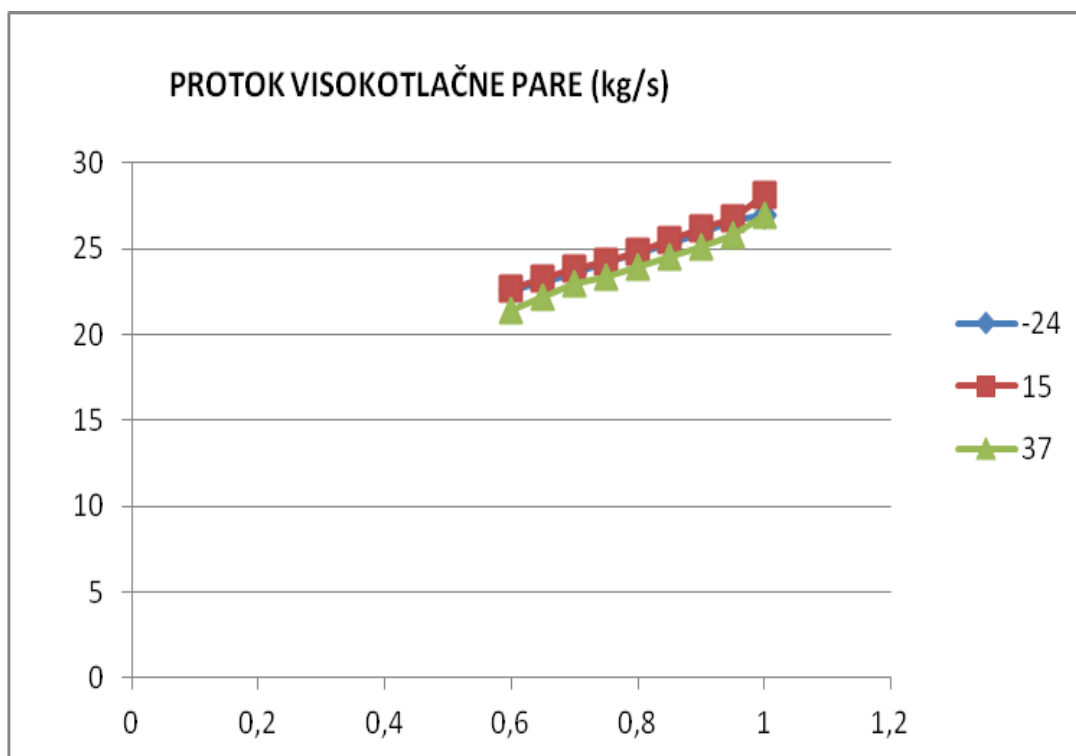


Slika 30. Korisnost kotla na otpadnu toplinu (HRSG)

Tablica 9. Korisnost kotla na otpadnu toplinu ETA KOTLA (HRSG)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| 60% | 0,847 | 0,857 | 0,861 |
| 65% | 0,845 | 0,854 | 0,861 |
| 70% | 0,843 | 0,852 | 0,861 |
| 75% | 0,841 | 0,850 | 0,859 |
| 80% | 0,838 | 0,848 | 0,857 |
| 85% | 0,835 | 0,846 | 0,855 |
| 90% | 0,833 | 0,844 | 0,853 |
| 95% | 0,830 | 0,841 | 0,851 |
| 100% | 0,825 | 0,842 | 0,852 |

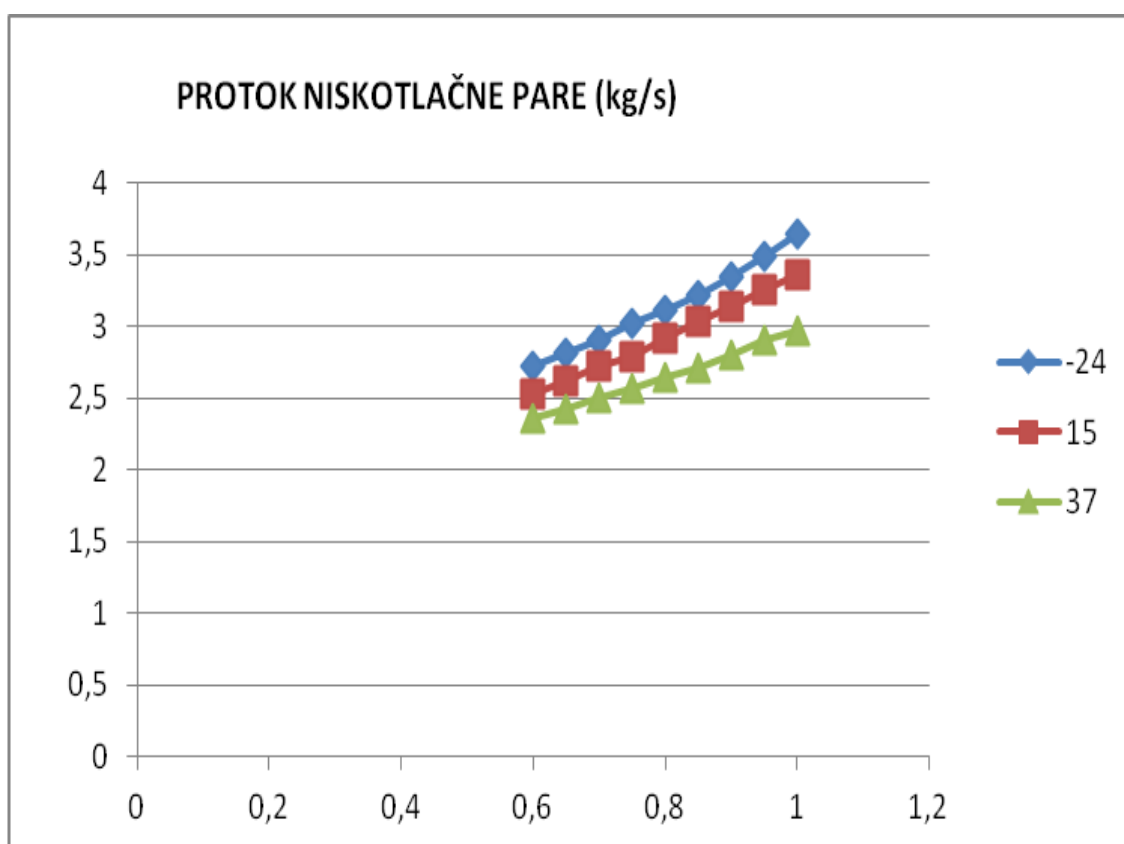
Kao što je prikazano na pripadajućem dijagramu (slika 30) i tablici 9 korisnost kotla na otpadnu toplinu najveća je na 37°C, a najmanja na -24°C. Također sa povećanjem opterećenja postrojenja smanjuje se korisnost kotla na otpadnu toplinu zbog smanjenja temperature dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine.

**Slika 31. Protok visokotlačne pare Dk(24)**

Tablica 10. Protok visokotlačne pare Dk(24)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| 60% | 22,53 | 22,69 | 21,43 |
| 65% | 23,08 | 23,28 | 22,16 |
| 70% | 23,59 | 23,89 | 23,00 |
| 75% | 24,22 | 24,23 | 23,40 |
| 80% | 24,68 | 24,79 | 23,98 |
| 85% | 25,30 | 25,48 | 24,52 |
| 90% | 25,92 | 26,17 | 25,08 |
| 95% | 26,64 | 26,76 | 25,77 |
| 100% | 26,94 | 28,14 | 26,95 |

Slika 31 i tablica 10 prikazuju rezultate protoka visokotlačne turbine. Povećanjem opterećenja postrojenja povećava se i protok.

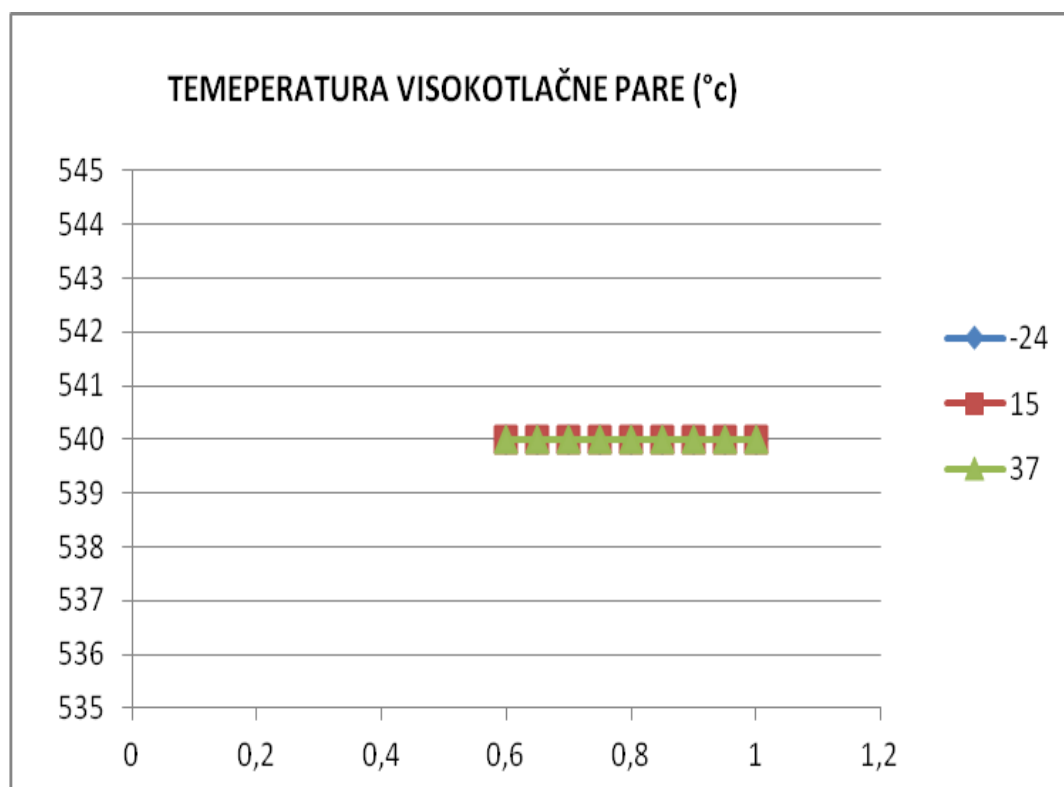


Slika 32. Protok niskotlačne pare Dk(12)

Tablica 11. Protok niskotlačne pare Dk(12)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|----------------------------|-------|------|------|
| 60% | 2,73 | 2,53 | 2,36 |
| 65% | 2,82 | 2,62 | 2,43 |
| 70% | 2,91 | 2,72 | 2,50 |
| 75% | 3,02 | 2,78 | 2,57 |
| 80% | 3,12 | 2,92 | 2,65 |
| 85% | 3,22 | 3,04 | 2,72 |
| 90% | 3,35 | 3,15 | 2,80 |
| 95% | 3,49 | 3,26 | 2,91 |
| 100% | 3,65 | 3,37 | 2,97 |

Na slici 32 i tablici 11 prikazani su rezultati protoka niskotlačne turbine. Najveći protoci niskotlačne turbine su na temperaturi -24°C i smanjuju se povećanjem okolišne temperature ali se povećavaju povećanjem opterećenja postrojenja.

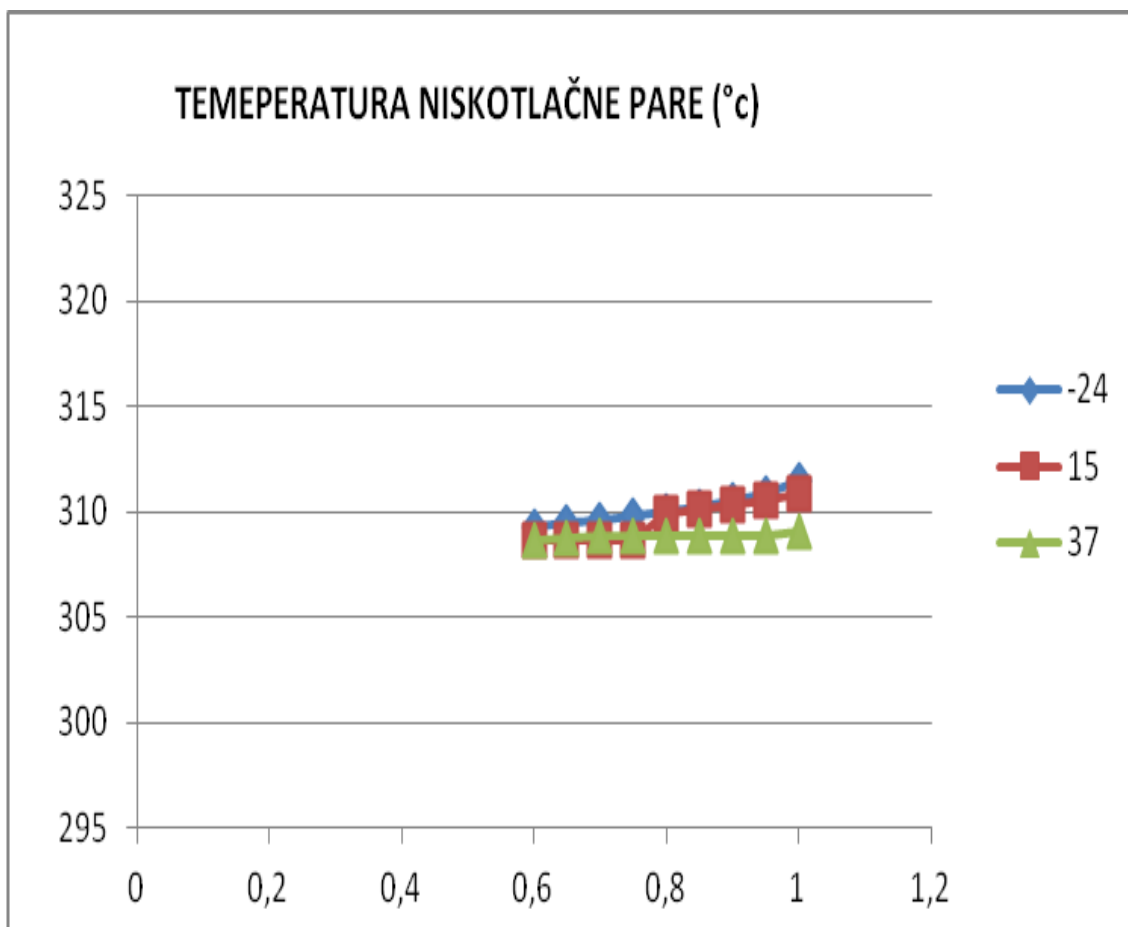


Slika 33. Temperatura visokotlačne turbine Twi(24) (°C)

Tablica 12. Temperatura visokotlačne turbine Twi(24) (°C)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| 60% | 540,00 | 539,99 | 539,99 |
| 65% | 540,00 | 539,99 | 539,99 |
| 70% | 540,00 | 539,99 | 539,99 |
| 75% | 540,00 | 539,99 | 539,99 |
| 80% | 540,00 | 540,00 | 539,99 |
| 85% | 540,00 | 540,00 | 539,99 |
| 90% | 540,00 | 540,00 | 539,99 |
| 95% | 540,00 | 540,00 | 540,00 |
| 100% | 540,00 | 540,00 | 540,00 |

Kao što je prikazano na slici 33 i tablici 12 temperatura visokotlačne turbine je konstantna.



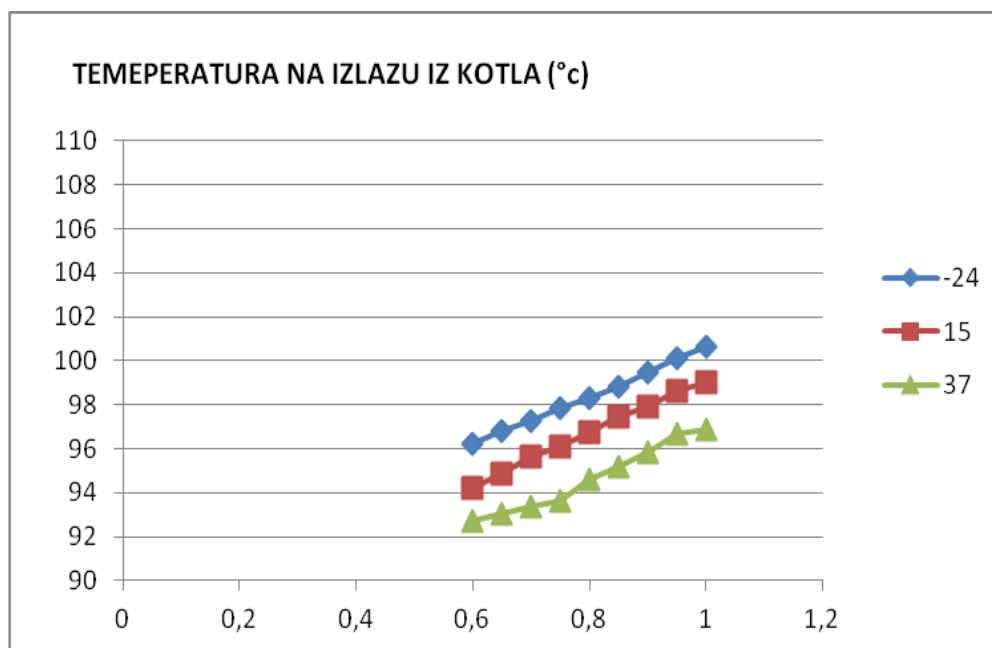
Slika 34. Temperatura niskotlačne turbine Twi(12) (°C)

Tablica 13. Temperatura niskotlačne turbine Twi(12) (°C)

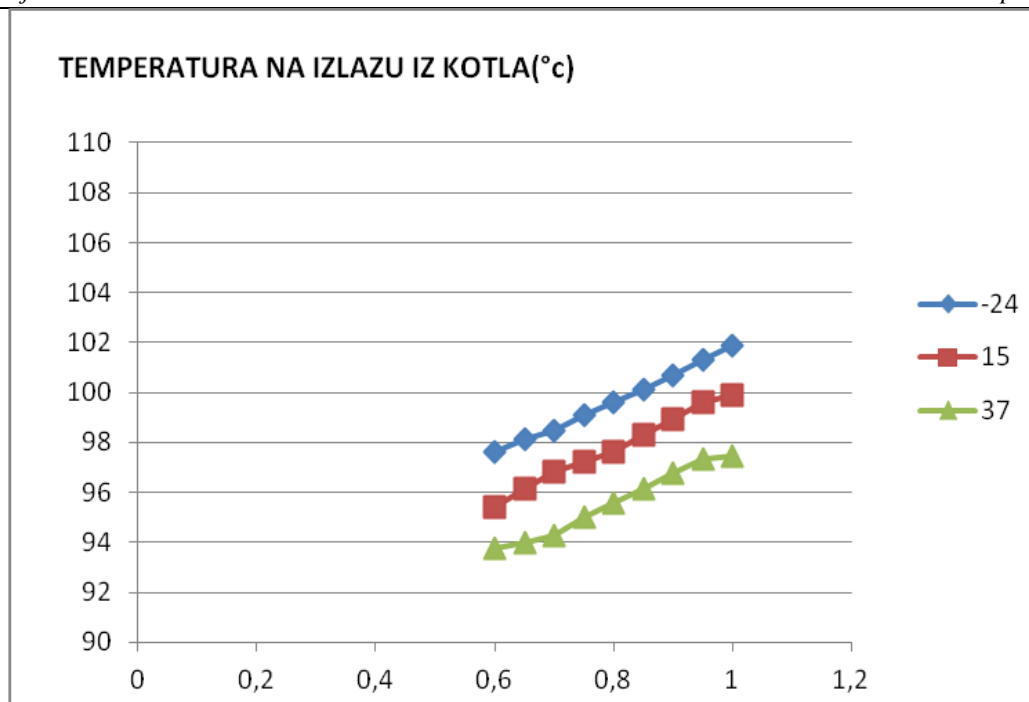
| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| 60% | 309,31 | 308,70 | 308,61 |
| 65% | 309,45 | 308,64 | 308,71 |
| 70% | 309,64 | 308,61 | 308,83 |
| 75% | 309,81 | 308,61 | 308,82 |
| 80% | 309,98 | 309,92 | 308,83 |
| 85% | 310,26 | 310,08 | 308,89 |
| 90% | 310,52 | 310,33 | 308,86 |
| 95% | 310,89 | 310,50 | 308,87 |
| 100% | 311,46 | 310,87 | 309,09 |

Slika 34 i tablica 13 prikazuju rezultate temperature niskotlačne turbine. Porast temperature porastom opterećenja postrojenja je 1-2°C. Temperatura niskotlačne turbine opada porastom opterećenja postrojenja.

Ulazna temperatura u kotao otpadne topline je već prikazana na slici 25 i tablici 7 jer je to zapravo izlazna temperatura dimnih plinova iz plinske turbine.



Slika 35. Temperatura na izlazu iz kotla Tgi(9) (°C) (0MW)

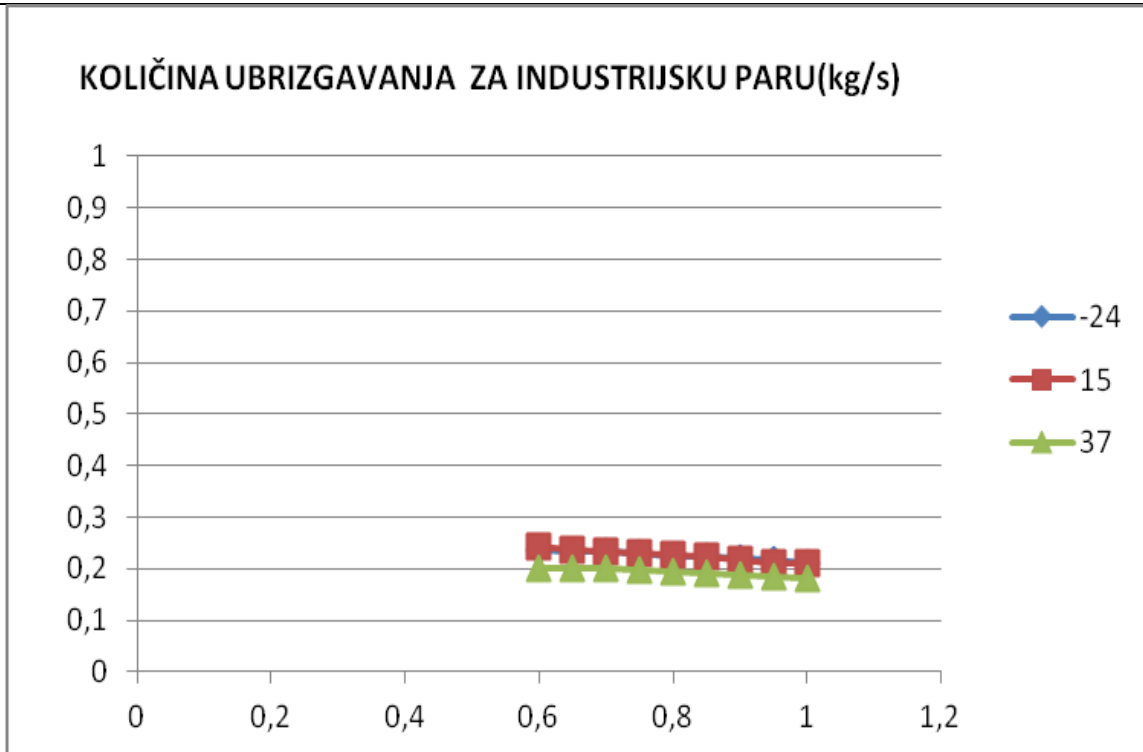


Slika 36. Temperatura na izlazu iz kotla Tgi(9) (°C) (80MW)

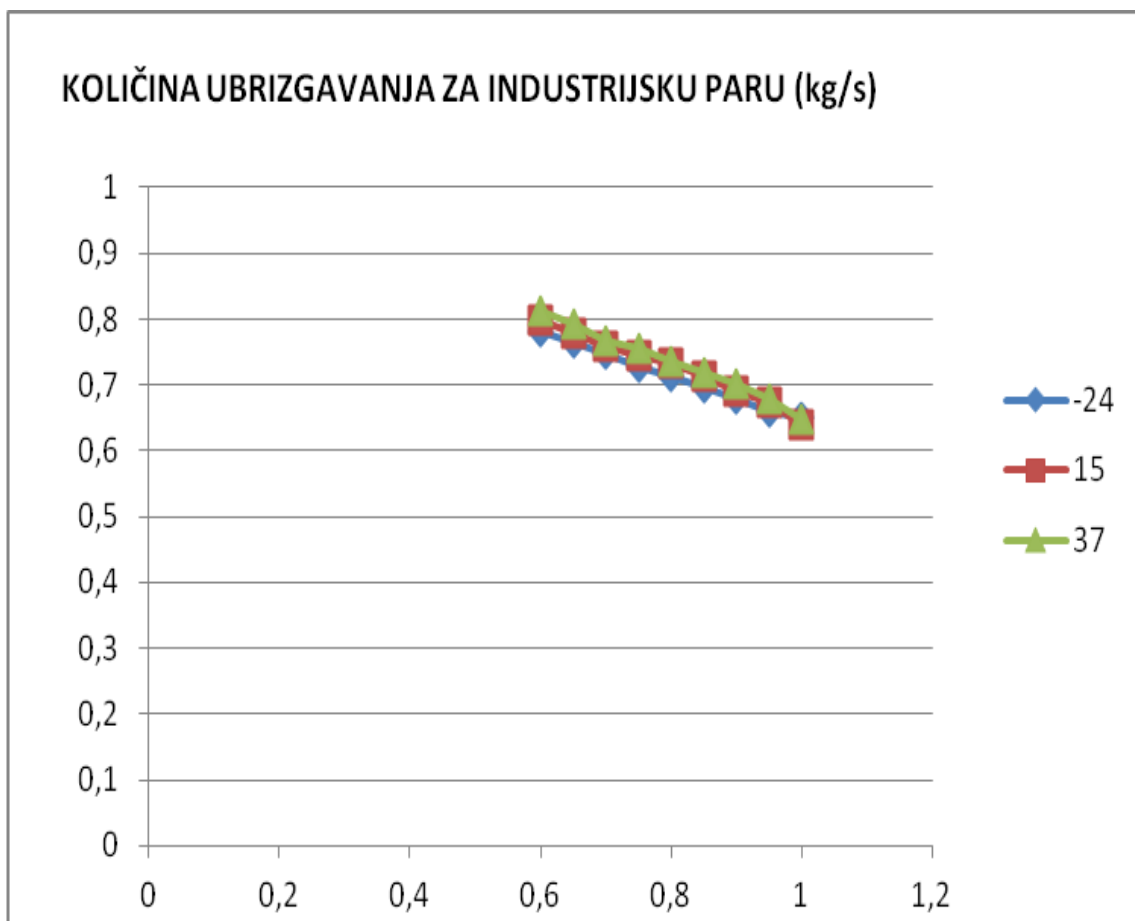
Tablica 14. Temperatura na izlazu iz kotla Tgi(9) (°C)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | 15°C | | 37°C | |
|----------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW |
| 60% | 96,23 | 97,60 | 94,22 | 95,43 | 92,72 | 93,75 |
| 65% | 96,79 | 98,11 | 94,87 | 96,12 | 93,03 | 93,98 |
| 70% | 97,24 | 98,50 | 95,64 | 96,84 | 93,37 | 94,25 |
| 75% | 97,87 | 99,08 | 96,06 | 97,22 | 93,61 | 95,03 |
| 80% | 98,27 | 99,62 | 96,72 | 97,64 | 94,63 | 95,59 |
| 85% | 98,82 | 100,12 | 97,44 | 98,32 | 95,19 | 96,13 |
| 90% | 99,45 | 100,70 | 97,90 | 98,92 | 95,86 | 96,76 |
| 95% | 100,11 | 101,32 | 98,61 | 99,59 | 96,65 | 97,32 |
| 100% | 100,63 | 101,86 | 99,01 | 99,91 | 96,85 | 97,46 |

Temperatura na izlazu iz kotla je prikazana u tablici 14. Temperatura raste s povećanjem opterećenja postrojenja i povećanjem zadane toplinske snage, ali opada povećanjem okolišne temperature.



Slika 37. Količina ubrizgavanja za industrijsku paru (0MW)



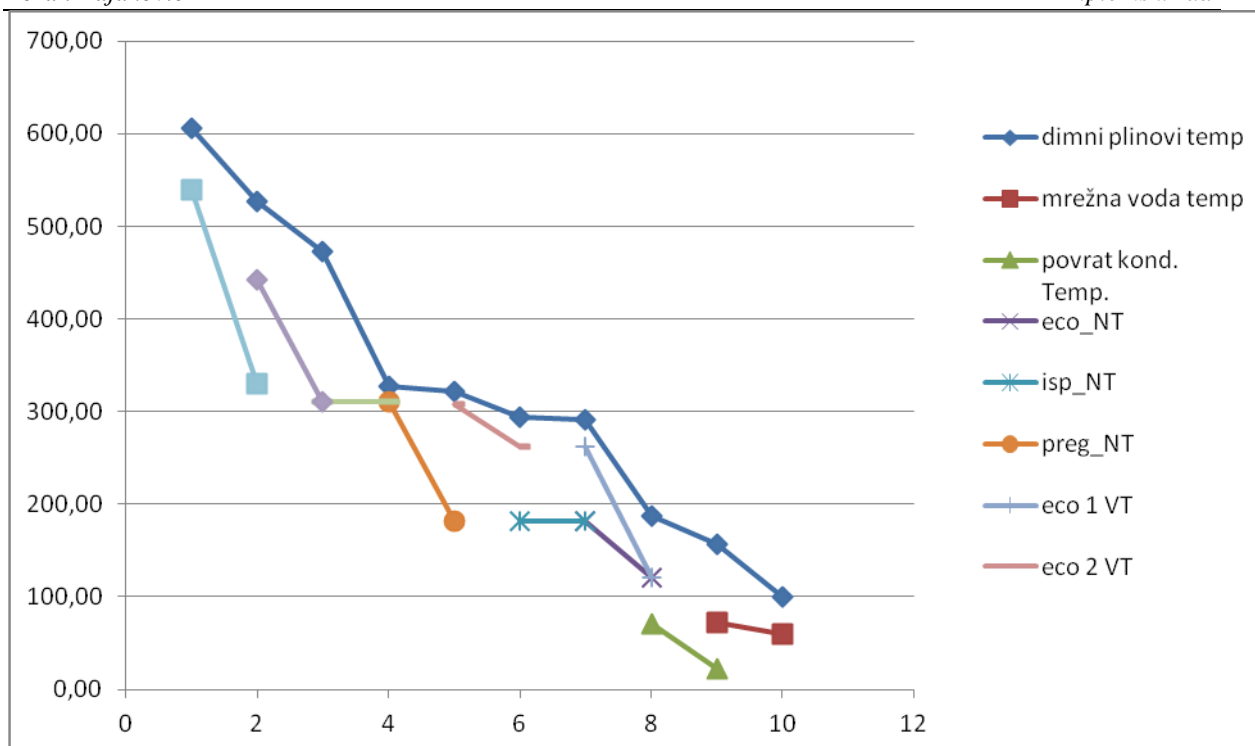
Slika 38. Količina ubrizgavanja za industrijsku paru (80MW)

Tablica 15. Količina ubrizgavanja za industrijsku paru (kg/s)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | 15°C | | 37°C | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW |
| 60% | 0,238 | 0,781 | 0,242 | 0,798 | 0,200 | 0,813 |
| 65% | 0,234 | 0,763 | 0,237 | 0,778 | 0,200 | 0,793 |
| 70% | 0,232 | 0,748 | 0,233 | 0,759 | 0,200 | 0,768 |
| 75% | 0,229 | 0,727 | 0,229 | 0,745 | 0,196 | 0,756 |
| 80% | 0,224 | 0,714 | 0,226 | 0,733 | 0,195 | 0,737 |
| 85% | 0,222 | 0,697 | 0,222 | 0,713 | 0,192 | 0,719 |
| 90% | 0,219 | 0,679 | 0,217 | 0,692 | 0,188 | 0,700 |
| 95% | 0,216 | 0,660 | 0,212 | 0,673 | 0,183 | 0,678 |
| 100% | 0,211 | 0,651 | 0,210 | 0,638 | 0,183 | 0,647 |

U tablici 15 prikazana je količina ubrizgavanja pare koja se koristi za industrijsku paru. Povećanjem opterećenja postrojenja sve manje pare odlazi iz postrojenja kao industrijska para. Povećanjem toplinske snage raste i količina industrijske pare.

Slijedeća slika i tablica prikazuje presjek temperatura kroz kotao na otpadnu toplinu kroz svih deset krugova postrojenja kotla za zadanu okolišnu temperaturu 15°C, opterećenje postrojenja prvi i drugi dio na 100% te sa toplinskom snagom od 80 MW.



Slika 39. Temperaturni presjek kotla na otpadnu toplinu

Tablica 16. Temperaturni presjek kotla na otpadnu toplinu (°C)

| temperature | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|-------------|--------------|--------|--------|---------|----------|----------|--------|-----------|-----------|
| KV(i) | Tg(i) | Tw(40) | Tw(30) | Tw(1i) | Tw(1i) | Tw(1i) | Tw(2i) | Tw(2i) | Tw(2i) | Tw(2i) | Tw(2i) |
| | dimni pl. | mrežna voda | povrat kond. | eco_NT | isp_NT | preg_NT | eco 1 VT | eco 2 VT | isp_VT | preg_1_VT | preg_2_VT |
| 1 | 605,60 | | | | | | | | | | 540,00 |
| 2 | 527,13 | | | | | | | | | 442,35 | 329,98 |
| 3 | 473,48 | | | | | | | | 311,36 | 311,36 | |
| 4 | 327,14 | | | | | | 310,87 | | 310,71 | | |
| 5 | 322,35 | | | | | | 182,27 | | 308,08 | | |
| 6 | 294,71 | | | | | | 182,27 | | 261,88 | | |
| 7 | 290,78 | | | | 182,28 | 182,28 | | 261,88 | | | |
| 8 | 187,24 | | 71,43 | 120,20 | | | | 121,39 | | | |
| 9 | 156,42 | 72,01 | 21,89 | | | | | | | | |
| 10 | 99,91 | 60,00 | | | | | | | | | |

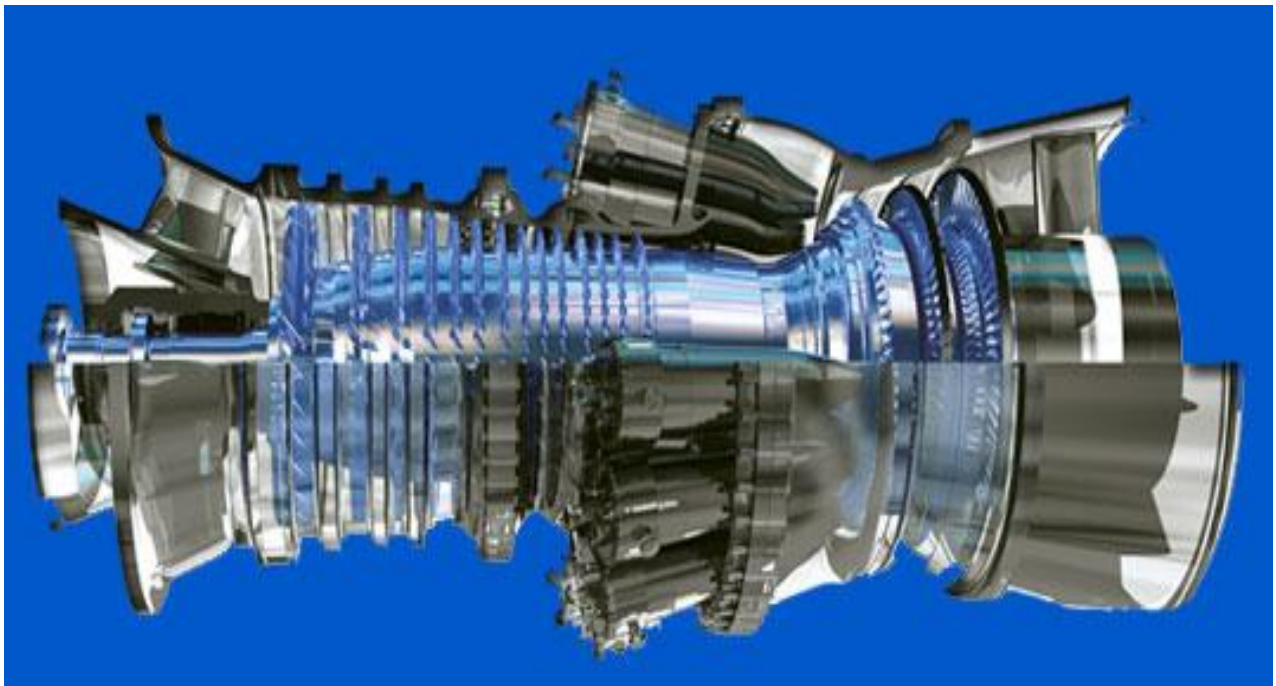
Kao što je prikazano pripadajućom slikom 39 i tablicom 16 temperaturni presjek je u granicama očekivanog. Dimni plinovi su u rasponu od 100°C do 600°C. Mrežna voda ulazi sa zadanih 60°C, dok je u visokotlačnom pregrijaču2 izlazna temperatura 540°C kao što je i zadano u graničnim uvjetima matematičkog modela.

3.3. Proračun parne turbine

Parna turbina se sastoji od visokotlačnog i niskotlačnog dijela parne turbine. Turbina ima dva oduzimanja. Prvo oduzimanje je na kraju visokotlačnog dijela na tlaku od 11 bara, dok je drugo oduzimanje u niskotlačnom dijelu na tlaku od 2,5 bara.

Dobivena pregrijana para je na tlaku od 95 bara i u visokotlačnom krugu vode napušta pregrijač pare i odvodi se u visokotlačni stupanj parne turbine gdje ekspandira i na kojem se dovodi dobivena pregrijana para iz niskotlačnog kruga vode.

Na nižem tlaku ukupna količina pare dijeli se na dva dijela. Na kraju visokotlačnog stupnja je prvo oduzimanje pare na tlaku od 11 bara, gdje se para dalje odvodi u obliku industrijske pare. Drugi dio ukupne količine pare se odvodi u niskotlačni stupanj parne turbine gdje ekspandira na tlaku od 2,5 bara u otplinjaču, gdje je drugo oduzimanje pare i gdje se dalje para odvodi u izmjenjivač topline (zagrijač mrežne vode) C4 i nakon predaje topline mrežnoj vodi, miješa s pothlađenom kapljevinom.



Slika 40. Parna turbina [10]

3.3.1. *Jednadžbe matematičkog modela za parnu turbinu*

VT stupanj parne turbine: izentropska snaga

$$W_{P_{VT}} = D_{VT} \cdot (H_{VT1} - H_{TP1}) + (D_{VT} - D_{P1}) \cdot (H_{TP1} - H_{T3}) \quad (17)$$

NT stupanj parne turbine: izentropska snaga

$$W_{P_{NT}} = (D_{HRSG} - D_{P1}) \cdot (H_{T4} - H_{TP2}) + (D_{HRSG} - D_{P1} - D_{P2}) \cdot (H_{TP2} - H_k) \quad (18)$$

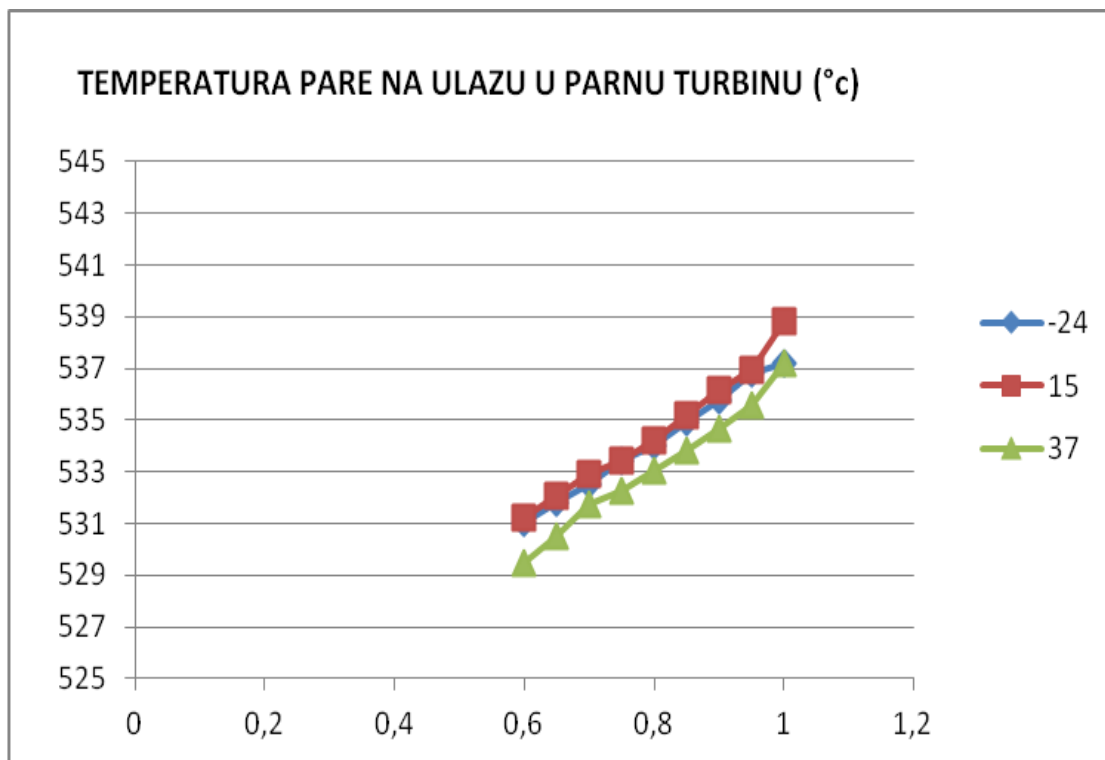
Bilanca masenog protoka iz niskotlačnog stupnja parne turbine u kondenzator:

$$D_K = D_{HRSG} - D_{P1} - D_{P2} \quad (19)$$

Ukupna snaga koju proizvodi električni generator:

$$W_{el} = \eta_{el} \cdot \eta_{meh} \cdot \eta_{red} \cdot W_{pt} \quad (20)$$

3.3.2. Prikaz rezultata matematičkog modela za parnu turbinu



Slika 41. Temperatura pare na ulazu u parnu turbinu $T_t(1)$ (°C)

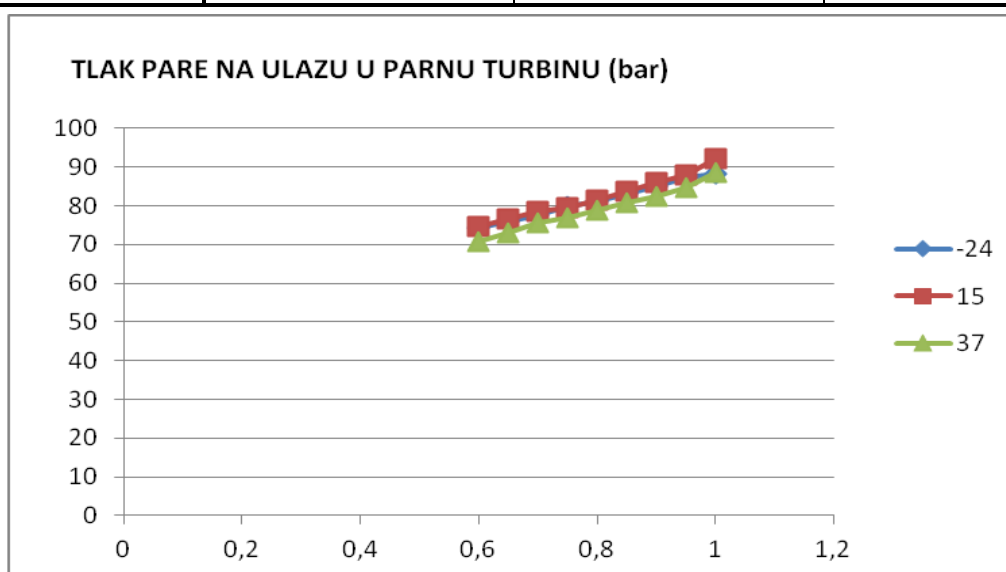
Tablica 17. Temperatura pare na ulazu u parnu turbinu $T_t(1)$ (°C)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| 60% | 531,02 | 531,24 | 529,46 |
| 65% | 531,79 | 532,08 | 530,50 |
| 70% | 532,51 | 532,93 | 531,72 |
| 75% | 533,43 | 533,40 | 532,28 |
| 80% | 534,05 | 534,19 | 533,07 |
| 85% | 534,94 | 535,15 | 533,85 |
| 90% | 535,79 | 536,13 | 534,63 |
| 95% | 536,78 | 536,94 | 535,59 |
| 100% | 537,19 | 538,84 | 537,20 |

Na slici 41 i tablici 17 prikazana je temperatura pare na ulazu u parnu turbinu koja je približno jednaka u omjeru s okolišnom temperaturom s malim porastom s povećanjem opterećenja postrojenja. Temperatura pare na ulazu u parnu turbinu dobivena je računanjem mješališta tj podataka iz prvog i drugog dijela postrojenja. Mješalište je potrebno računati jer imamo dvije plinske turbine i dva kotla na otpadnu toplinu, tako da je postrojenje podijeljeno na dva dijela i prvi dio i drugi dio postrojenja može raditi na različitim opterećenjima (od 60% do 100%), nije potrebna oba dijela postrojenja postaviti na isto opterećenje rada (npr. 100%).

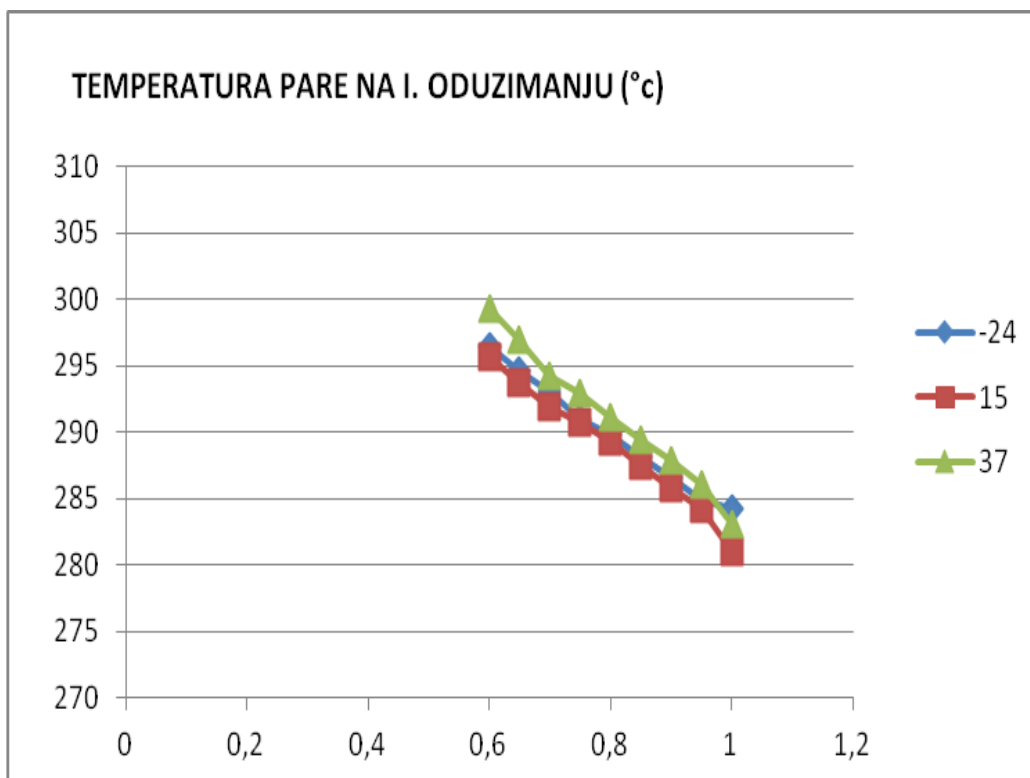
Tablica 18. Tlak pare na ulazu u parnu turbinu PT(10) (bar)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | 15°C | 37°C |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| 60% | 74,13 | 74,63 | 70,61 |
| 65% | 75,88 | 76,56 | 72,97 |
| 70% | 77,54 | 78,51 | 75,72 |
| 75% | 79,66 | 79,60 | 77,01 |
| 80% | 81,08 | 81,41 | 78,83 |
| 85% | 83,14 | 83,63 | 80,62 |
| 90% | 85,11 | 85,90 | 82,43 |
| 95% | 87,42 | 87,79 | 84,66 |
| 100% | 88,39 | 92,27 | 88,41 |

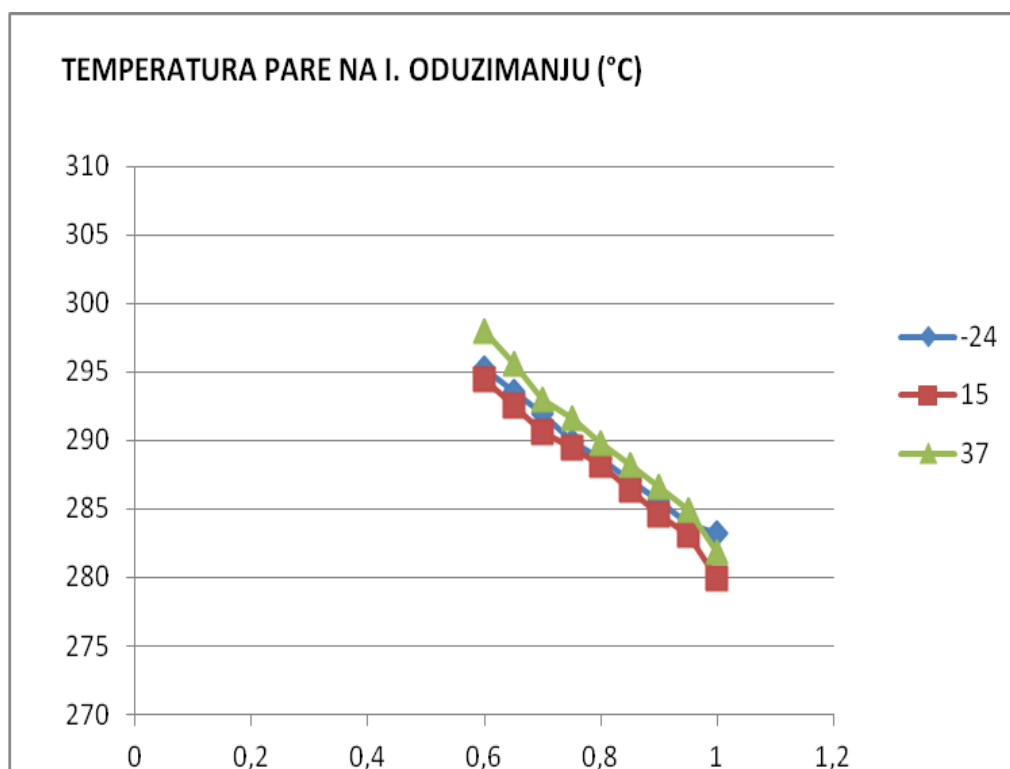


Slika 42. Tlak pare na ulazu u parnu turbinu PT(10) (bar)

Slika 42 i tablica 18 prikazuju tlak na ulazu u parnu turbinu gdje tlak na ulazu u parnu turbinu raste sa povećanjem opterećenja postrojenja.



Slika 43. Temperatura pare na I.oduzimanju Tt(2) (°C) (0MW)

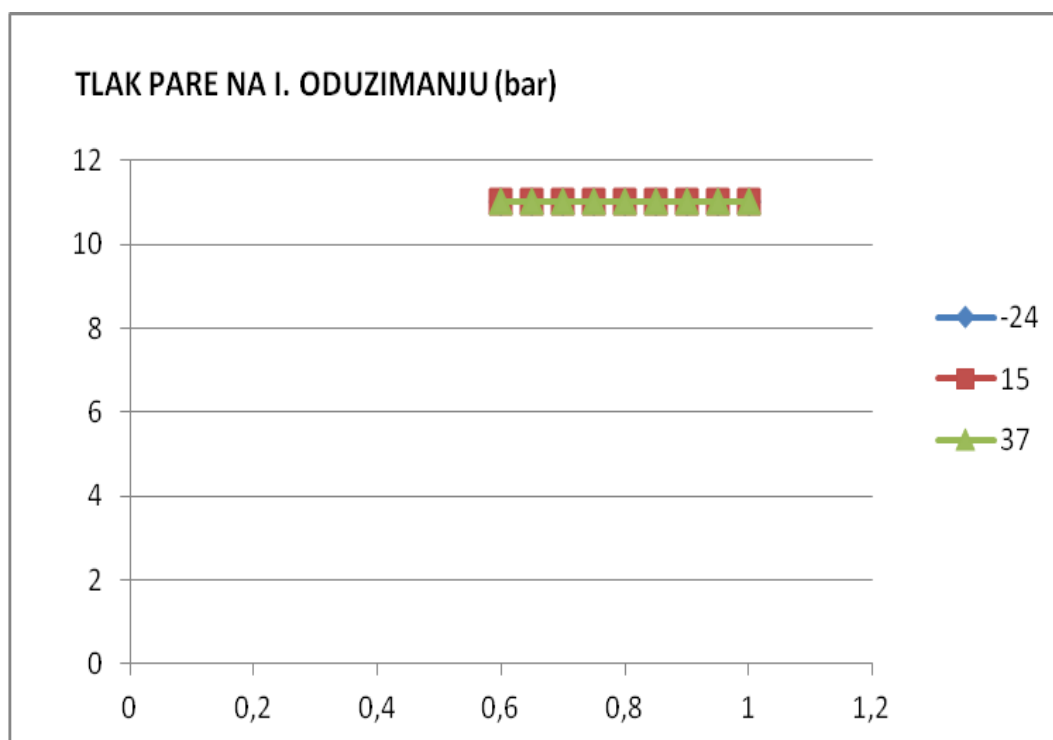


Slika 44. Temperatura pare na I.oduzimanju Tt(2) (°C) (80MW)

Tablica 19. Temperatura pare na I.oduzimanju Tt(2) (°C)

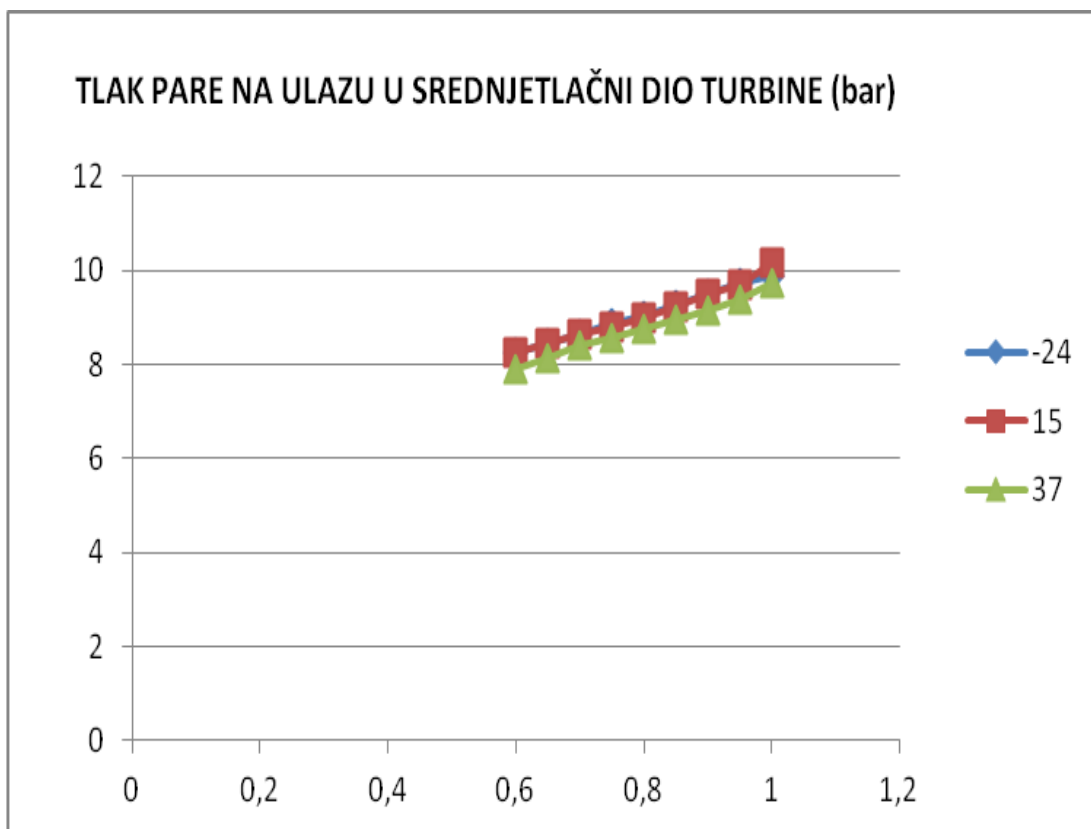
| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | 15°C | | 37°C | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW |
| 60% | 296,42 | 295,24 | 295,72 | 294,47 | 299,28 | 297,93 |
| 65% | 294,68 | 293,52 | 293,79 | 292,55 | 296,93 | 295,61 |
| 70% | 296,05 | 291,91 | 291,87 | 290,65 | 294,26 | 292,96 |
| 75% | 291,06 | 289,94 | 290,71 | 289,49 | 292,92 | 291,61 |
| 80% | 289,83 | 288,72 | 289,34 | 288,16 | 291,13 | 289,84 |
| 85% | 288,18 | 287,10 | 287,55 | 286,39 | 289,45 | 288,16 |
| 90% | 286,65 | 285,58 | 285,76 | 284,61 | 287,93 | 286,66 |
| 95% | 284,91 | 283,86 | 284,27 | 283,13 | 286,13 | 284,87 |
| 100% | 284,63 | 283,24 | 281,06 | 279,90 | 283,13 | 281,86 |

Temperatura pare na I.oduzimanju približno je jednaka na svim okolišnim temperaturama kao što je prikazano u tablici 19. Porastom opterećenja postrojenja temperatura na I.oduzimanju ima mali pad.

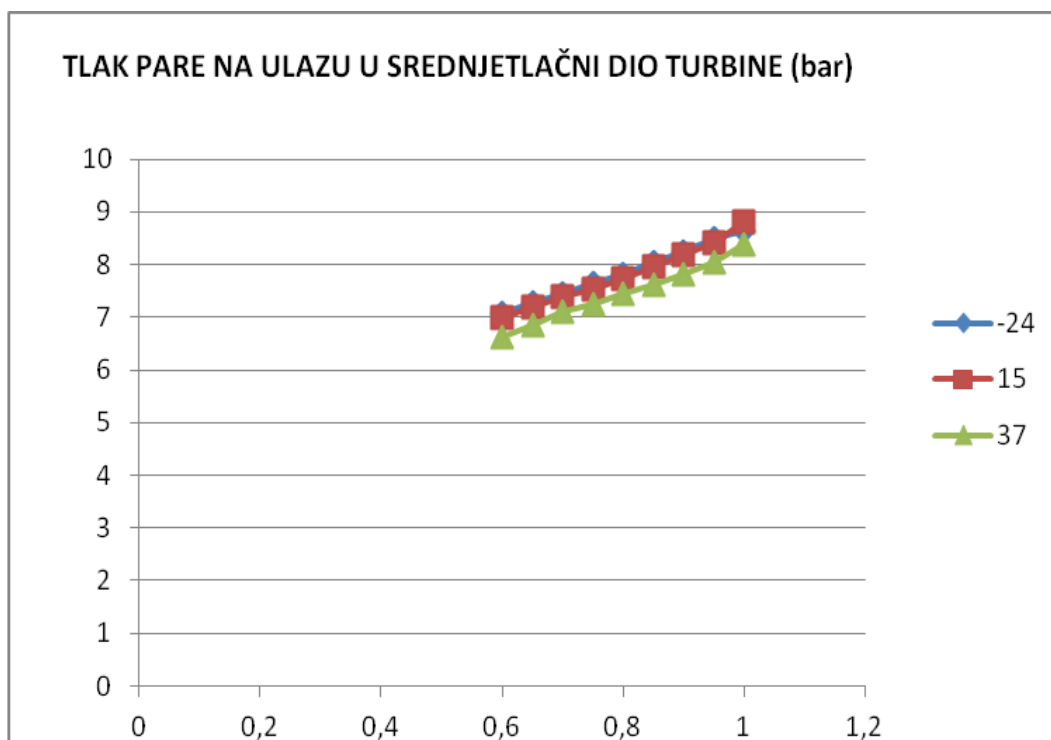


Slika 45. Tlak pare na I.oduzimanju PT(11) (bar)

Kao što je ranije već objašnjeno tlak pare na I. odzimanju je 11 bara bez obzira na okolišnu temperaturu i porast opterećenja postrojenja.



Slika 46. Tlak pare na ulazu u srednjotlačni dio turbine PT(20) (0MW) (bar)

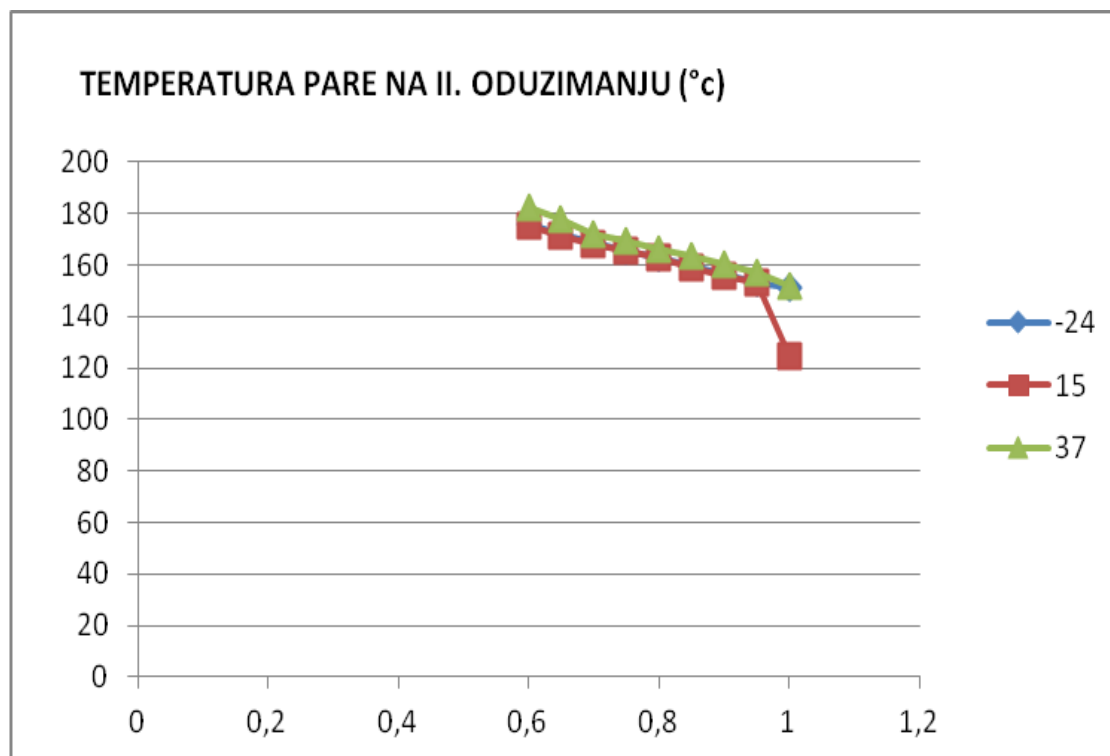


Slika 47. Tlak pare na ulazu u srednjotlačni dio turbine PT(20) (snaga 80MW) (bar)

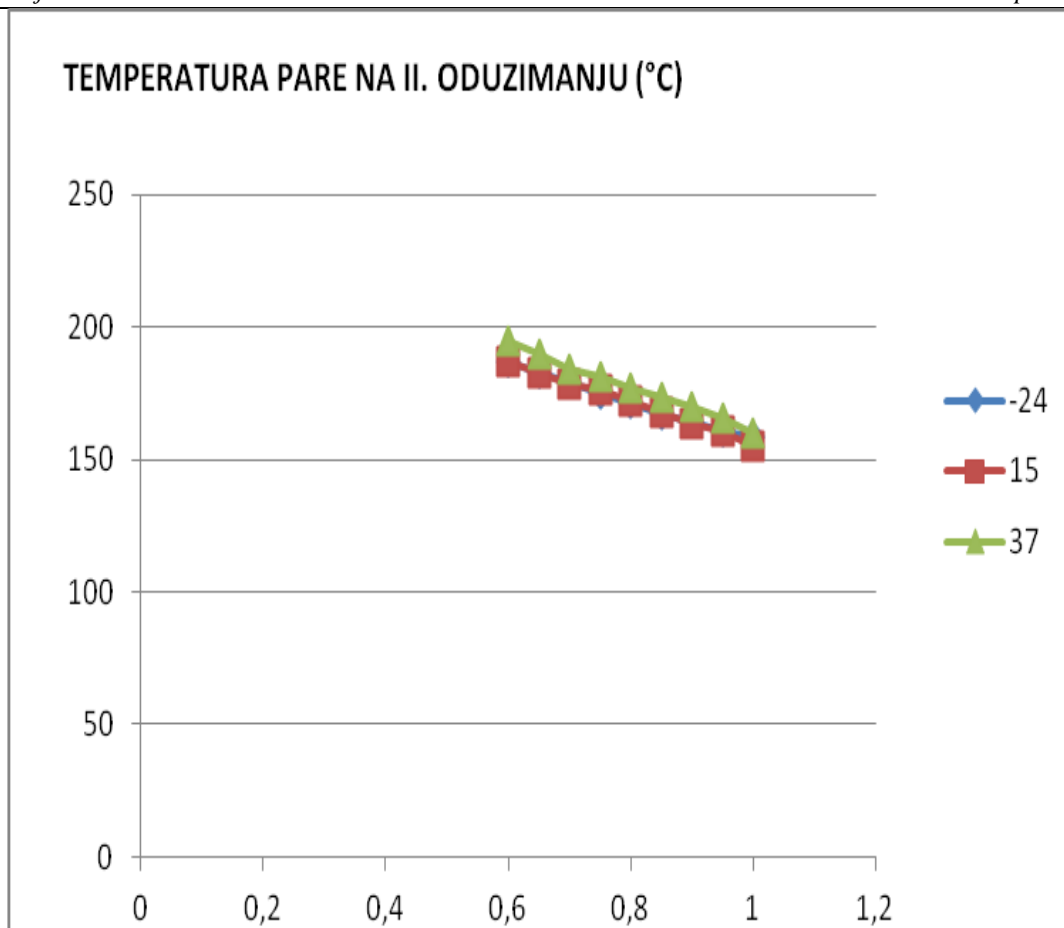
Tablica 20. Tlak pare na ulazu u srednjotlačni dio turbine PT(20) (bar)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | 15°C | | 37°C | |
|----------------------------|-------|------|-------|------|------|------|
| | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW |
| 60% | 8,27 | 7,08 | 8,23 | 7,00 | 7,91 | 6,64 |
| 65% | 8,46 | 7,27 | 8,44 | 7,20 | 8,14 | 6,86 |
| 70% | 8,64 | 7,44 | 8,67 | 7,40 | 8,41 | 7,12 |
| 75% | 8,87 | 7,66 | 8,78 | 7,52 | 8,56 | 7,25 |
| 80% | 9,04 | 7,82 | 9,00 | 7,73 | 8,75 | 7,44 |
| 85% | 9,26 | 8,04 | 9,24 | 7,96 | 8,94 | 7,62 |
| 90% | 9,49 | 8,25 | 9,49 | 8,20 | 9,14 | 7,81 |
| 95% | 9,75 | 8,50 | 9,71 | 8,40 | 9,39 | 8,04 |
| 100% | 9,90 | 8,65 | 10,14 | 8,82 | 9,75 | 8,39 |

Tlak pare na ulazu u srednjotlačni dio turbine raste s porastom opterećenja postrojenja. Povećanjem toplinske snage tlak opada. Promjenom okolišne temperature tlak ostaje u rasponu razlike od 1 bar.



Slika 48. Temperatura pare na II.oduzimanju Tt(3) (snaga 0MW) (°C)

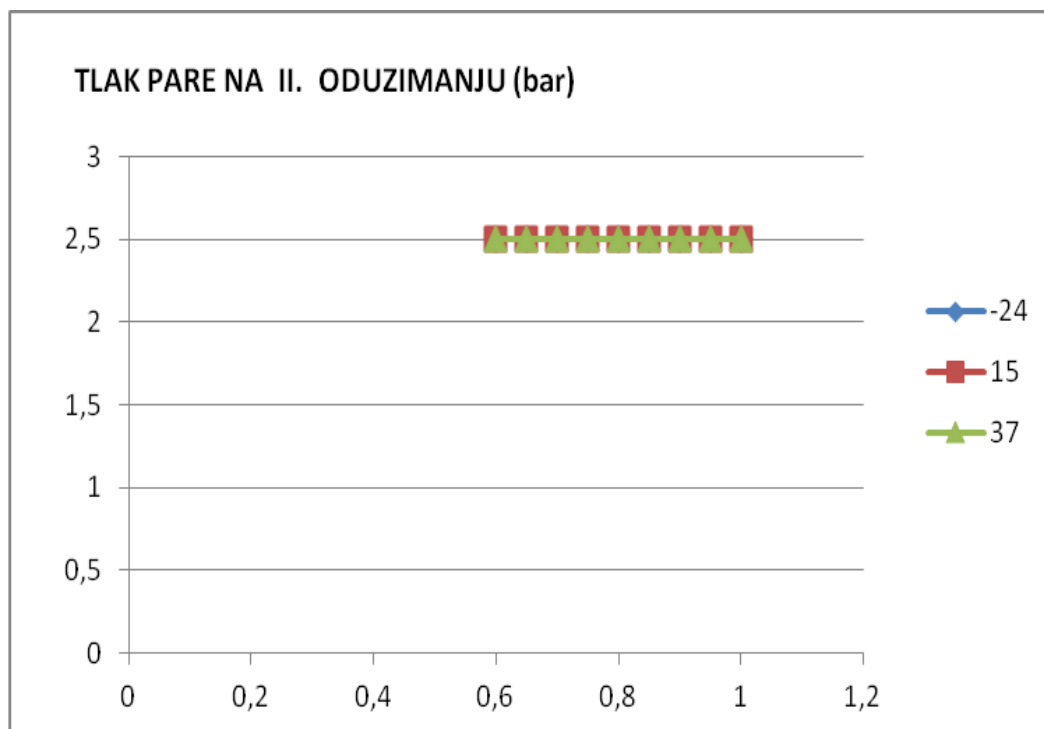


Slika 49. Temperatura pare na II.oduzimanju Tt(3) (snaga 80MW) (°C)

Tablica 21. Temperatura pare na II.oduzimanju Tt(3) (°C)

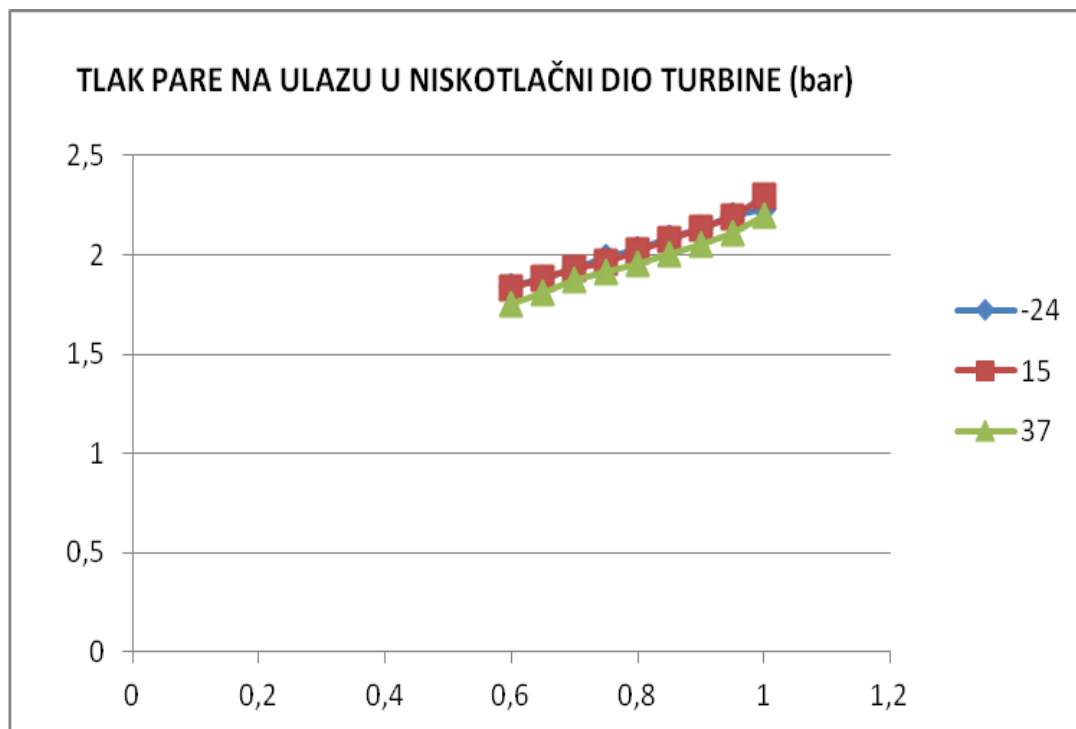
| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | 15°C | | 37°C | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW |
| 60% | 175,75 | 186,91 | 175,50 | 187,13 | 182,52 | 194,74 |
| 65% | 171,81 | 182,99 | 171,25 | 182,86 | 177,50 | 189,77 |
| 70% | 168,73 | 179,30 | 167,75 | 178,58 | 171,75 | 184,08 |
| 75% | 165,22 | 174,71 | 165,70 | 175,98 | 169,19 | 181,17 |
| 80% | 162,75 | 171,55 | 162,76 | 172,17 | 166,12 | 177,18 |
| 85% | 159,43 | 167,40 | 159,15 | 167,60 | 163,23 | 173,36 |
| 90% | 156,44 | 164,09 | 155,82 | 163,86 | 160,18 | 169,60 |
| 95% | 153,10 | 160,59 | 152,96 | 160,90 | 156,73 | 165,32 |
| 100% | 151,16 | 158,78 | 124,46 | 154,68 | 151,72 | 160,01 |

Kao što je prikazano u tablici 21 temperatura pare na II. oduzimanju s porastom toplinske snage ima veće vrijednosti, dok s povećanjem opterećenja postrojenja temperatura na II. oduzimanju opada.

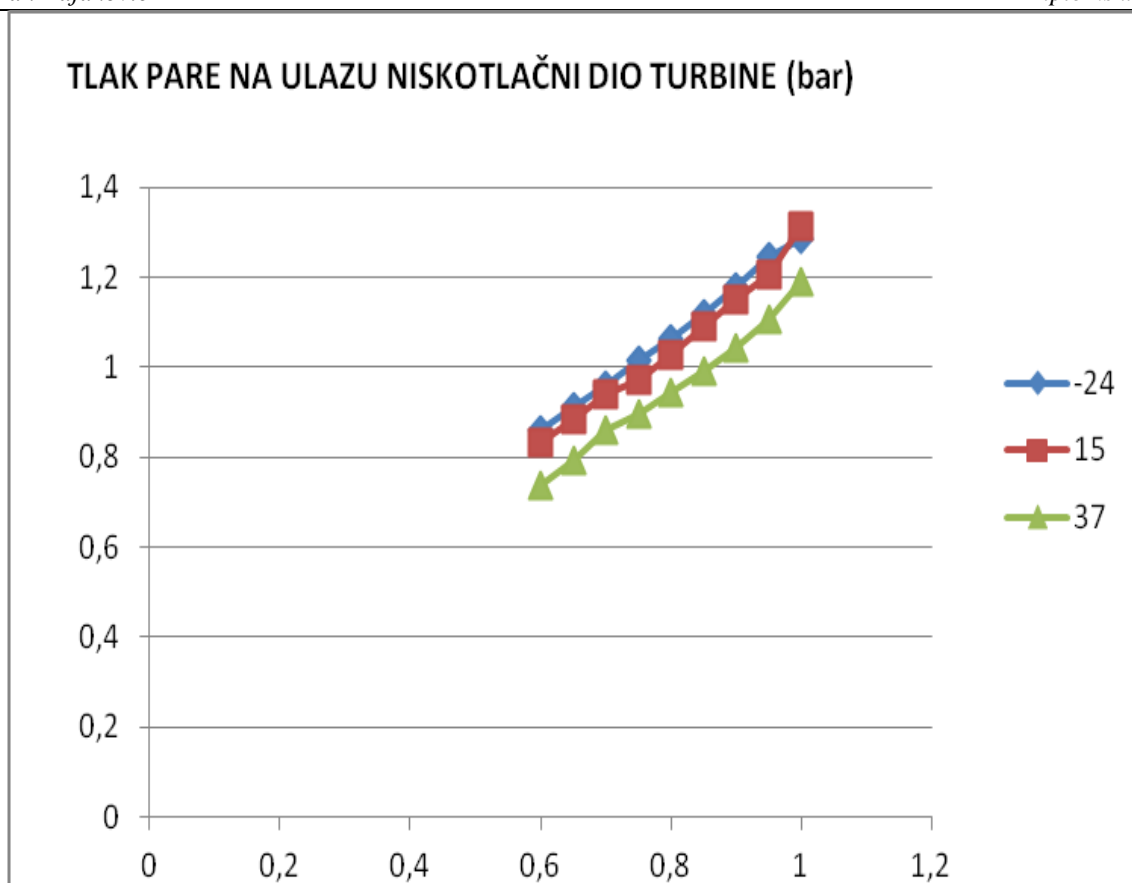


Slika 50. Tlak pare na II.oduzimanju PT(21)

Kao što je već prije objašnjeno tlak pare na II.oduzimanju je 2,5 bara i on se ne mijenja.



Slika 51. Tlak pare na ulazu u niskotlačni dio turbine PT(30) (snaga 0MW) (bar)



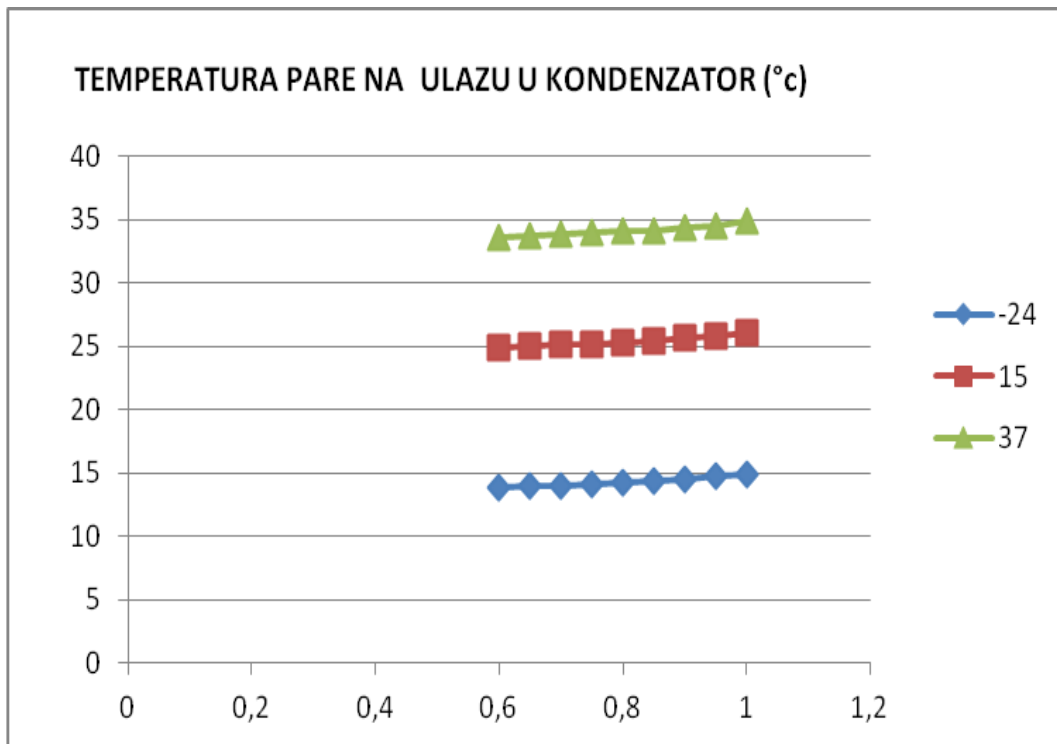
Slika 52. Tlak pare na ulazu u niskotlačni dio turbine PT(30) (snaga 80MW) (bar)

Tablica 22. Tlak pare na ulazu u niskotlačni dio turbine PT(30) (bar)

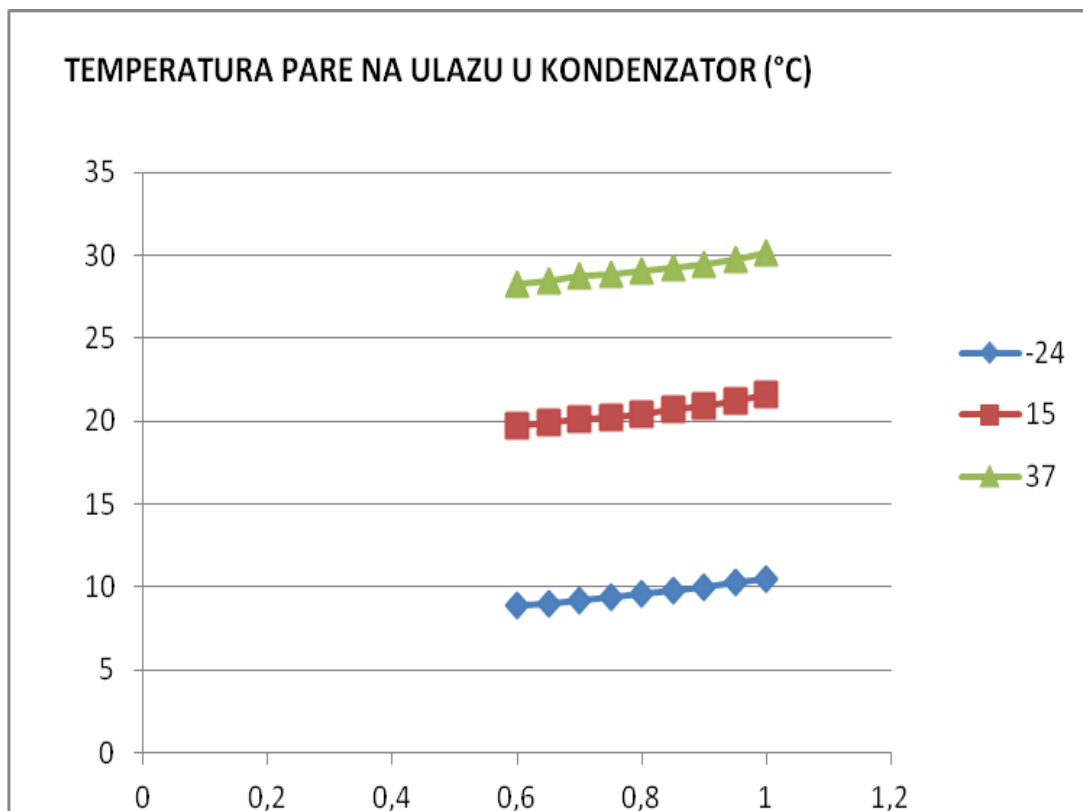
| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | 15°C | | 37°C | |
|----------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW |
| 60% | 1,84 | 0,86 | 1,83 | 0,83 | 1,75 | 0,73 |
| 65% | 1,88 | 0,91 | 1,88 | 0,88 | 1,81 | 0,79 |
| 70% | 1,93 | 0,96 | 1,93 | 0,94 | 1,88 | 0,86 |
| 75% | 1,99 | 1,02 | 1,96 | 0,97 | 1,91 | 0,90 |
| 80% | 2,03 | 1,06 | 2,02 | 1,03 | 1,96 | 0,94 |
| 85% | 2,08 | 1,12 | 2,07 | 1,09 | 2,00 | 0,99 |
| 90% | 2,13 | 1,18 | 2,14 | 1,15 | 2,05 | 1,04 |
| 95% | 2,20 | 1,24 | 2,19 | 1,21 | 2,11 | 1,11 |
| 100% | 2,23 | 1,29 | 2,29 | 1,31 | 2,20 | 1,19 |

U tablici 22 prikazano je kako tlak pare na ulazu u niskotlačni dio turbine raste s porastom opterećenja postrojenja. Promjenom okolišne temperature tlak ostaje približno jednak ali se

mijenja promjenom toplinske snage. Povećanjem toplinske snage tlak pare na ulazu u niskotlačni dio turbine opada.



Slika 53. Temperatura pare na ulazu u kondenzator Tt(4) (snaga 0MW) (°C)

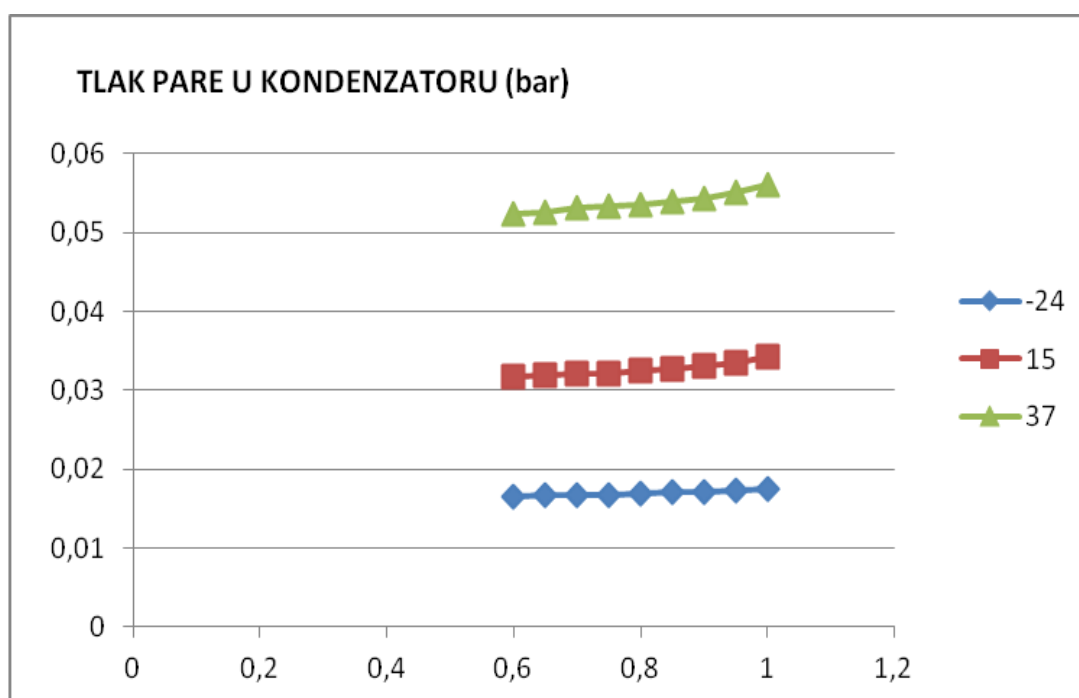


Slika 54. Temperatura pare na ulazu u kondenzator Tt(4) (snaga 80MW) (°C)

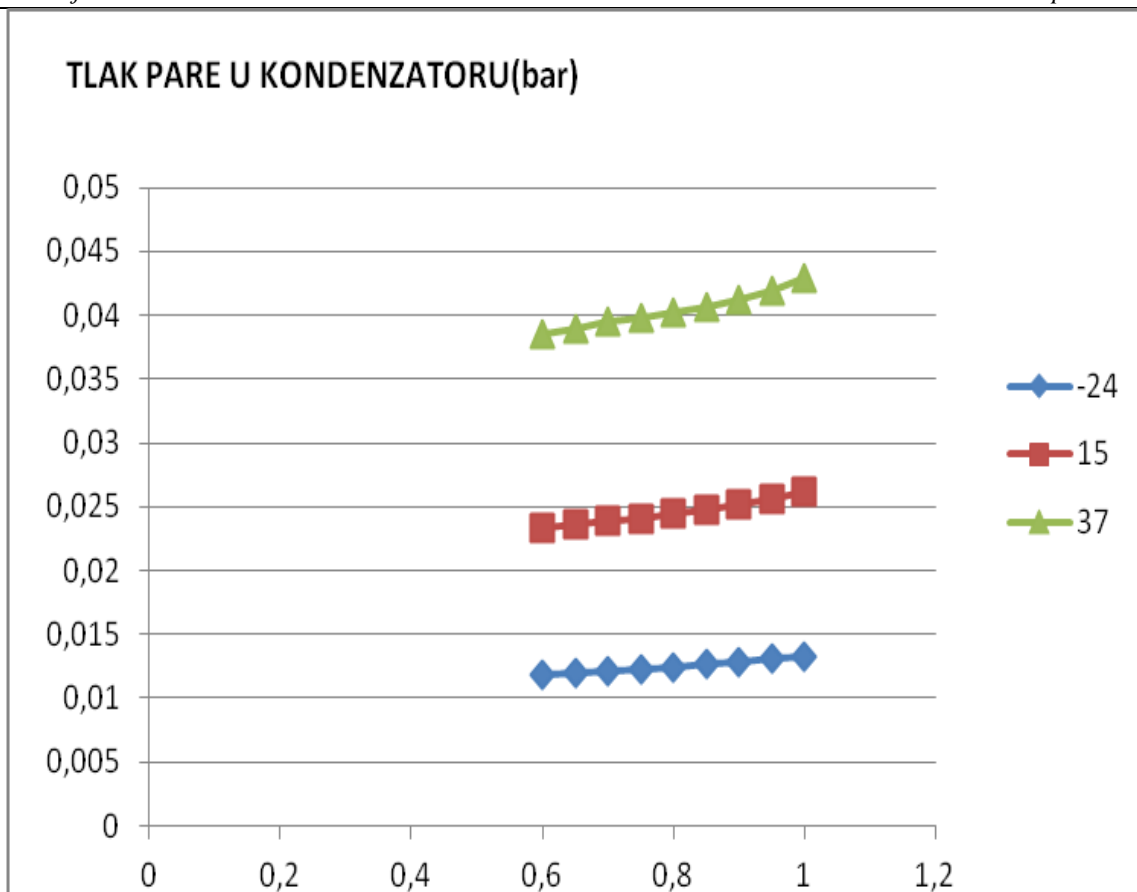
Tablica 23. Temperatura pare na ulazu u kondenzator Tt(4) (°C)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | 15°C | | 37°C | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW |
| 60% | 13,91 | 8,84 | 24,96 | 19,73 | 33,66 | 28,26 |
| 65% | 13,95 | 9,01 | 25,03 | 19,92 | 33,76 | 28,49 |
| 70% | 14,02 | 9,17 | 25,12 | 20,12 | 33,92 | 28,76 |
| 75% | 14,15 | 9,39 | 25,14 | 20,22 | 33,97 | 28,89 |
| 80% | 14,23 | 9,56 | 25,27 | 20,44 | 34,07 | 29,08 |
| 85% | 14,39 | 9,78 | 25,46 | 20,69 | 34,19 | 29,26 |
| 90% | 14,55 | 10,02 | 25,65 | 20,95 | 34,34 | 29,47 |
| 95% | 14,76 | 10,30 | 25,82 | 21,18 | 34,54 | 29,74 |
| 100% | 14,86 | 10,46 | 26,13 | 21,63 | 34,86 | 30,11 |

Na slikama 53 i 54 i tablici 23 prikazana je temperatura na ulazu u kondenzator. Temperatura na ulazu u kondenzator ima rast s porastom opterećenja postrojenja i porastom okolišne temperature. Najveća temperatura na ulazu u kondenzator je kad se proizvodi samo električna energija. Proizvodnjom toplinske snage opada temperatura pare na ulazu u kondenzator.



Slika 55. Tlak pare u kondenzatoru PT(31) (snaga 0MW) (bar)



Slika 56. Tlak pare u kondenzatoru PT(31) (snaga 80MW) (bar)

Tablica 24. Tlak pare u kondenzatoru PT(31) (bar)

| TEMPERATURA OPTEREĆENJE | -24°C | | 15°C | | 37°C | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW | 0MW | 80MW |
| 60% | 0,0166 | 0,0118 | 0,0318 | 0,0234 | 0,0523 | 0,0385 |
| 65% | 0,0166 | 0,0119 | 0,0319 | 0,0237 | 0,0526 | 0,0390 |
| 70% | 0,0167 | 0,0121 | 0,0321 | 0,0240 | 0,0531 | 0,0395 |
| 75% | 0,0168 | 0,0123 | 0,0321 | 0,0241 | 0,0533 | 0,0398 |
| 80% | 0,0169 | 0,0125 | 0,0324 | 0,0244 | 0,0536 | 0,0402 |
| 85% | 0,0170 | 0,0127 | 0,0328 | 0,0248 | 0,0539 | 0,0407 |
| 90% | 0,0172 | 0,0129 | 0,0332 | 0,0252 | 0,0544 | 0,0412 |
| 95% | 0,0174 | 0,0132 | 0,0335 | 0,0257 | 0,0550 | 0,0419 |
| 100% | 0,0175 | 0,0133 | 0,0342 | 0,0262 | 0,0560 | 0,0429 |

Na slikama 55 i 56 te na tablici 24 prikazan je tlak pare u kondenzatoru koji raste porastom opterećenja postrojenja i porastom okolišne temperature, ali opada porastom toplinske snage.

3.4. Proračun izmjenjivača topline

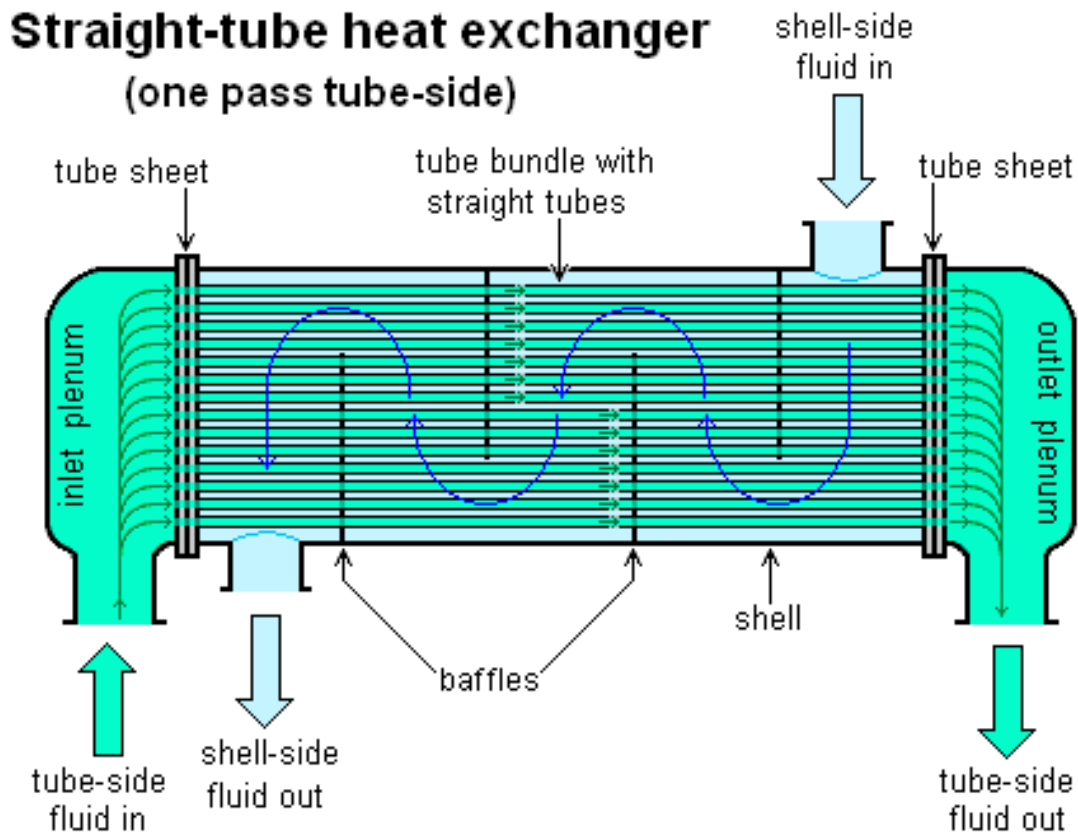
Postrojenje blok K sadrži dva zasebna izmjenjivača (cijevni) C4 i C6 te u svakom kotlu na otpadnu toplinu po jedan cijevni izmjenjivač i jedan dvostruki izmjenjivač. Uz pomoć izmjenjivača koji se nalaze u kotlu na otpadnu toplinu računamo protoke koji se koriste za proračun parne turbine.

Izmjenjivač C4 ima nazivnu snagu 80 MWt, a izmjenjivač C6 40 MWt. Oni su povezani jedan s drugim točnije može se u ovisnosti jedan o drugome birati koji će raditi s većim opterećenjem, a koji s manjim (biranje koeficijenta). U ovom proračunu podijeljeno je da izmjenjivač C4 radi (uzima) sa 67%, točnije protok mrežne vode koji izmjenjivači koriste za pretvorbu topline, odlazi 67% na izmjenjivač C4, a 33% na izmjenjivač C6.

Izmjenjivači topline tipa cijevi u plaštu (shell and tube) sadrže fluid koji se zagrijava ili hladi. Drugi fluid struji preko cijevi kako bi mogao dati ili apsorbirati traženu količinu topline. Shell and tube izmjenjivači se koriste pri tlakovima iznad 30 bara i temperaturama preko 260°C.

Korištenje cijevi s malim promjerima čine izmjenjivač topline ekonomičnim i kompaktnim ali postoji problem što postoji vjerojatnost da će doći do bržeg stvaranja naslaga u izmjenjivaču topline, a zbog male veličine mehaničko čišćenje naslaga je teško. Da bi se prevladali problemi začepjenja i čišćenja, mogu se koristiti veći promjeri cijevi.

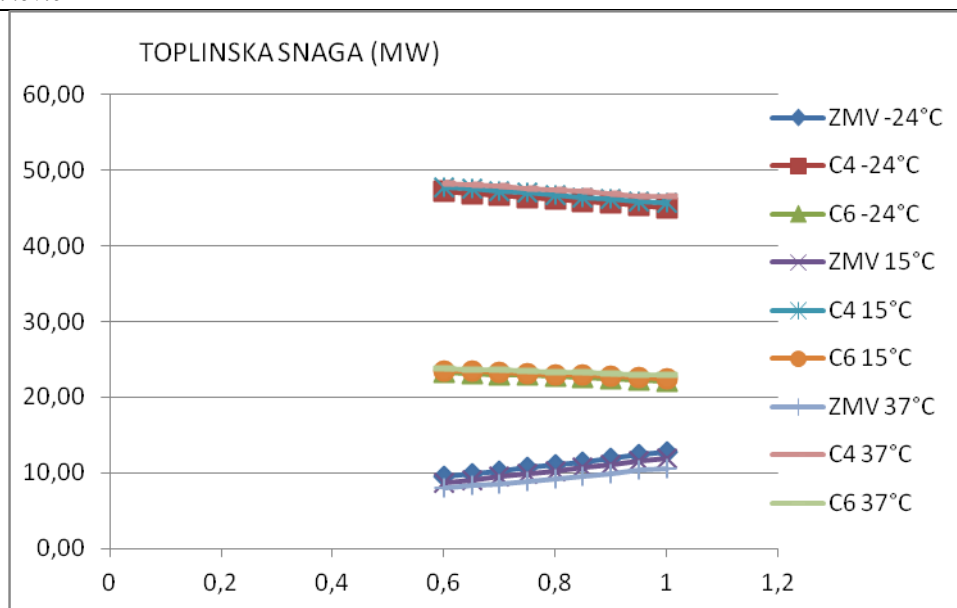
Debljina stijenke se određuje na način da se mora pripaziti na njenu aksijalnu čvrstoću, čvrstoću na obodno opterećenje, čvrstoću na izvijanje, dostupnost rezervnih dijelova te da vibracija inducirana protokom ima otpor.[11]



Slika 57. Izmjenjivač topline

Na slici 58 i tablici 25 prikazani su rezultati zagrijača masene vode (ZMV) i izmjenjivača topline C4 i C6 na snazi 80 MW.

ZMV raste porastom opterećenja postrojenja, ali opada porastom okolišne temperature, jer povećanjem okolišne temperature i porastom temperature dimnih plinova veća je izmjena topline te je zbog toga i veća snaga na izmjenjivačima C4 i C6, kojima snaga opada porastom opterećenja. Razlika u snazi između izmjenjivača C4 i C6 nastaje jer je u proračunu postavljeno da 67% tvari iz sustava idu na izmjenjivač C4, a 33% na izmjenjivač C6.



Slika 58. Toplinska snaga 80MW

Tablica 25. Toplinska snaga 80MW

| TEMP. OPT. | -24°C | | | 15°C | | | 37°C | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ZMV | C4 | C6 | ZMV | C4 | C6 | ZMV | C4 | C6 |
| 60% | 9,52 | 47,22 | 23,26 | 8,70 | 47,77 | 23,53 | 8,07 | 48,19 | 23,74 |
| 65% | 9,91 | 46,96 | 23,13 | 9,11 | 47,50 | 23,39 | 8,31 | 48,03 | 23,66 |
| 70% | 10,24 | 46,74 | 23,02 | 9,52 | 47,22 | 23,26 | 8,57 | 47,86 | 23,57 |
| 75% | 10,66 | 46,46 | 22,88 | 9,81 | 47,03 | 23,16 | 8,93 | 47,62 | 23,45 |
| 80% | 11,05 | 46,19 | 22,75 | 10,23 | 46,75 | 23,03 | 9,26 | 47,39 | 23,34 |
| 85% | 11,45 | 45,93 | 22,62 | 10,66 | 46,46 | 22,88 | 9,58 | 47,18 | 23,24 |
| 90% | 11,89 | 45,63 | 22,48 | 11,07 | 46,18 | 22,75 | 9,94 | 46,94 | 23,12 |
| 95% | 12,38 | 45,31 | 22,32 | 11,51 | 45,89 | 22,60 | 10,41 | 46,63 | 22,97 |
| 100% | 12,84 | 45,00 | 22,16 | 11,83 | 45,67 | 22,50 | 10,61 | 46,49 | 22,90 |

4. ANALIZA REZULTATA

Na osnovi matematičkog modela bloka K može se napraviti analiza rezultata. Analizom rezultata prikazat će se ovisnost rezultata o zadanoj temperaturi, zadanom opterećenju postrojenja te o zadanoj toplinskoj snazi.

U tablici 26 prikazani su rezultati koji odgovaraju nazivnim vrijednostima plinskih turbina i parne turbine. Odgovarajuće nazivne vrijednosti plinskih turbina i parne turbine dobiju se na okolišnoj temperaturi od 15°C, opterećenju postrojenja u prvom i drugom dijelu od 100% te kada je toplinska snaga 0 MW tj dok se proizvodi samo električna energija. U tom slučaju iskoristivost postrojenja je 50,93%, a ukupna električna snaga približno 209 MW.

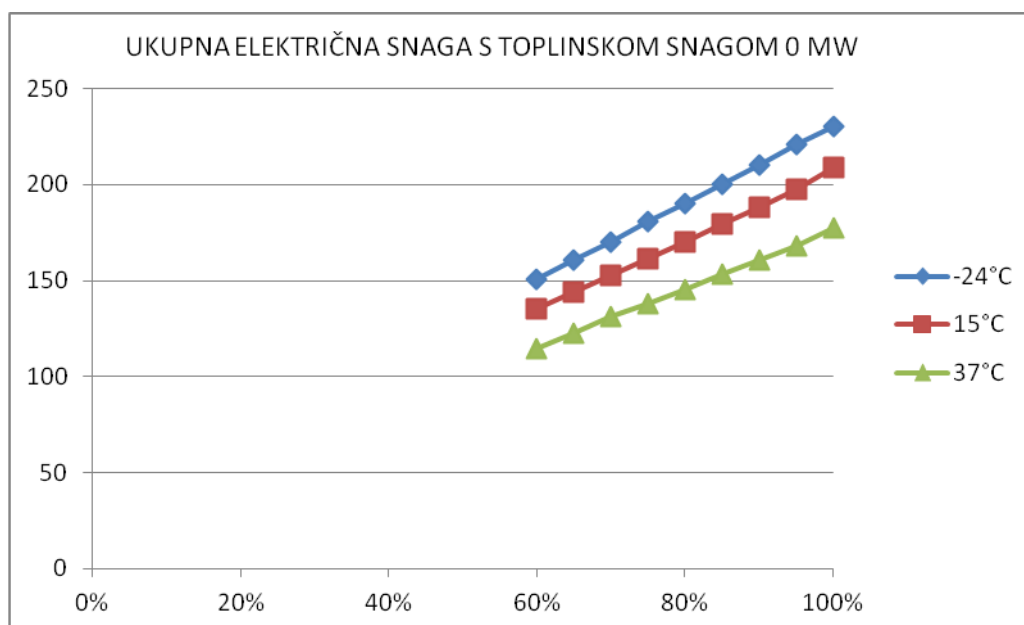
Tablica 26. Rezultati blok K (100%-100%)

| | | |
|--|--------|---------|
| Potrošnja goriva1 | [kg/s] | 4,17 |
| Potrošnja goriva2 | [kg/s] | 4,17 |
| Snaga PT1 | [MW] | 71,265 |
| Snaga PT2 | [MW] | 71,265 |
| Snaga parne turbine | [MW] | 66,364 |
| Ukupna električna snaga | [MW] | 208,894 |
| Eta postrojenja | [%] | 50,93 |
| Temperatura na ulazu u plinsku turbinu | [°C] | 1271,53 |
| Eta kotla1 | [%] | 84,17 |
| Eta kotla2 | [%] | 84,17 |

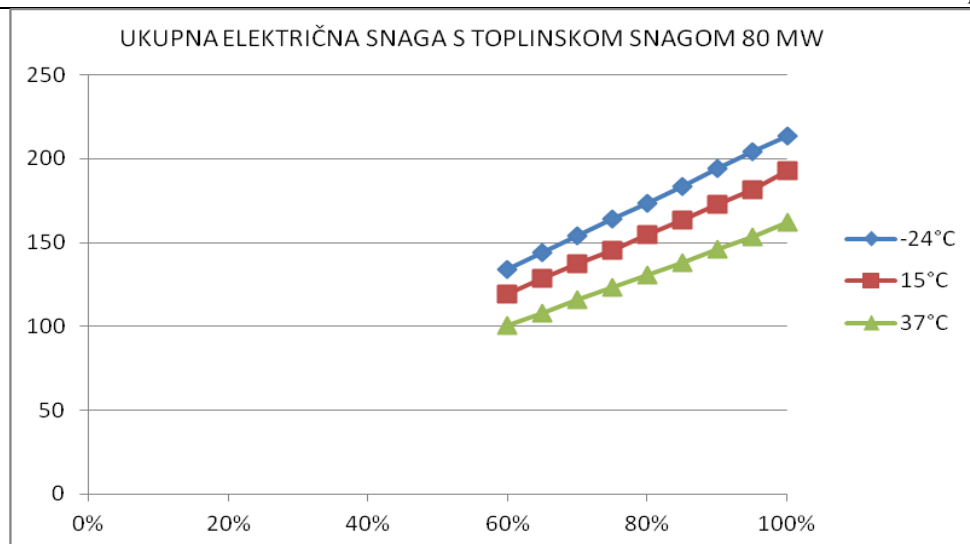
Na slijedećim slikama i tablicama će biti prikazana ovisnost ukupne električne snage i električne korisnosti postrojenja o temperaturi okoliša, opterećenju postrojenja te toplinskoj snazi. Iz prikazanih dijagrama i tablica vidljivo je da ukupna električna snaga i električna korisnost postrojenja su na maksimalnoj vrijednosti na -24°C i 100% opterećenja postrojenja te na minimalnoj toplinskoj snazi (0 MW). Promjenom samo jedne od tih vrijednosti (povećanjem okolišne temperature ili povećanjem toplinske snage ili smanjenjem opterećenja postrojenja) smanjuje se vrijednost ukupne električne snage i električne korisnosti postrojenja.

Tablica 27. Ukupna električna snaga s minimalnom toplinskom snagom

| UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA S TOPLINSKOM SNAGOM 0 MW | | | | KORISNOST POSTROJENJA S TOPLINSKOM SNAGOM 0 MW | | | |
|--|----------|----------|----------|--|--------|-------|---------|
| | -24 | 15 | 37 | | -24 | 15 | 37 |
| 60% | 150,5886 | 135,0405 | 114,8165 | 60% | 11,51% | 0,00% | -14,98% |
| 65% | 160,5442 | 144,0281 | 122,7253 | 65% | 11,47% | 0,00% | -14,79% |
| 70% | 170,3774 | 152,9977 | 130,9826 | 70% | 11,36% | 0,00% | -14,39% |
| 75% | 180,6222 | 161,2333 | 138,0919 | 75% | 12,03% | 0,00% | -14,35% |
| 80% | 190,256 | 170,1427 | 145,5872 | 80% | 11,82% | 0,00% | -14,43% |
| 85% | 200,3518 | 179,2701 | 153,0734 | 85% | 11,76% | 0,00% | -14,61% |
| 90% | 210,4089 | 188,4204 | 160,5262 | 90% | 11,67% | 0,00% | -14,80% |
| 95% | 220,779 | 197,3063 | 168,3362 | 95% | 11,90% | 0,00% | -14,68% |
| 100% | 230,1678 | 208,8955 | 177,1549 | 100% | 10,18% | 0,00% | -15,19% |

**Slika 59. Ukupna električna snaga s minimalnom toplinskom snagom****Tablica 28. Ukupna električna snaga s toplinskom snagom 80 MW**

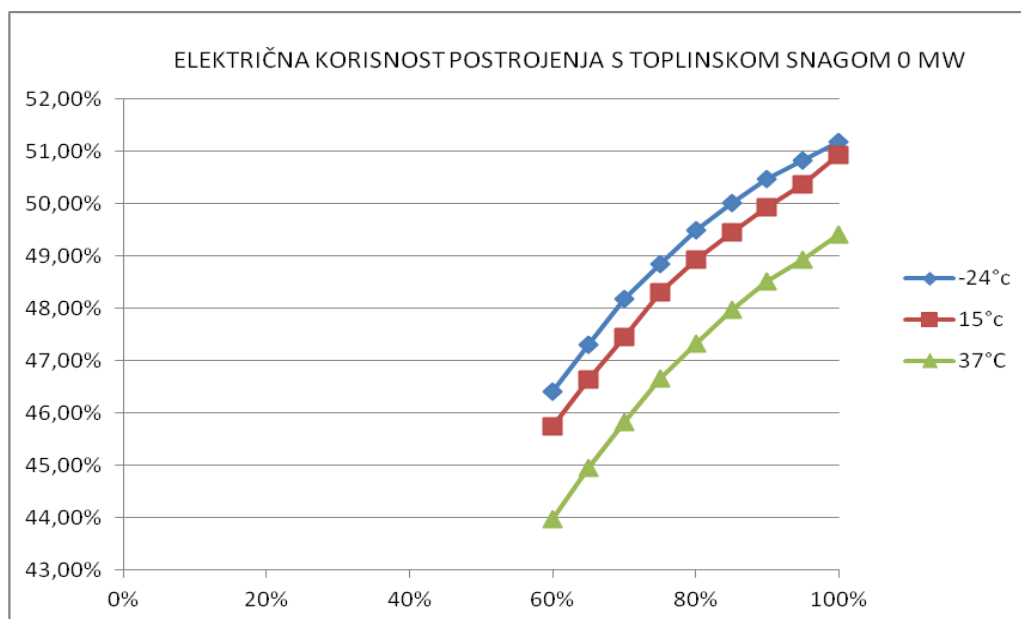
| UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA S TOPLINSKOM SNAGOM 80 MW | | | | UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA S TOPLINSKOM SNAGOM 80 MW | | | |
|---|----------|----------|----------|---|--------|-------|---------|
| | -24 | 15 | 37 | | -24 | 15 | 37 |
| 60% | 134,0152 | 119,5556 | 100,3575 | 60% | 12,09% | 0,00% | -16,06% |
| 65% | 143,9139 | 128,4459 | 108,1016 | 65% | 12,04% | 0,00% | -15,84% |
| 70% | 153,7402 | 137,3878 | 116,1892 | 70% | 11,90% | 0,00% | -15,43% |
| 75% | 163,9957 | 145,6141 | 123,2283 | 75% | 12,62% | 0,00% | -15,37% |
| 80% | 173,636 | 154,5265 | 130,7295 | 80% | 12,37% | 0,00% | -15,40% |
| 85% | 183,7856 | 163,6822 | 138,2151 | 85% | 12,28% | 0,00% | -15,56% |
| 90% | 193,8861 | 172,8337 | 145,6847 | 90% | 12,18% | 0,00% | -15,71% |
| 95% | 204,3083 | 181,7266 | 153,5222 | 95% | 12,43% | 0,00% | -15,52% |
| 100% | 213,7294 | 192,5185 | 162,2812 | 100% | 11,02% | 0,00% | -15,71% |



Slika 60. Ukupna električna snaga s toplinskom snagom 80 MW

Tablica 29. Električna korisnost postrojenja s minimalnom toplinskom snagom

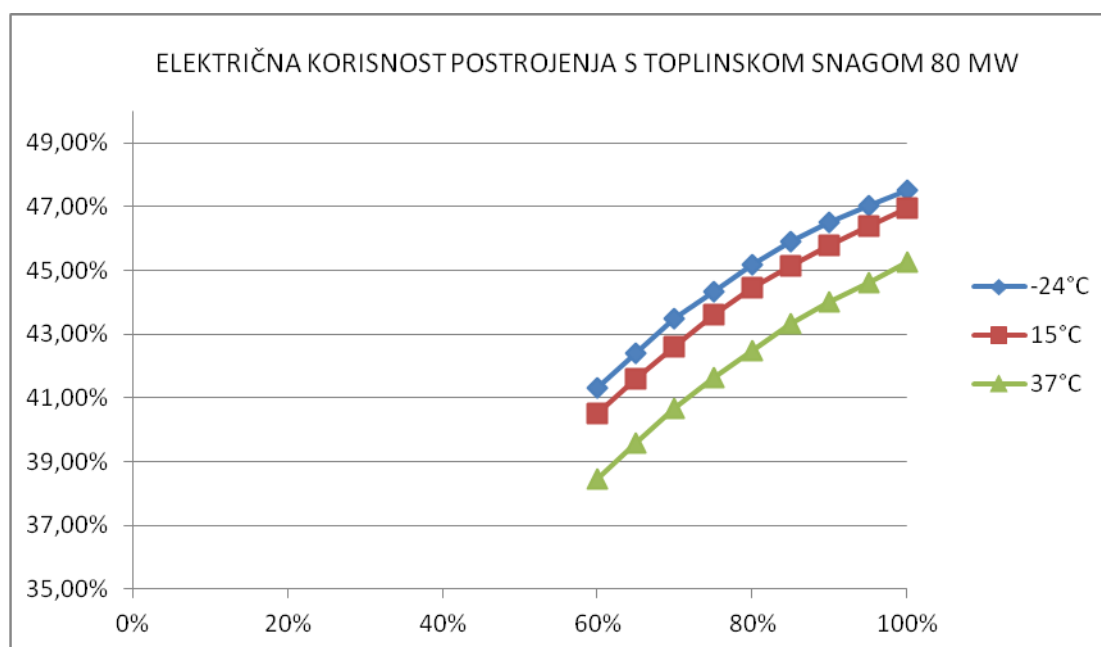
| ELEKTRIČNA KORISNOST POSTROJENJA S TOPLINSKOM SNAGOM 0 MW | | | | ELEKTRIČNA KORISNOST POSTROJENJA S TOPLINSKOM SNAGOM 0 MW | | | |
|---|--------|--------|--------|---|-------|-------|--------|
| | -24 | 15 | 37 | | -24 | 15 | 37 |
| 60% | 46,40% | 45,74% | 43,98% | 60% | 1,44% | 0,00% | -3,85% |
| 65% | 47,31% | 46,64% | 44,95% | 65% | 1,44% | 0,00% | -3,62% |
| 70% | 48,18% | 47,46% | 45,83% | 70% | 1,53% | 0,00% | -3,43% |
| 75% | 48,85% | 48,30% | 46,65% | 75% | 1,13% | 0,00% | -3,41% |
| 80% | 49,48% | 48,93% | 47,32% | 80% | 1,13% | 0,00% | -3,30% |
| 85% | 50,02% | 49,44% | 47,97% | 85% | 1,17% | 0,00% | -2,97% |
| 90% | 50,47% | 49,92% | 48,51% | 90% | 1,11% | 0,00% | -2,81% |
| 95% | 50,81% | 50,37% | 48,93% | 95% | 0,87% | 0,00% | -2,86% |
| 100% | 51,17% | 50,93% | 49,40% | 100% | 0,47% | 0,00% | -2,99% |



Slika 61. Električna korisnost postrojenja s minimalnom toplinskom snagom

Tablica 30. Električna korisnost postrojenja s toplinskom snagom 80 MW

| ELEKTRIČNA KORISNOST POSTROJENJA S TOPLINSKOM SNAGOM 80 MW | | | | ELEKTRIČNA KORISNOST POSTROJENJA S TOPLINSKOM SNAGOM 80 MW | | | |
|--|--------|--------|--------|--|-------|-------|--------|
| | -24 | 15 | 37 | | -24 | 15 | 37 |
| 60% | 41,30% | 40,50% | 38,44% | 60% | 1,97% | 0,00% | -5,08% |
| 65% | 42,41% | 41,59% | 39,59% | 65% | 1,97% | 0,00% | -4,81% |
| 70% | 43,48% | 42,62% | 40,65% | 70% | 2,03% | 0,00% | -4,60% |
| 75% | 44,35% | 43,62% | 41,63% | 75% | 1,67% | 0,00% | -4,56% |
| 80% | 45,16% | 44,44% | 42,49% | 80% | 1,63% | 0,00% | -4,39% |
| 85% | 45,88% | 45,14% | 43,31% | 85% | 1,64% | 0,00% | -4,05% |
| 90% | 46,51% | 45,79% | 44,03% | 90% | 1,57% | 0,00% | -3,84% |
| 95% | 47,02% | 46,40% | 44,63% | 95% | 1,35% | 0,00% | -3,81% |
| 100% | 47,51% | 46,93% | 45,25% | 100% | 1,24% | 0,00% | -3,58% |

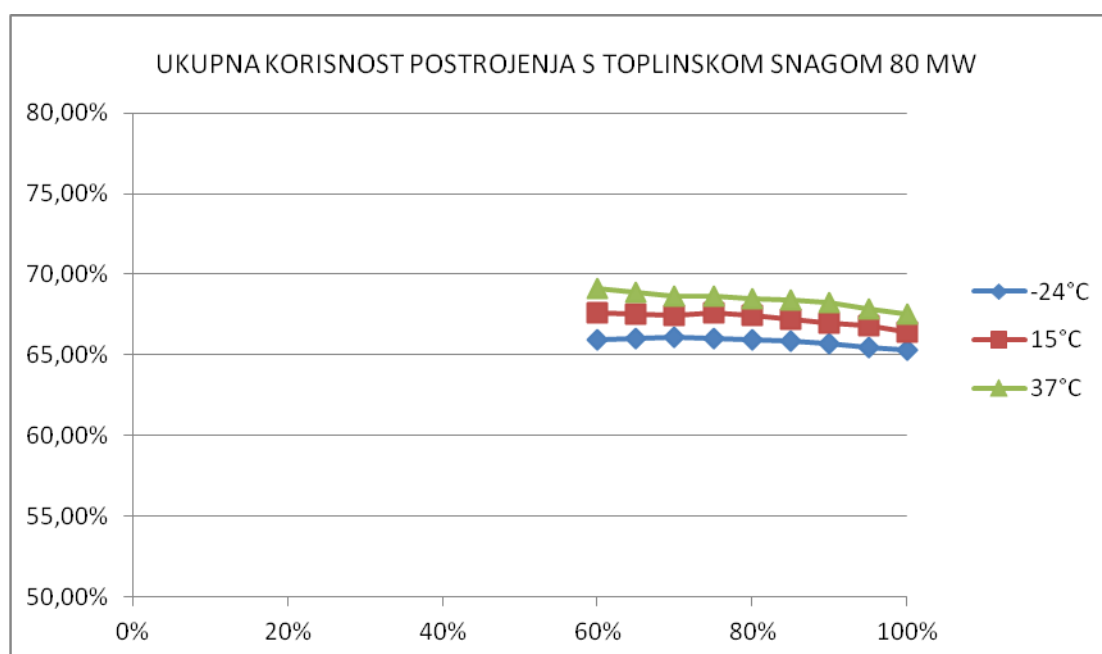


Slika 62. Električna korisnost postrojenja s toplinskom snagom 80 MW

Na slici 63 i tablici 31 prikazani su rezultati ukupne korisnosti postrojenja. Ukupna korisnost postrojenja raste s porastom toplinske snage, sa smanjenjem opterećenja postrojenja i s povećanjem okolišne temperature.

Tablica 31. Ukupna korisnost postrojenja s toplinskom snagom 80MW

| UKUPNA KORISNOST POSTROJENJA S TOPLINSKOM SNAGOM 80 MW | | | | UKUPNA KORISNOST POSTROJENJA S TOPLINSKOM SNAGOM 80 MW | | | |
|--|--------|--------|--------|--|--------|-------|-------|
| | -24 | 15 | 37 | | -24 | 15 | 37 |
| 60% | 65,95% | 67,60% | 69,09% | 60% | -2,44% | 0,00% | 2,20% |
| 65% | 65,99% | 67,50% | 68,89% | 65% | -2,24% | 0,00% | 2,07% |
| 70% | 66,10% | 67,43% | 68,65% | 70% | -1,97% | 0,00% | 1,80% |
| 75% | 65,99% | 67,59% | 68,66% | 75% | -2,37% | 0,00% | 1,58% |
| 80% | 65,97% | 67,45% | 68,49% | 80% | -2,19% | 0,00% | 1,54% |
| 85% | 65,85% | 67,20% | 68,38% | 85% | -2,01% | 0,00% | 1,76% |
| 90% | 65,70% | 66,98% | 68,21% | 90% | -1,92% | 0,00% | 1,83% |
| 95% | 65,43% | 66,82% | 67,88% | 95% | -2,07% | 0,00% | 1,59% |
| 100% | 65,30% | 66,44% | 67,56% | 100% | -1,71% | 0,00% | 1,69% |



Slika 63. Ukupna korisnost postrojenjas toplinskom snagom 80 MW

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu napravljen je matematički model Bloka K termoelektrane toplane (TE – TO) Zagreb. Dobiveni su i analizirani rezultati za dvije plinske turbine jednakih karakteristika, za dva kotla na otpadnu toplinu jednakih karakteristika, za jednu parnu turbinu te za dva izmjenjivača topline C4 i C6 koji služe za područno grijanje.

Iz prikazanih rezultata u prethodnim poglavljima, vidljivo je da su dobivene nazivne vrijednosti snaga za plinske turbine (71,265 MW) i za parnu turbinu (66,364 MW) pri temperaturi okoliša od 15°C s opterećenjem postrojenja u prvom i u drugom krugu od 100% s minimalnom toplinskom snagom (0 MW).

Maksimalna električna korisnost (iskoristivost) postrojenja i ukupna električna snaga dobiveni su na niskim temperaturama (zimskim uvjetima rada u ovom slučaju -24°C) sa 100% opterećenjem postrojenja i minimalnom toplinskom snagom. Vidljivo je iz analize rezultata kako promjenom samo jednog stanja (povećanje okolišne temperature ili povećanje toplinske snage ili smanjenje opterećenja postrojenja) mijenjamo tj. smanjujemo električnu korisnost (iskoristivost) postrojenja i ukupnu električnu snagu.

Ukupna korisnost (iskoristivost) postrojenja najveća je na višim ljetnim temperaturama, na manjem opterećenju postrojenja, na većoj toplinskoj snazi (u našem slučaju 60% opterećenja postrojenja, prvi i drugi dio postrojenja, 37°C temperatura okoliša i toplinska snaga 80MW).

LITERATURA

- [1] http://www.montmontaza.hr/?page_id=148#
- [2] Prospekt TE-TO Zagreb, Hrvatska elektroprivreda D.D.
- [3] <http://www.hep.hr/proizvodnja/osnovni/termoelektrane/teto.aspx>
- [4] Galović, A., Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2007
- [5] Čehil, M., Optimalno korištenje otpadne topline u parnoturbinskom ciklusu, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010
- [6] Bogdan, Ž., Termoenergetska postrojenja, Predavanja iz kolegija Termoenergetska postrojenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [7] http://www.mzoip.hr/doc/Zastita_okolisa/Izvjesce_22_11_2010_4.pdf
- [8] Lončar, D., Krajačić, G., Vujanović, M., Podrška developerima – Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu, Centar za transfer tehnologije – CTT, Zagreb, 2009
- [9] www.cmigroupe.com
- [10] <http://savez-energeticara-pgz.hr>
- [11] Saunders, E.A., Heat exchanger: Selection, design and construction, New York: Longman scientific and technical, 1988

PRILOZI

I. CD-R disc