

# Integracija toplinskog spremnika u kombi kogeneracijsko postrojenje

---

Vukša, Toni

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:990718>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-25**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Toni Vukša**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil, dipl. ing.

Student:

Toni Vukša

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Mislavu Čehilu, dipl. ing. na pruženoj mogućnosti rada na zanimljivoj temi i na korisnim savjetima.

Posebno se zahvaljujem dr. sc. Stjepku Katuliću, dipl. ing. na velikoj pomoći i čestim konzultacijama tijekom izrade rada.

Također se zahvaljujem svojim roditeljima koji su mi omogućili studiranje i pružali mi nesebičnu podršku u istom.

Naročito se zahvaljujem svojoj djevojci i prijateljima na podršci koju su mi pružili tokom mog studiranja.

Toni Vukša



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Toni Vukša** Mat. br.: 0035195784

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Integracija toplinskog spremnika u kombi kogeneracijsko postrojenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Integration of Heat Storage Tank into Combined Cogeneration Power Plant**

Opis zadatka:

Ugradnja toplinskog spremnika u sustav daljinskog grijanja omogućuje manje oscilacije u opterećenju postrojenja u odnosu na rad bez toplinskog spremnika. Osim toga, u slučaju vremenski promjenjivih cijena električne energije, korištenjem toplinskog spremnika moguće je povećati prihode od prodaje električne energije.

U radu je potrebno stoga:

1. Napraviti matematički model termoelektričnog postrojenja čije su osnovne komponente plinska turbina, generator pare na otpadnu toplinu, parna turbina te toplinski spremnik.
2. Simulirati godišnji rad postrojenja bez spremnika i sa spremnikom.
3. Analizirati dobivene rezultate.

Ostali tehnički podaci nalaze se kod mentora.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SADRŽAJ .....                                                                 | I   |
| POPIS SLIKA .....                                                             | II  |
| POPIS OZNAKA I KRATICA .....                                                  | III |
| SAŽETAK.....                                                                  | IV  |
| 1. UVOD.....                                                                  | 1   |
| 2. TERMOENERGETSKA POSTROJENJA .....                                          | 3   |
| 2.1. Plinsko-turbinsko postrojenje .....                                      | 4   |
| 2.2. Parno-turbinsko postrojenje .....                                        | 5   |
| 2.3. Kombinirano postrojenje.....                                             | 6   |
| 2.4. Kogeneracija .....                                                       | 7   |
| 2.4.1. Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare..... | 8   |
| 2.5. Termoelektrana TE TO Sisak Blok C .....                                  | 9   |
| 3. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAV .....                                      | 10  |
| 3.1. Centralizirani toplinski sustav grada Siska .....                        | 10  |
| 3.2. Toplinske potrebe centraliziranog toplinskog sustava grada Siska .....   | 12  |
| 4. TOPLINSKI SPREMNIK .....                                                   | 13  |
| 4.1. Akumulator topline u TE-TO Zagreb [8].....                               | 15  |
| 5. MATEMATIČKI MODEL.....                                                     | 16  |
| 5.1. MATLAB.....                                                              | 16  |
| 5.2. Postrojenje bez toplinskog spremnika.....                                | 16  |
| 5.2.1. Matematički model plinsko-turbinskog postrojenja .....                 | 19  |
| 5.2.2. Matematički model generatora pare na ispušne plinove.....              | 20  |
| 5.2.3. Matematički model parno-turbinskog postrojenja .....                   | 21  |
| 5.3. Postrojenje s toplinskim spremnikom .....                                | 24  |
| 5.4. Optimizacija .....                                                       | 25  |
| 6. REZULTATI .....                                                            | 26  |
| 6.1. Postrojenje bez toplinskog spremnika.....                                | 26  |
| 6.2. Postrojenje s toplinskim spremnikom .....                                | 29  |
| 7. ZAKLJUČAK.....                                                             | 32  |
| LITERATURA.....                                                               | 33  |
| PRILOZI.....                                                                  | 34  |

## POPIS SLIKA

|           |                                                                    |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1.  | TETO Sisak [2] .....                                               | 3  |
| Slika 2.  | Shema plinsko-turbinskog postrojenja .....                         | 4  |
| Slika 3.  | T,s dijagram realnog Brytonovog ciklusa [1].....                   | 4  |
| Slika 4.  | Parnoturbinsko postrojenje [1] .....                               | 5  |
| Slika 5.  | T,s dijagram Rankinovog procesa [1] .....                          | 5  |
| Slika 6.  | Shema kombiniranog postrojenja .....                               | 7  |
| Slika 7.  | T,s dijagram kombiniranog procesa [1] .....                        | 7  |
| Slika 8.  | Shema kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare .....  | 8  |
| Slika 9.  | Centralizirani toplinski sustav [5] .....                          | 10 |
| Slika 10. | Karta centraliziranog toplinskog sustava grada Siska .....         | 11 |
| Slika 11. | Prosječni dnevni toplinski konzum CTS-a grada Siska .....          | 12 |
| Slika 12. | Shema toplinskog spremnika.....                                    | 14 |
| Slika 13. | Tipični temperaturni profil u akumulatoru topline [7] .....        | 14 |
| Slika 14. | Akumulator topline TE-TO Zagreb [8] .....                          | 15 |
| Slika 15. | Shemu postrojenja bez toplinskog spremnika .....                   | 17 |
| Slika 16. | Snaga plinske turbine u ovisnosti o promjeni opterećenja .....     | 19 |
| Slika 17. | Potrošnja goriva u ovisnosti o opterećenju.....                    | 19 |
| Slika 18. | Stupanj djelovanja plinske turbine u ovisnosti o opterećenju ..... | 20 |
| Slika 19. | Proizvodnja VT pare u ovisnosti o optećenju .....                  | 21 |
| Slika 20. | Shema postrojenja s toplinskim spremnikom.....                     | 24 |
| Slika 21. | Dobit i toplinski konzum kroz godinu.....                          | 26 |
| Slika 22. | Krivulje snage oduzimanja i toplinskog konzuma za siječanj .....   | 27 |
| Slika 23. | Snage turbina u karakterističnom danu siječnja .....               | 27 |
| Slika 24. | Stanje spremnika, krivulje oduzimanja i konzuma za siječanj.....   | 29 |
| Slika 25. | Akumulacija spremnika kroz mjesec .....                            | 30 |
| Slika 26. | Dobit i toplinski konzum kroz godinu.....                          | 31 |

**POPIS OZNAKA I KRATICA**

| <b>Oznaka</b>      | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>                              |
|--------------------|-----------------|------------------------------------------|
| A                  | MWh             | Akumulirana energija u spremniku         |
| B                  | kg/s            | Potrošnja goriva                         |
| CC                 | -               | eng. Combined-cycle                      |
| CHP                | -               | eng. Combined Heat and Power             |
| Cijena_EE          | EUR/MWh         | Cijena električne energije               |
| CST                | -               | Centralizirani toplinski sustav          |
| DH                 | -               | eng. District Heating                    |
| etaPAT             | -               | Stupanj djelovanja parne turbine         |
| etaPLT             | -               | Stupanj djelovanja plinske turbine       |
| Faktor_opterećenja | -               | Faktor opterećenja                       |
| h                  | kJ/kg           | Specifična entalpija                     |
| H <sub>d</sub>     | MJ/kg           | Donja ogrjevna vrijednost goriva         |
| HRSG               | -               | eng. Heat Recovery Steam Generator       |
| KKE                | -               | Kombinirana kogeneracijska elektrana     |
| m                  | kg/s            | Maseni protok                            |
| p                  | bar             | Tlak                                     |
| Raspon_opterećenja | -               | Raspon opterećenja                       |
| s                  | kJ/kg           | Specifična entropija                     |
| SnagaPLT           | MW              | Snaga plinske turbine                    |
| SnagaPLT_nazivna   | MW              | Nazivna snaga plinske turbine            |
| SnagaPAT           | MW              | Snaga parne turbine                      |
| SnagaPAT_VT        | MW              | Snaga visokotlačnog dijela parne turbine |
| SnagaPAT_NT        | MW              | Snaga niskotlačnog dijela parne turbine  |
| SnagaUK            | MW              | Ukupna snaga kombiniranog postrojenja    |
| T                  | K               | Temperatura apsolutna                    |
| t                  | °C              | Temperatura                              |
| TE-TO              | -               | Termoelektrana-toplana                   |
| x                  | kg/kg           | Sadržaj pare                             |



## SAŽETAK

U radu je analizirana integracija toplinskog spremnika u kombiniranu kogeneracijsku elektranu (KKE) na prirodni plin te njegov utjecaj na rad elektrane. Kombinirana elektrana spaja plinski i parni proces proizvodnje električne energije. Kogeneracijsko postrojenje se koristi za istovremenu proizvodnju električne energije i korisne toplinske energije čime se značajno povećava stupanj iskoristivosti primarne energije, u usporedbi s odvojenom proizvodnjom električne i toplinske energije.

Napravljen je matematički model KKE koja se sastoji od plinske turbine, generatora pare na otpadnu toplinu, parne turbine i toplinskog spremnika. Za okvirne radne parametre KKE su uzeti podatci za Blok C termoelektrane Sisak koja ima obvezu u svakom satu godine zadovoljiti toplinski konzum daljinskog centraliziranog toplinskog sustava (CTS) grada Siska.

Integracija toplinskog spremnika dozvoljava termoelektrani veću slobodu pri odabiru optimalnog načina rada jer joj omogućuje proizvodnju više toplinske energije od trenutno zahtijevanog toplinskog opterećenja CTS sustava te skladištenje tog viška proizvedene topline kojim se kasnije može namirivati toplinsko opterećenje CTS-a. U vrijeme dok su na tržištu električne energije prisutne visoke cijene električne energije para se može u potpunosti iskoristavati za proizvodnju električne energije, dok se toplinsko opterećenje namiruje iz toplinskog spremnika te se time mogu povećati prihodi.

Napravljena je optimizacija rada termoelektrane sa i bez toplinskog spremnika u programu MATLAB® te je uspoređen njihov rad. Glavni cilj optimizacije je bio da elektrana zadovolji satno toplinsko opterećenje CTS-a i da uz to maksimira zaradu od prodaje električne energije. Pomoću optimizacijskog algoritma „fmincon“ u svakom satu karakterističnog dana u mjesecu određuje se optimalni faktor opterećenja uz nametnuta ograničenja, s ciljem ostvarivanja što veće zarade pri prodaji električne energije na dvotarifnom tržištu.

Ključne riječi: termoenergetska postrojenja, kombinirani ciklus, kogeneracija, toplinski spremnik, akumulator topline, matematički model, optimizacija

## 1. UVOD

U današnje vrijeme razvijene zemlje ovise o električnoj energiji više nego ikada prije i na vidiku nije vidljiva promjena toga rastućeg trenda. Na području proizvodnje električne energije, te u ostalim područjima energetike (znanosti općenito), konstantno se događaju velike promjene u tržišnim uvjetima poslovanja sudionika na energetsom tržištu. Svakim danom sudionici tržišta sve više ulažu u unaprjeđenje svojih tehnologija da bi proizveli električnu energiju uz što manji trošak. Nove tehnologije, poput solarnih fotonaponskih elektrana te vjetroelektrana, su u zadnjih deset godina značajno snizile cijenu električne energije na energetsom tržištu. Takvi tržišni uvjeti nameću svim sudionicima visoke zahtjeve za što efikasnijim radom da bi opstali. Tako se događa prirodna/tržišna selekcija te opstaju samo oni najsposobnijih.

U klasičnim termoelektranama se izgaranjem goriva preko generatora pare proizvodi vodena para koja se u parnoturbinskom postrojenju transformira u električnu energiju. Stupanj djelovanja današnjih termoelektrana je većinom oko 35-50% što znači da se samo nešto između trećine i polovice proizvedene topline pretvori u električnu energiju. Ostatak proizvedene topline, ako se dalje ne koristi u nekom procesu, nepovratno se baca u okoliš što predstavlja značajan gubitak. Prema današnjim cijenama energenata te cijenama električne energije na tržištu takav stupanj iskorištenja energije je nedovoljan za profitabilno poslovanje. Stoga je većina današnjih termoelektrana ciljano građena na područjima gdje bi se ta otpadna toplina mogla iskoristiti na načine poput predavanja topline gradskim toplanama, tj. daljinskim centraliziranim toplinskim sustavima (CTS), sušarama drvne biomase, industriji itd. Takvim iskorištavanjem otpadne topline se ukupni stupanj korisne pretvorbe energije sadržane u gorivu povećava čime se profitabilnost postrojenja povećava.

No, takvi tipovi gradnje daljinskih CTS-ova ovisnima o radu termoelektrana su nametnuli ugovorne obveze termoelektranama da moraju u svakom trenutku zadovoljiti potrebno toplinsko opterećenje CTS-a. Nadalje, situaciju za termoelektrane otežava i preklapanje krivulje toplinskog opterećenja CTS-a i cijena električne energije na tržištu, tj. kada je cijena električne energije najviša, tada je i toplinsko opterećenje najviše i obratno. Tako se događa da u trenutcima kada je cijena električne energije visoka termoelektrane moraju veći dio svoga proizvodnog kapaciteta usmjeriti na namirivanje toplinskog opterećenja umjesto da tada proizvode električnu energiju koja im omogućava veću zaradu. Rješenje toga problema pojavilo se u obliku toplinskih spremnika koji bi se koristili tako da je moguće toplinu proizvoditi i

skladištiti u uvjetima kada je toplinsko opterećenje CTS-a malo i dok je cijena električne energije niska. Kada se cijene električne energije i toplinsko opterećenje u jutarnjim i popodnevnim satima povise tada se toplinsko opterećenje djelomično ili potpuno namiruje iz toplinskog spremnika, a termoelektrana može proizvoditi više električne energije.

## 2. TERMOENERGETSKA POSTROJENJA

Termoenergetska postrojenja su postrojenja koja iz kemijske energije goriva proizvode električnu i/ili toplinsku energiju. Proizvodnja se vrši prvo izgaranjem goriva u ložištima čime se dobivaju dimni plinovi visoke unutarnje energije, tj. plinovi visokih temperatura, najčešće oko 1400-1600°C. U generatoru pare se prenosi toplina s dimnih plinova na vodenu paru te je konačni proizvod vodena para visokih parametara. Ta para se može iskoristiti za proizvodnju rada na turbini koja je spojena na radni stroj npr. električni generator gdje se generira električna energija.

U termoenergetska postrojenja ubrajamo sljedeća postrojenja:

- parno-turbinska postrojenja,
- plinsko-turbinska postrojenja,
- kombinirana postrojenja,
- postrojenja za vezanu proizvodnju električne i toplinske energije (kogeneracijska postrojenja),
- motore s unutarnjim izgaranjem,
- nuklearna postrojenja. [1]

U ovome radu će se pobliže opisati elementi kombiniranog kogeneracijskog postrojenja na prirodni plin koje se sastoji od plinske turbine, generatora pare na ispušne plinove i parne turbine pošto će se u radu analizirati integracija toplinskog spremnika u takvo postrojenje. Modelirano termoenergetsko postrojenje bit će približno bazirano na podacima o bloku C termoelektrane TETO Sisak (Slika 1).

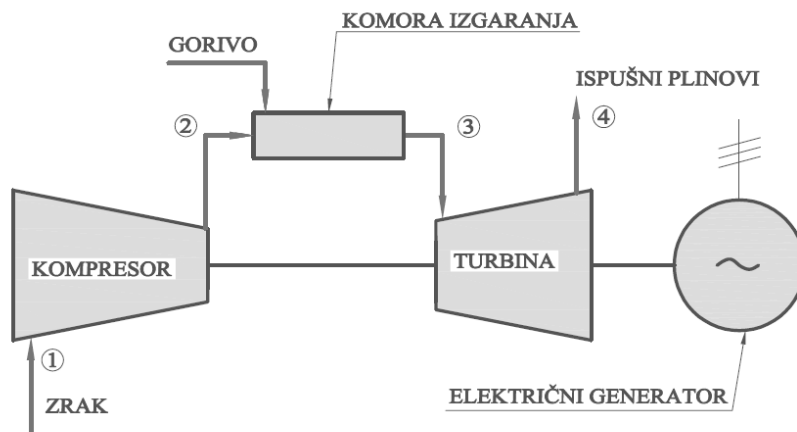


Slika 1. TETO Sisak [2]

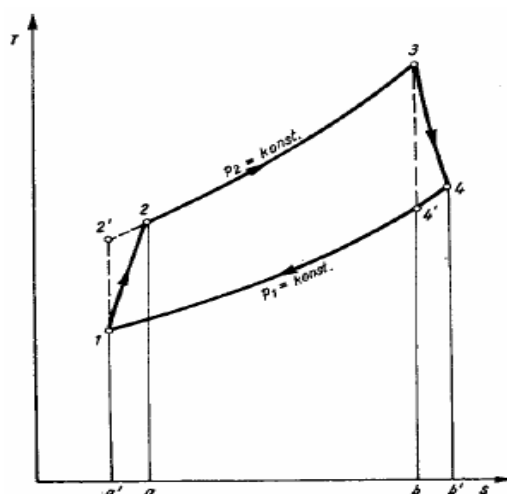
## 2.1. Plinsko-turbinsko postrojenje

Slika 2 prikazuje shemu osnovnog plinsko-turbinskog postrojenja. Plinsko-turbinsko postrojenje radi tako da aksijalni kompresor usisava zrak iz okoline stanja 1 i tlači ga to stanja 2. Stlačeni zrak potom ulazi u komoru izgaranja gdje se ubrizgava gorivo, plinsko ili tekuće, čijim izgaranjem se iz kemijske energije oslobađa toplinska energija kojom se izobarno podiže toplinsko stanje dimnih plinova do stanja 3. Dimni plinovi tada ulaze u turbinu u kojoj se vrši ekspanzija do tlaka okoline, tj. do stanja 4.

Slika 3 prikazuje T,s dijagram Brytonovog kružnog procesa na kojemu se zasniva plinsko-turbinsko postrojenje. Na dijagramu su označena stanja koje odgovaraju stanjima sa sheme (Slika 2). Razlika između idealnog Brytonovog kružnog procesa i realnog plinsko-turbinskog je to što se u realnom procesu radi o otvorenom procesu, jer linija promjene stanja od 4 do 1 u stvarnosti ne postoji. [1]



Slika 2. Shema plinsko-turbinskog postrojenja

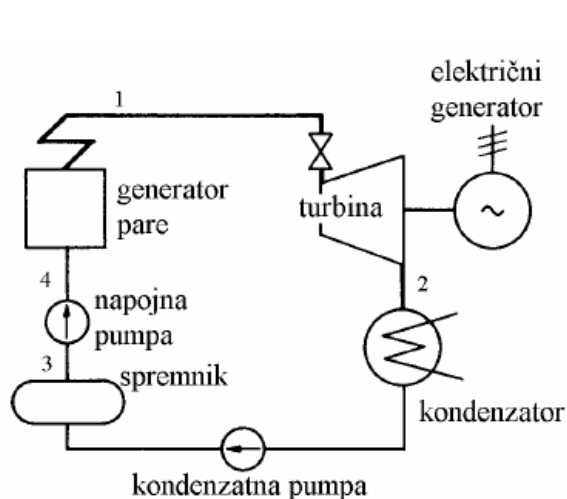


Slika 3. T,s dijagram realnog Brytonovog ciklusa [1]

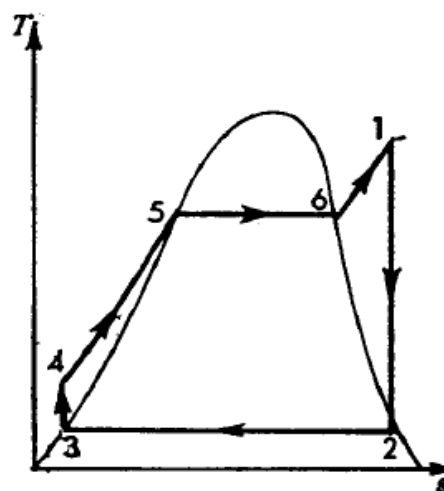
## 2.2. Parno-turbinsko postrojenje

Slika 4 prikazuje shemu osnovnog parno-turbinskog postrojenja. Slika 5 prikazuje Rankinov proces s vodenom parom s oznakama stanja radne tvari koja odgovaraju stanjima na prethodnoj shemi (Slika 4). Proces se odvija tako da se u generatoru pare, pomoću topline dimnih plinova nastalih izgaranjem goriva u ložištu, proizvodi vodena para visokog tlaka i temperature označena s oznakom 1. Ta para se potom vodi na parnu turbinu gdje ekspandira do stanja 2, tj. do tlaka kondenzacije koji je uvjetovan temperaturom rashladnog medija u kondenzatoru. U turbini se energija fluida, u obliku tlaka ili entalpije preko kinetičke energije razmjenjuje s rotorom turbostroja te se transformira u mehanički rad turbine koji se dalje preko vratila prenosi do električnog generatora. Ekspandirana para stanja 2 se vodi u kondenzator gdje izobarno kondenzira. Nastali kondenzat se potom prvo odvodi kondenzatnom pumpom u spremnik vode te nakon toga s napojnom pumpom tlači na radni tlak stanja 4. [3] [1]

Parnoturbinska postrojenja se koriste za zadovoljavanje bazne potrošnje električne energije u većini elektroenergetskih sustava.



Slika 4. Parnoturbinsko postrojenje [1]



Slika 5. T,s dijagram Rankinovog procesa [1]

### 2.3. Kombinirano postrojenje

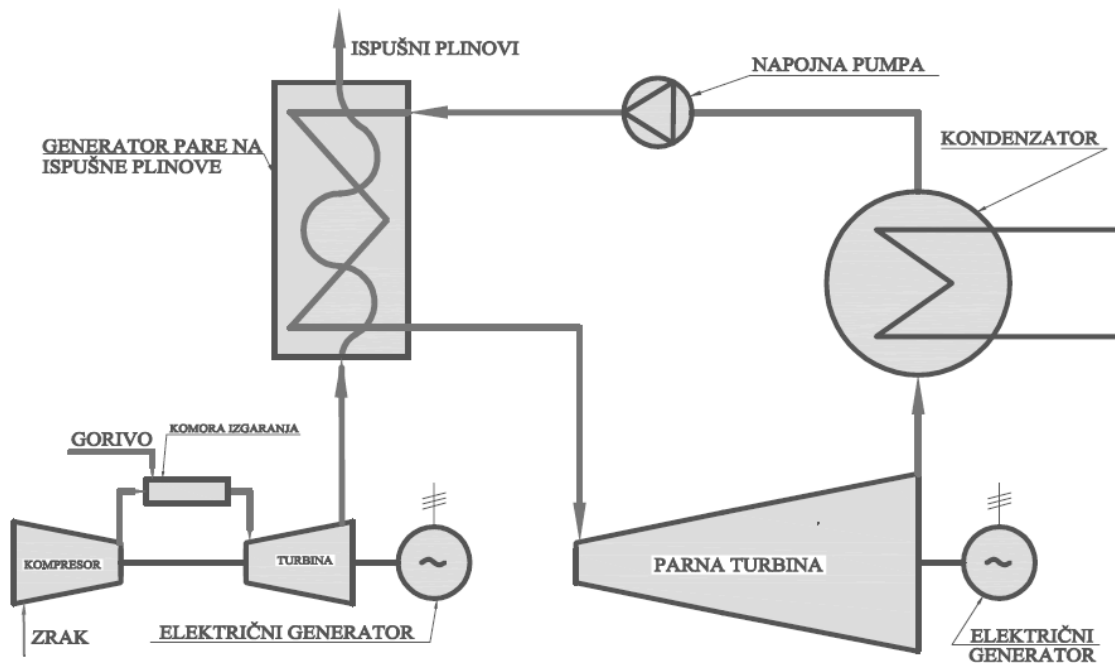
Stupnjevi djelovanja kružnih procesa u termoenergetskim postrojenjima su ograničeni s temperaturama njihovih toplinskih spremnika.

Kod današnjih plinskih turbina postižu se stupnjevi djelovanja od oko 38%. Ograničenja postizanja višeg stupnja djelovanja uvjetovana su temperaturama radnog medija. Radni medij, u slučaju plinsko-turbinskog postrojenja, su dimni plinovi nastali izgaranjem goriva. Temperature dimnih plinova na ulazu u turbinu premašuju vrijednost od 1450°C. Ti dimni plinovi tada ekspandiraju u turbini do okolišnog tlaka pri kojemu im ostane značajno povišena unutarnja energija, s temperaturom reda veličine od oko 600°C, koja ostaje neiskorištena.

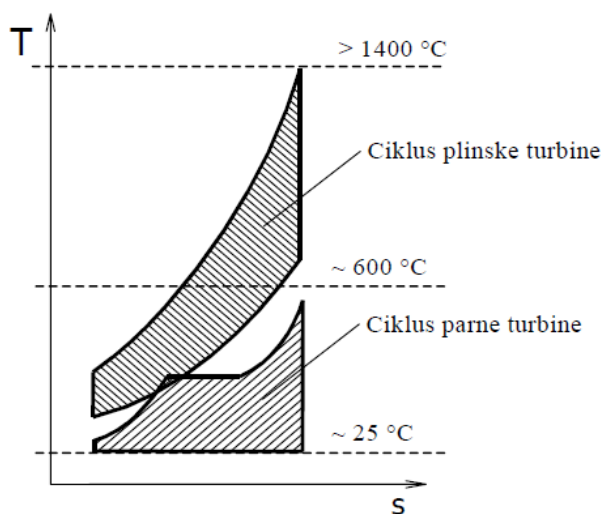
Kod parnoturbinskih postrojenja kružni proces se odvija s gornjom temperaturom radnog medija, vodene pare, od oko 600°C što je granica do koje današnji materijali još uvijek imaju zadovoljavajući životni vijek. Donja temperatura radnog medija je uvjetovana temperaturom okoliša kojim se radni medij hladi u kondenzatoru, u prosjeku 25°C. Takve radne karakteristike omogućuju postizanje stupnja djelovanja od oko 45%.

Stoga se došlo do ideje da se iskoristi otpadna toplina plinsko-turbinskog postrojenja u svrhu generiranja pare za parnoturbinski proces. Slika 6 prikazuje tipično kombinirano postrojenje (eng. Combined-Cycle Process, CC). Kombinirano postrojenje funkcionira tako da se ispušni dimni plinovi iz plinske turbine s temperaturom od oko 600°C odvede u generator pare na ispušne plinove (eng. Heat Recovery Steam Generator, HRSG) gdje se proizvodi vodena para za parnu turbinu. Time se iskorištava preostala unutarnja energija ispušnih plinova i to predstavlja bit kombiniranog procesa. U takvom procesu se postižu stupnjevi djelovanja i preko 60%. [1]

Slika 6 prikazuje shemu kombiniranog postrojenja, a slika 7 prikazuje T,s dijagram kombiniranog procesa u kojemu su jasno vidljive temperaturne razlike koje se iskorištavaju za ovakav spojeni ciklus.



Slika 6. Shema kombiniranog postrojenja



Slika 7. T,s dijagram kombiniranog procesa [1]

## 2.4. Kogeneracija

Otpadna toplota u poznatim kružnim procesima zbog relativno visoke apsolutne temperature okoline, sukladno drugom zakonu termodinamike, sprječava da se više od 40% energije sadržane u gorivu pretvori u koristan mehanički rad. Stoga se s ciljem iskorištenja te otpadne topline grade kogeneracijska termoenergetska postrojenja (eng. CHP – combined heat and power) koja istovremeno proizvode električnu energiju i korisnu toplinsku energiju. Toplina se može koristiti za zagrijavanje prostora preko toplana, tj. daljinskih centraliziranih toplinski



sustava, za industriju u obliku tehnološke pare itd. Slika 8 prikazuje shemu jednostavnog kogeneracijskog postrojenja.

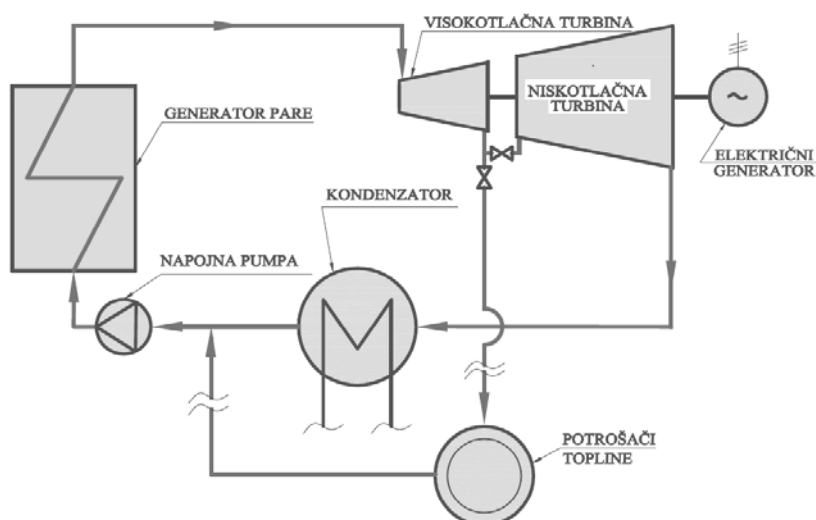
Tipovi kogeneracijskih postrojenja:

- postrojenje protutlačne turbine
- postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare (Poglavlje 2.4.1)
- postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova
- motori s unutarnjim izgaranjem s iskorištavanjem otpadne topline [1]

U radu će biti analizirano postrojenje s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare jer se takav tip kogeneracijskog postrojenja nalazi u TETO Sisak, Blok C prema kojem je modelirano postrojenje u ovom radu.

### 2.4.1. Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare

Kod kondenzacijskog postrojenja parna turbina mora imati najmanje dva stupnja: visokotlačni i niskotlačni. Između njih se vrši oduzimanje određenog protoka pare da bi se iskoristila u druge svrhe. Kod ovakvog tipa postrojenja postoje dva granična načina rada pogona, čisti kondenzacijski kada nema oduzimanja u kojemu sva para ekspandira u niskotlačnom dijelu turbine i čisti protutlačni način rada u kojemu bi se sva para oduzimala između visokotlačnog i niskotlačnog dijela turbine. Kad bi se sva para oduzimala prije niskotlačnog dijela turbine tada bi se u kućištu niskotlačne turbine temperatura povisila preko dozvoljene granice te bi se lopatice turbine pregrijale. Stoga se u stvarnosti ne može voziti čisti protutlačni pogon te zbog toga uvijek mora jedan dio pare (oko 10% nazivnog protoka) strujati kroz niskotlačni dio turbine radi hlađenja lopatica i diskova. [1]



**Slika 8. Shema kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare**

## 2.5. Termoelektrana TE TO Sisak Blok C

Termoelektrana TETO Sisak (Slika 1) smještena je četiri kilometra nizvodno od Siska na desnoj obali Save. Slika 10. prikazuje njenu poziciju. Termoelektrana se sastoji od tri bloka, bloka A, B i C. Blokovi A i B nisu u funkciji više godina stoga će u ovom radu biti zanemareni.

Blok C je kombinirano kogeneracijsko postrojenje instalirane snage  $230 \text{ MW}_e$  i  $50 \text{ MW}_t$ . Način funkcioniranja kombiniranog postrojenja je opisan u poglavlju 2.3, a kogeneracija je opisana u poglavlju 2.4.

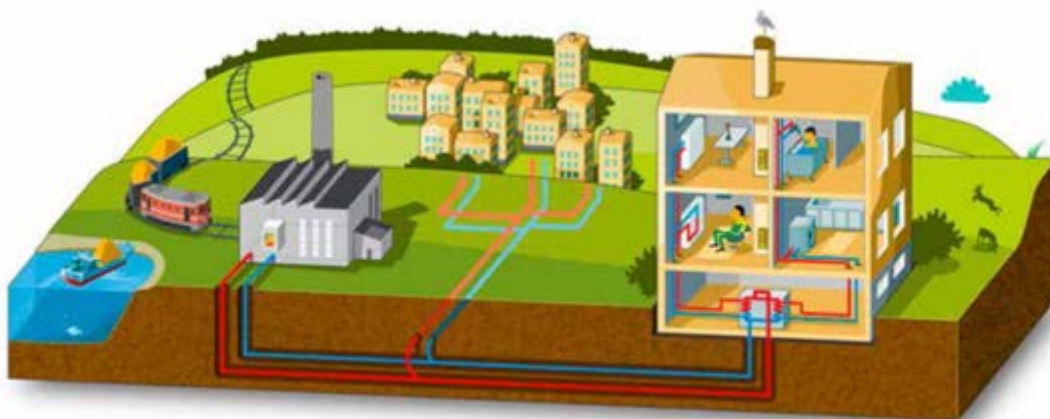
Glavni objekt postrojenja se sastoji od plinske turbine s generatorom, generatora pare na ispušne plinove iz plinske turbine s dimnjakom visine 65 m i parne turbine s generatorom. Za pogon bloka C se isključivo može koristiti prirodni plin. Plinsko-turbinsko postrojenje proizvodi električnu energiju dok se otpadna toplina ispušnih plinova iz plinske turbine koristi za proizvodnju vodene pare u generatoru pare na ispušne plinove. Vodena para se koristi za proizvodnju električne energije u parnoturbinskom postrojenju, a manjim dijelom i za potrebe CTS sustav grada Siska koji je opisan u poglavlju 3.1. [4]

Parna turbina je kondenzacijska s reguliranim oduzimanjem pare čiji način funkcioniranja je opisan u poglavlju 2.4.1. Oduzimanje, nazivne snage  $50 \text{ MW}$ , vrši se za namirivanje toplinskih potreba CTS-a grada Siska.

### 3. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAV

Centralizirani toplinski sustavi (eng. District heating, DH) su sustavi za distribuiranje topline proizvedene na centralnoj lokaciji za grijanje više stambenih prostora i/ili industrijskih objekata. Takvi sustavi grijanja su najčešće prisutni u gušće naseljenim gradskim sredinama gdje je veća potreba za toplinskom energijom. Toplina se najčešće distribuira pomoću toplinski izoliranih cijevi ukopanih u zemlju. Za veće gradske centralizirane toplinske sustave (CTS) izvor topline je najčešće „otpadna toplina“ iz kogeneracijskih termoelektrana čime se kod nekih termoelektrana postiže stupanj iskorištenja primarne energije i do 80%. Ostali izvori topline mogu biti standardni bojleri, otpadna toplina iz industrije, geotermalna energija, dizalice topline, solarna energija, ali i nuklearnih elektrana. Radni medij za prijenos topline cijevima je najčešće voda. Za industrijske primjene se primjenjuje vodena para viših parametara koja se može iskoristiti u industrijskim procesima zbog njene više temperature.

U ovome radu će biti analizirana interakcija toplinskih potreba CTS-a grada Siska sa radom termoelektrane bazirane na podacima o TETO Sisak koja opskrbljuje potonji sa potrebnom toplotom te će se s toga u poglavlju 3.1 pojasniti CTS grada Siska.



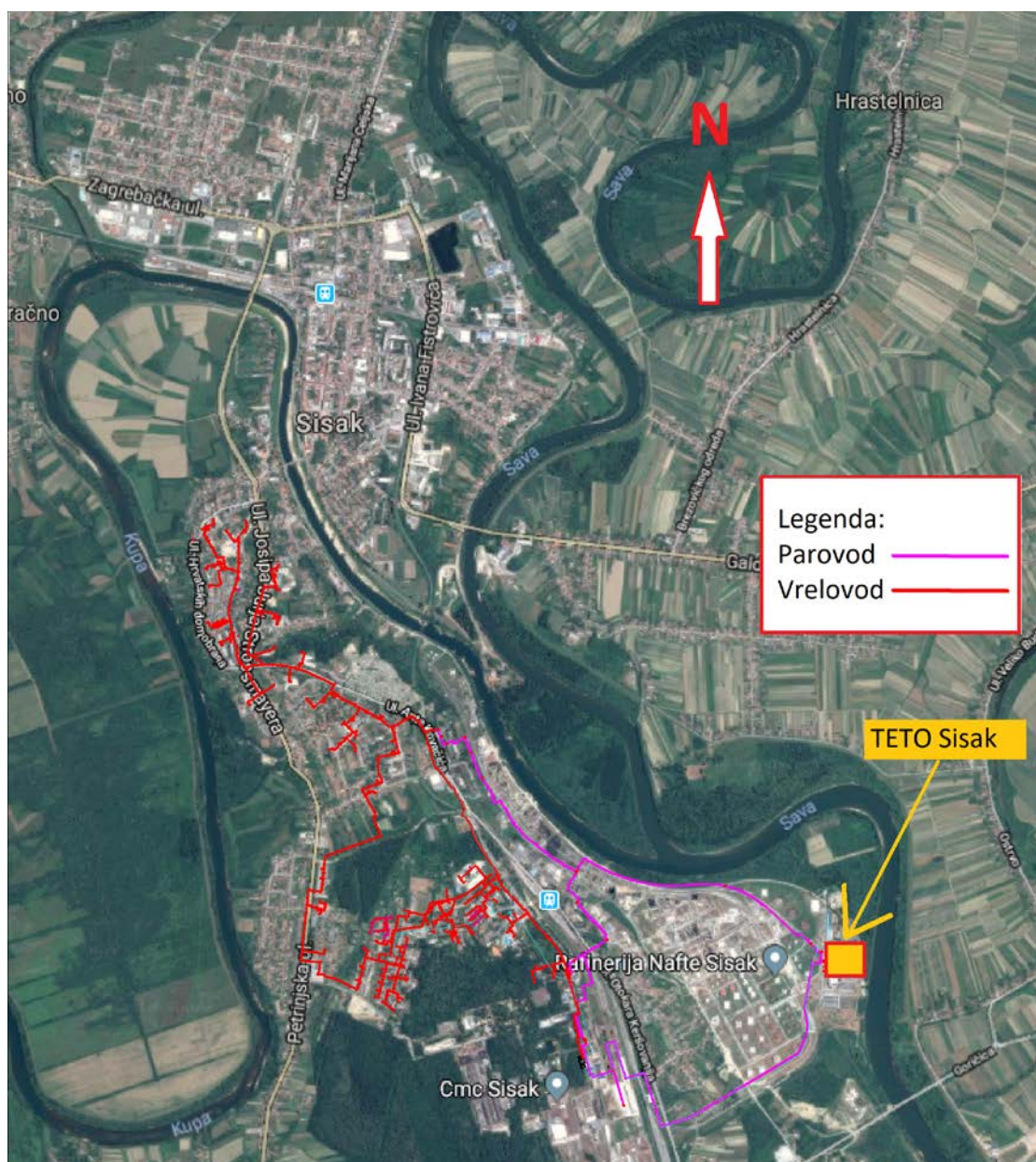
Slika 9. Centralizirani toplinski sustav [5]

#### 3.1. Centralizirani toplinski sustav grada Siska

U gradu Sisku distribucijskom mrežom centraliziranog toplinskog sustava upravlja HEP Toplinarstvo d.o.o. U 2016. godine opskrbljivalo je 4145 kupaca toplotom. Isporučeno je 55387 MWh ogrjevnje topline te 27 352 tona tehnološke pare. [6]

Slika 10. prikazuje kartu CTS-a grada Siska gdje se vidi i pozicija termoelektrane TETO Sisak. Karta je izrađena preklapanjem sheme distribucijske mreže dobivene od HEP Toplinarstva i satelitskog snimka grada Siska izrađenog pomoću Google Mapsa. Na slici 10 rozom bojom su označeni parovodi koji se koriste za opskrbljivanje industrije sa tehničkom parom te za prijenos topline do toplinskih stanica HEP Toplinarstva gdje se izmjenjivačima zagrijava voda za vrelovodni sustav distribucije topline do krajnjih korisnika. Kondenzirana para se vraća povratnim vodom do termoelektrane. Vrelovodni cjevovodi na slici 10 označeni su sa crvenom bojom.

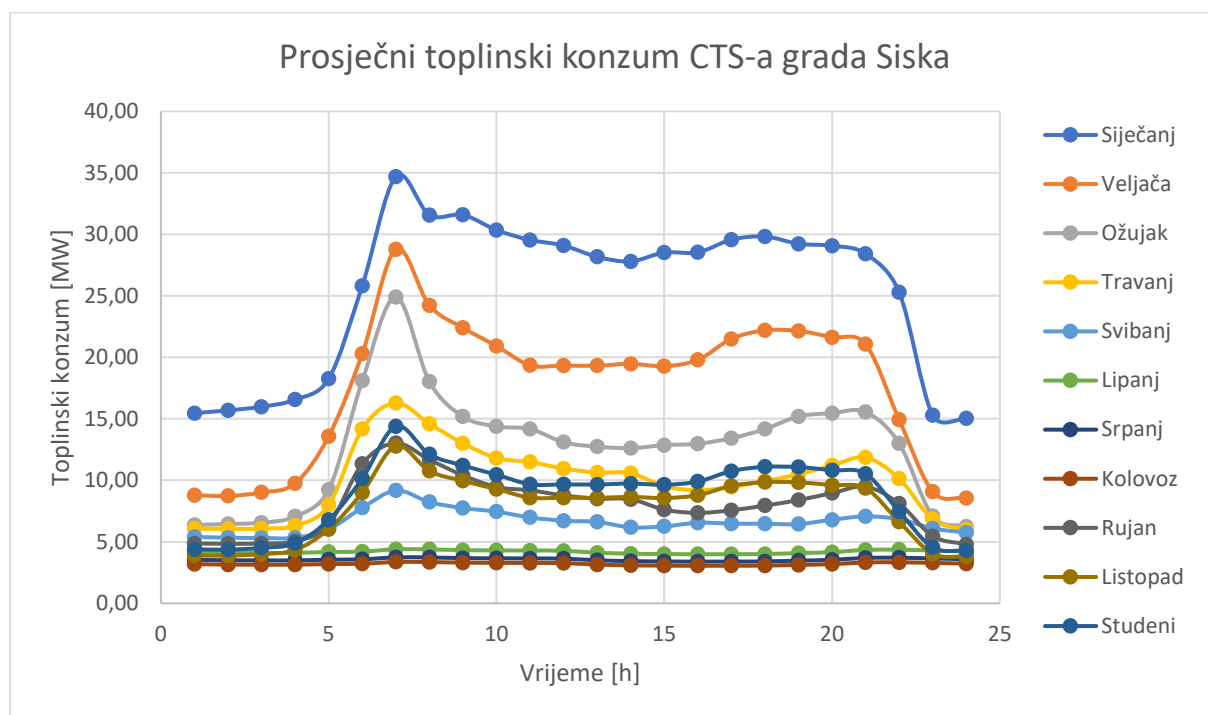
Na karti je također lako uočljivo kako CTS grada Siska pokriva samo jednu polovicu grada, tj. samo dio grada koji se nalazi na desnoj obali rijeke Kupe.



### Slika 10. Karta centraliziranog toplinskog sustava grada Siska

### 3.2. Toplinske potrebe centraliziranog toplinskog sustava grada Siska

Slika 11 prikazuje prosječno dnevno toplinsko opterećenje CTS-a grada Siska po mjesecima za 2017. godinu. U prilogu se nalazi tablični prikaz ovih podataka



**Slika 11. Prosječni dnevni toplinski konzum CTS-a grada Siska**

Podatci o toplinskom konzumu su aproksimirani iz podataka dobivenih od Termoelektrane Sisak o predanoj toplini HEP Toplinarstvu u obliku vode pare 14 bara i 280°C, te iz mjerenja dobivenih od HEP Toplinarstva. Oduzeta para iz kondenzacijske turbine (opisane u poglavlju 2.4.1) se vodi parovodima do toplinskih stanica gdje se preko izmjenjivačima zagrijava voda od vrelovodne toplinske mreže kojom se dalje distribuira toplina po mreži CTS-a.

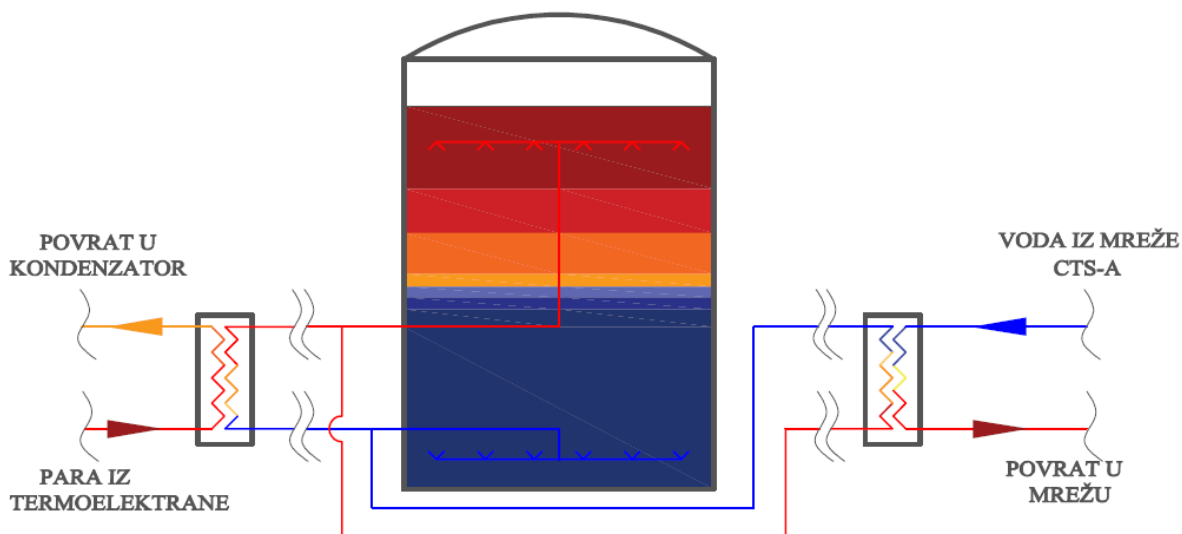
#### 4. TOPLINSKI SPREMNIK

Toplinski spremnik razmatran u ovome radu odnosi se na spremnik energije u kojemu se energija skladišti u obliku osjetne topline vode. Popularno se nazivaju akumulatorima topline. Primjer toplinskog spremnika u sklopu termoelektrane TE-TO Zagreb je opisan u poglavlju 4.1. Kod osjetnih toplinskih spremnika energija se pohranjuje u obliku unutarnje energije medija unutar spremnika bez promjene agregatnog stanja. S obzirom na vezu s izvorom topline i mrežom CTS-a moguće su dvije izvedbe toplinskog spremnika. Spremnici koji su hidraulički spojeni sa mrežnom vodom koja prolazi kroz spremnik i izvedba sa odvojenim optokom vode. U potonjem slučaju se spremnik puni i prazni toplinskom energijom preko površinskih izmjenjivača (2x100 %) voda/voda. U prvom slučaju spremnik se puni direktno iz toplinskog izvora vodom povišene temperature kao nosiocem energije.

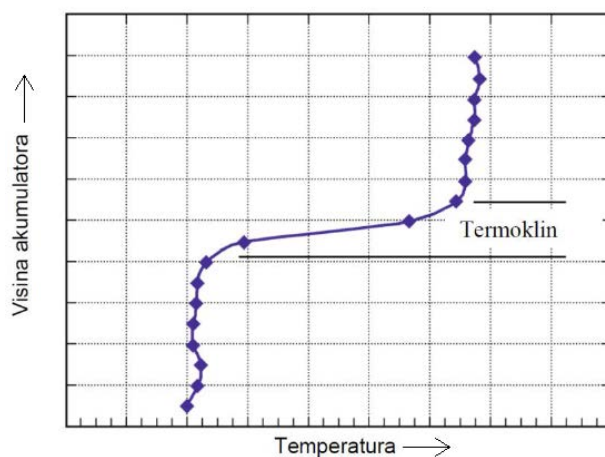
Budući da topla voda ima manju gustoću od hladne vode, pojavljuje se temperaturno raslojavanje vode. Stoga pri punjenju spremnika energijom, ulaz tople vode mora biti pri vrhu spremnika, a izlaz hladne vode pri dnu spremnika. Kod pražnjenja spremnika vrijedi obrnuto, izlaz tople vode mora biti pri vrhu, a ulaz hladne vode pri dnu spremnika. Brzina punjenja i pražnjenja akumulatora mora biti što manja kako bi se osiguralo temperaturno raslojavanje vode i održavanje tzv. toplinskog klina (Slika 13), prijelaznog sloja između hladne i tople vode koji omogućuje korištenje tople vode s vrha iako cijeli spremnik nije na istoj temperaturi. Akumulator mora imati odgovarajuću visinu kako bi se raslojavanje vode moglo održati pri razumnim brzinama punjenja i pražnjenja. U protivnom dolazi do miješanja tople i hladne vode i pri istom toplinskom kapacitetu akumulatora temperaturu tople vode pri pražnjenju nije moguće držati konstantnom već ona stalno pada. [7]

Slika 12 prikazuje shemu toplinskog spremnika i način spajanja sa izvorom topline i mrežom CTS-a pomoću dva izmjenjivača topline.





Slika 12. Shema toplinskog spremnika



Slika 13. Tipični temperaturni profil u akumulatoru topline [7]

Gubitci topline prijelazom topline na okolišni zrak smanjuju se odgovarajućom izolacijom spremnika. Što je veći odnos zapremine prema oplošju akumulatora to su gubitci manji. Ispitivanja na velikim akumulatorima su pokazala da uz odgovarajuću izolaciju (300-500 mm mineralne vune sa zaštitom od aluminijskog lima) ohlađivanje akumulatora je zanemarivo i iznosi dnevno oko 0,025 °C ili tjedno nešto ispod 0,2 °C. [7]

#### 4.1. Akumulator topline u TE-TO Zagreb [8]



**Slika 14. Akumulator topline TE-TO Zagreb [8]**

„Akumulator topline u TE-TO Zagreb (Slika 14) pušten je u rad u prosincu 2015. s ciljem optimizacije proizvodnje električne i toplinske energije i ušteda. Optimizacija proizvodnje postiže se upravljanjem viškom toplinske energije, koji se u akumulatoru pohranjuje u obliku tople vode. Kapacitet akumulatora, koji je visok 53 metra, iznosi 750 MWh, snage 150 MWt pri razlici temperature ulazne i izlazne vode do 40 stupnjeva Celzijusa. Riječ je o prvom projektu takve vrste koji je realiziran u Hrvatskoj, a koji je u skladu s odredbama Trećeg paketa energetske propisa Europske unije značajno poboljšao radnu fleksibilnost TE-TO-a Zagreb te opskrbu toplinskom energijom u Zagrebu.“ [8]



## 5. MATEMATIČKI MODEL

„Matematički model je:

- skup matematičkih izraza koji opisuju uzročne veze između stanja sustava, njihove strukture i utjecaja koji su to stanje izazvali,
- Točna definicija ponašanja nekog idealiziranog sustava, koji je više-manje sličan modeliranom realnom sustavu.

Uzročne veze je matematički moguće formulirati tek uz uvođenje određenih pretpostavki i aproksimacija. Što je opis potpuniji i točniji, to je složeniji i manje prikladan za primjenu stoga težimo kompromisu između točnosti matematičkog modela i prikladnosti za korištenje.“ [9]

U radu je napravljen matematički model termoenergetskog postrojenja u MATLAB-u.

### 5.1. MATLAB

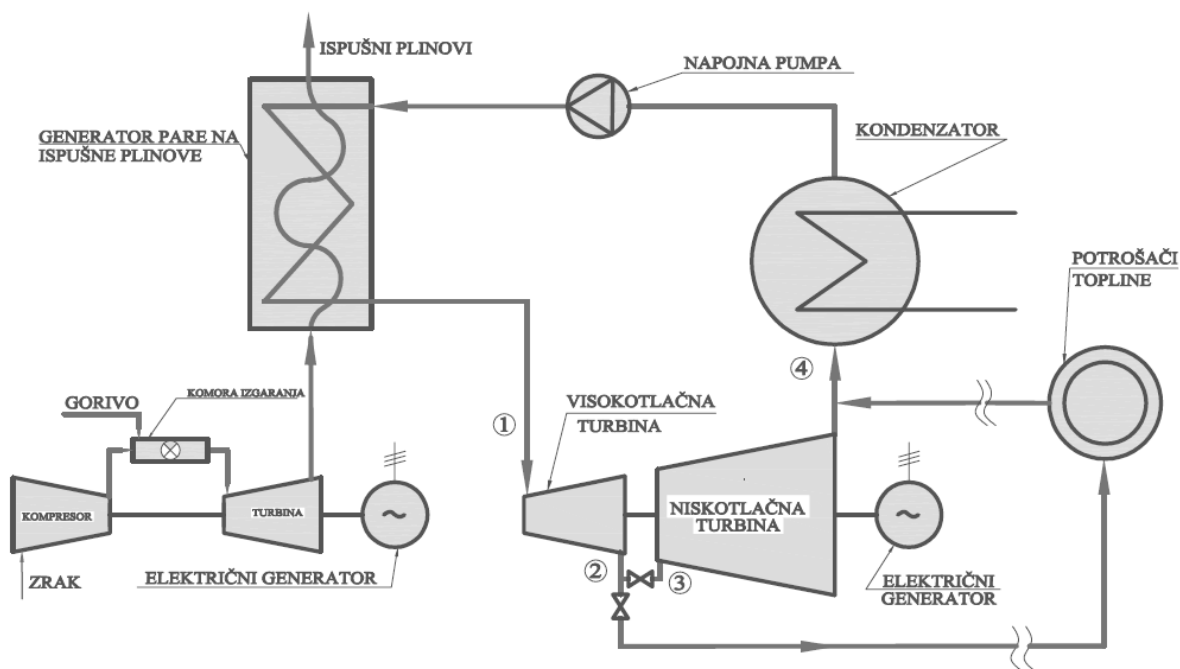
MATLAB je programski jezik visoke razine koji služi za numeričku analizu. Naziv je nastao spajanjem engleskih riječi (MATrix LABoratory). Nastao je kroz usavršavanja paketa LINPACK i EISPACK. Program se intenzivno koristi u industrijskom razvoju kao i praktičnom inženjerstvu. Prva verzija Matlab-a napravljena je na sveučilištima Stanford University i University of New Mexico s ciljem primjene u linearnoj algebri, numeričkoj analizi i matricnoj teoriji. Na početku se temeljio na kompleksnoj matrici kao osnovnom tipu podataka. Ima mogućnost povezivanja s programima pisanim u C, C++, C#, Javi i Fortran-u. Vrlo dobro pokriva sva područja inženjerske djelatnosti kao što su obrada signala, grafičko oblikovanje, automatsko upravljanje, statistička obrada, financijska matematika, simbolička matematika i mnoga druga. [10]

### 5.2. Postrojenje bez toplinskog spremnika

Modelirano termoenergetsko postrojenje sastoji se od plinske turbine, generatora pare na ispušne plinove i parne turbine stoga će se navesti pretpostavke i jednadžbe korištene pri izradi matematičkog modela.

Slika 15 prikazuje shemu postrojenja bez toplinskog spremnika. Proces započinje kompresijom zraka iz okoline pomoću kompresora. U kompresoru se zrak tlači na povišeni tlak te se takvog stanja vodi u komoru izgaranja gdje omogućuje izgaranje ubrizganog goriva. Dimni plinovi nastali izgaranjem ekspandiraju u plinskoj turbini. Nazivna snaga plinske turbine je 160 MW. Nakon ekspanzije u plinskoj turbini, dimni plinovi s temperaturom iznad 500°C vode se u generator pare na ispušne plinove gdje se proizvodi pregrijana vodena para, stanja 75 bara i 525°C, nazivnog protoka 201 t/h. Pregrijana para se vodi do visokotlačne turbine u kojoj

ekspandira do tlaka oduzimanja, iznosa 16 bara. Tada se dio pare oduzima za namirenje toplinskih potreba CTS-a opisanih u poglavlju 3.2. Ostatak pare se odvodi u niskotlačni dio parne turbine. Nazivna snaga parne turbine je 75 MW. Tlak na kraju ekspanzije je jednak tlaku u kondenzatoru i iznosi 0.0317 bar. Kondenzirana para se napojnom pumpom tlači na radni tlak i vodi nazad u generator pare na ispušne plinove čime je krug parnog procesa zatvoren. Raspon radnog opterećenja plinske turbine je od 60% do 100%.



Slika 15. Shemu postrojenja bez toplinskog spremnika

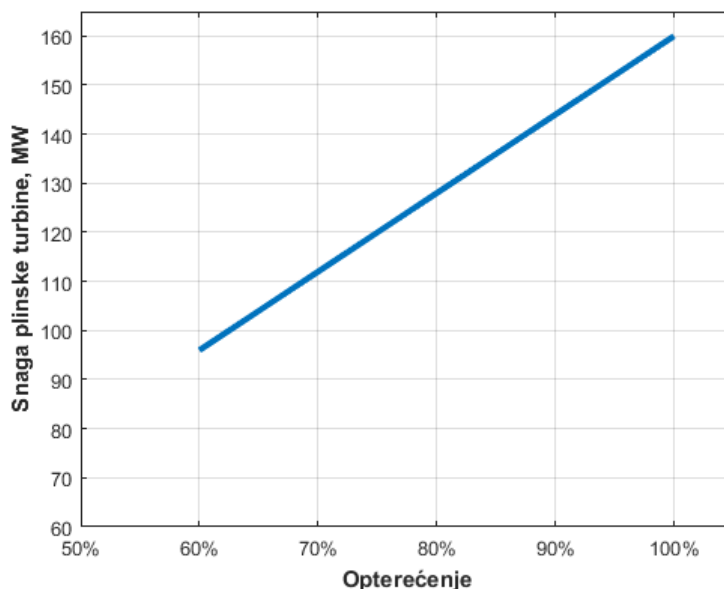
U tablici 1 se nalaze ulazni podatci koji su korišteni u matematičkom modelu.

**Tablica 1. Ulazni podatci**

| Oznaka                    | Vrijednost    | Jedinica |
|---------------------------|---------------|----------|
| $H_d$                     | 46,261        | MJ/kg    |
| <i>Raspon_opterećenja</i> | 60% - 100%    | -        |
| <i>B_raspon</i>           | (6,86 - 9,79) | kg/s     |
| <i>m1_raspon</i>          | (146,8 - 201) | t/h      |
| <i>SnagaPLT_nazivna</i>   | 160           | MW       |
| <i>SnagaPAT_nazivna</i>   | 75            | MW       |
| <i>etaPAT</i>             | 0,9           | -        |
| <i>p1</i>                 | 75            | bar      |
| <i>t1</i>                 | 525           | °C       |
| <i>p2</i>                 | 16            | bar      |
| <i>T_kond</i>             | 25            | °C       |
| <i>p_kond</i>             | 0.0317        | bar      |
| <i>CijenaEE NT</i>        | 50            | EUR/MWh  |
| <i>CijenaEE VT</i>        | 75            | EUR/MWh  |
| <i>Cijena_goriva</i>      | 32,4          | EUR/MWh  |

Za cijenu električne energije na tržištu je uzeta dvotarifna varijanta, sa niskom tarifom iznosa 50 EUR/MWh od 21h do 7 h i sa visokom tarifom od 75 EUR/MWh od 7h do 21h.

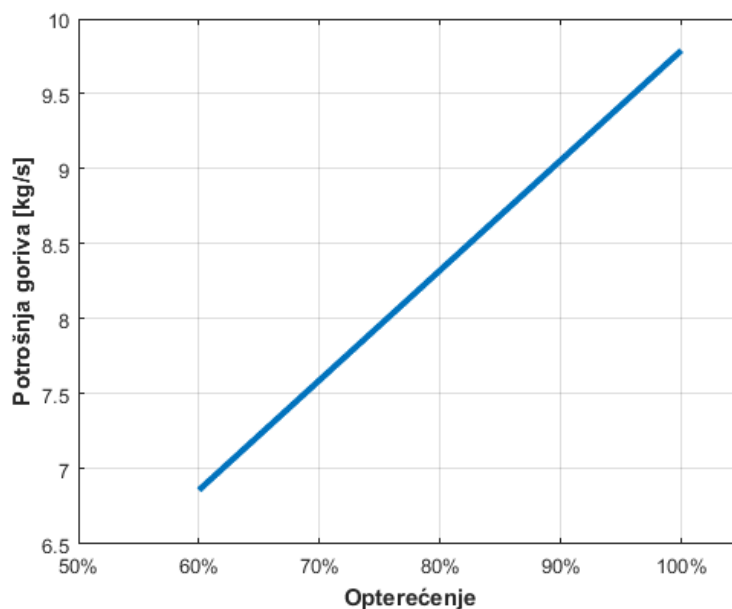
### 5.2.1. Matematički model plinsko-turbinskog postrojenja



**Slika 16. Snaga plinske turbine u ovisnosti o promjeni opterećenja**

Snaga plinske turbine se može linearno aproksimirati iz poznate krivulje opterećenja (Slika 16) prema sljedećem izrazu:

$$Snaga_{PLT} = Snaga_{PLT\_nazivna} \times Faktor\_opterećenja \quad (1)$$



**Slika 17. Potrošnja goriva u ovisnosti o opterećenju**

Potrošnja goriva plinsko-turbinskog postrojenja se također linearno mijenja sa promjenom opterećenja te ju računamo pomoću linearne interpolacije:

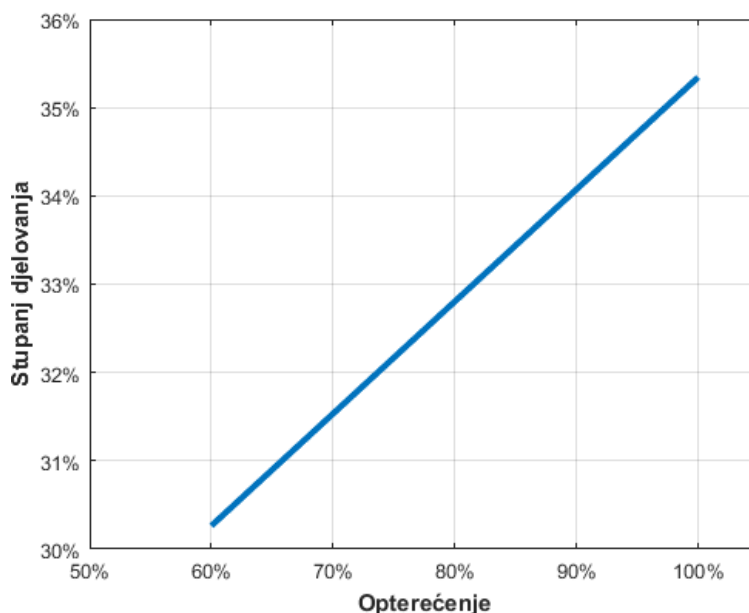
$$B = \frac{B(100\%) - B(60\%)}{(1 - 0,6)} \times (Faktor\_opterećenja - 0.6) \quad (2)$$

U MATLAB-u postoji funkcija `interp1` koja vrši linearnu interpolaciju na zadanom rasponu podataka. Poziva se sa sintaksom:

$$B = \text{interp1}(B\_raspon, Raspon\_opterećenja, Faktor\_opterećenja) \quad (3)$$

Stupanj djelovanja plinskoturbinskog procesa računamo pomoću izraza:

$$\eta_{PLT} = \frac{Snaga_{PLT}}{B \times Hd} \quad (4)$$

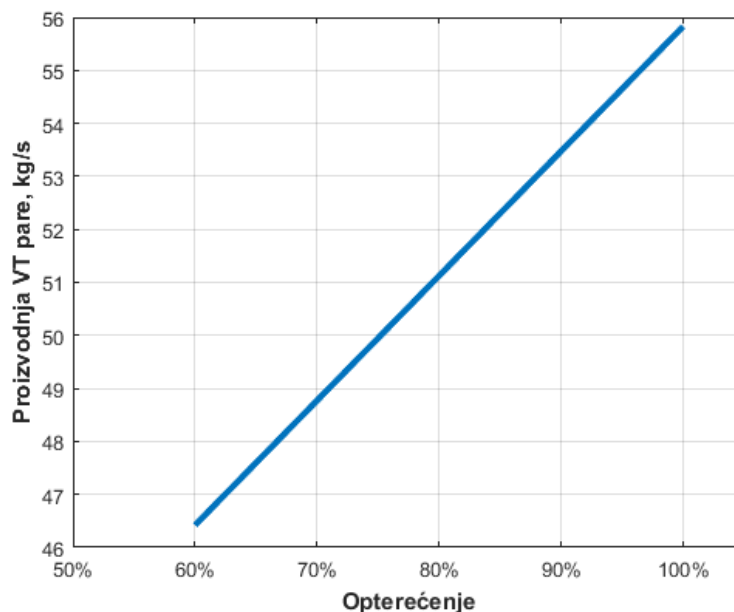


**Slika 18. Stupanj djelovanja plinske turbine u ovisnosti o opterećenju**

Na slici 18 se vidi da se stupanj djelovanja plinske turbine smanjuje sa smanjenjem opterećenja te je najveći pri opterećenju od 100%.

### 5.2.2. Matematički model generatora pare na ispušne plinove

Slika 19 pokazuje aproksimiranu krivulju proizvodnje visokotlačne pare u generatoru pare na ispušne plinove u ovisnosti o opterećenju plinske turbine. Parametri pare su 75 bara i 525°C.



**Slika 19. Proizvodnja VT pare u ovisnosti o opterećenju**

Maseni protok pregrijane pare također računamo pomoću `interp1` funkcije izrazom koji slijedi:

$$m1 = \text{interp1}(m1\_raspon, Raspon\_opterećenja, Faktor\_opterećenja) \quad (5)$$

### 5.2.3. Matematički model parno-turbinskog postrojenja

Stanja vodene pare u radnim točkama su izračunata pomoću `XSteam` funkcije. `XSteam` je funkcija korištena u MATLAB-u za računanje toplinskih stanja vode. Podatke o svojstvima vode i vodene pare bazira na podacima iz IAPWS IF-97 standarda. [11]

Maseni protok visokotlačne (VT) pare na izlazu iz generatora pare na ispušne plinove označavamo sa stanjem 1. Slika 19 pokazuje promjenu masenog protoka VT pare ovisno o opterećenju plinske turbine.

Specifična entalpija vodene pare stanja 1 je:

$$h1 = XSteam('h\_pt', p1, T1) \quad (6)$$

Specifična entropija točke jedan izražena je izrazom:

$$s1 = XSteam('s\_pt', p1, T1) \quad (7)$$

Stanje točke 2 računamo pomoću specifične entalpije pomoćne točke 2is do koje bi para ekspandirala kad bi ekspanzija u turbini bila izentropska:

$$h2is = XSteam('h\_ps', p2, s1) \quad (8)$$

Stvarnu specifičnu entalpiju točke 2 izračunavamo pomoću izraza u koji je uračunat stupanj djelovanja turbine:

$$h2 = h1 - \eta_{PAT} * (h1 - h_{2is}) \quad (9)$$

Specifična entropija točke 2 izražena je izrazom:

$$s2 = XSteam('s_{pt}', p2, h2) \quad (10)$$

Kada znamo iznose specifičnih entalpija u točkama 1 i 2 možemo izračunati snagu visokotlačnog djela parne turbine prema izrazu:

$$Snaga_{PAT\_VT} = m1 * (h1 - h2) \quad (11)$$

Nakon kraju visokotlačnog djela turbine vrši se oduzimanje pare stanja 2 u svrhu namirenja toplinskih potreba CTS-a. Toplinske potrebe CTS-a detaljnije su opisane u poglavlju 3.2.

Iz poznatog toplinskog opterećenja izračunat će se potrebno oduzimanje pregrijane pare.

Maseni protok  $m2$  iznosi:

$$m2 = \frac{Toplinsko\_opterećenje}{h2 \times 1000} \quad (12)$$

Preostalu paru nakon oduzimanja označavamo sa stanjem 3.

$$m3 = m1 - m2 \quad (13)$$

Parametri stanja 3 su jednaki stanju 2.

$$h3 = h2 \quad (14)$$

$$s3 = s2 \quad (15)$$

Stanje 4 računamo na isti način kao i stanje 2. Prvo odredimo specifičnu entalpiju pomoćne točke 4is do koje bi se došlo izentropskom ekspanzijom do tlaka u kondenzatoru.

$$h_{4is} = XSteam('h_{ps}', p_{kond}, s3) \quad (16)$$

Zatim uračunamo stupanj djelovanja turbine da bismo dobili stvarno stanje 4:

$$h4 = h3 - \eta_{PAT} \times (h3 - h_{4is}) \quad (17)$$

Nakon toga možemo pomoću XSteam izračunati sadržaj pare točke 4 da bismo provjerili je li unutar dozvoljenih granica:

$$x4 = XSteam('x_{ph}', p_{kond}, h4) \quad (18)$$

Snaga niskotlačnog dijela parne turbine ovisi o oduzimanju pare te se izračuna prema izrazu:

$$Snaga_{PAT\_NT} = m3 \times (h3 - h4) \quad (19)$$

Ukupna snaga parne turbine je jednaka:

$$SnagaPAT = SnagaPAT\_VT + SnagaPAT\_NT \quad (20)$$

Ukupna snaga kombiniranog postrojenja je jednaka zbroju snage parne i snage plinske turbine:

$$SnagaUK = SnagaPAT + SnagaPLT \quad (21)$$

Proizvedena električna energija u jednom satu je jednaka ukupnoj snazi kombiniranog postrojenja:

$$Proizvedena\_EE(sat) = SnagaUK(sat) \quad (22)$$

Prihodi od prodaje električne energije u jednom satu su jednaki:

$$Prihodi(sat) = ProizvedenaEE(sat) \times CijenaEE(sat) \quad (23)$$

Rashodi u ovom radu se odnose samo na cijenu goriva.

$$Rashodi(sat) = B(sat) \times Cijena\_goriva \quad (24)$$

Dobit po satu je jednaka razlici prihoda i rashoda.

$$Dobit(sat) = Prihod(sat) - Rashod(sat) \quad (25)$$

Ukupna zarada po danu se dobije sumiranje Dobiti kroz 24 sata.

$$Dobit\_dan = \sum_{sat=1}^{24} Dobit(sat) \quad (26)$$

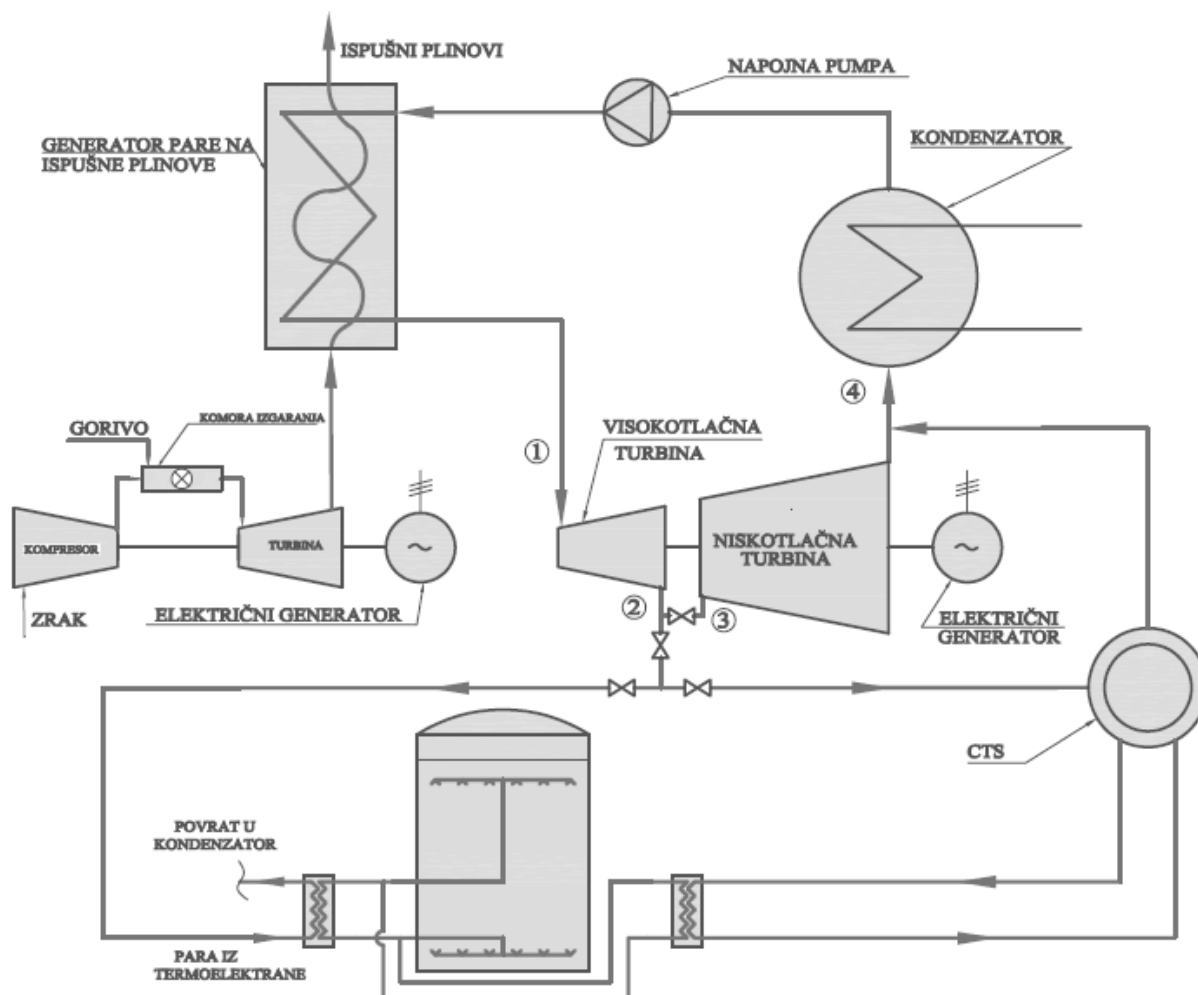
Ukupni stupanj iskoristivosti za proizvodnju električne energije kombiniranog postrojenja se računa prema:

$$\eta_{UK} = \frac{SnagaUK}{B \times Hd} \quad (27)$$

Prihod od prodaje toplinske energije nije uziman u obzir pošto je taj iznos fiksni i vezan uz toplinski konzum te samim time ne utječe na optimizaciju.



### 5.3. Postrojenje s toplinskim spremnikom



Slika 20. Shema postrojenja s toplinskim spremnikom

Matematički model postrojenja sa toplinskim spremnikom ne razlikuje se značajno od matematičkog modela postrojenja bez spremnika. Jedina razlika je što toplinski spremnik omogućuje da oduzimanje pregrijane pare ne mora nužno u svakom satu zadovoljavati toplinske potrebe CTS-a već se ono može namirivati i iz toplinskog spremnika, ako u njemu ima raspoložive energije.

Akumulacija energije u spremniku ovisi o stanju napunjenosti spremnika u prethodnom satu te o razlici između snage oduzimanja sa parne turbine i toplinskog konzuma CTS-a u tome satu. Ako je snaga oduzimanja veća od toplinskog konzuma CTS-a, količina energije sadržane u spremniku će porasti za njihovu razliku. Ako je toplinski konzum veći od snage oduzimanja s

parne turbine, onda će se toplinski spremnik prazniti te namirivati razliku između toplinskog konzuma i snage oduzimanja. Akumulirana energija u spremniku se računa prema izrazu:

$$A(sat + 1) = A(sat) + Snaga\_oduzimanja - Toplinsko\_opterećenje \quad (28)$$

Za ograničenje je u MATLAB-u moralo biti uvedeno da napunjenost spremnika ne može biti manja od nule što nije fizikalno. Za gornju granicu kapaciteta toplinskog spremnika nisu uvedena ograničenja.

Prihod, rashod i dobit u danu se računaju na isti način kao u poglavlju 5.2.

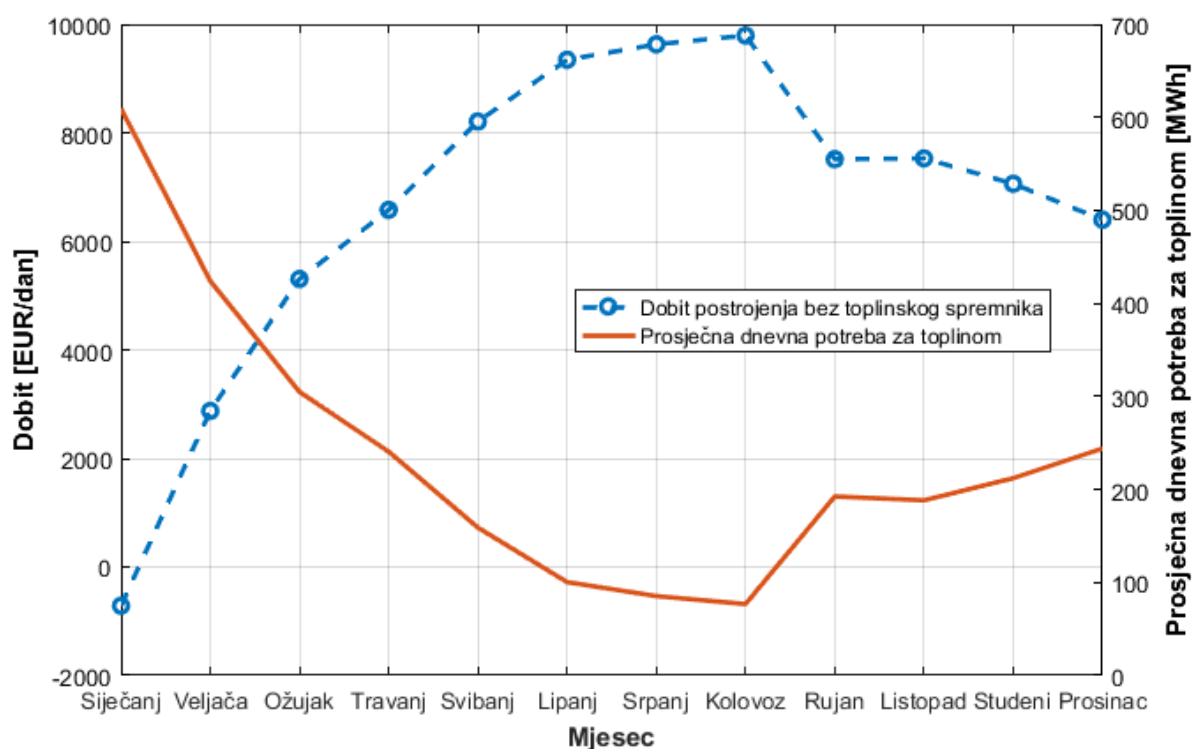
#### 5.4. Optimizacija

Rad postrojenja sa i bez toplinskog spremnika je optimiziran u MATLAB-u pomoću optimizacijskog algoritma „fmincon“. Optimizacija se vršila tako da je za funkciju cilja bilo zadano da se nađe maksimalna ostvariva dobit karakterističnog dana za svaki od 12 mjeseci uz obavezno namirenje toplinskog konzuma CTS-a. Optimizacijske varijable za postrojenje sa spremnikom su bile faktor opterećenja postrojenja te maseni protok oduzete pare stanja 2, a za postrojenje bez spremnika, optimizacijska varijabla je samo faktor opterećenja.

## 6. REZULTATI

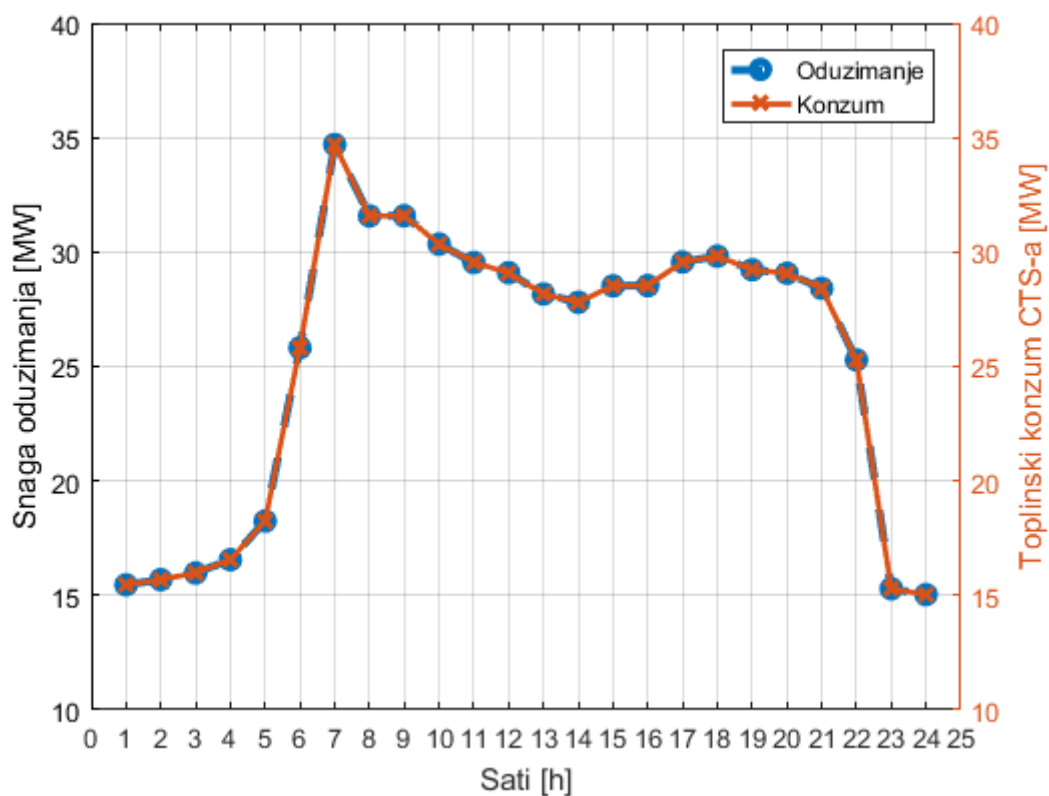
### 6.1. Postrojenje bez toplinskog spremnika

Slika 21. prikazuje iznose dnevne dobiti kroz 12 mjeseci i iznose prosječne dnevne potrebe za toplinom CTS-a. Iz grafa je se vidi da postrojenje posluje s većom dobiti od prodaje električne energije u mjesecima kada je toplinsko opterećenje CTS-a manje jer se tada manja količina pare oduzima koja bi inače proizvodila snagu na niskotlačnom dijelu parne turbine. Prihodi od prodaje toplinske energije nisu uračunati jer je to fiksni iznos i ne ovisi o optimizaciji postrojenja.

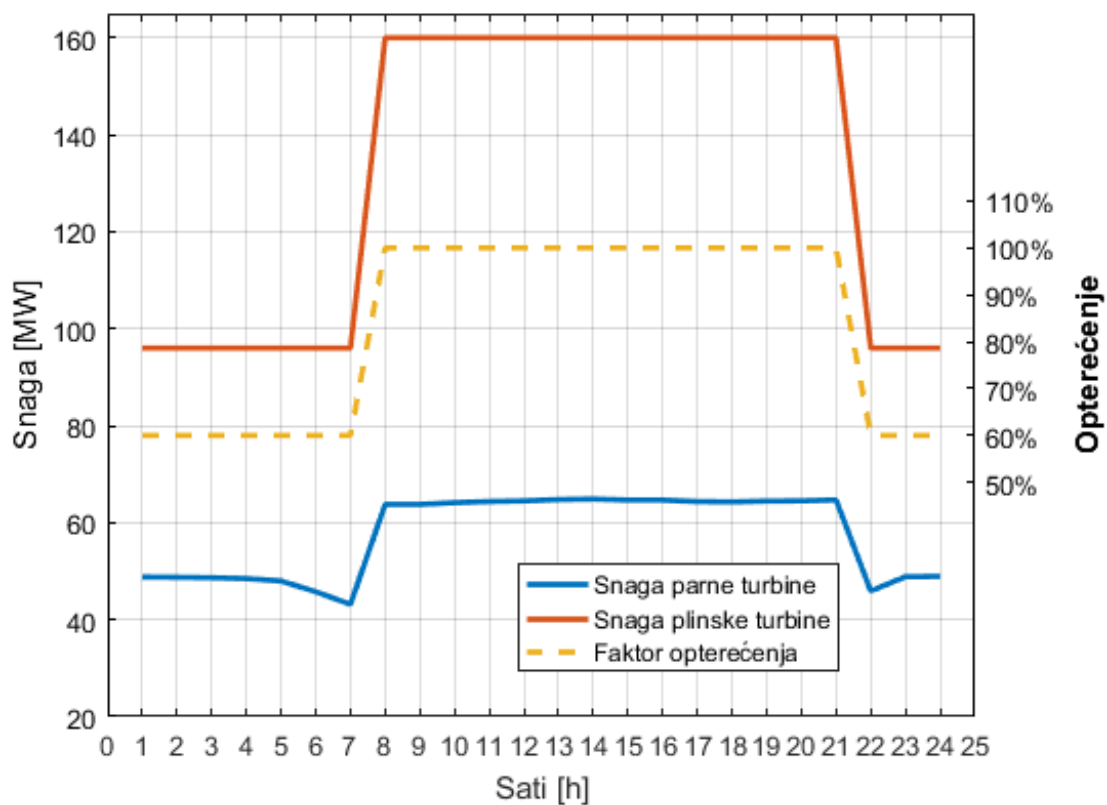


Slika 21. Dobit i toplinski konzum kroz godinu

Slika 22 prikazuje potrebni toplinski konzum za CTS i snagu oduzimanja za karakteristični dan u siječnju. Iz slike se jasno vidi kako optimizacijski algoritam zadovoljava uvjet da u svakom satu mora zadovoljiti potrebe CTS-a s prikladnim protokom oduzete pare.



Slika 22. Krivulje snage oduzimanja i toplinskog konzuma za siječanj



Slika 23. Snage turbina u karakterističnom danu siječnja

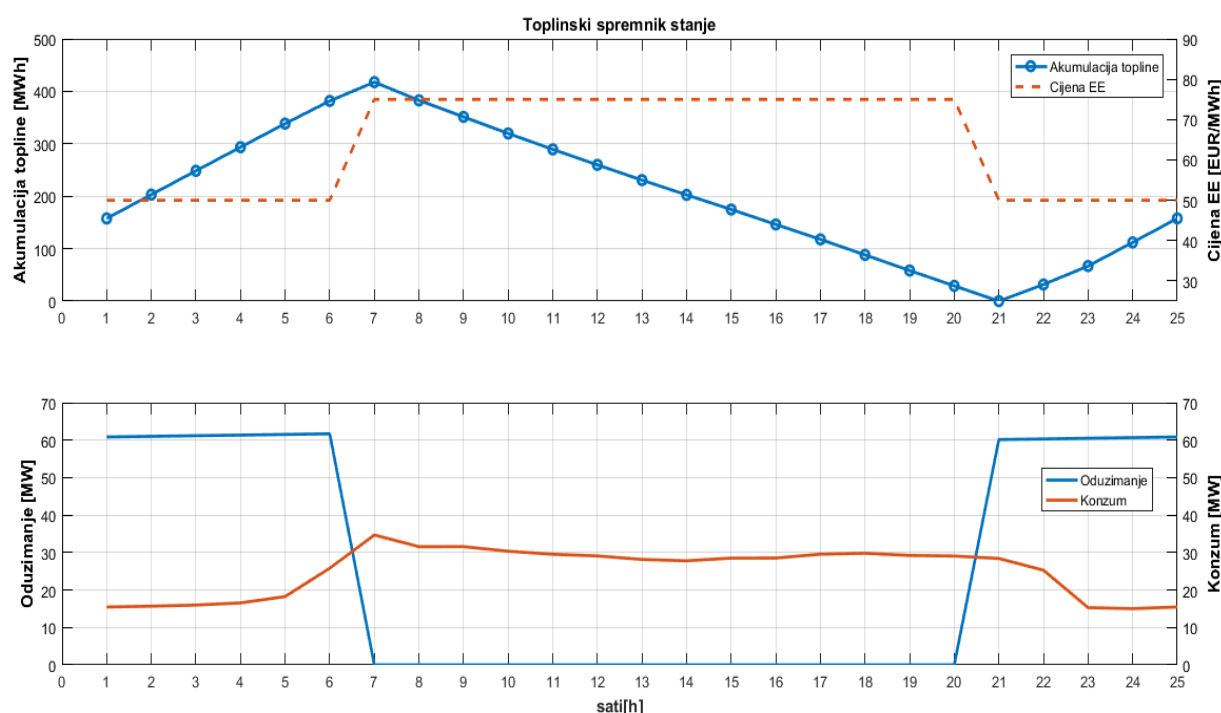
Slika 23 pokazuje krivulju opterećenja kombiniranog postrojenja. Optimizacijski algoritam je za sate kada vrijedi visoka cijena struje odredio da je najprofitabilnije da elektrana radi sa 100% opterećenja, a dok je niska cijena električne energije da radi sa 60%-tnim opterećenjem. Tako je odabrano jer je cijena električne energije za vrijeme niske tarife ispod granične cijene profitabilnosti. Granična cijena električne energije pri kojoj postrojenje posluje s nulom, uz cijenu goriva od 32,4 EUR/MWh, pri 100%-tnom opterećenju je 62,27 EUR/MWh, a pri 60%-tnom opterećenju je 69,72 EUR/MWh. Cijena je različita jer se sa smanjenjem opterećenja stupanj djelovanja smanjuje. Prema tome, postrojenje u satima kada je cijena električne energije niska smanjuje opterećenje na minimum koji zadovoljava toplinske potrebe CTS-a te proizvodi što manju količinu električne energije da bi njime generirala manji ukupni gubitak.

U svim ostalim mjesecima optimizacijski algoritam je odredio slične rezultate. Odlučujući faktor za određivanje optimalnog faktora opterećenja je cijena električne energije u tome satu.

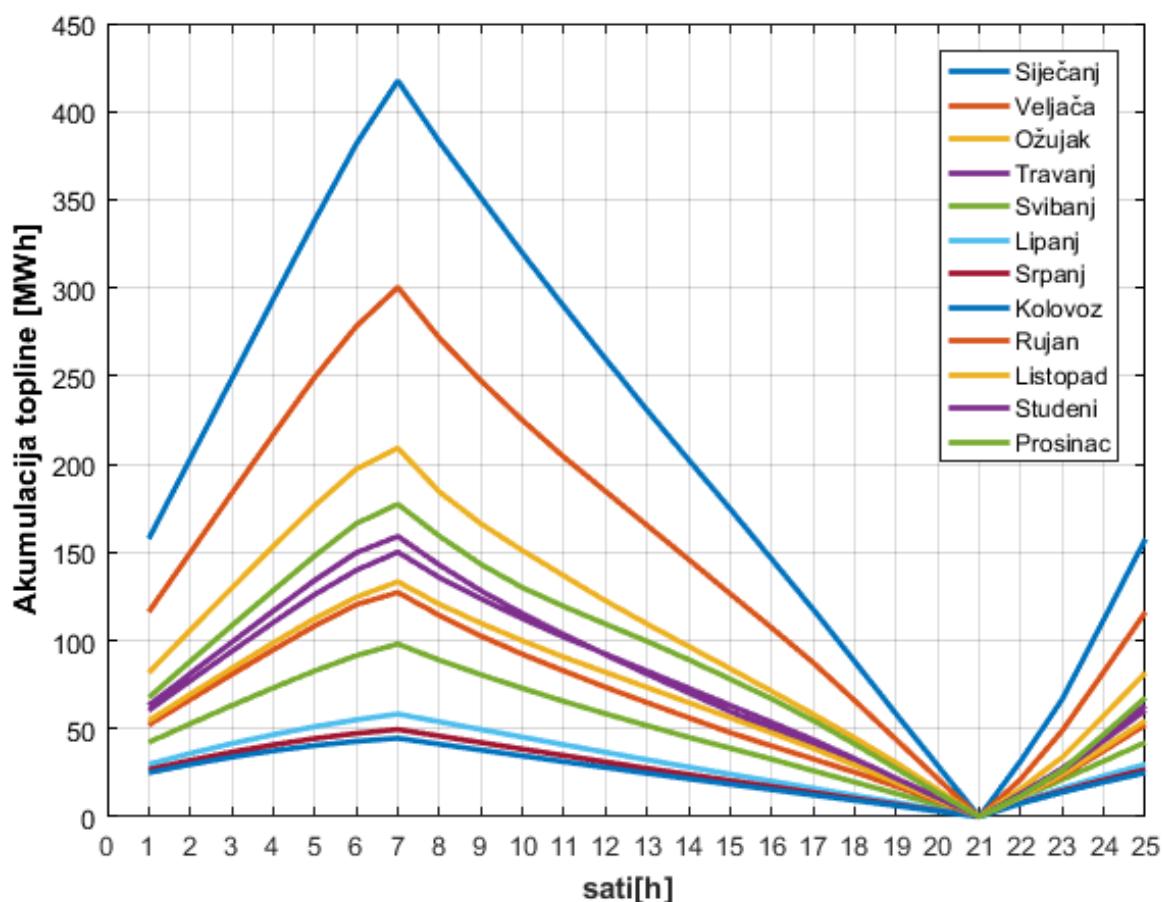
## 6.2. Postrojenje s toplinskim spremnikom

Slika 24 prikazuje ponašanje postrojenja za karakteristični dan u siječnju. Na donjem dijagramu slike 24 je vidljivo kako postojanje toplinskog spremnika utječe na razdvajanje veze između snage oduzimanja i toplinskog konzuma. Bez toplinskog spremnika te krivulje su se morale preklapati kako bi se u svakom zadovoljio toplinski konzum s prikladnim protokom oduzete pare (Slika 22). Kod postrojenja s toplinskim spremnikom to više nije slučaj.

Iz dijagrama na slici 24 vidimo kako se kroz 24 sata mijenja stanje napunjenosti toplinskog spremnika. Stanje napunjenosti spremnika u 1. satu dana jednako je stanju zadnjeg sata prethodnog dana. Optimizacijski algoritam je odredio da je optimalno da se toplinski spremnik puni u satima dok je na snazi niska cijena električne energije, a da se prazni za vrijeme visoke cijene te da se toplinske potrebe CTS-a u tim satima u potpunosti namiruju iz toplinskog spremnika. Time je u satima visoke cijene električne energije oduzimanje pare svedeno na nulu te je sva proizvedena para iskorištena za proizvodnju električne energije. Toplinski spremnik se isprazni u 21. satu dana kada nastupa niska cijena električne energije te tada započinje njegovo punjenje do 7. sata idućeg dana kada nastupa visoka cijena električne energije.



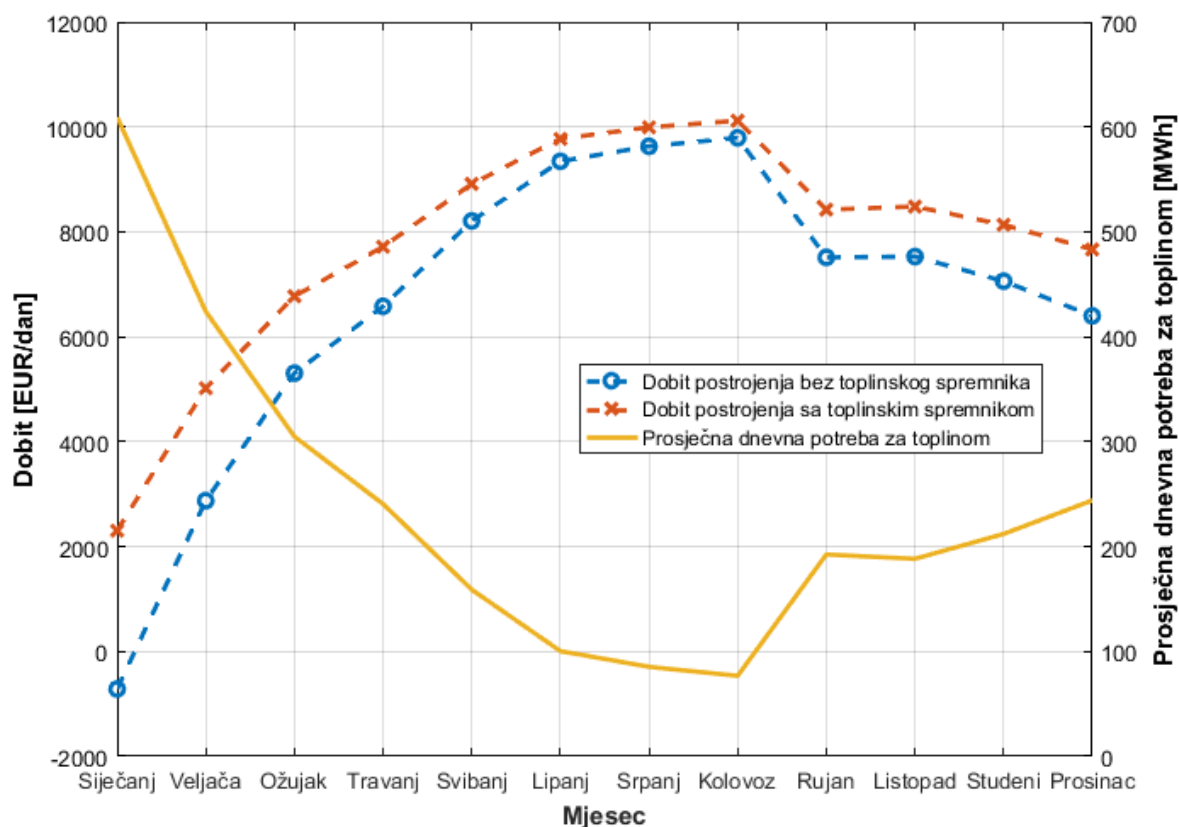
Slika 24. Stanje spremnika, krivulje oduzimanja i konzuma za siječanj



**Slika 25. Akumulacija spremnika kroz mjesece**

Slika 25 prikazuje ponašanje toplinskog spremnika u karakterističnim danima za svih dvanaest mjeseci godine. Vidljivo je da se sa smanjenjem toplinskog konzuma smanjuje i potrebni maksimalni kapacitet toplinskog spremnika. Najveći zahtijevani toplinski kapacitet toplinskog spremnika je dobiven za karakteristični dan u siječnju i iznosi 417 MWh.

Slika 26 prikazuje usporedbu dobiti po danu za svih 12 mjeseci godine za postrojenje bez toplinskog spremnika i za postrojenje s toplinskim spremnikom. Najveći porast dobiti kod postrojenja s toplinskim spremnikom, u odnosu na postrojenje bez spremnika, je u zimskim mjesecima kada je toplinski konzum najveći. Tada se najveći dio proizvodnje pare namijenjene za namirivanje toplinskog konzuma CTS-a može, pomoću toplinskog spremnika, vremenski prebaciti u period dok je na snazi niska cijena električne energije. Postrojenje u tom slučaju može proizvoditi više električne energije u satima kad je cijena električne energije visoka.



**Slika 26. Dobit i toplinski konzum kroz godinu**

Sumiranjem dobiti po danima za jednu godinu dolazimo do ukupne dobiti postrojenja za godinu dana. U slučaju postrojenja bez toplinskog spremnika godišnja dobit iznosi: 2 426 001 EUR, a za postrojenje s toplinskim spremnikom godišnja dobit iznosi: 2843 565 EUR što je povećanje od 17%.



## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirana je integracija toplinskog spremnika u kombinirano kogeneracijsko termoenergetsko postrojenje na prirodni plin koje ima obvezu podmirivanja toplinskog konzuma centraliziranog toplinskog sustava. Modelirano termoenergetsko postrojenje proizvedenu električnu energiju prodaje na dvotarifnom električnom tržištu sa cijenom visoke tarife od 75 EUR/MWh i niske tarife od 50 EUR/MWh. Granični iznos cijene električne energije pri kojoj je trošak goriva jednak zaradi od prodaje električne energije je poprilično visok zbog niskog stupnja djelovanja kombiniranog postrojenja te za 100%-tno opterećenje iznosi 62,27 EUR/MWh, a za 60%-tno opterećenje iznosi 69,72 EUR/MWh. Cijena prirodnog plina iznosi 32,6 EUR/MWh.

Za optimalni rad postrojenja najveći zahtijevani toplinski kapacitet toplinskog spremnika je dobiven za karakteristični dan u siječnju i iznosi 417 MWh.

Iz rezultata je vidljivo da je u slučaju integracije takvog toplinskog spremnika, u prethodno opisano postrojenje, godišnja dobit porasla za 17%.

Porast dobiti se ostvaruje tako da se toplinski spremnik puni u satima dok je na snazi niska cijena električne energije, a da se prazni za vrijeme visoke cijene te da se toplinski konzum CTS-a djelomično ili u potpunosti namiruju iz toplinskog spremnika. Time je u satima visoke cijene električne energije oduzimanje pare smanjeno te je više proizvedene pare iskorišteno za proizvodnju električne energije.

## LITERATURA

- [1] Ž. Bogdan, Termoeenergetska postrojenja; interna skripta, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [2] Centar za praćenje poslovanja energetskog sektora i investicija (CEI), [Mrežno]. Available: <http://cei.hr/projekti/završeni-projekti/te-sisak-izgradnja-13/>. [Pokušaj pristupa 10. 2. 2018].
- [3] B. Matijašević, Turbostrojevi I; podloge za predavanja, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [4] Tehničko-tehnološko rješenje postrojenja Kombi kogeneracijske elektrane Sisak 230 MWe/50 MWt – TE Sisak blok C, Zagreb: HEP-Proizvodnja d.o.o., prosinac 2013.
- [5] K. Thorsson/Fortum, Artist, [Art].
- [6] »Godišnje izvješće 2016.«, HEP d.d., Zagreb, 2016..
- [7] Tehnokom d.o.o., »TS15 Spremnik mazuta - Revizija studije TS14,« Zagreb, 30. lipnja 2016..
- [8] »Energetika-net,« [Mrežno]. Available: <http://www.energetika-net.com/vijesti/instalacije-termotehnika-i-voda/akumulator-topline-uskoro-u-novom-ruhu-23511>. [Pokušaj pristupa 10. Veljače 2018.].
- [9] N. Šerman, Regulacija procesa, radna verzija interne skripte, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [10] »Wikipedia,« [Mrežno]. Available: <https://hr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>. [Pokušaj pristupa 5. 2. 2018.].
- [11] [Mrežno]. Available: <http://xsteam.sourceforge.net/>. [Pokušaj pristupa 18. 2. 2018.].
- [12] »Energetika-net,« [Mrežno]. Available: [http://images.energetika-net.com/media/article\\_images/big/te-sisak-portal-20151104155229653.jpg](http://images.energetika-net.com/media/article_images/big/te-sisak-portal-20151104155229653.jpg). [Pokušaj pristupa 12. Veljače 2018.].

---

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Toplinski konzum CTS-a
- III. MATLAB skripta za optimizaciju postrojenja bez toplinskog spremnika
- IV. MATLAB skripta za optimizaciju postrojenja s toplinskim spremnikom

## Prilog II

## Toplinski konzum CTS-a

| Toplinski konzum CTS-a [MW] |          |         |        |         |         |        |        |         |       |          |        |          |
|-----------------------------|----------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|-------|----------|--------|----------|
| Sat                         | Siječanj | Veljača | Ožujak | Travanj | Svibanj | Lipanj | Srpanj | Kolovoz | Rujan | Listopad | Studen | Prosinac |
| 1                           | 15,46    | 8,78    | 6,37   | 6,07    | 5,40    | 4,16   | 3,53   | 3,18    | 4,86  | 3,90     | 4,39   | 4,60     |
| 2                           | 15,69    | 8,73    | 6,44   | 6,05    | 5,33    | 4,11   | 3,50   | 3,15    | 4,84  | 3,87     | 4,36   | 4,81     |
| 3                           | 15,98    | 9,01    | 6,56   | 6,08    | 5,31    | 4,10   | 3,49   | 3,14    | 4,86  | 4,00     | 4,51   | 5,01     |
| 4                           | 16,56    | 9,76    | 7,06   | 6,31    | 5,33    | 4,10   | 3,49   | 3,14    | 5,05  | 4,33     | 4,88   | 5,31     |
| 5                           | 18,25    | 13,58   | 9,22   | 7,98    | 6,03    | 4,17   | 3,55   | 3,19    | 6,38  | 6,03     | 6,79   | 6,79     |
| 6                           | 25,82    | 20,29   | 18,09  | 14,17   | 7,77    | 4,20   | 3,57   | 3,22    | 11,33 | 9,01     | 10,14  | 15,40    |
| 7                           | 34,69    | 28,79   | 24,90  | 16,28   | 9,17    | 4,39   | 3,74   | 3,36    | 13,02 | 12,78    | 14,39  | 21,67    |
| 8                           | 31,57    | 24,22   | 18,03  | 14,59   | 8,23    | 4,38   | 3,73   | 3,35    | 11,67 | 10,76    | 12,11  | 19,26    |
| 9                           | 31,58    | 22,40   | 15,19  | 13,01   | 7,75    | 4,32   | 3,67   | 3,30    | 10,41 | 9,95     | 11,20  | 15,83    |
| 10                          | 30,35    | 20,92   | 14,38  | 11,81   | 7,45    | 4,30   | 3,66   | 3,29    | 9,45  | 9,29     | 10,46  | 12,90    |
| 11                          | 29,54    | 19,35   | 14,17  | 11,48   | 6,98    | 4,29   | 3,65   | 3,28    | 9,19  | 8,59     | 9,67   | 11,89    |
| 12                          | 29,09    | 19,33   | 13,10  | 10,96   | 6,71    | 4,27   | 3,63   | 3,27    | 8,77  | 8,58     | 9,67   | 11,76    |
| 13                          | 28,17    | 19,32   | 12,73  | 10,64   | 6,62    | 4,11   | 3,50   | 3,15    | 8,51  | 8,58     | 9,66   | 12,53    |
| 14                          | 27,80    | 19,47   | 12,62  | 10,58   | 6,17    | 4,03   | 3,43   | 3,09    | 8,46  | 8,65     | 9,74   | 13,15    |
| 15                          | 28,52    | 19,28   | 12,86  | 9,51    | 6,26    | 4,00   | 3,40   | 3,06    | 7,61  | 8,56     | 9,64   | 13,63    |
| 16                          | 28,53    | 19,79   | 12,97  | 9,19    | 6,55    | 3,99   | 3,39   | 3,05    | 7,35  | 8,79     | 9,90   | 14,59    |
| 17                          | 29,56    | 21,50   | 13,42  | 9,46    | 6,48    | 3,99   | 3,39   | 3,05    | 7,57  | 9,55     | 10,75  | 16,06    |
| 18                          | 29,82    | 22,18   | 14,17  | 9,93    | 6,46    | 4,01   | 3,40   | 3,06    | 7,94  | 9,85     | 11,09  | 16,62    |
| 19                          | 29,23    | 22,15   | 15,20  | 10,49   | 6,44    | 4,08   | 3,47   | 3,12    | 8,39  | 9,83     | 11,07  | 16,68    |
| 20                          | 29,07    | 21,63   | 15,45  | 11,20   | 6,79    | 4,16   | 3,54   | 3,18    | 8,96  | 9,60     | 10,81  | 16,22    |
| 21                          | 28,42    | 21,06   | 15,55  | 11,85   | 7,07    | 4,34   | 3,69   | 3,32    | 9,48  | 9,35     | 10,53  | 16,14    |
| 22                          | 25,29    | 14,92   | 13,00  | 10,13   | 6,83    | 4,36   | 3,70   | 3,33    | 8,10  | 6,63     | 7,46   | 12,21    |
| 23                          | 15,29    | 9,08    | 7,09   | 6,82    | 6,09    | 4,29   | 3,65   | 3,28    | 5,46  | 4,03     | 4,54   | 5,26     |
| 24                          | 15,03    | 8,56    | 6,24   | 5,98    | 5,75    | 4,21   | 3,58   | 3,22    | 4,78  | 3,80     | 4,28   | 4,44     |

## Prilog III

## MATLAB skripta za optimizaciju postrojenja bez toplinskog spremnika

```

%++++++Optimizacija postrojenja BEZ spremnik++++++
function BezSpremnika()
%++++++ ULAZNI PODATCI ++++++
Hd=46.241; % MJ/kg prirodni plin
Cijena_goriva=9*3.6; % EUR/MWh (9 EUR/GJ)
Cijena_EE=[50 50 50 50 50 50 50 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 50 50 50];
KonzumX=load('CTS_Toplinski_Konzum_12_mjeseci.mat');
Konzum=[KonzumX.Konzum9];
SnagaPLT_nazivna=160000; % kW plinska turbina

%----- potrošnja goriva i proizvodnja VT pare

Raspon_opterecenja=[0.6 1]; % vektor opterećenja
B_raspon=[6.86 9.79]*3600; % kg/h
m1_raspon=[146.8 201]/3.6; %kg/s proizvodnja VT pare

%-----stanje 1 - pregrijana para VT
T1=525; %°C
p1=75; %bar

h1=XSteam('h_pt',p1,T1);
s1=XSteam('s_pt',p1,T1);
etaPAT=0.9; %stupanj djelovanja parne turbine

%-----stanje 2 - oduzimanje
p2=16; % bar, tlak oduzimanja
h2is=XSteam('h_ps',p2,s1);
h2=h1-etaPAT*(h1-h2is);
s2=XSteam('s_ph',p2,h2);
T2=XSteam('T_ph',p2,h2);

%-----kondenzator
T_kond=25; %C Rijeka Sava
p_kond=XSteam('pSat_t',T_kond); % bar, tlak u kondenzatoru

%-----stanje 3
h3=h2;
s3=s2;
%-----stanje 4
h4is=XSteam('h_ps',p_kond,s3);
h4=h3-etaPAT*(h3-h4is);
s4=XSteam('s_ph',p_kond,h4);
x_kond=XSteam('x_ph',p_kond,h4);

%-----inicijalna pretpostavka za fmincon
x0= repmat(0.99,1,24);
%-----upper and lower boundry za fmincon
ub= repmat(1,1,24);
lb= repmat(0.6,1,24);

Display='iter';
options=gaoptimset('Display',Display,'UseParallel','always');

%++++++ fmincon ++++++
[x,fval]=fmincon(@funkcijacilja,x0,[],[],[],[],lb,ub,[],options);

save('workspace.mat')

%++++++ FUNKCIJA CILJA ++++++
function Dobit = funkcijacilja(x)
for sat=1:24
    B(sat)=interp1(Raspon_opterecenja,B_raspon,x(sat));
    m1(sat)=interp1(Raspon_opterecenja,m1_raspon,x(sat));

    m2(sat)=Konzum(sat)*1000/(h2); %kg/s oduzimanje za CTS
    m3(sat)=m1(sat)-m2(sat);

    Snaga_oduzimanja=(m2*h2)/1000; %MW

    SnagaPAT_VT(sat)=m1(sat)*(h1-h2);
    SnagaPAT_NT(sat)=m3(sat)*(h3-h4);

```

```

% ukupna snaga ST
SnagaPAT(sat)=SnagaPAT_VT(sat)+SnagaPAT_NT(sat); % kW

% ukupna snaga GT
SnagaPLT(sat)=x(sat)*SnagaPLT_nazivna; % kW

% ukupna proizvedena EE
Proizvedena_EE(sat)=(SnagaPLT(sat)+SnagaPAT(sat))/1000;% MWh

Rashod(sat)=(B(sat)*Hd/3600)*Cijena_goriva; %EUR/h
Prihod(sat)=Proizvedena_EE(sat)*Cijena_EE(sat);

end

Dobit=sum(Rashod)-sum(Prihod);
Dobit1=Dobit

end
end

```

## Prilog IV

### MATLAB skripta za optimizaciju postrojenja s toplinskim spremnikom

```

%++++++Optimizacija postrojenja SA spremnikom++++++

function SaSpremnikom()
%++++++ ULAZNI PODATCI ++++++
Hd=46.241; % MJ/kg, prirodni plin
Cijena_goriva=9*3.6; % EUR/MWh (9 EUR/GJ)
Cijena_EE=[50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75];
KonzumX=load('CTS_Toplinski_Konzum_12_mjeseci');
Konzum=[KonzumX.Konzum12(21:24) KonzumX.Konzum12(1:20)];
SnagaPLT_nazivna=160000; % plinska turbina, kW

%----- potrošnja goriva i proizvodnja VT pare
Raspon_opterecenja=[0.6 1]; % vektor opterećenja
B_raspon=[6.86 9.79]*3600; % protok goriva kg/h
m1_raspon=[146.8 201]/3.6; %kg/s proizvodnja VT pare

%-----stanje 1 - pregrijana para VT
T1=525; %°C
p1=75; %bar
h1=XSteam('h_pt',p1,T1);
s1=XSteam('s_pt',p1,T1);
etaPAT=0.9; %stupanj djelovanja parne turbine
%-----stanje 2 - oduzimanje
p2=16; % bar, tlak oduzimanja
h2is=XSteam('h_ps',p2,s1);
h2=h1-etaPAT*(h1-h2is);
s2=XSteam('s_ph',p2,h2);
T2=XSteam('T_ph',p2,h2);
%-----kondenzator
T_kond=25; %C Rijeka Sava
p_kond=XSteam('pSat_t',T_kond); % bar, tlak u kondenzatoru
%-----stanje 3
h3=h2;
s3=s2;
%-----stanje 4
h4is=XSteam('h_ps',p_kond,s3);
h4=h3-etaPAT*(h3-h4is);
s4=XSteam('s_ph',p_kond,h4);
x_kond=XSteam('x_ph',p_kond,h4);

m_kond_min=5.6;% minimalni protok kroz kondenzator(10% nazivnog), kg/s
A(1)=0; % akumulacija topline u pocetku (akumulirana masa pare), kg/s

%-----upper and lower boundry za fmincon
ub1=repmat(1,1,24); % gornja granica za opterećenje
lb1=repmat(0.6,1,24); % donja granica za opterećenje
ub2=repmat(50,1,24); % gornja granica za m2 oduzimanje kg/s
lb2=repmat(0,1,24); % donja granica za m2
ub=[ub1, ub2];
lb=[lb1, lb2];

%-----inicijalna pretpostavka za fmincon

```

```

x011=repmat(0.8,1,10);
x012=repmat(0.8,1,14);
x021=repmat(15,1,10);
x022=repmat(2,1,14);
x0=[x011, x012, x021, x022];

Display='iter';
options=gaoptimset('Display',Display);
%+++++ fmincon %+++++
[x,fval]=fmincon(@funkcijacilja,x0,[],[],[],[],lb,ub,@nonlcon,options);
funkcijacilja(x);

save('workspace.mat');

%+++++ FUNKCIJA CILJA %+++++
function Dobit = funkcijacilja(x)
    for sat=1:24

        B(sat)=interp1(Raspon_opterecenja,B_raspon,x(sat));
        m1(sat)=interp1(Raspon_opterecenja,m1_raspon,x(sat));

        m2(sat)=x(24+sat); %kg/s

        if m2(sat)>m1(sat)-m_kond_min
            m2(sat)=m1(sat)-m_kond_min; %minimalni protok kroz NT
        end

        Snaga_oduzimanja=(m2*h2)/1000; %MW

        m3(sat)=m1(sat)-m2(sat);

        SnagaPAT_VT(sat)=m1(sat)*(h1-h2);
        SnagaPAT_NT(sat)=m3(sat)*(h3-h4);

        % --- ukupna snaga ST
        SnagaPAT(sat)=SnagaPAT_VT(sat)+SnagaPAT_NT(sat); % kW
        % --- ukupna snaga GT
        SnagaPLT(sat)=x(sat)*SnagaPLT_nazivna; % kW
        % --- ukupna proizvedena EE
        Proizvedena_EE(sat)=(SnagaPLT(sat)+SnagaPAT(sat))/1000; % MWh

        Rashod(sat)=(B(sat)*Hd/3600)*Cijena_goriva; %EUR/h
        Prihod(sat)=Proizvedena_EE(sat)*Cijena_EE(sat);
        Dobit_sat(sat)=Prihod(sat)-Rashod(sat);

        A(sat+1)=A(sat)+x(24+sat)-Konzum(sat)*1000/h2;
        A_MWh(sat+1)=A(sat+1)*h2/1000;

    end
    Dobit=sum(Rashod)-sum(Prihod);
    Dobit1=Dobit;

end

function [c,ceq]=nonlcon(x)

    for sat=1:24
        A(sat+1)=A(sat)+x(24+sat)-Konzum(sat)*1000/h2;
        c(1,sat)=-A(sat+1);
        ceq=[];
    end
end
end

```