

# Parno turbinsko postrojenje na drvenu biomasu za proizvodnju električne i toplinske energije

---

**Hrastić, Mihael**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:381836>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PARNO TURBINSKO POSTROJENJE NA DRVNU BIOMASU ZA  
PROIZVODNJU ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

Rijeka, srpanj 2024.

Mihael Hrastić

0069090085

Zavod: Zavod za termodinamiku i energetiku  
Predmet: Energetski sustavi

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Mihael Hrastić (0069090085)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)

Zadatak: **Parno turbinsko postrojenje na drvenu biomasu za proizvodnju električne i toplinske energije / Combined heat and power plant on woody biomass with Steam turbine**

### Opis zadatka:

Potrebno je izraditi tehničko rješenje kogeneracijskog energetskog postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom na drvenu biomasu na području Gorskog kotra, koje će proizvoditi 3 MW električne i 10 MW toplinske energije. Toplinski izvor je generator pare radnog tlaka pare 30 bar i temperature 300°C. Za zadane uvjete treba izraditi koncept postrojenja s toplinskom shemom i proračunom energetske bilance, izbor, proračun i opis glavne opreme te proračun potrošnje goriva (drvne biomase).

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

Komentor:  
izv. prof. dr. sc. Vladimir Glažar

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

# IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno uz usmjerenje mentora izv. prof. dr. sc. Igora Bonefačića, vodeći se uputama pisanja završnog rada te navedene literature i znanjem stečenim na prijediplomskom studiju.

# ZAHVALA

Zahvaljujem se svim profesorima tijekom studiranja, a posebnu zahvalu upućujem svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Igoru Bonefačiću, koji mi je pomagao, usmjeravao me prema pravom smjeru i utrošio svoje vrijeme za izradu ovog završnog rada.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KOGENERACIJSKO POSTROJENJE.....	2
3. IDEJNO RJEŠENJE SUSTAVA .....	5
4. PRORAČUN KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA.....	6
4.1. Parametri stanja fluida u postrojenju .....	8
4.2. Proračun toplinske bilance.....	15
4.3. Ukupna iskoristivost postrojenja .....	18
5. PRORAČUN POTROŠNJE DRVNE BIOMASE .....	20
5.1. Kemijski sastav goriva.....	20
5.2. Donja ogrjevna moć goriva .....	22
5.3. Potrošnja goriva .....	24
5.4. Proračun emisija izgaranja drvene biomase .....	25
6. IZBOR I OPIS GLAVNE OPREME .....	28
6.1. Generator pare .....	28
6.2. Parna turbina.....	29
6.3. Kondenzator.....	30
6.4. Izmjenjivač topline za potrošnju.....	34
6.5. Otplinjač .....	34
7. ZAKLJUČAK .....	36
LITERATURA .....	37
POPIS SLIKA .....	38
POPIS TABLICA .....	39
POPIS OZNAKA .....	40
SAŽETAK .....	47
SUMMARY .....	48

## 1. UVOD

Tema završnog rada je izraditi tehničko rješenje kogeneracijskog energetskeg postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom na području Gorskog kotara koja kao gorivo koristi drvenu biomasu. Zadatak uključuje izradu koncepta postrojenja s toplinskom shemom i proračunavanje energetskeg bilanci za cijeli sustav. Također je potrebno izabrati, proračunati i opisati glavnu opremu te proračunati potrošnju drvene biomase kao gorivo.

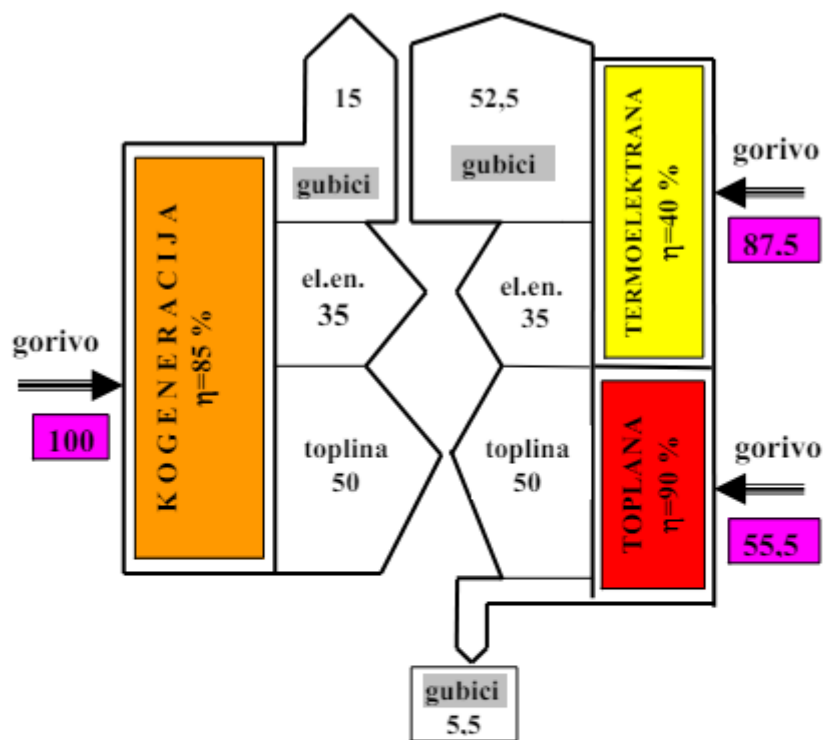
U današnjem svijetu sve se više okrećemo prema obnovljivim energetskeg izvorima. Fosilna goriva, kao što su nafta, ugljen i zemni plin, svojim nepovoljnim utjecajem na okoliš, ograničenim resursima i visokom cijenom glavni su razlozi zašto sve više težimo prema obnovljivim izvorima energije.

Povišenjem cijena primarne energije teži se prema sve učinkovitijim načinima proizvodnje energije. Kogeneracijski energetskeg sustav upravo je jedan od tih načina jer se istovremeno proizvodi toplinska i električna energija iz istog energenta.

Drvena biomasa nije samo obnovljivi izvor energije, već ima i niski štetni utjecaj na okoliš. Rastom šuma, tijekom korištenja drvene biomase, ne dolazi do dodatnih emisija ugljičnog dioksida jer se on procesom fotosinteze apsorbira. Povećanjem cijena fosilnih goriva drvena biomasa mogla bi postati jedan od glavnih izvora energije. Hrvatska, svojim bogatim šumskim područjima, ima visok potencijal za korištenje drvene biomase.

## 2. KOGENERACIJSKO POSTROJENJE

Kogeneracijski energetski sustav ili kogeneracija je suproizvodnja električne i toplinske energije radi smanjenja gubitaka topline koji se nepovratno gube u okolinu. Toplina koja se proizvede u kogeneracijskom postrojenju najčešće se koristi za grijanje naselja, ali može se koristiti za tehnološke potrebe vlastite ili neke druge industrije. Kogeneracijsko postrojenje, za istu količinu goriva, ima 30 % veću učinkovitost od odvojene proizvodnje toplinske i električne energije te ima pozitivan učinak na emisiju stakleničkih plinova.



- Razlika potrošnje goriva =  $(87,5 + 55,5) - 100 = 43\%$
- Relativna ušteda goriva =  $\frac{(87,5 + 55,5) - 100}{87,5 + 55,5} \cdot 100 = 30\%$
- Gubici kogeneracije = 15 (15 %)
- Gubici odvojene proizvodnje = 58 (40,5 %)

Slika 2.1. Usporedba odvojene proizvodnje energije i kogeneracije [1]



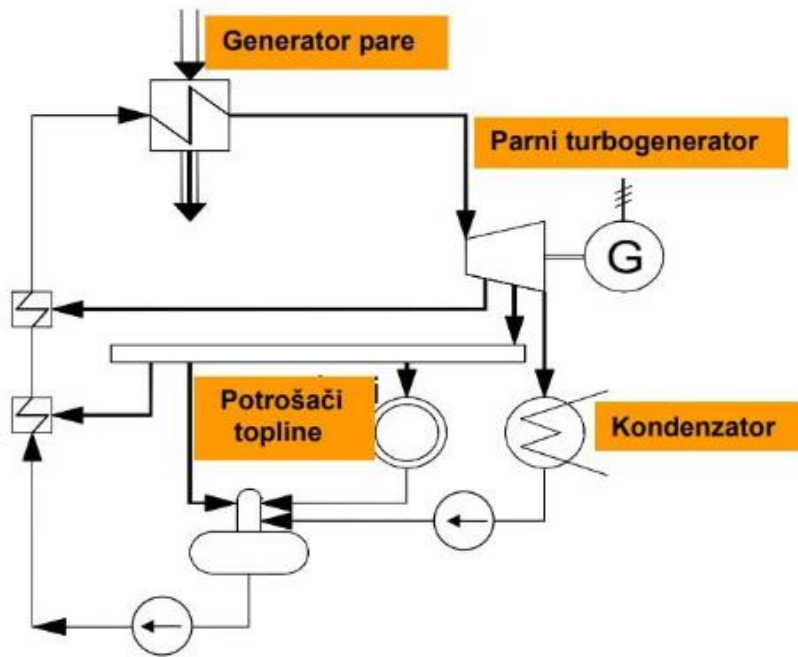
Sukladno tome kogeneracijska postrojenja su ekonomičnija, sigurnija su i fleksibilnija te smanjuju emisiju ugljikovog dioksida. Negativna strana kogeneracijskih postrojenja su visoka početna ulaganja, ali su dugoročno isplativija.

Dizel, benzin, prirodni plin, biogorivo i ugljen su vrste goriva koja se mogu koristiti kod kogeneracijskih postrojenja. Najčešće vrste kogeneracijskih postrojenja su:

- kogeneracijski sustavi s parnom turbinom
- kogeneracijski sustavi s plinskom turbinom
- kogeneracijski sustavi s motorom s unutrašnjim izgaranjem
- integrirani kogeneracijski sustavi
- kogeneracijski sustavi s gorivim ćelijama
- kogeneracijski sustavi s magnetohidrodinamskim generatorom.

Kogeneracijski sustavi s parnom turbinom mogu biti s protutlačnom turbinom ili s kondenzacijskom turbinom uz oduzimanje pare. Najviše se koriste kogeneracijski sustavi s protutlačnom turbinom zbog njene visoke iskoristivosti i relativno malih troškova ulaganja.

Prema zadanim uvjetima u zadatku za ovo postrojenje usvojen je kogeneracijski sustav s kondenzacijskom turbinom uz regulirano oduzimanje pare. Kod ovog tipa kogeneracijskog sustava, dio pare se oduzima i preusmjerava potrošačima topline, dok ostatak pare ekspandira.



*Slika 2.2. Shema kogeneracijskog sustava s kondenzacijskom turbinom uz oduzimanje pare [1]*

### **3. IDEJNO RJEŠENJE SUSTAVA**

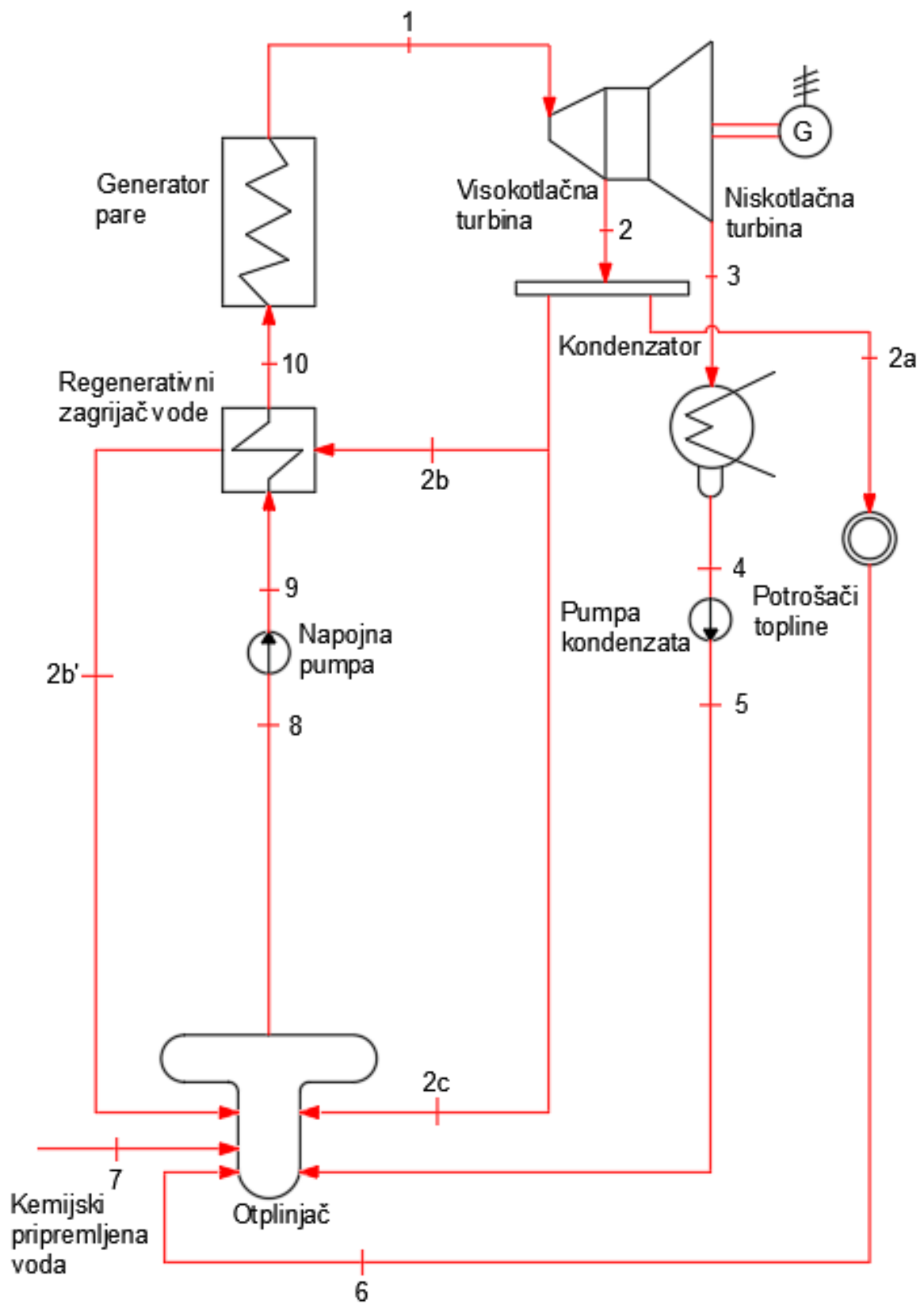
Prema zadanom zadatku, idejno rješenje položaja kogeneracijskog postrojenja na drvenu biomasu treba biti na prostoru Gorskog kotara. Grad Delnice je najveći grad na ovom području te se zbog relativno dobrog položaja i razvijene drvne industrije čini kao optimalno rješenje kao lokacija za izgradnju kogeneracijskog postrojenja na drvenu biomasu. U blizini Delnica, točnije u Fužinama, nalazi se najveća hrvatska drvna industrija Drvenjača d.d. te se također blizu nalazi pilana Mrkopalj. Grad Delnice također je smješten pokraj autoceste Zagreb-Rijeka te je time moguć brzi transport biomase do postrojenja.

## 4. PRORAČUN KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA

Za veličine koje su zadane potrebno je odrediti idejno rješenje kogeneracijskog postrojenja. Zadani su tlak i temperatura pregrijane pare koju moramo proizvesti u generatoru pare koji iznose  $p_1 = 30$  bar i  $\theta_1 = 300$  °C. Također zadane su snaga električne energije koje je potrebno osigurati u iznosu od  $P_e = 3$  MW te potreba za toplinskom energijom koja iznosi  $\Phi_{ts} = 10$  MW. Ostale podatke, kao što je entalpija, po određenim dijelovima postrojenja nalazimo u tablicama za zasićenu i pregrijanu paru te u Mollierovom h-s dijagramu za vodenu paru. Koristeći entalpije iz pojedinog dijela postrojenja izračunati ćemo masene protoke u svakom dijelu postrojenja, toplinske bilance te izračunati potrošnju goriva s obzirom na vlažnost drvene biomase. Dijelovi kogeneracijskog postrojenja na drvnu biomasu su:

- Generator pare na drvnu biomasu
- Parno-turbinsko postrojenje s reguliranim oduzimanjem
- Izmjenjivač topline za potrošače i razdjelnik
- Kondenzator
- Spremnik napojne vode ili otplinjač
- Kemijska priprema vode
- Termičke pripreme vode
- Ložišta
- Spremišta drvene biomase

Na slici 4.1. predočena je shema parnog kogeneracijskog postrojenja s reguliranim oduzimanjem pare.



Slika 4.1. Shema kogeneracijskog postrojenja

#### 4.1. Parametri stanja fluida u postrojenju

Svi parametri su izvučeni iz toplinskih tablica za zasićenu i pregrijanu vodenu paru te iz Mollierovog h-s dijagrama za vodenu paru.

Točka 1 – Stanje pare na ulazu u turbinu:

- Tlak pregrijane pare na ulazu u turbinu:

$$p_1 = 30 \text{ bar} \quad (4.1.)$$

- Temperatura pregrijane pare na ulazu u turbinu:

$$\theta_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (4.2.)$$

Iz tablica za pregrijanu paru se na temelju tlaka i temperature pare na izlazu iz generatora pare očitavaju entalpija i entropija pare.

- Entalpija pregrijane pare na ulazu u turbinu:

$$h_1 = 2988 \text{ kJ/kg} \quad (4.3.)$$

- Entropija pregrijane pare na ulazu u turbinu:

$$s_1 = 6,530 \text{ kJ/kgK}. \quad (4.4.)$$

Točka 2 – Stanje pare pri reguliranom oduzimanju pare

- Tlak pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju:

$$p_2 = 16 \text{ bar}. \quad (4.5.)$$

Pod uvjetom da je  $s_1 = s_2$  interpolacijom podataka iz toplinskih tablica za pregrijanu paru dobivamo temperaturu pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju.

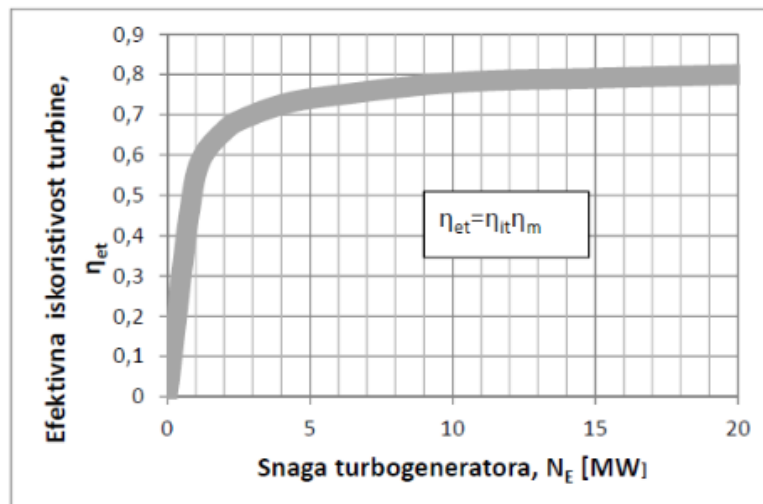
- Temperatura pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju:

$$\theta_2 = 234,63 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (4.6.)$$

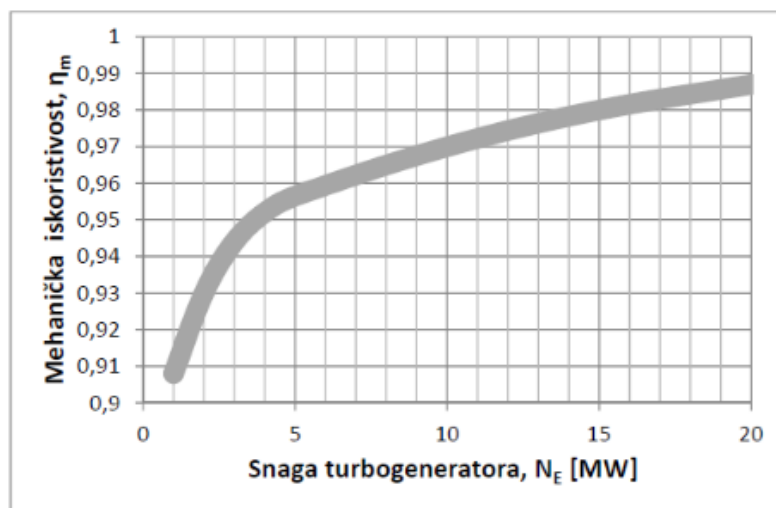
Entalpiju pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju dobijemo iz poznatog tlaka pri kojem se para oduzima i poznate entropije iz točke 1. Iz tablica za pregrijanu paru očitana entalpija pri reguliranom oduzimanju pare za idealni slučaj iznosi:

$$h_{2i} = 2846,07 \text{ kJ/kg}. \quad (4.7.)$$

Kako u realnom slučaju imamo gubitke u turbini entalpija će biti veća jer moramo više energije utrošiti da bi savladali te gubitke. Porastom entalpije raste i entropija jer se pad ne odvija adijabatski, već politropski. Koeffcijent unutarnje iskoristivosti turbine računa se prema izrazu (4.10.), a podaci za njegov izračun očitavaju se iz dijagrama sa slike 4.2. i iz dijagrama sa slike 4.3.



Slika 4.2. Efektivna korisnost turbine [4]



Slika 4.3. Mehanička iskoristivost turbine [4]

- Očitana efektivna iskoristivost za snagu od 3 MW:

$$\eta_{\text{ef}} = 0,7 \quad (4.8.)$$

- Očitana mehanička iskoristivost za snagu od 3 MW:

$$\eta_m = 0,94. \quad (4.9.)$$

Unutarnja iskoristivost turbine računa se prema izrazu (4.10.):

$$\eta_{i,t} = \frac{\eta_{ef}}{\eta_m} = 0,745. \quad (4.10.)$$

Stvarna entalpija pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju računa se prema formuli (4.11.):

$$h_2 = h_1 - (h_1 - h_{2i}) \cdot \eta_{i,t} \quad (4.11.)$$

- Stvarna vrijednost entalpije u točki 2:

$$h_2 = 2882,26 \text{ kJ/kg} \quad (4.12.)$$

- Stvarna vrijednost entropije u točki 2:

$$s_2 = 6,60 \text{ kJ/kgK}. \quad (4.13.)$$

Točka 3 – Stanje pare na ulazu u kondenzator

Odabrani tlak u kondenzatoru iznosi 0,1 bar te ćemo pomoću njega i poznate entropije iz stanja dva odrediti stanje pare u kondenzatoru. Kao i u prethodnoj točki postoje gubici u turbini te pad entalpije nije adijabatski, nego politropski.

- Tlak vodene pare na ulazu u kondenzatoru:

$$p_3 = 0,1 \text{ bar} \quad (4.14.)$$

- Temperatura vodene pare na ulazu u kondenzator:

$$\theta_3 = 45,84 \text{ °C}. \quad (4.15.)$$

Entalpiju pare na ulazu u kondenzator dobijemo iz poznatog tlaka koji vlada u kondenzatoru te poznate entropije iz točke 2. Vrijednosti entropija i entalpija se očitaju iz tablica za zasićenu vodenu paru te se prema formuli (4.16.) dobije entalpija u točki 3 za idealni slučaj.

$$h_{3i} = h'_3 + \frac{s_2 - s'_3}{s''_3 - s'_3} \cdot (h''_3 - h'_3) \quad (4.16.)$$



- Entalpija vrele kapljevine pri tlaku 0,1 bar:

$$h'_3 = 191,9 \text{ kJ/kg} \quad (4.17.)$$

- Entalpija zasićene vodene pare pri tlaku 0,1 bar:

$$h''_3 = 2584 \text{ kJ/kg} \quad (4.18.)$$

- Entropija vrele kapljevine pri tlaku 0,1 bar:

$$s'_3 = 0,6492 \text{ kJ/kgK} \quad (4.19.)$$

- Entropija zasićene vodene pare pri tlaku 0,1 bar:

$$s''_3 = 8,149 \text{ kJ/kgK}. \quad (4.20.)$$

Uvrštavanjem očitanih podataka u izraz (4.16.) dobije se entalpija vodene pare pri ulazu u kondenzator za idealni slučaj:

$$h_{3i} = 2089,79 \text{ kJ/kg}. \quad (4.21.)$$

Stvarna entalpija vodene pare pri ulazu u kondenzator računa se prema formuli (4.22.):

$$h_3 = h_2 - (h_2 - h_{3i}) \cdot \eta_{i,t} \quad (4.22.)$$

Uvrštavanjem vrijednosti (4.10.), (4.12.) i (4.21.) u izraz (4.22.) dobije se stvarna vrijednost entalpije u točki 3.

- Stvarna vrijednost entalpije u točki 3:

$$h_3 = 2291,87 \text{ kJ/kg} \quad (4.23.)$$

- Stvarna vrijednost entropije u točki 2:

$$s_3 = 7,23 \text{ kJ/kgK}. \quad (4.24.)$$

Točka 4 – Stanje kondenzata na izlazu iz kondenzatora

Para u kondenzatoru prelazi u zasićeno stanje kondenzacijom. Stanje kondenzata na izlazu iz kondenzatora dobije se pomoću tlaka iz prethodne točke.

- Tlak kondenzata na izlazu iz kondenzatora:

$$p_4 = 0,1 \text{ bar} \quad (4.25.)$$

- Temperatura kondenzata na izlazu iz kondenzatora:

$$\theta_4 = 45,84 \text{ °C} \quad (4.26.)$$

- Stvarna vrijednost entalpije u točki 3:

$$h_4 = h'_3 = 191,9 \text{ kJ/kg} \quad (4.27.)$$

- Stvarna vrijednost entropije u točki 2:

$$s_4 = s'_3 = 0,6492 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.28.)$$

#### Točka 5 – Stanje kondenzata nakon pumpe kondenzata

Pumpa podiže tlak kondenzata na 1,4 bar. Ovaj tlak vlada u spremniku napojne vode i pritom dolazi do zanemarivog porasta temperature i entalpije kondenzata.

- Tlak kondenzata nakon pumpe kondenzata:

$$p_5 = 1,4 \text{ bar} \quad (4.29.)$$

- Temperatura kondenzata nakon pumpe kondenzata:

$$\theta_5 = 45,84 \text{ °C} \quad (4.30.)$$

- Entalpija kondenzata nakon pumpe kondenzata:

$$h_5 = 191,9 \text{ kJ/kg} \quad (4.31.)$$

- Entropija kondenzata nakon pumpe kondenzata:

$$s_5 = 0,6492 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.32.)$$

#### Točka 6 – Stanje povratnog kondenzata od toplinskih potrošača

Pri temperaturi 70 °C i tlaku od 1,4 bar kondenzat se od toplinskih potrošača vraća u spremnik napojne vode. Pomoću tih podataka dobiva se entalpija kondenzata.

- Tlak povratnog kondenzata od toplinskih potrošača:

$$p_6 = 1,4 \text{ bar} \quad (4.33.)$$

- Temperatura povratnog kondenzata od toplinskih potrošača:

$$\theta_6 = 70 \text{ °C} \quad (4.34.)$$

- Entalpija povratnog kondenzata od toplinskih potrošača:

$$h_6 = 293 \text{ kJ/kg} \quad (4.35.)$$

- Entropija povratnog kondenzata od toplinskih potrošača:

$$s_6 = 0,9549 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.36.)$$

Točka 7 – Stanje kemijski pripremljene vode na ulazu u otplinjač

Kemijski pripremljena voda temperature od 20 °C i tlaka 1,4 bar, dovodi se u otplinjač iz spremnika pripremljene potrošne vode za nadoknadu gubitaka pare u procesu. Pomoću tih vrijednosti određuje se entalpija kemijske pripremljene vode.

- Tlak kondenzata nakon pumpe kondenzata:

$$p_{kpV} = 1,4 \text{ bar} \quad (4.37.)$$

- Temperatura kondenzata nakon pumpe kondenzata:

$$\theta_{kpV} = 20 \text{ °C} \quad (4.38.)$$

- Entalpija kondenzata nakon pumpe kondenzata:

$$h_{kpV} = 83,90 \text{ kJ/kg} \quad (4.39.)$$

- Entropija kondenzata nakon pumpe kondenzata:

$$s_{kpV} = 0,2964 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.40.)$$

Točka 2b' – Stanje kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode

U regenerativnom zagrijaču, pri tlaku od 16 bara, para se kondenzira dok ne dostigne liniju zasićenja. Pomoću očitane temperature i poznatog tlaka dobije se entalpija kondenzata u točki 2b'.

- Tlak kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode:

$$p_{2b'} = 1,4 \text{ bar} \quad (4.41.)$$

- Temperatura kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode:

$$\theta_{2b'} = 201,36 \text{ °C} \quad (4.42.)$$

- Entalpija kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode:

$$h_{2b'} = 858,3 \text{ kJ/kg} \quad (4.43.)$$

- Entropija kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode:

$$s_{2b'} = 2,344 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.44.)$$

Točka 2c – stanje pare na ulazu u otplinjač

Para koja je oduzeta iz visokotlačnog dijela turbine, prije ulaska u otplinjač, se prigušuje na tlak 1,4 bar. Entalpija se ne mijenja.

- Tlak pare na ulazu u otplinjač:

$$p_{2c} = 1,4 \text{ bar} \quad (4.45.)$$

- Temperatura pare na ulazu u otplinjač:

$$\theta_{2c} = 204,36 \text{ °C} \quad (4.46.)$$

- Entalpija pare na ulazu u otplinjač:

$$h_{2c} = 2882,26 \text{ kJ/kg} \quad (4.47.)$$

- Entropija pare na ulazu u otplinjač:

$$s_{2c} = 6,60 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.48.)$$

Točka 8 – Stanje napojne vode na izlazu iz otplinjača

U otplinjaču vlada tlak zasićenja od 1,4 bar te pomoću tog podatka dobivamo stanje vode na izlazu iz otplinjača

- Tlak napojne vode na izlazu iz otplinjača:

$$p_8 = 1,4 \text{ bar} \quad (4.49.)$$

- Temperatura napojne vode na izlazu iz otplinjača:

$$\theta_8 = 109,33 \text{ °C} \quad (4.50.)$$

- Entalpija napojne vode na izlazu iz otplinjača:

$$h_8 = 458,5 \text{ kJ/kg} \quad (4.51.)$$

- Entropija napojne vode na izlazu iz otplinjača:

$$s_8 = 1,4109 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.52.)$$

Točka 9 – Stanje napojne vode nakon pumpe napojne vode

Napojna pumpa podiže tlak napojne vode na 35 bara. Taj tlak je veći od tlaka na izlazu iz generatora pare iz razloga jer želimo savladati gubitke strujanja u generatoru pare i regenerativnom zagrijaču vode. Pritom su se entalpija i temperatura napojne vode neznatno povećale.

- Tlak napojne vode nakon pumpe:

$$p_9 = 35 \text{ bar} \quad (4.53.)$$

- Temperatura napojne vode nakon pumpe:

$$\theta_9 = 110 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.54.)$$

- Entalpija napojne vode nakon pumpe:

$$h_9 = 463,86 \text{ kJ/kg} \quad (4.55.)$$

- Entropija napojne vode nakon pumpe:

$$s_9 = 1,416 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.56.)$$

Točka 10 – Stanje napojne vode na ulazu u generator pare

Regenerativni zagrijač zagrijava napojnu vodu na 135 °C. Entalpija napojne vode dobije se pomoću poznatog tlaka i temperature.

- Tlak napojne vode na ulazu u generator pare:

$$p_{10} = 35 \text{ bar} \quad (4.57.)$$

- Temperatura napojne vode na ulazu u generator pare:

$$\theta_{10} = 135 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.58.)$$

- Entalpija napojne vode na ulazu u generator pare:

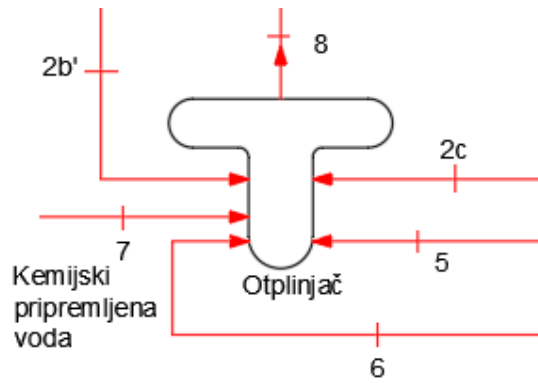
$$h_{10} = 569,63 \text{ kJ/kg} \quad (4.59.)$$

- Entropija napojne vode na ulazu u generator pare:

$$s_{10} = 1,682 \text{ kJ/kgK.} \quad (4.60.)$$

## 4.2. Proračun toplinske bilance

Količina vode koja ulazi u otplinjač mora biti jednaka količini vode koja izlazi iz spremnika.



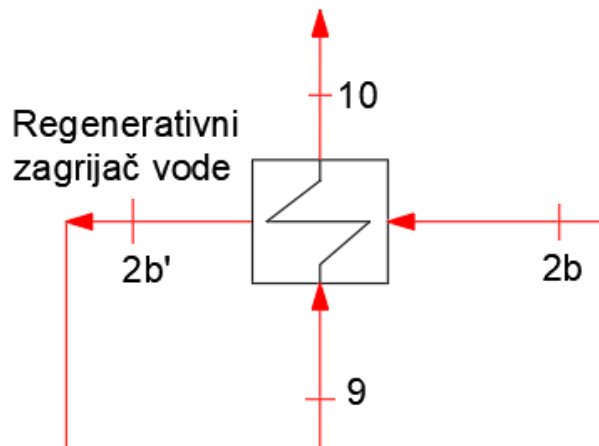
Slika 4.4. Toplinska bilanca otplinjača

Toplinska bilanca otplinjača računa se prema izrazu (4.61.)

$$D = m_{2b} + m_{2c} + m_5 + m_6 + m_7 \quad (4.61.)$$

Bilanca topline otplinjača računa se prema izrazu (4.62.)

$$D \cdot h_8 = m_{2b'} \cdot h_{2b'} + m_{2c} \cdot h_{2c} + m_5 \cdot h_5 + m_6 \cdot h_6 + m_7 \cdot h_7 \quad (4.62.)$$



Slika 4.5. Toplinska bilanca regenerativnog zagrijača vode

Toplinska bilanca regenerativnog zagrijača vode računa se prema izrazu (4.63.)

$$D \cdot (h_{10} - h_9) = m_{2b} \cdot (h_{2b} - h_{2b'}) \quad (4.63.)$$

$$m_{2b} = \frac{D \cdot (h_{10} - h_9)}{h_{2b} - h_{2b'}} \quad (4.64.)$$

Bilanca snage generatora električne energije računa se prema izrazu (4.65.)

$$\frac{P_e}{\eta_g \cdot \eta_m} = D \cdot (h_1 - h_3) - m_{od} \cdot (h_2 - h_3) \quad (4.65.)$$

Gdje se količina oduzete pare iz turbine računa prema izrazu (4.66.)

$$m_{od} = \frac{\phi_{ts}}{h_2 - h_{10}} \quad (4.66.)$$

Količina oduzete pare također se računa prema izrazu (4.67.)

$$m_{od} = m_{2a} + m_{2b} + m_{2c} \quad (4.67.)$$

Maseni protok pare koji se isporučuje potrošačima računa se prema izrazu (4.68.)

$$m_{2a} = \frac{\phi_{ts}}{h_2 - h_6} \quad (4.68.)$$

Količina kemijski pripremljene potrošne vode iznosi

$$m_7 = 1 \text{ t/h} \quad (4.69.)$$

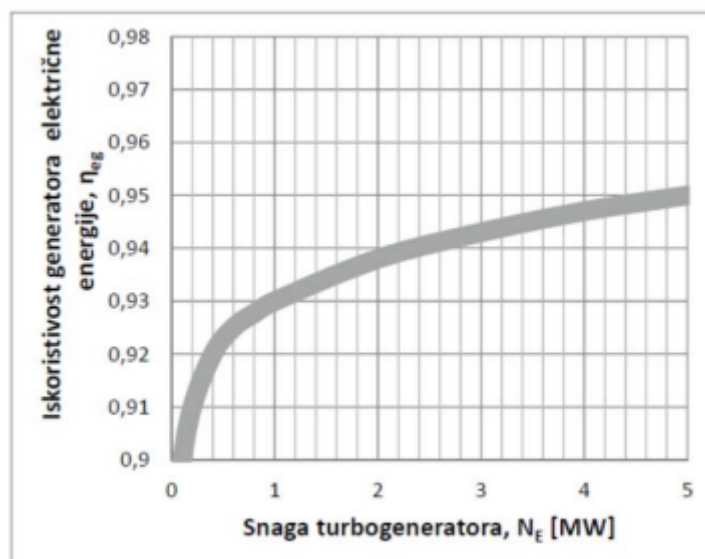
Količina kondenzata na povratku iz procesa računa se prema izrazu (4.70.)

$$m_6 = m_{2a} - 1 \text{ t/h} \quad (4.70.)$$

Snaga generatora električne energije iznosi

$$P_e = 3 \text{ MW} \quad (4.71.)$$

Na slici 4.6. iščitava se iz grafa iskoristivost generatora električne energije.



Slika 4.6. Iskoristivost električnog generatora [4]

Iščitana vrijednost iznosi:  $\eta_g = 0,943$  (4.72.)

U tablici 4.1. predočeni su izračunati parametri toplinske bilance.

Tablica 4.1. Rezultati protočnih veličina

$D$	$m_{od}$	$m_{2a}$	$m_{2b}$	$m_{2c}$	$m_5$	$m_6$	$m_7$
kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s
8,53	4,32	3,86	0,45	0,01	4,21	3,58	0,28
t/h	t/h	t/h	t/h	t/h	t/h	t/h	t/h
30,71	15,55	13,90	1,62	0,04	15,16	12,90	1

### 4.3. Ukupna iskoristivost postrojenja

Ukupan stupanj iskoristivosti kogeneracijskog postrojenja računa se kao omjer ukupne proizvedene energije i ukupne dovedene energije izgaranja goriva prema izrazu (4.73.):



$$\eta_{\text{uk}} = \frac{P_e + \phi_{\text{ts}}}{Q_k} \quad (4.73.)$$

gdje je:

$\eta_{\text{uk}}$  - ukupan stupanj iskoristivosti kogeneracijskog postrojenja

$P_e$  – proizvedena električna energija, kW

$\phi_{\text{ts}}$  – proizvedena toplinska energija, kW

$Q_k$  – energija izgaranja goriva, kW.

Energija izgaranja goriva računa se prema izrazu (4.74.):

$$Q_k = \frac{D \cdot (h_1 - h_{10})}{\eta_{\text{gp}}} \quad (4.74.)$$

gdje je:

$\eta_{\text{gp}}$  – stupanj korisnosti generatora pare, usvajamo  $\eta_{\text{gp}} = 0,86$ .

Izračunata energija dobivena izgaranjem goriva iznosi:

$$Q_k = 23986,86 \text{ kW} \quad (4.75.)$$

Ukupan stupanj iskoristivosti kogeneracijskog postrojenja iznosi:

$$\eta_{\text{uk}} = 0,5420 = 54,20 \% \quad (4.76.)$$

## 5. PRORAČUN POTROŠNJE DRVNE BIOMASE

### 5.1. Kemijski sastav goriva

Biomasa je goriva tvar koja može biti životinjskog ili biljnog porijekla. Biomasa se uvrštava u obnovljive izvore energije jer se može prirodnim putem obnoviti nakon što se potroši. Ako se godišnje iskorištenje biomase podudara ili je manje od godišnjeg prirasta nove biomase, tada će emisija ugljikovog dioksida pri korištenju te biomase biti usporediva s emisijom ugljikovog dioksida tijekom fotosinteze biomase. Koristi se za proizvodnju toplinske energije za grijanje ili zagrijavanje vode te za proizvodnju električne energije, te se može primijeniti u industriji za proizvodnju kemikalija ili vlakana. Biomasa može biti prisutna kao čvrsta, tekuća ili plinovita tvar.

Drvena biomasa je vrsta biomase nastala gospodarenjem šuma te može biti ostaci i otpad iz drvne industrije pri piljenju, brušenju ili blanjanju. Drvena biomasa dolazi u četiri osnovna oblika:

- Briketi
- Peleti
- Sječka
- Cjepanice.

Drvena biomasa prema svojem kemijskom sastavu se najviše sastoji od ugljika C, kisika O<sub>2</sub> te vodika H<sub>2</sub>, ali uspoređujući ih s fosilnim gorivima drvena biomasa sadrži vrlo malo dušika N<sub>2</sub> i sumpora S. Pošto u zadatku nije zadana vrsta drvne biomase, već samo lokacija kogeneracijskog postrojenja, kao gorivo uzet ćemo najrasprostranjeniju vrstu drva na području Gorskog kotara. U Gorskom kotaru pretežno prevladava crnogorična šuma te ćemo za proračun kemijskog sastava uzeti tu vrstu drveta.

Tablica 5.1. Različiti oblici drvene biomase i njihovi kemijski sastavi [5]

	C	H	O	N	K	S	Cl
	m.u.% (s.o.)						
Smreka (s korom)	49,8	6,3	43,2	0,13	0,13	0,015	0,005
Bukva (s korom)	47,9	6,2	43,3	0,22	0,22	0,015	0,006
Jablan KKO	47,5	6,2	44,1	0,42	0,35	0,031	0,004
Vrba KKO	47,1	6,1	44,2	0,54	0,26	0,045	0,004
Kora (Crnogorično drveće)	51,4	5,7	38,7	0,48	0,24	0,085	0,019
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva Crnogorično drveće *	47–54	5,6–7,0	40–44	<0,1–0,5		<0,01–0,05	<0,01–0,03
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva Listopadno drveće	48–52	5,9–6,5	41–45	<0,1–0,5		<0,01–0,05	<0,01–0,03
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva*	51–56	5,9–6,5	36–43	0,3–1,2		0,02–0,20	<0,01–0,05
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva Ostaci od pridobivanja drva*	50–53	5,9–6,3	40–44	0,3–0,8		0,01–0,08	<0,01–0,04
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva Kulture brzorastućih nasada*	47–51	5,8–6,7	40–46	0,2–0,8		0,02–0,10	<0,01–0,05
Miskant	47,5	6,2	41,7	0,73	0,70	0,150	0,220
Pšenična slama	45,6	5,8	42,4	0,48	1,00	0,082	0,190
Tritikala (zmje)	43,5	6,4	46,4	1,68	0,60	0,110	0,070
Pogača od uljane repice	51,5	7,4	30,1	4,97	1,60	0,550	0,019
<i>Fosilna goriva, radi usporedbe</i>							
Ugljen	72,5	5,6	11,0	1,30	–	0,940	< 0,1
Lignit	65,9	4,6	23,0	0,70	–	0,390	< 0,1
Lož ulje	85–86	11–13	1–4	–	–	–	–
Prirodni plin	75	25	–	–	–	–	–

Kemijski sastav drvene biomase od neprerađenog crnogoričnog drveća izvučen je iz tablice 5.1. prikazan je u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Kemijski sastav drvene biomase

Kemijski element	c	o	h	n	s
Maseni udio	0,51	0,42	0,063	0,003	0,0003

## 5.2. Donja ogrjevna moć goriva

Količina topline koja se oslobađa izgaranjem određene količine goriva naziva se ogrjevna moć goriva. Ogrjevna moć se dijeli na gornju ogrjevnju moć i donju ogrjevnju moć. Donja ogrjevna moć je količina topline koja se oslobađa izgaranjem jedinice količine goriva kada se plinovi izgaranja ohlade na temperaturu višu od temperature kondenzacije vodene pare, pri čemu se vodena para kondenzira i ne oslobađa se njena toplina kondenzacije. Donja ogrjevna moć za kruta i tekuća goriva računa se prema izrazu (5.1.):

$$H_d = 33900 \cdot c + 117000 \cdot \left( h - \frac{o}{8} \right) + 10500 \cdot s - 2500 \cdot w \quad (5.1.)$$

Uvrštavanjem masenih udjela iz tablice 5.2. u izraz (5.1.) dobit ćemo ogrjevnju moć suhe drvene biomase:

$$H_{d0} = 18520,65 \text{ kJ/kg} \quad (5.2.)$$

Vlaga ima veliki utjecaj na ogrjevnju moć drvene biomase. Ako je udio vlage veći tada će ogrjevna vrijednost drvene biomase biti manja, a udio vlage ćemo smanjiti sušenjem goriva. U proračunu ćemo uzeti različite udjele vlage te će se pokazati utjecaj vlage na količinu potrebnog goriva za kogeneracijsko postrojenje. Ogrjevna vrijednost za različite udjele vlage računa se prema izrazu (5.3.):

$$H_{dM} = \frac{H_{d0} \cdot (100 - M) - 2,44 \cdot M}{100} \quad (5.3.)$$

gdje je

$M$  – udio vlage u gorivu

$H_{dM}$  – donja ogrjevna moć ovisno o udjelu vlage, kJ/kg

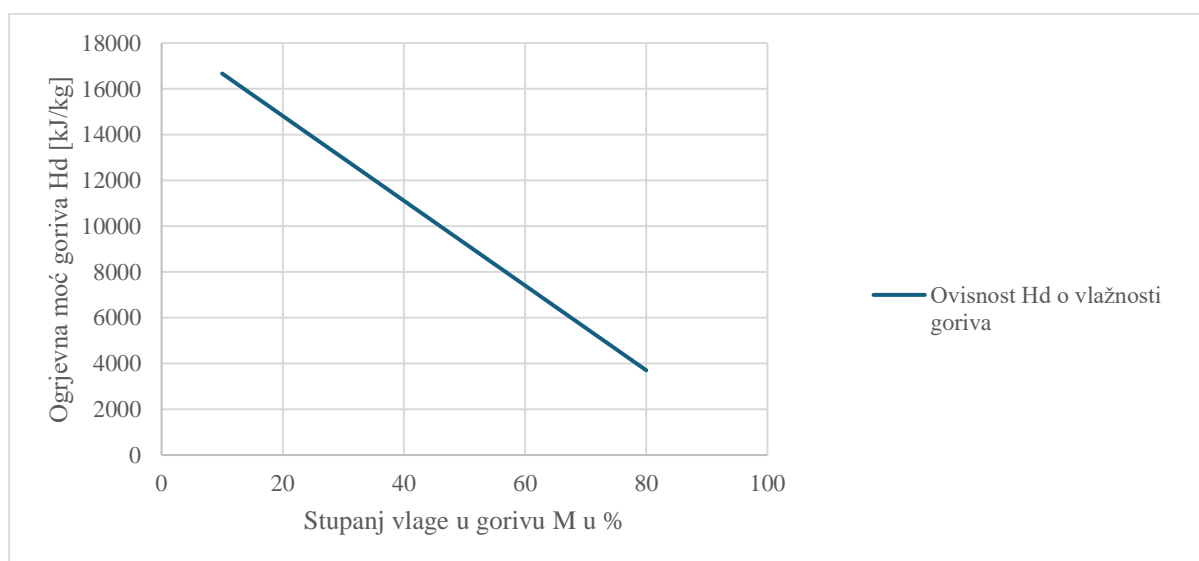
$H_{d0}$  – donja ogrjevna moć suhe drvene biomase, kJ/kg.

U tablici 5.3. prikazane su vrijednosti donje ogrjevne moći goriva s obzirom na stupanj vlage u gorivu.

Tablica 5.3. Ovisnost donje ogrjevne vrijednosti o stupnju vlage u gorivu

Udio vlage u gorivu $M$	Donja ogrjevna moć goriva $H_{dM}$ [kJ/kg]
50%	9259,11
40%	11111,41
30%	12963,72
20%	14816,03
10%	16668,34
0%	18520,65

Iz tablice je uočljivo da povećanjem postotka vlage u gorivu donja ogrjevna vrijednost pada što je detaljnije prikazano grafički na slici 5.1.



Slika 5.1. Grafički prikaz ovisnosti donje ogrjevne moći o vlažnosti goriva

### 5.3. Potrošnja goriva

Potrošnja goriva računa se kao omjer oslobođene energije izgaranja goriva u kotlu (4.75.) i donje ogrjevne moći prema izrazu (5.4.):

$$D_g = \frac{Q_k}{H_{dM}} \quad (5.4.)$$

gdje je

$D_g$  – potrebna količina goriva za izgaranje, kg/s

$Q_k$  – energija dobivena izgaranjem goriva, kW

$H_{dM}$  – donja ogrjevna moć ovisna o vlažnosti goriva, kJ/kg.

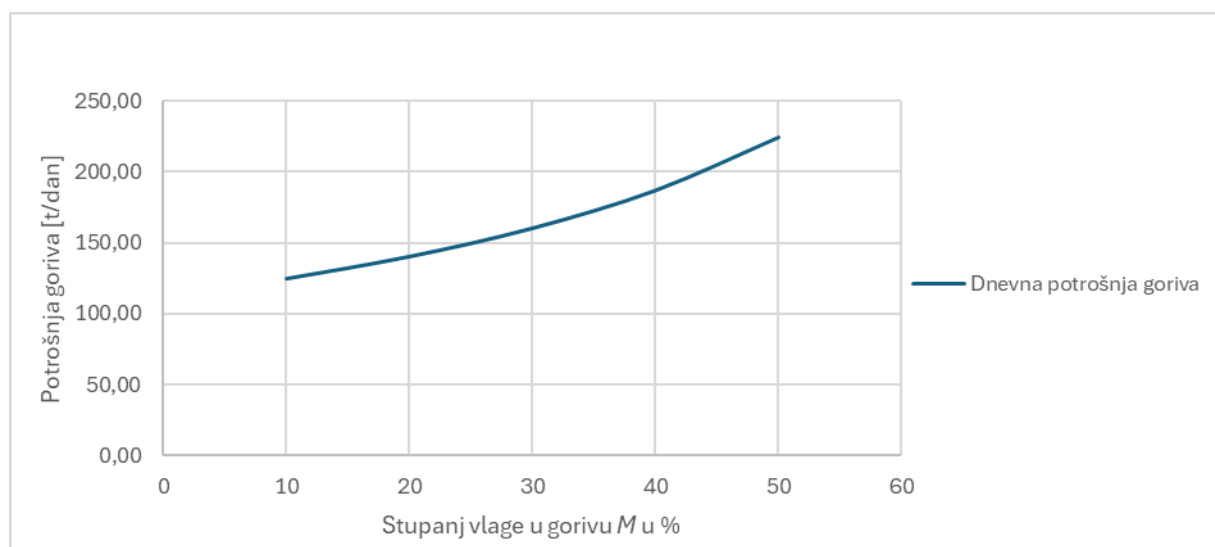
U tablici 5.4. prikazana je potrošnja goriva s obzirom na stupanj vlage u gorivu.

*Tablica 5.4. Ovisnost potrošnje goriva o udjelu vlage*

Stupanj vlažnosti goriva $M$	Potrošnja goriva $D_g$		
	kg/s	t/h	t/dan
50%	2,59	9,33	223,86
40%	2,16	7,77	186,52
30%	1,85	6,66	159,87
20%	1,62	5,84	140,04
10%	1,44	5,18	124,34
0%	1,30	4,66	111,90

Iz rezultata je vidljivo da se potrošnja goriva povećava s povećanjem stupnja vlažnosti goriva. Primjećuje se da je potrošnja goriva kod 50% udjela vlage veća za 56% u usporedbi s potrošnjom

goriva kod 10% udjela vlage. Na slici 5.2. detaljnije je predočena ovisnost potrošnje goriva o stupnju vlage drvene biomase.



Slika 5.2. Grafički prikaz potrošnje goriva ovisno o stupnju vlage u gorivu

#### 5.4. Proračun emisija izgaranja drvene biomase

Potpunim izgaranjem drvene biomase stvaraju se emisije ugljičnog dioksida CO<sub>2</sub>, dušičnih oksida NO<sub>x</sub>, sumpornih oksida SO<sub>x</sub>, klorovodika HCl te čestica u atmosferu. Energetsko iskorištenje drvene biomase se smatra CO<sub>2</sub> neutralnim zbog njegove obnovljivosti sadnjom drveća. Dušični oksidi nastaju izgaranjem dušika u gorivu. Sumporni oksidi nastaju izgaranjem sumpora u gorivu. Ti spojevi stvaraju kisele kiše te imaju štetan utjecaj na zdravlje ljudi. Drvna biomasa sadrži jako malu količina klora Cl, što dovodi do stvaranja spojeva klorovodika HCl koji imaju korozivni utjecaj te štetno djeluju na zdravlje ljudi. Aerosoli ili lebdeći pepeo su čestice koje čine najštetniju emisiju nastalo izgaranjem drvene biomase.

Emisije izgaranja drvene biomase računaju se na sljedeći način:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,666 \cdot c \quad (5.5.)$$

$$m_{\text{SO}_2} = 2 \cdot s \quad (5.6.)$$

$$m_{\text{NO}_x} = 100 \text{ kg/TJ} \cdot Q_k \cdot m_G \quad (5.7.)$$

$$m_{\text{Cl}} = 0,5142 \cdot cl \cdot 0,6. \quad (5.8.)$$

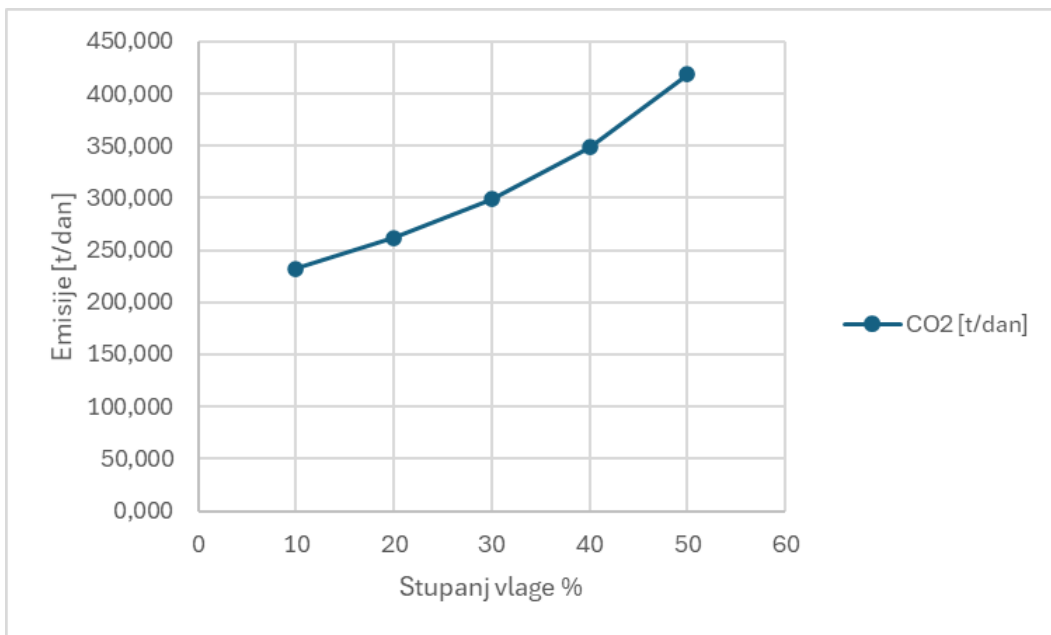
U tablici 5.5. predloženi su rezultati emisija plinova.

*Tablica 5.5. Emisije plinova*

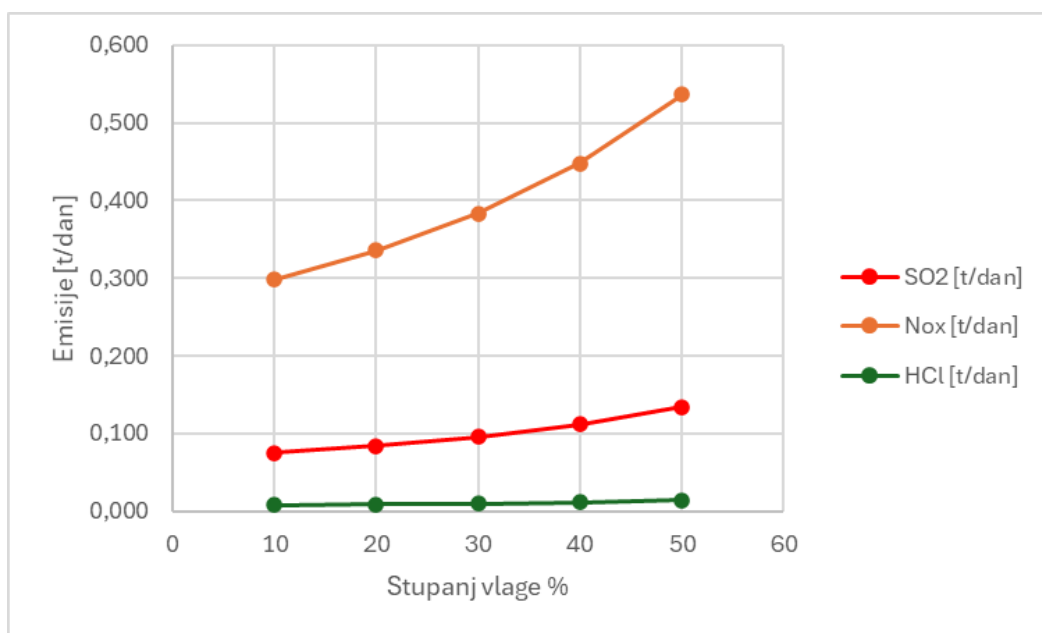
Stupanj vlažnosti goriva <i>M</i>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HCl
	t/dan	t/dan	t/dan	t/dan
50	418,486	0,134	0,537	0,014
40	348,723	0,112	0,447	0,012
30	298,896	0,096	0,383	0,010
20	261,834	0,084	0,336	0,009
10	232,465	0,075	0,298	0,008

Povećanjem vlage u gorivu povećava se potrošnja goriva te se time i povećava emisija plinova pri izgaranju. Time zaključujemo da će smanjenjem stupnja vlage u gorivu biti povoljnije za okoliš i ljude. Detaljniji prikaz ovisnosti emisija ugljičnog dioksida s obzirom na stupanj vlage u gorivu grafički je prikazano na slici 5.3. te su na slici 5.4. detaljnije predložene ostale emisije plinova.





Slika 5.3. Grafički prikaz emisije CO<sub>2</sub>

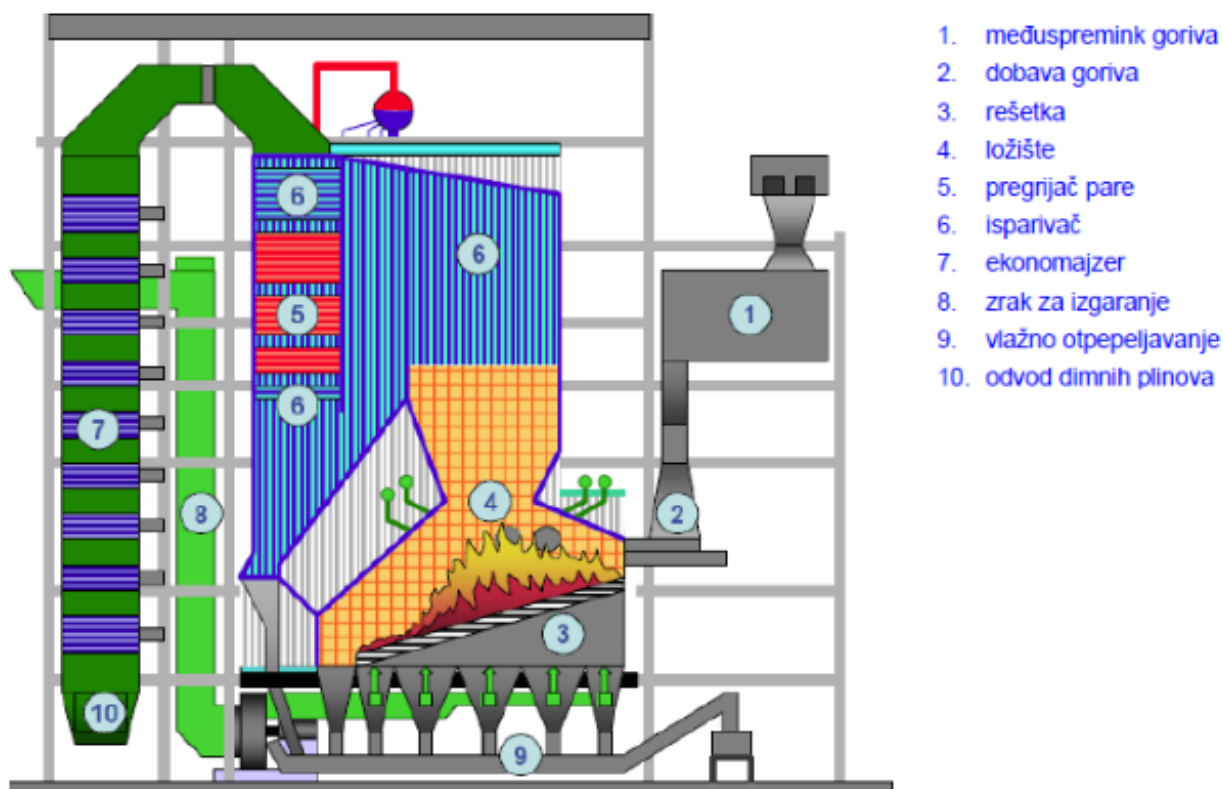


Slika 5.4. Grafički prikaz emisije SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i HCl

## 6. IZBOR I OPIS GLAVNE OPREME

### 6.1. Generator pare

Energetski uređaji koji proizvode vodenu paru pod određenim tlakom i temperaturom, koja se koristi kao radni fluid za pogon parnih strojeva ili za prijenos toplinske energije nazivaju se generatori pare. Izgaranje u nepokretnom sloju u ložištima s rešetkom, izgaranje u mjehurićastom fluidiziranom sloju te izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju načini su izgaranja koji se primjenjuju kod postrojenja za izgaranje biomase. Ložišta s izgaranjem na rešetki su pogodna za sagorijevanje različitih materijala poput sječke, piljevine, krupne i komadne biomase, kao i vlažnih goriva i goriva s visokim udjelom pepela. Ovisno o načinu unosa goriva u ložište, postoje rešetke s donjim i gornjim dovodom goriva. U ovom postrojenju koristi se generator pare izveden s gornjim dovodom goriva u ložište s nagnutom vibrirajućom rešetkom predočen na slici 6.1.



Slika 6.1. Generator pare s nagnutom rešetkom [6]

Nagnuta rešetka je kontinuirano pomična, hladena vodom, opremljena automatskim nadzorom i regulacijom visine sloja goriva, kao i regulacijom brzine vrtnje ventilatora primarnog zraka. Generator pare s nagnutom rešetkom osigurava stabilno i učinkovito sagorijevanje, čime se smanjuje emisija ugljičnog monoksida i količina neizgorivih čestica u dimnim plinovima.

## 6.2. Parna turbina

Toplinski strojevi u kojima se toplinska energija, koja se nalazi u pari, prvo pretvara u kinetičku energiju, a potom u mehanički rad nazivaju se parne turbine. Prema tlaku na izlazu turbine se dijele na:

- kondenzacijske turbine - para izlazi u kondenzator u kojemu vlada podtlak (vakum)
- protutlačne turbine - para izlazi pod pretlakom, koji je veći od atmosferskog tlaka, a dalje se koristi za pokretanje manjih (pomoćnih) turbina u energetsom sustavu ili za opskrbu toplinske energije drugim procesima
- kondenzacijske turbine s oduzimanjem pare - dio pare izlazi kroz regulirana ili neregulirana oduzimanja kako bi se zadovoljile potrebe raznih pomoćnih potrošača, dok se preostali dio ispušta u kondenzator
- protutlačne turbine s oduzimanjem pare - dio pare se izlučuje kroz regulirane ili neregulirane izlaze, a na kraju procesa ekspanzije, izlazi pod tlakom koji je veći od atmosferskog kako bi se dalje koristitila.

Parna turbina koja se koristi u ovom postrojenju je kondenzacijska turbina s jednim reguliranim oduzimanjem pare za potrebe toplinskih potrošača. Turbina je sastavljena od visokotlačne turbine i niskotlačne turbine. Pregrijana para tlaka  $p_1 = 30$  bar i temperature  $\theta_1 = 300$  °C ulazi u visokotlačni dio turbine te ekspandira do tlaka 16 bara, a dio pare se odvaja za toplinske potrošače i zagrijavanje napojne vode. Preostala para, u niskotlačnom dijelu turbine, ekspandira do tlaka 0,1 bar. Lopatice su pokretane ekspanzijom pare te prenose snagu na vratilo turbine. Snaga s vratila parne turbine prenosi se do generatora električne energije koji daje izlaznu snagu električne energije  $P_e = 3$  MW.

### 6.3. Kondenzator

Kondenzatori su površinski izmjenjivači topline za pretvaranje vodene pare u tekućinu putem procesa kondenzacije. Rade na atmosferskom tlaku, ali obično funkcioniraju na blagom podtlaku ili vakumu kako bi entalpijski pad na turbini bio što veći. Tlak koji vlada u kondenzatoru je između 0,07 i 0,1 bar. U ovom proračunu odabran je tlak od 0,1 bar.

Proračunom kondenzatora određuje se površina cijevi za hlađenje koja je potrebna za prijenos svih toplina kondenzacije izlazne vodene pare iz turbine. Podaci koji su potrebni za proračun su temperatura vode koja ulazi u kondenzator, koja varira između 25 i 28 °C za kružne sustave s rashladnim tornjevima u umjerenim područjima. Usvaja se temperatura:

$$t_{w1} = 26 \text{ °C} \quad (6.1.)$$

Porast temperature rashladne vode varira između 8 i 12 °C, te se uzima prosječna vrijednost od 10 °C. Temperatura izlazne vode iznosi:

$$t_{w2} = 36 \text{ °C} \quad (6.2.)$$

Standardne dimenzije cijevi kondenzatora su Ø23/21 mm ili Ø25/23 mm. Za ovaj proračun uzima se standardna veličina cijevi Ø23/21 mm. Za slatke rashladne vode brzina strujanja kroz cijevi varira između 1,5 i 2,5 m/s. Usvojena je vrijednost:

$$w_v = 2 \text{ m/s} \quad (6.3.)$$

Ostale potrebne vrijednosti za proračun su:

$$m_3 = 4,21 \text{ kg/s} \quad (6.4.)$$

$$h_3 = 2291,87 \text{ kJ/kg} \quad (6.5.)$$

$$h_4 = 191,9 \text{ kJ/kg} \quad (6.6.)$$

$$c_w = 4,187 \text{ kJ/kgK} \quad (6.7.)$$

Rashladna voda prima količinu topline pri kondenzaciji, a para ju predaje prema izrazu (6.8.)

$$Q = m_3 \cdot (h_3 - h_4) \quad (6.8.)$$

$$Q = 8840,87 \text{ kW.}$$

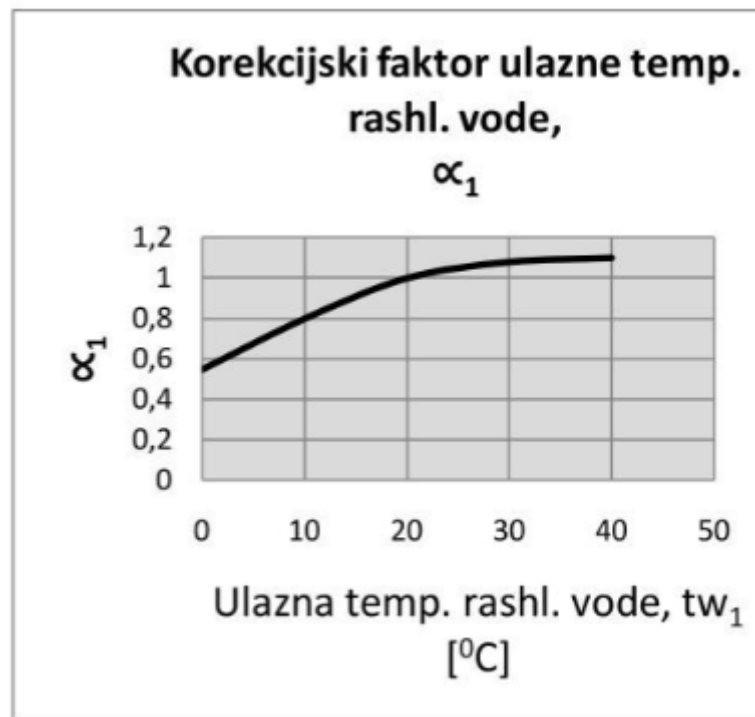
Nadalje računa se karakteristična veličina kondenzatora odnosno specifično opterećenje rashladne vode. Izraz se dobiva omjerom količine kondenzirane pare u jedinici vremena i rashladne površine kondenzatora, a vrijednosti se kreću između 0,01 i 0,02 kg/m<sup>2</sup>s. Vrijednost koju usvajamo je:

$$d_k = 0,015 \text{ kg/m}^2\text{s} = 54 \text{ kg/m}^2\text{h.} \quad (6.9.)$$

Koeficijent prolaza topline određuje se prema izrazu (6.10.)

$$k = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot b \cdot k'. \quad (6.10.)$$

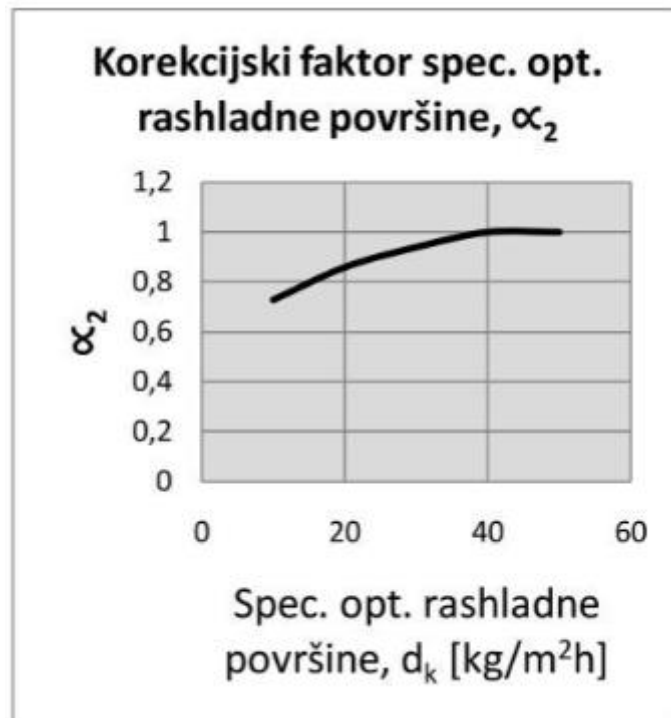
Iz dijagrama sa slike 6.2. očitava se korekcijski faktor ulazne temperature rashladne vode.



Slika 6.2. Dijagram korekcijskog faktora ulazne temperature rashladne vode [9]

Očitana vrijednost za  $t_{w1} = 26 \text{ °C}$  iznosi:  $\alpha_1 = 1,06.$  (6.11.)

Iz dijagrama sa slike 6.3. očitava se korekcijski faktor specifičnog opterećenja rashladne vode.

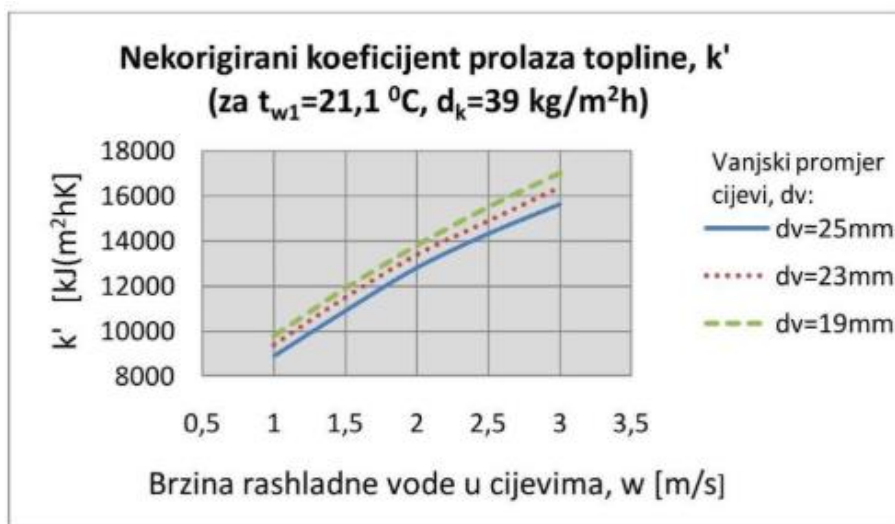


Slika 6.3. Korekcijski faktor specifičnog opterećenja rashladne vode [9]

Očitana vrijednost za  $d_k = 54$  kg/m<sup>2</sup>h iznosi:  $\alpha_2 = 1$ . (6.12.)

Sljedeće je potrebno odrediti koeficijent onečišćenja rashladne površine čija vrijednost varira od 0,75 do 0,95. Odabrana je vrijednost  $b = 0,85$ . (6.13.)

Iz dijagrama sa slike 6.4. očitava se nekorrigirani koeficijent prolaza.



Slika 6.4. Nekorigirani koeficijent prolaza topline [9]

Očitana vrijednost za  $d_v = 23\text{ mm}$  i  $w_v = 2\text{ m/s}$  iznosi  $k' = 13500\text{ kJ/m}^2\text{hK} = 3,75\text{ kW/m}^2\text{K}$ . (6.14.)

Uvrštavanjem (6.11.), (6.12.), (6.13.) i (6.14.) u izraz (6.10.) dolazi se do koeficijenta prolaza topline u kondenzatoru:

$$k = 3,37875\text{ kW/m}^2\text{K}. \quad (6.15.)$$

Srednja razlika temperature vodene pare (4.15.) i rashladne vode računa se prema izrazu (6.16.)

$$\Delta t = \theta_3 - \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} \quad (6.16.)$$

$$\Delta t = 14,84\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Prema izrazu (6.17.) dobiva se potrebna rashladna površina kondenzatora.

$$A_k = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} \quad (6.17.)$$

$$A_k = 176,32\text{ m}^2.$$

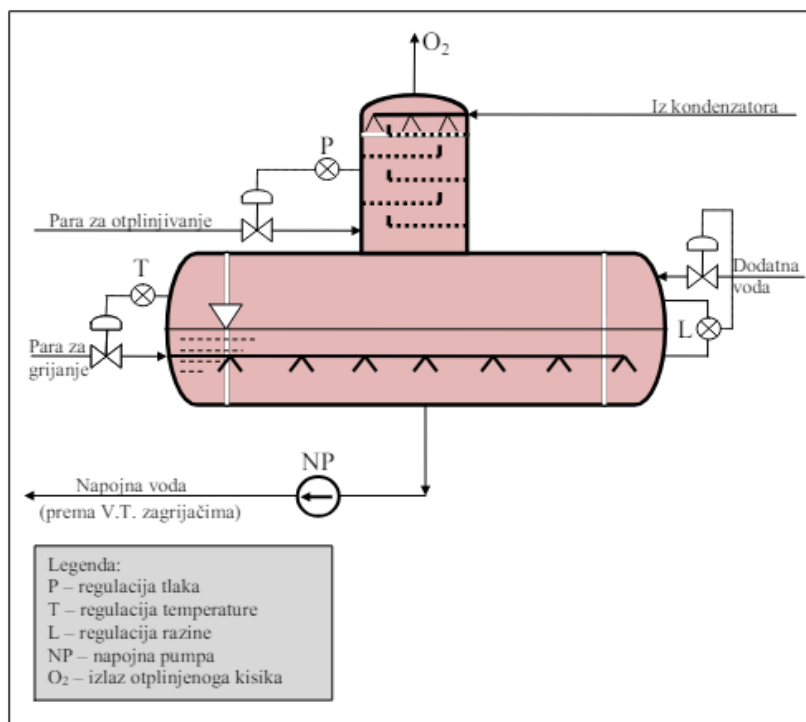
Usvaja se vrijednost površine:  $A_k = 180\text{ m}^2$

## 6.4. Izmjenjivač topline za potrošnju

Izmjenjivač topline, koji se koristi u ovom postrojenju, odvaja fluide različitih temperatura pomoću krute stjenke te omogućuje prijenos topline putem konvekcije s površinom stjenke i provođenja kroz stjenku. Dijele se na cijevne i pločaste, a ovo postrojenje koristi cijevni izmjenjivač topline za potrošnju. Kroz cijevi prolazi oduzeta pregrijana para tlaka  $p_2 = 16$  bar i temperature  $\theta_2 = 234,63$  °C te predaje vodi toplinu za daljnje korištenje. Para koja je oduzeta potpuno kondenzira pri konstantnom tlaku do temperature  $\theta_6 = 70$  °C. Pri oduzimanju para predaje toplinski tok  $\Phi_{ts} = 10$  MW toplinskim potrošačima zagrijavajući vodu iz vrelovoda. Kondenzirana vodena para se pumpama vraća nazad u otplinjač.

## 6.5. Otplinjač

Postupak termičke obrade napojne vode s primarnim ciljem uklanjanja otopljenog kisika radi sprječavanja njegovog korozivnog djelovanja u sustavu za proizvodnju pare naziva se otplinjivanje. Taj proces se obavlja u otplinjačima, shematski predložen na slici 6.5.



Slika 6.5. Shema otplinjača [8]



Porastom temperature vode dolazi do smanjenja topivosti plinova u vodi, a ta topivost dostiže minimum pri temperaturi vrelišta vode. U otplinjaču, voda se zagrijava do temperature isparavanja koja odgovara tlaku u otplinjaču putem direktnog miješanja s parom u protustrujnom strujanju te kroz proces raspršivanja.

## 7. ZAKLJUČAK

Kogeneracijska postrojenja općenito predstavljaju učinkovito rješenje u ostvarivanju održivog energetskeg sustava zbog njihove mogućnosti istovremene proizvodnje električne i toplinske energije, što rezultira povećanom ukupnom iskoristivošću postrojenja i smanjenja štetnih plinova. Kogeneracijska postrojenja zahtijevaju visoka početna ulaganja, ali dugoročno gledano ovakva postrojenja se više isplate.

Izgradnjom kogeneracijskog postrojenja na drvenu biomasu na području Gorskog kotara predstavlja idealno rješenje zbog dostupnih prirodnih resursa i razvijene drvne industrije na tom području te je na području Gorskog kotara visoka potražnja za toplinom i električnom energijom što čini izgradnju ovakvog postrojenja još isplativijim. Korištenjem ostataka iz drvne industrije kao gorivo za pogon postrojenja je puno bolja alternativa od fosilnih goriva zbog manje štetnog djelovanja na okoliš i potrebe uvoza fosilnih goriva. Izgradnja ovakvog postrojenja također utječe na gospodarski razvoj na tom području otvaranjem novih radnih mjesta.

Zaključak je sljedeći, izgradnja parnog kogeneracijskog postrojenja na drvenu biomasu na području Gorskog kotara zbog idealnog položaja te zahtjevima ovakvog područja za istovremenom potrošnjom električne i toplinske energije predstavlja optimalno dugoročno održivo ulaganje.

## LITERATURA

- [1] Glažar V. , Bonefačić I.: „Kogeneracijski energetske sustavi“ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2021.
- [2] Borovec B., Senčić T.: „Usporedba troškova drvoprerađivačkog pogona sa kogeneracijskim energetske sustavom na drvenu sječku i klasičnog drvoprerađivačkog pogona“, stručni članak, Tehnički fakultet Rijeka, 2017.
- [3] Skupina autora: Toplinske tablice, Zagreb, 2010.
- [4] Prelec Z.: „Termoenergetske postrojenja“ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka
- [5] Internet stranica: [www.regea.org](http://www.regea.org) , „Priručnik o gorivima iz drvne biomase“, 2012.
- [6] StandardKessel, Company presentation, s interneta, [https://www.standardkessel-baumgarte.com/fileadmin/user\\_upload/Range\\_of\\_products\\_and\\_services\\_112018.pdf](https://www.standardkessel-baumgarte.com/fileadmin/user_upload/Range_of_products_and_services_112018.pdf), 2008.
- [7] Mrzljak V., Senčić T.: „Parne turbine“ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka
- [8] Prelec Z: „Energetske postrojenja (Regenerativni zagrijači napojne vode)“ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka
- [9] Prelec Z: „Energetske postrojenja ( Kondenzatori pare) “ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Usporedba odvojene proizvodnje energije i kogeneracije [1].....	2
Slika 2.2. Shema kogeneracijskog sustava s kondenzacijskom turbinom uz oduzimanje pare [1].	4
Slika 4.1. Shema kogeneracijskog postrojenja.....	7
Slika 4.2. Efektivna korisnost turbine [4] .....	9
Slika 4.3. Mehanička iskoristivost turbine [4] .....	9
Slika 4.4. Toplinska bilanca otplinjača.....	16
Slika 4.5. Toplinska bilanca regenerativnog zagrijača vode .....	16
Slika 4.6. Iskoristivost električnog generatora [4] .....	18
Slika 5.1. Grafički prikaz ovisnosti donje ogrjevne moći o vlažnosti goriva .....	23
Slika 5.2. Grafički prikaz potrošnje goriva ovisno o stupnju vlage u gorivu.....	25
Slika 5.3. Grafički prikaz emisije CO <sub>2</sub> .....	27
Slika 5.4. Grafički prikaz emisije SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> i HCl .....	27
Slika 6.1. Generator pare s nagnutom rešetkom [6].....	28
Slika 6.2. Dijagram korekcijskog faktora ulazne temperature rashladne vode [9] .....	31
Slika 6.3. Korekcijski faktor specifičnog opterećenja rashladne vode [9].....	32
Slika 6.4. Nekorigirani koeficijent prolaza topline [9].....	33
Slika 6.5. Shema otplinjača [8] .....	34

## POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Rezultati protočnih veličina.....	18
Tablica 5.1. Različiti oblici drvene biomase i njihovi kemijski sastavi [5] .....	21
Tablica 5.2. Kemijski sastav drvene biomase .....	21
Tablica 5.3. Ovisnost donje ogrjevne vrijednosti o stupnju vlage u gorivu .....	23
Tablica 5.4. Ovisnost potrošnje goriva o udjelu vlage .....	24
Tablica 5.5. Emisije plinova .....	26

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
$A_k$	$m^2$	Rashladna površina kondenzatora
$b$	-	Koeficijent onečišćenja rashladne površine
$c$	-	Maseni udio ugljika
$c_w$	$kJ/kgK$	Specifična toplina vode
$D$	$kg/s$	Količina proizvedene pare u generatoru pare
$d_k$	$kg/m^2s$	Specifično opterećenje rashladne vode
$H_d$	$kJ/kg$	Donja ogrjevnna moć goriva
$H_{d0}$	$kJ/kg$	Donja ogrjevnna moć goriva s udjelom vlage od 0%
$H_{dM}$	$kJ/kg$	Donja ogrjevnna moć goriva ovisno o udjelu vlage
$h$	-	Maseni udio vodika
$h_1$	$kJ/kg$	Entalpija pregrijane pare na izlazu iz generatora pare
$h_2$	$kJ/kg$	Stvarna entalpija pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju
$h'_2$	$kJ/kg$	Entalpija vrele kapljevine pri reguliranom oduzimanju
$h''_2$	$kJ/kg$	Entalpija suhozasićene vodene pare pri reguliranom oduzimanju
$h_{2b'}$	$kJ/kg$	Entalpija kondenzata na izlazu iz

		regenerativnog zagrijača vode
$h_{2c}$	kJ/kg	Entalpija oduzete pare na ulazu u otplinjač
$h_{2i}$	kJ/kg	Entalpija pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju
$h_3$	kJ/kg	Stvarna entalpija vodene pare pri ulazu u kondenzator
$h'_3$	kJ/kg	Entalpija vrele kapljevine pri ulazu u kondenzator
$h''_3$	kJ/kg	Entalpija suhozasićene vodene pare pri ulazu u kondenzator
$h_{3i}$	kJ/kg	Entalpija pregrijane pare pri ulazu u kondenzator
$h_4$	kJ/kg	Entalpija kondenzata na izlazu iz kondenzatora
$h_5$	kJ/kg	Entalpija kondenzata nakon pumpe kondenzata
$h_6$	kJ/kg	Entalpija povratnog kondenzata od toplinskih potrošača
$h_8$	kJ/kg	Entalpija napojne vode na izlazu iz otplinjača
$h_9$	kJ/kg	Entalpija napojne vode nakon pumpe
$h_{10}$	kJ/kg	Entalpija napojne vode na ulazu u generator pare
$h_{kpV}$	kJ/kg	Entalpija kemijski pripremljene vode
$k$	kW/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prolaza topline
$k'$	kW/m <sup>2</sup> K	Nekorigirani koeficijent prolaza topline

$M$	-	Udio vlage u gorivu
$m_{2b}$	kg/s	Količina pare za regenerativno zagrijavanje
$m_{2c}$	kg/s	Količina pare na ulazu u otplinjač
$m_3$	kg/s	Količina izlazne pare iz turbine
$m_5$	kg/s	Količina pare na izlazu iz kondenzatora
$m_6$	kg/s	Količina kondenzata na povratku iz procesa
$m_7$	kg/s	Količina kemijski pripremljene vode dovedene u otplinjač
$m_{od}$	kg/s	Količina oduzete pare iz turbine
$m_{Cl}$	kg/s	Emisija Cl po kilogramu goriva
$m_{CO_2}$	kg/s	Emisija CO <sub>2</sub> po kilogramu goriva
$m_{NO_x}$	kg/s	Emisija NO <sub>x</sub> po kilogramu goriva
$m_{SO_2}$	kg/s	Emisija SO <sub>2</sub> po kilogramu goriva
$n$	-	Maseni udio dušika
$o$	-	Maseni udio kisika
$P_e$	MW	Električna snaga
$p_1$	bar	Tlak pregrijane pare na izlazu iz generatora pare
$p_2$	bar	Tlak pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju
$p_{2b'}$	bar	Tlak kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode
$p_{2c}$	bar	Tlak oduzete pare na ulazu u otplinjač
$p_3$	bar	Tlak u kondenzatoru



$p_4$	bar	Tlak na izlazu iz kondenzatora
$p_5$	bar	Tlak na kondenzata nakon pumpe kondenzata
$p_6$	bar	Tlak povratnog kondenzata od toplinskih potrošača
$p_8$	bar	Tlak napojne vode na izlazu iz otplinjača
$p_9$	bar	Tlak napojne vode nakon pumpe
$p_{10}$	bar	Tlak napojne vode na ulazu u generator pare
$p_{kpv}$	bar	Tlak kemijski pripremljene vode
$Q_k$	MW	Energija dobivena izgaranjem goriva
$s$	-	Maseni udio sumpora
$s_1$	kJ/kgK	Entropija pregrijane pare na izlazu iz generatora pare
$s_2$	kJ/kgK	Entropija pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju
$s'_2$	kJ/kgK	Entropija vrele kapljevine pri reguliranom oduzimanju
$s''_2$	kJ/kgK	Entropija suhozasićene vodene pare pri reguliranom oduzimanju
$s_{2b'}$	kJ/kgK	Entropija kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode
$s_{2c}$	kJ/kgK	Entropija oduzete pare na ulazu u otplinjač
$s_3$	kJ/kgK	Entropija vodene pare pri ulazu u kondenzator

$s'_3$	kJ/kgK	Entropija vrele kapljevine pri ulazu u kondenzator
$s''_3$	kJ/kgK	Entropija suhozasićene vodene pare pri ulazu u kondenzator
$s_4$	kJ/kgK	Entropija kondenzata na izlazu iz kondenzatora
$s_5$	kJ/kgK	Entropija kondenzata nakon pumpe kondenzata
$s_6$	kJ/kgK	Entropija povratnog kondenzata od toplinskih potrošača
$s_8$	kJ/kgK	Entropija napojne vode na izlazu iz otplinjača
$s_9$	kJ/kgK	Entropija napojne vode nakon pumpe
$s_{10}$	kJ/kgK	Entropija napojne vode na ulazu u generator pare
$s_{kpv}$	kJ/kgK	Entropija kemijski pripremljene vode
$t_{w1}$	°C	Temperatura rashladne vode na ulazu u kondenzator
$t_{w2}$	°C	Temperatura rashladne vode na izlazu iz kondenzatora
$\Delta t$	°C	Srednja razlika temperature pare i rashladne vode
$Q$	kW	Toplina predana rashladnoj vodi
$Q_k$	kW	Energija dobivena izgaranjem goriva
$w$	-	Maseni udio vlage
$w_v$	m/s	Brzina strujanja vode u cijevima kondenzatora

$\alpha_1$	-	Korekcijski faktor ulazne temperature rashladne vode
$\alpha_2$	-	Korekcijski faktor specifičnog opterećenja rashladne vode
$\eta_{ef}$	-	Efektivna iskoristivost turbine
$\eta_g$	-	Iskoristivost generatora električne energije
$\eta_{gp}$	-	Iskoristivost generatora pare
$\eta_{i,t}$	-	Unutarnja iskoristivost turbine
$\eta_m$	-	Mehanička iskoristivost turbine
$\eta_{uk}$	-	Ukupna iskoristivost postrojenja
$\theta_1$	°C	Temperatura pregrijane pare na izlazu iz generatora pare
$\theta_2$	°C	Temperatura pregrijane pare pri reguliranom oduzimanju
$\theta_{2b'}$	°C	Temperatura kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode
$\theta_{2c}$	°C	Temperatura oduzete pare na ulazu u otplinjač
$\theta_3$	°C	Temperatura pregrijane pare u kondenzatoru
$\theta_4$	°C	Temperatura kondenzata na izlazu iz kondenzatora
$\theta_5$	°C	Temperatura kondenzata nakon pumpe kondenzata
$\theta_6$	°C	Temperatura povratnog kondenzata od toplinskih potrošača

$\theta_8$	°C	Temperatura napojne vode na izlazu iz otplinjača
$\theta_9$	°C	Temperatura napojne vode nakon pumpe
$\theta_{10}$	°C	Temperatura napojne vode na ulazu u generator pare
$\theta_{kpv}$	°C	Temperatura kemijski pripremljene vode
$\Phi_{ts}$	MW	Toplinska snaga

## SAŽETAK

Ovim završnim radom razvijeno je i izračunato tehničko rješenje parnog turbinskog kogeneracijskog postrojenja koje koristi drvenu biomasu kao gorivo, s posebnim fokusom na područje Gorskog kotara. Kogeneracijsko energetska postrojenje mora biti dizajnirano tako da osigura proizvodnju električne energije snage 3 MW i toplinske energije snage 10 MW za potrebe toplinskih potrošača. Kogeneracijsko postrojenje zamišljeno je s kondenzacijskom turbinom s jednim reguliranim oduzimanjem pare. Izrađena je toplinska shema postrojenja, izračunata je energetska bilanca te potrošnja drvne biomase za zadane parametre. Na posljetku izračunata je, odabrana i opisana glavna oprema postrojenja.

Ključne riječi: para, kogeneracijsko postrojenje, potrošnja goriva, drvena biomasa, oprema postrojenja.

## **SUMMARY**

This final paper presents the development and calculation of a technical solution for a steam turbine cogeneration plant utilizing wood biomass, tailored specifically for the Gorski kotar region. The cogeneration power plant must ensure the production of electrical power with a capacity of 3 MW and thermal power with a capacity of 10 MW for the needs of heat consumers. The cogeneration plant is conceived with a steam condensing turbine with one regulated steam seizure. A thermal scheme of the plant has been developed, an energy balance has been calculated, and the consumption of wood biomass for given parameters has been determined. Lastly, the primary equipment of the facility has been chosen, evaluated, and outlined.

Keywords: steam, cogeneration plant, fuel consumption, wood biomass, plant equipment.