

# Kogeneracijsko postrojenje s parnom turbinom na drvnu biomasu

---

Hrvatin, Nada

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:190:999845>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-01**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**KOGENERACIJSKO POSTROJENJE S PARNOM TURBINOM  
NA DRVNU BIOMASU**

Rijeka, rujan 2023.

Nada Hrvatin

0125163536

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**KOGENERACIJSKO POSTROJENJE S PARNOM TURBINOM  
NA DRVNU BIOMASU**

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

Rijeka, rujan 2023.

Nada Hrvatin

0125163536

Rijeka, 14. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**  
Predmet: **Energetski sustavi**  
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Nada Hrvatinić (0125163536)**  
Studij: **Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Kogeneracijsko postrojenje s parnom turbinom na drvnu biomasu / Steam turbine biomass cogeneration plant.**

### Opis zadatka:

Potrebno je osmisлити i proračunati tehničko rješenje parno-turbinskog kogeneracijskog postrojenja na drvnu biomasu na području Gorskog kotara. Zadana električna snaga postrojenja je 4 MW uz istovremenu proizvodnju toplinske energije u obliku pare tlaka 18 bar i temperature 220°C. Tlak svježje pare na izlazu iz generatora pare je 64 bar i 360°C.

Za zadane uvjete treba izraditi koncept postrojenja s toplinskom shemom i proračunom energetske bilance, izbor, proračun i opis glavne opreme te proračun potrošnje drvne biomase kao goriva.

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

*Nada Hrvatinić*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

*BF*

Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

*KS*

Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## IZJAVA

Izjavljujem da sam samostalno izradila završni rad „Kogeneracijsko postrojenje s parnom turbinom na drvenu biomasu“ uz usmjerenje mentora izv. prof. dr. sc. Igora Bonefačića, pomoću navedene literature te sa stečenim znanjem na prijediplomskom studiju.

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Igoru Bonefačiću na pomoći, usmjeravanju i utrošenom vremenu za izradu ovog završnog rada.*

*Zahvaljujem se obitelji na pruženoj podršci, razumijevanju i vjeri u mene tijekom studiranja i pisanja rada.*

*Zahvaljujem se svojim prijateljicama Lidiji, Kristini, Lari, Lei i Mikićima na neprestanom poticanju.*

*I na kraju se posebno zahvaljujem prijateljima i kolegama iz U14, Eni Vunderlih, Sari Kauzlarić i Josipu Tomiću na nezaboravnim danima, velikoj motivaciji i slušanju.*

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KOGENERACIJSKO ENERGETSKO POSTROJENJE.....	2
3. IDEJNO RJEŠENJE .....	4
4. PRORAČUN KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA.....	5
4.1. Toplinska shema postrojenja .....	5
4.2. Termodinamički parametri stanja fluida u postrojenju.....	6
4.3 Proračun energetske bilance .....	11
4.4. Opis rada postrojenja .....	14
5. PRORAČUN POTROŠNJE DRVNE BIOMASE KAO GORIVA.....	15
5.1. Kemijski sastav goriva.....	15
5.2. Donja ogtjevna moć goriva .....	17
5.3. Potrošnja goriva.....	19
6. GLAVNA OPREMA KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA.....	20
6.1. Kondenzator pare.....	20
6.1.1 Proračun kondenzatora pare.....	21
6.2. Pumpa kondenzata .....	26
6.3. Napojna pumpa.....	28
6.4. Parna turbina.....	30
6.5. Otplinjač .....	32
7. ZAKLJUČAK .....	33
LITERATURA .....	34
POPIS OZNAKA .....	35
POPIS SLIKA .....	37
POPIS TABLICA.....	38
SAŽETAK.....	39
SUMMARY .....	40

## 1. UVOD

Kogeneracijska energetska postrojenja predstavljaju ključnu komponentu suvremenih energetskih sustava, s obzirom na njihovu sposobnost istovremene proizvodnje električne i toplinske energije, pružajući time učinkovitu i održivu energetska alternativu. U današnjem svijetu, gdje energetske potrebe društva stalno rastu, kogeneracijska postrojenja se sve više ističu po svojoj učinkovitosti.

U današnjem svijetu, postojeća energetska postrojenja često se oslanjaju na fosilna goriva kao glavni izvor energije, što rezultira velikim uništavanjem i zagađenjem prirode. Ipak, s rastućim cijenama fosilnih goriva, nepovoljnim utjecajima na okoliš i ograničenim zalihama, sve se više teži obnovljivim izvorima energije kao održivijem rješenju.

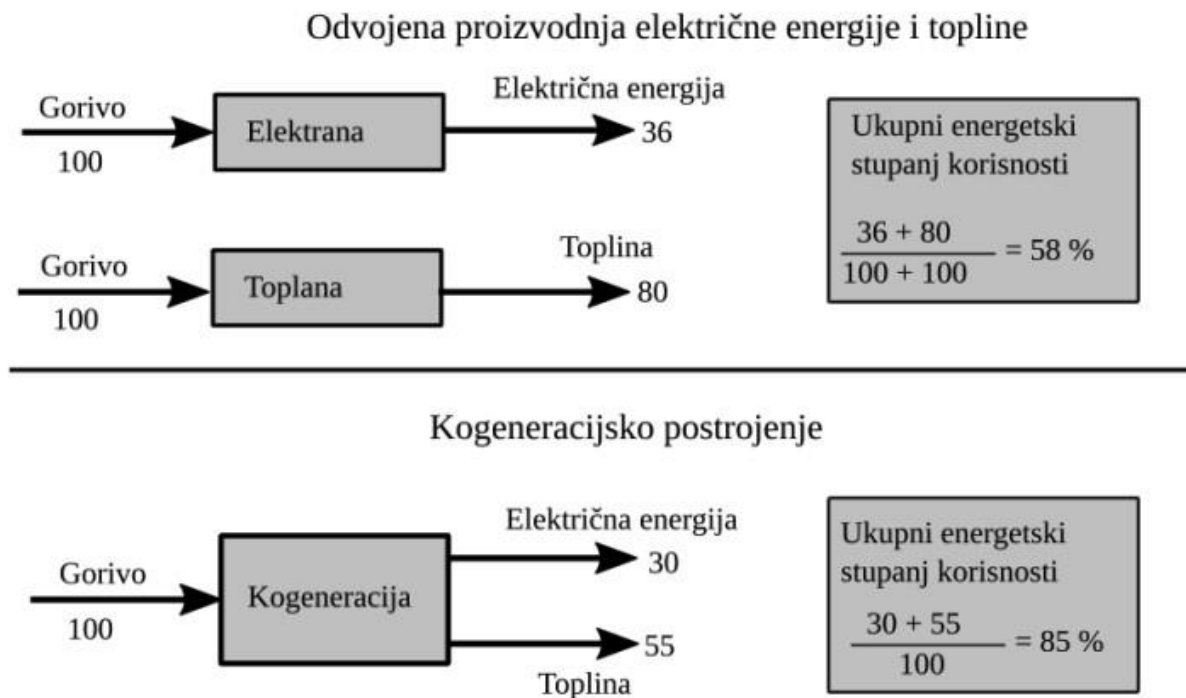
Kogeneracijska postrojenja koriste razne vrste goriva, ali od posebne su važnosti goriva iz obnovljivih izvora energije. Drvna biomasa uključuje drvo i druge organske materijale, ne samo da je obnovljiva, već ima i niski ekološki utjecaj. Osim toga, često se generira kao nusproizvod drvne industrije, čime se dodatno povećava njezin potencijal kao gorivu za proizvodnju energije. U tom kontekstu, drvna biomasa bi u budućnosti mogla postati jedan od glavnih izvora energije.

Ovaj završni rad usmjeren je na proračunavanje i projektiranje kogeneracijskog postrojenja koje koristi drvenu biomasu kao izvor goriva. Potrebno je izraditi koncept postrojenja, toplinsku shemu postrojenja te proračunati energetske bilance te izabrati, proračunati i opisati glavnu opremu postrojenja. Također, potrebno je proračunati potrošnju drvne biomase kao goriva.



## 2. KOGENERACIJSKO ENERGETSKO POSTROJENJE

Kogeneracija, također poznata pod nazivom kombinirana toplina i snaga ili reciklirana energija, je proces simultane proizvodnje dvije ili više vrsta energije iz jednog izvora goriva. Kogeneracijska energetska postrojenja iskorištavaju inače odbačenu toplinu, za dodatnu proizvodnju energije zbog čega imaju do 30% veću iskoristivost u odnosu na postrojenja s odvojenom proizvodnjom električne i toplinske energije.



Slika 2.1 Usporedba odvojene proizvodnje i kogeneracijskog postrojenja [2]

Kogeneracijska postrojenja su ekonomičnija i produktivnija, imaju bolje djelovanje na okoliš što se očituje u manjoj potrebi za dodavanjem fosilnih goriva, također je reducirana emisija ugljikovih plinova i na kraju i sigurnija su.

Postoje različite vrste goriva u kogeneracijskim postrojenjima, neka od njih su:

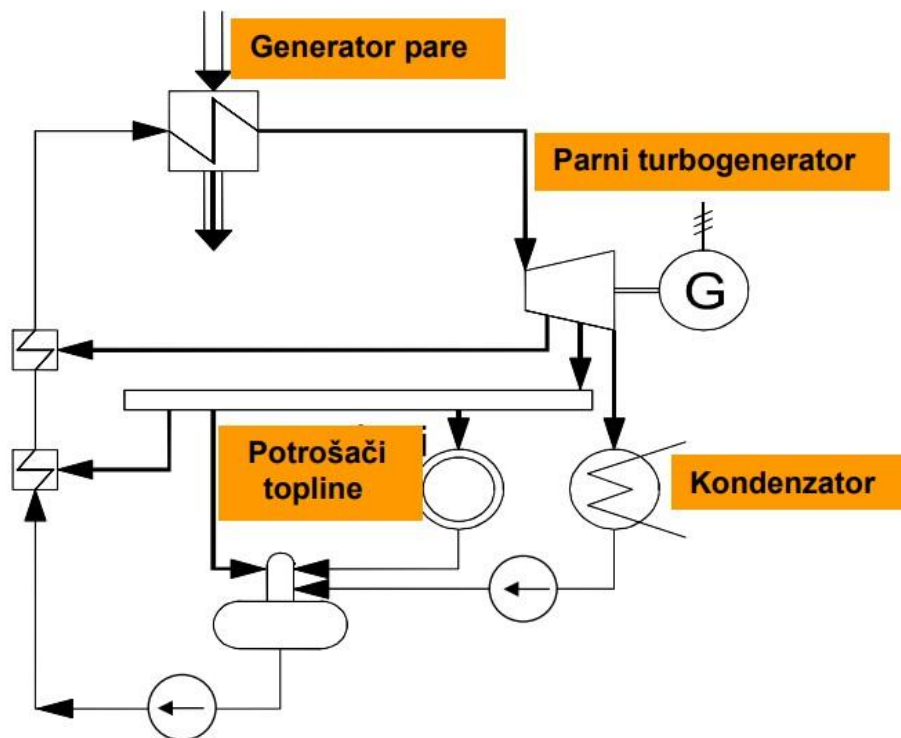
- prirodni plin
- dizel
- benzin
- ugljen
- biogorivo

Postoji nekoliko vrsta kogeneracijskih postrojenja:

- kogeneracijski sustavi s parnom turbinom
- kogeneracijski sustavi s plinskom turbinom
- kogeneracijski sustavi s motorom s unutrašnjim izgaranjem
- integralni kogeneracijski sustavi
- kogeneracijski sustavi s gorivim ćelijama
- kogeneracijski sustavi s magnetohidrodinamskim (MHD) generatorom

Najčešći su kogeneracijski sustavi s parnom turbinom.

S obzirom na postavljene početne uvjete, za ovo postrojenje usvojen je oblik kogeneracijskog energetskeg postrojenja s kondenzacijskom turbinom uz regulirano oduzimanje pare. U takvoj turbini jedan se dio pare oduzima iz turbine i odvodi potrošačima pare, a ostatak pare ekspandira dalje do tlaka kondenzacije.



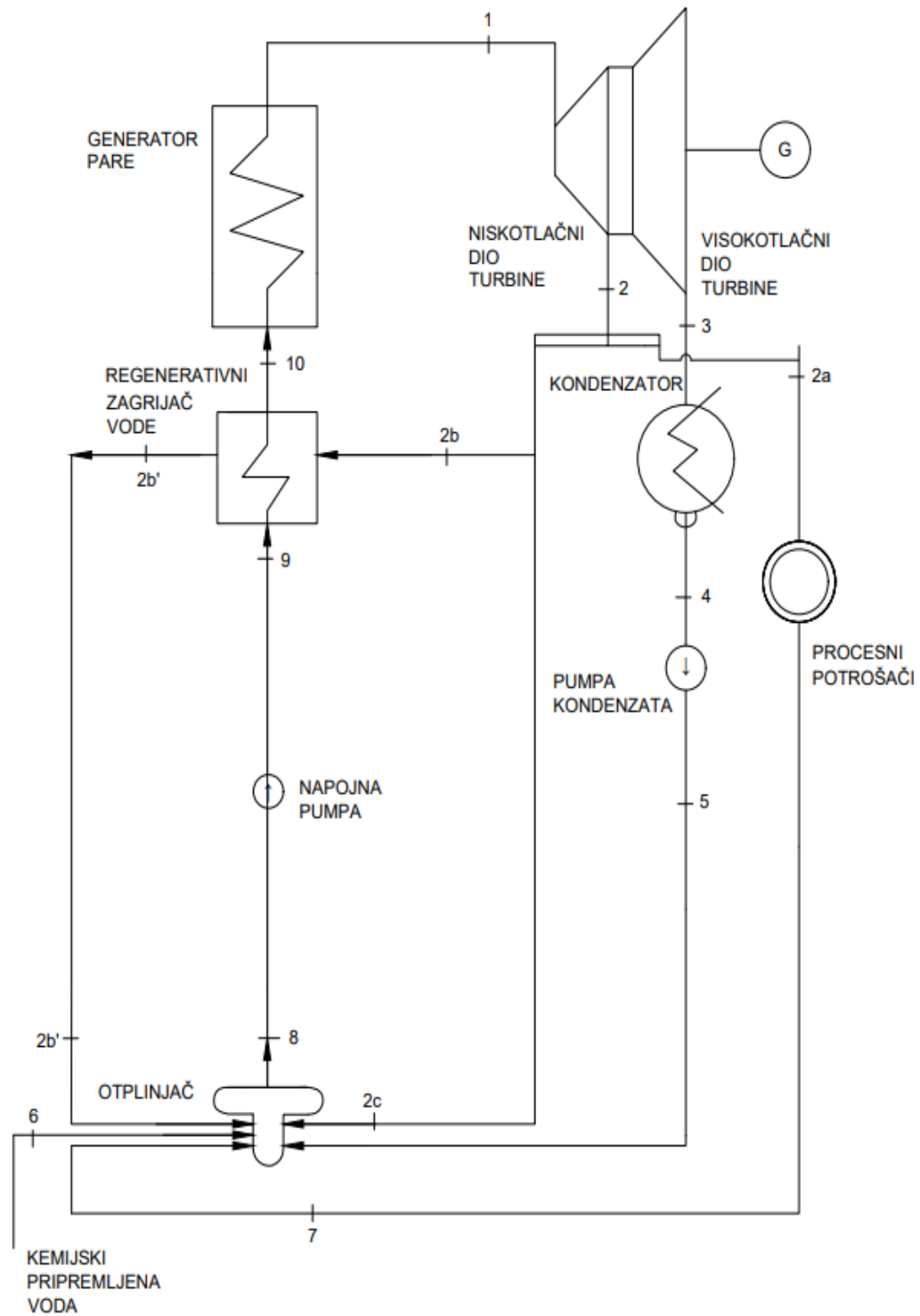
Slika 2.2 Shematski prikaz kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom turbinom uz regulirano oduzimanje [1]

### **3. IDEJNO RJEŠENJE**

U skladu s postavljenim uvjetima, potrebno je locirati idejno kogeneracijsko postrojenje na drvenu biomasu na području Gorskog kotara, odnosno u blizini grada Delnice. Delnice, kao najveći i najnaseljeniji grad na tom području s relativno razvijenom drvnom industrijom zbog bogatstva prirodnih resursa, čine se kao prikladna lokacija za izgradnju ovog kogeneracijskog postrojenja. Osim toga, u neposrednoj blizini Delnice nalaze se i dva značajna pogona u drvnjoj industriji: Drvenjača d.d. u Fužinama i Pilana Mrkopalj u Mrkoplju. Ova blizina ima značajne prednosti, jer olakšava transport biomase do postrojenja, a dobra prometna povezanost je ključna za neprekidno opskrbljivanje kogeneracijskog postrojenja drvnom biomasom.

## 4. PRORAČUN KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA

### 4.1. Toplinska shema postrojenja



Slika 4.1 Toplinska shema kogeneracijskog postrojenja

## 4.2. Termodinamički parametri stanja fluida u postrojenju

Zadani parametri:

Tlak i temperatura svježe pare iz generatora pare :

$$t_1 = 360 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_1 = 64 \text{ bar}$$

Tlak i temperatura pare oduzete iz visokotlačnog dijela turbine:

$$t_2 = 220 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_2 = 18 \text{ bar}$$

Svi ostali parametri iščitani su iz termodinamičkih tablica za pregrijanu i zasićenu vodenu paru te iz h-s dijagrama.

Točka 1- stanje svježe pare na izlazu iz generatora pare

Pomoću zadanih parametara, tlaka i temperature dobiva se stanje pare na izlazu iz generatora, odnosno na ulazu u turbinu.

Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
360	64	3057	6,3306

Točka 2/2b- stanje pare na izlazu iz visokotlačnog dijela turbine

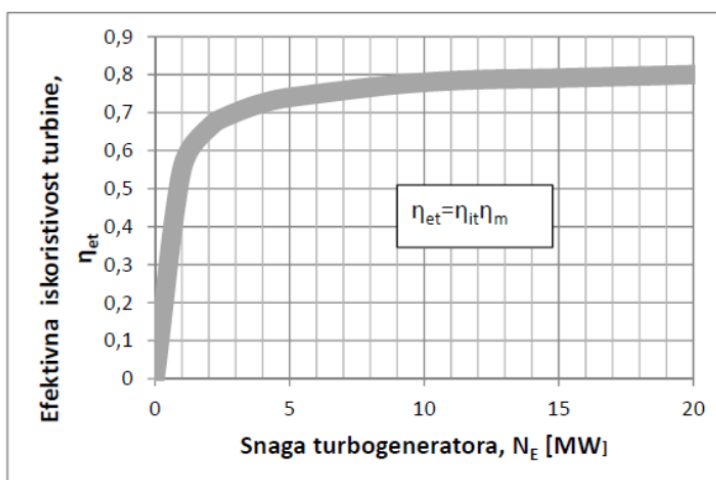
Pomoću zadanih parametara, tlaka i temperature dobiva se stanje pare koja je oduzeta iz visokotlačnog dijela turbine.

Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
220	18	2822	6,452

Točka 3- stanje pare na ulazu u kondenzator

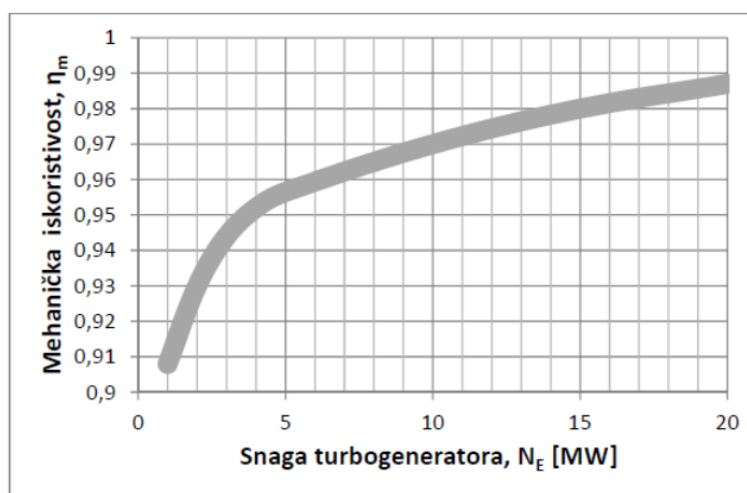
Pri odabranom tlaku u kondenzatoru od 0,07 bar te izračunatu entalpiju, dobiva se stanje pare na ulazu u kondenzator. Entalpija se računa kroz adijabatski pada od tlaka 18 bara do tlaka 0,06 bara. Ekspanzija pare kroz turbinu uzrokuje gubitke koji rezultiraju politropskom ekspanzijom, a ne adijabatskom, što dalje uzrokuje povećanje entropije. Koeficijent unutarnje iskoristivosti turbine računa se pomoću očitanih koeficijenata efektivne i mehaničke iskoristivosti turbine, iz dijagrama na slikama 4.2. i 4.3.

#### ***Efektivna iskoristivost turbine u zavisnosti od snage***



Slika 4.2 Efektivna iskoristivost turbine u zavisnosti od snage [8]

#### ***Mehanička iskoristivost turbine u zavisnosti od snage***



Slika 4.3 Mehanička iskoristivost turbine u zavisnosti od snage [8]

Koeficijenti efektivne i mehaničke iskoristivosti:

$$\eta_{et} = 0,72$$

$$\eta_m = 0,95$$

Entalpija idealnoga procesa:

$$h_{3t} = 2000 \text{ J/kg}$$

$$\eta_{i,t} = \frac{\eta_{et}}{\eta_m} \quad (4.1)$$

$$\eta_{i,t} = \frac{0,72}{0,95}$$

$$\eta_{i,t} = 0,758$$

$$h_3 = h_2 - (h_2 - h_{3t}) \cdot \eta_{i,t} \quad (4.2)$$

$$h_3 = 2822 - (2822 - 2000) \cdot 0,758$$

$$h_3 = 2199,01 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
39,03	0,07	2199,01	7,081

Točka 4 – stanje kondenzata na izlazu iz kondenzatora

Para koja je ušla u kondenzator potpuno kondenzira, do linije zasićenja. Pomoću poznatog tlaka iz točke 3 dobiva se stanje kondenzata na izlazu iz kondenzatora.

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
39,03	0,07	163,43	0,5591

Točka 5- stanje kondenzata nakon tlačne pumpe glavnog kondenzata

Tlačna pumpa tlači kondenzat na tlak od 1,45 bar, odnosno do tlaka koji vlada u otplinjaču. Pomoću poznatog tlaka dobiva se stanje kondenzata nakon tlačne pumpe.

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
39,0305	1,45	163,567	0,5591

Točka 6- stanje kemijski pripremljene vode na ulazu u otplinjač

U otplinjač se dovodi kemijski pripremljena voda iz spremnika pripremljene potrošne vode, temperatura svježje, kemijski pripremljene vode jednaka je temperaturi okoline i iznosi 20°C, dok je tlak jednak tlaku u otplinjaču i iznosi 1,45 bar. Pomoću ovih parametara dobiva se stanje pripremljene vode.

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
20	1,45	83,9	0,2964

Točka 7- stanje povratnog kondenzata od toplinskih potrošača

Kondenzat se od toplinskih potrošača vraća pri poznatoj temperaturi od 70°C te pri tlaku 1,45 bara (tlak koji vlada u otplinjaču). Pomoću tih parametara dobiva se stanje povratnog kondenzata.

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
70	1,45	293	0,9549

Točka 2b'- stanje kondenzata na izlazu iz regenerativnog zagrijača vode

U regenerativnom zagrijaču vode para kondenzira do linije zasićenja pri tlaku 18 bara. Pomoću očitane temperature i poznati tlak dobiva se stanje kondenzata.

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
210,5	1,45	897,7	2,4246

Točka 2c- stanje pare na ulazu u otplinjač

Para koja se oduzima iz visokotlačnog dijela turbine prigušuje se na tlak 1,45 bar (tlak koji vlada u otplinjaču) te entalpija ostaje nepromijenjena.

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
174,26	1,45	2822	7,5491



Točka 8- stanje napojne vode na usisnoj strani pumpe/ na izlazu iz otplinjača

Pomoću poznatoga tlaka koji vlada u otplinjaču dobiva se stanje napojne vode.

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
110	1,45	462,85	1,418

Točka 9- stanje napojne vode nakon napojne pumpe/ na ulazu u regenerativni zagrijač

Napojna pumpa tlači napojnu vodu na tlak od 70 bar, koji je većeg iznosa u odnosu na tlak u generatoru pare, kako bi se svladali gubici strujanja. Pretpostavljeni pad tlaka je 4 bar.

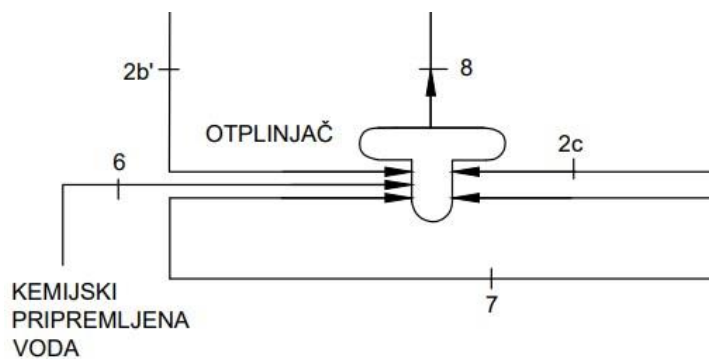
Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
110,27	70	465,7	1,418

Točka 10- stanje napojne vode na ulazu u generator pare

Napojna voda se u regenerativnom zagrijaču vode zagrijava na 135 °C, pomoću poznatih parametara, temeprature i tlaka dobiva se stanje napojne vode.

Temperatura [°C]	Tlak [bar]	Entalpija [kJ/kg]	Entropija [kJ/(kgK)]
135	70	567,5	1,687

### 4.3 Proračun energetske bilance



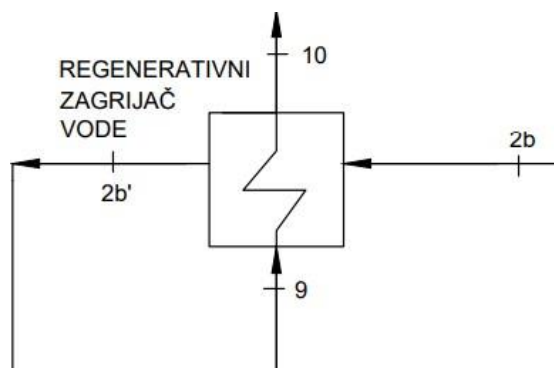
Slika 4.4 Bilanca topline otplinjača

Izraz za bilancu mase otplinjača

$$m_7 + m_6 + m_5 + m_{2c} + m_{2b} = D \quad (4.3)$$

Izraz za bilancu topline otplinjača

$$m_7 \cdot h_7 + m_6 \cdot h_6 + m_5 \cdot h_5 + m_{2c} \cdot h_{2c} + m_{2b'} \cdot h_{2b'} = D \cdot h_8 \quad (4.4)$$



Slika 4.5 Bilanca topline regenerativnog zagrijača

Izraz za bilancu topline regenerativnog zagrijača

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

$$m_{2b} = \frac{D \cdot (h_{10} - h_9)}{h_{2b} - h_{2b'}} \quad (4.5)$$

Uvrštavanjem izraza (4.5.) u izraz (4.3) dobiva se

$$m_5 = D \cdot \left(1 - \frac{h_{10} - h_9}{h_{2b} - h_{2b'}}\right) - m_7 - m_6 - m_{2c} \quad (4.6)$$

Uvrštavanjem izraza (4.4.) i (4.5.) u (4.6.) dobiva se

$$m_{2c} = \frac{D \cdot h_9 - m_7 \cdot h_7 - \left(\frac{D \cdot (h_{10} - h_9)}{h_{2b} - h_{2b'}}\right) \cdot h_{2b'} - D \cdot \left(1 - \frac{h_{10} - h_9}{h_{2b} - h_{2b'}}\right) \cdot h_5 + m_6 \cdot h_5 + m_7 \cdot h_5 - m_6 \cdot h_6}{h_{2b} - h_5} \quad (4.7)$$

Bilanca snage generatora električne energije

$$\frac{P}{\eta_g \cdot \eta_m} = D \cdot (h_1 - h_3) - m_{od} \cdot (h_2 - h_3)$$

$$\frac{P}{\eta_g \cdot \eta_m} = D \cdot (h_1 - h_3) - (m_{2a} + m_{2b} + m_{2c}) \cdot (h_2 - h_3) \quad (4.8)$$

Uvrštavanjem izraza (4.5.) i (4.7.) u (4.8.) dobiva se izraz za potrebnu količinu proizvedene pare

$$D = \frac{\frac{P \cdot (h_{2c} - h_5)}{\eta_g \cdot \eta_m} + m_{2a} \cdot (h_{2c} - h_5) - m_7 \cdot h_7 + m_6 \cdot h_5 + m_7 \cdot h_5 - m_6 \cdot h_6}{\frac{(h_1 - h_3) \cdot (h_{2c} - h_5)}{h_2 - h_3} - h_8 + \left(\frac{h_{10} - h_9}{h_{2b} - h_{2b'}}\right) \cdot h_{2b'} + \left(1 - \frac{h_{10} - h_9}{h_{2b} - h_{2b'}}\right) \cdot h_5 - \left(\frac{h_{10} - h_9}{h_{2b} - h_{2b'}}\right) \cdot (h_{2c} - h_5)} \quad (4.9)$$

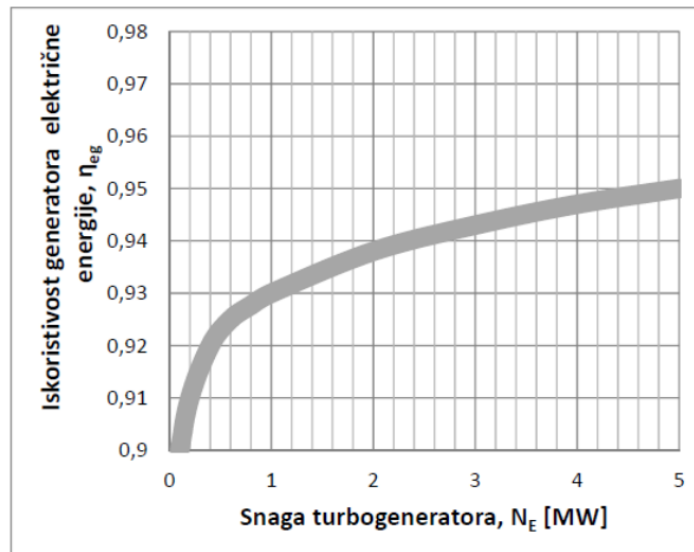
Zadani i iščitani parametri:

$m_{2a} = 2 \text{ t/h}$	- količina pare za potrebe toplinskih potrošača
$m_7 = 1 \text{ t/h}$	- količina kondenzata na povratku iz procesa
$m_6 = 1 \text{ t/h}$	- količina kemijski pripremljene vode dovedene u otplinjač
$P = 4 \text{ MW}$	- snaga
$\eta_m = 0,95$	- mehanička iskoristivost turbine

Ostali potrebni parametri za ovaj proračun prikazani su u prethodnom potpoglavlju 3.2. Termodinamički parametri stanja fluida u postrojenju.

Iskoristivost generatora električne energije iščitava se sa slike 4.6.

**Iskoristivost generatora električne energije u zavisnosti od snage**



Slika 4.6 Iskoristivost generatora električne energije u zavinsoti od snage [8]

$$\eta_g = 0,947$$

-iskoristivost generatora električne energije

Izračunati parametri:

$$D = 17,02131 \text{ t/h}$$

- količina proizvedene pare u generatoru pare

$$D = 4,728143 \text{ kg/s}$$

$$m_{2c} = 1,5884444 \text{ t/h}$$

- količina pare na ulazu u otplinjač

$$m_{2c} = 0,441234 \text{ kg/s}$$

$$m_5 = 12,5324 \text{ t/h}$$

- količina pare na izlazu iz kondenzatora

$$m_5 = 3,481223 \text{ kg/s}$$

$$m_{2b} = 0,900468 \text{ t/h}$$

- količina pare koja je korištena za regenerativno zagrijavanje

$$m_{2b} = 0,25013 \text{ kg/s}$$

$$m_{od} = 4,488911 \text{ t/h}$$

- ukupna količina pare koja je oduzeta iz turbine

$$m_{od} = 1,24692 \text{ kg/s}$$

#### 4.4. Opis rada postrojenja

U ovome se procesu koristi drvena biomasa, kao gorivo, koja se dovodi iz spremišta goriva u kotao.

Proces započinje u generatoru pare, gdje se proizvodi 17,02131 t/h pregrijane pare pod tlakom od 64 bar i pri temperaturi od 360 °C. Zatim, ova para ulazi u kondenzacijsku turbinu gdje se dio pare, 4,488911 t/h, oduzima pod tlakom od 18 bar. Od tog oduzetog dijela, 2 t/h pare se koristi za grijanje i tehnološke procese, dok se ostatak upotrebljava za regenerativno zagrijavanje i na kraju se otpušta.

Veći dio pare, odnosno, 12,5324 t/h, ekspandira u niskotlačnom dijelu turbine do tlaka 0,07 bar. Ovdje se mehanička energija dobivena radom turbine pretvara u električnu energiju putem generatora snage 4 MW, koji je spojen na vratilo turbine. Nakon ekspanzije, para kondenzira u kondenzatoru, a kondenzat se pumpom vraća u otplinjač. U otplinjaču se vrši odvajanje plinova CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>, koji se smatraju agresivnima.

U otplinjač se također dovodi kondenzat pare od 1 t/h iz procesnih potrošača, kao i kondenzat pare 0,900468 t/h iz regenerativnog zagrijača napojne vode. Oba kondenzata se miješaju s kondenzatom iz kondenzatora sa 1 t/h kemijski pripremljene vode koja služi za nadoknadu gubitaka pare u procesu.

Nakon otplinjača, voda se podiže na tlak od 70 bar pomoću napojne pumpe i prolazi kroz indirektni zagrijač vode, dostižući temperaturu od 135°C. Voda ovakvog stanja ulazi u generator pare i proces se ponavlja.

Ovaj proces koristi optočni rashladni sustav sa rashladnim tornjem vlažnog tipa za hlađenje vode, gdje se dio vode hladi isparavanjem, a drugi dio konvekcijom zraka.

## 5. PRORAČUN POTROŠNJE DRVNE BIOMASE KAO GORIVA

### 5.1. Kemijski sastav goriva

Pojam biomasa odnosi se na svu materiju biljnog ili životinjskog porijekla koja se može koristiti kao gorivo za proizvodnju energije. Energija iz biomase dolazi u čvrstom, tekućem i plinovitom stanju.

Drvena biomasa predstavlja svu šumsku drvenu masu, drvene ostatke nastale iz prerade drveta, kao i ostale vrste drvnog otpada. Drvena biomasa jedna je od najstarijih izvora energije, a ujedno je i obnovljivi izvor. Danas se pojavljuje u četiri osnovna uporabna oblika:

- sječka
- briketi
- peleti
- cjepanice

Radi proračuna potrošnje goriva, utvrđuje se kemijski sastav drvene biomase, neophodan za određivanje donje ogrjevne moći. Drvena biomasa u najvećem postotku sadrži ugljik, vodik i kisik, te se u njoj mogu pronaći tragovi dušika, sumpora, kalija, klora i pepela.

	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 (zrnje)	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	–	–	–	–	–

Slika 5.1 Kemijski sastav krute biomase [4]

S obzirom na nespecificiranu vrstu drvene biomase, već samo lokaciju budućeg kogeneracijskog postrojenja, za proračun kemijskog sastava uzima se najrasprostranjenija vrsta drveća u Gorskom kotaru, gdje prevladava crnogorična šuma, čineći tako većinu sirovine za drvenu industriju.

Kemijski sastav za materijale od neprerađenog crnogoričnog drveća uzima se kao srednja vrijednost prema podacima prikazanima na slici 5.2. Kemijski sastav krute biomase.

#### *5.1 Kemijski sastav drvene biomase kao goriva [4]*

C	O	H	S	N
0,51	0,42	0,063	0,0003	0,003

## 5.2. Donja ogrjevna moć goriva

Ogrjevna moć je fizička veličina koja opisuje količinu topline koja se oslobađa prilikom izgaranja određene količine goriva, izražena kao omjer toplinske energije oslobođene izgaranjem i mase ili volumena tog goriva. Razlikuju se:

- gornja ogrjevna moć – uključuje toplinu kondenzacije vodene pare nastale izgaranjem, pretpostavlja se da voda oslobođena iz goriva ostaje u tekućem stanju
- donja ogrjevna moć ( $H_d$ ) – ne uključuje toplinu kondenzacije vodene pare, pretpostavlja se da voda oslobođena iz goriva ostaje u obliku vodene pare

Za izračun potrošnje goriva koristi se donja ogrjevna moć, koja se dobiva pomoću izraza():

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

gdje je:

$c$  – maseni udio ugljika

$h$  – maseni udio vodika

$o$  – maseni udio kisika

$s$  – maseni udio sumpora

$w$  – maseni udio vlage

Prvo se računa donja ogrjevna moć koja sadrži 0% vlage, te se na temelju tog izračuna, pomoću izraza(5.2) računa ogrjevna moć s obzirom na različite masene udjele vlage u gorivu.

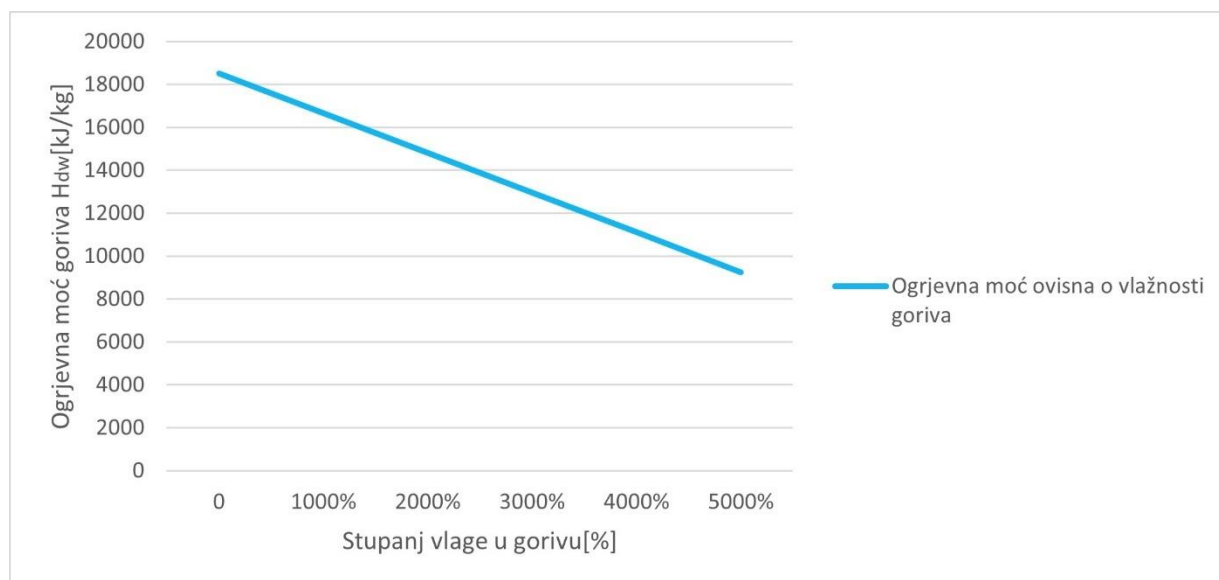
$$H_{dw} = \frac{H_d \cdot (100 - w) - 2,44 \cdot w}{100} \quad (5.2)$$



### 5.2 Ovisnost vrijednosti ogrjevnice moći o sadržaju vlage o gorivu

Maseni udio vlage $w$ [%]	Donja ogrjevna moć goriva $H_{dw}$ [kJ/kg <sub>G</sub> ]
0 %	18520,7
10%	16668,34
20%	14816,03
30%	12963,72
40%	11111,41
50%	9259,11

Kao što je vidljivo iz tablice 5.2., ogrjevna moć goriva pada povećanjem stupnja vlage u gorivu. Tablične vrijednosti prikazane su i dijagramski na sljedećoj slici.



Slika 5.2 Dijagramski prikaz vrijednosti ogrjevnice moći u zavisnosti od stupnja vlage u gorivu

### 5.3. Potrošnja goriva

Za proračun potrošnje goriva, potrebno je poznavati vrijednosti donje ogrjevne moći koje su prethodno izračunate, kao i izračunatu količinu oslobođene energije izgaranjem goriva u kotlu. Količina oslobođene energije izračunava se koristeći navedeni izraz uz pretpostavljeni koeficijent iskoristivosti generatora pare  $\eta_k = 0,86$ .

$$Q_k = \frac{D \cdot (h_1 - h_{10})}{\eta_k} \quad (5.3)$$

$$D = 4,728143 \text{ kg/s}$$

- količina proizvedene pare

$$h_1 = 3057 \text{ kJ/kg}$$

- entalpija vodene pare na izlazu iz generatora pare

$$h_{10} = 567,5 \text{ kJ/kg}$$

- entalpija napojne vode na ulazu u generator pare

$$\eta_k = 0,86$$

- koeficijent iskoristivosti kotla

$$Q_k = 13686,87 \text{ kW} = 13,687 \text{ MW}$$

- količina oslobođene energije izgaranja goriva

Nakon proračuna oslobođene energije izgaranja goriva, moguće je odrediti potrebnu količinu goriva za kotao pomoću sljedećeg izraza:

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

#### 5.3 Potrošnja goriva

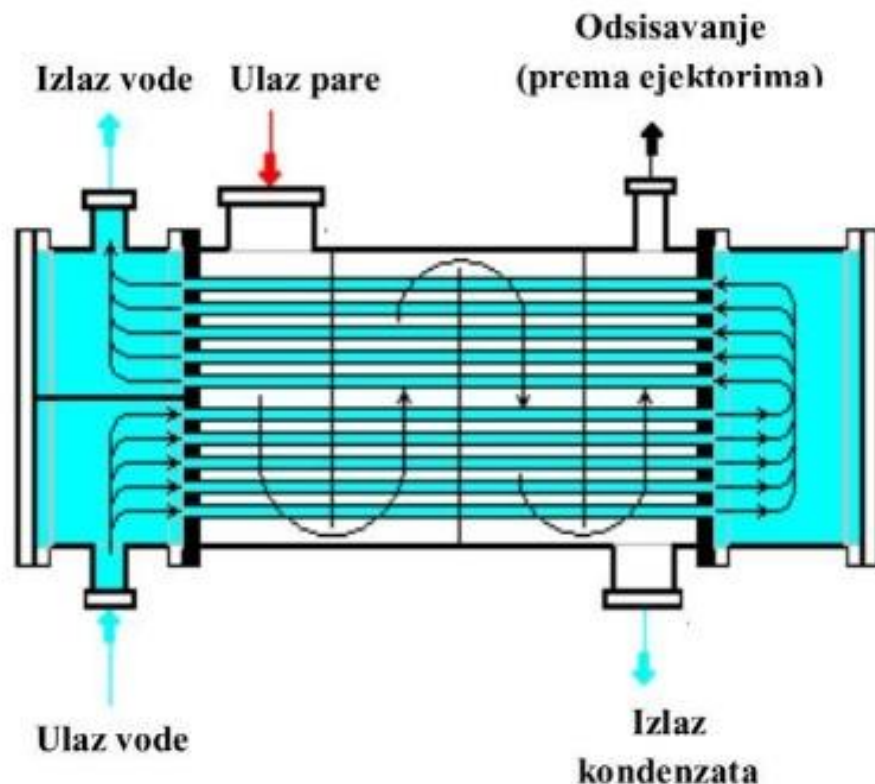
Stupanj vlažnosti goriva	Potrošnja goriva $D_g$	
	kg/s	t/h
0%	0,74	2,66
10%	0,82	2,96
20%	0,92	3,33
30%	1,06	3,80
40%	1,23	4,43
50%	1,48	5,32

## 6. GLAVNA OPREMA KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA

### 6.1. Kondenzator pare

Kondenzatori su tipovi površinskih izmjenjivača topline koji služe za kondenzaciju pare na izlazu iz turbine. Kondenzacija se događa pri tlaku koji je niži od atmosferskog tlaka. U kondenzatorima se obično održava tlak između 0,02 i 0,08 bar.

Za postizanje što veće efikasnosti parnog procesa, ključno je osigurati kondenzaciju pri što nižem tlaku (i temperaturi), što izravno ovisi o temperaturi radnog fluida, odnosno okolini. U konkretnom slučaju, odabran je tlak u kondenzatoru od 0,07 bar, koji premašuje iznos prosječnog tlaka, čime se smanjuje efikasnost postrojenja. Razlog za ovakav odabir je nedostatak dostatne količine rashladne vode na mjestu postavljanja planiranog postrojenja, što prisiljava na korištenje hlađenja okolnim zrakom u rashladnom tornju. Ovaj način hlađenja je manje efikasan, a to je i uzrok većeg tlaka kondenzacije.



Slika 6.1 Shematski prikaz kondenzatora pare [6]

### 6.1.1 Proračun kondenzatora pare

Kondenzator pare proračunava se kao izmjenjivač topline, gdje se korištenjem rashladne vode odvaja toplina isparavanja/ kondenzacije pare. To se postiže pri temperaturi ravnotežnog stanja, koja je uvjetovana tlakom u parnom prostoru kondenzata.

Ukoliko se zanemari pothlađenje izlaznoga kondenzata ispod ravnotežne temperature, što treba smanjiti na minimum, a u praksi se ne može u potpunosti izbjeći, tada je moguće pretpostaviti da se izmjena topline u kondenzatoru zbiva pri konstantnoj temperaturi.

Toplinskim proračunom kondenzatora određuje se rashladna površina cijevi, kroz koje se, uzimajući u obzir specifične uvjete okoline i opterećenja turbine, treba prenijeti sva toplina kondenzacije izlazne vodene pare iz turbine, kao i iz raznih drugih pomoćnih parnih tokova koji se vraćaju u kondenzator.

Za proračun je potrebno koristiti tlak i temperaturu koji vladaju u kondenzatoru- tlak od 0,07 bar i temperatura,  $t_k$  od 39,03°C. Također potrebna je i temperatura vode koja ulazi u kondenzator,  $t_{w1}$  čija se temperatura kreće između 25 i 28°C -vrijednost vode iz kružnog sustava s rashladnim tornjevima u umjerenim područjima. Za ovaj slučaj usvaja se srednja temperatura od 26,5°C. Izlazna temperatura vode ovisi o porastu temperature rashladne vode, koji se obično kreće između 8 i 12°C. Usvojen je porast od 8°C te je time temperatura izlazne rashladne vode,  $t_{w2}$  34,5°C.

Standardne dimenzije cijevi,  $\Phi 23/21$  mm i  $\Phi 25/23$  mm te se za ovaj proračun usvajaju dimenzije  $\Phi 23/21$  mm. Također, potrebno je usvojiti brzinu strujanja vode kroz cijevi,  $w$  čija se vrijednost kreće od 1,5 do 2,5 m/s za slatke rashladne vode. Usvojena je vrijednost od 2 m/s.

Ostali parametri potrebni za proračun:

$m_3 = 3,481222765$  kg/s - količina izlazne pare iz turbine

$h_3 = 2199,01$  kJ/kg - entalpija izlazne pare iz turbine

$h_4 = 163,43$  kJ/kg - entalpija kondenzata

$c_w = 4,187$  kJ/kg°C - specifična toplina vode

Pri kondenzaciji, para predaje, a rashladna voda preuzima količinu topline prema sljedećem izrazu

$$Q = m_3 \cdot (h_3 - h_4) \quad (6.1)$$

$$Q = 7086,307 \text{ kW} = 7,086 \text{ MW}$$

Sljedeće je potrebno odrediti karakterističnu veličinu kondenzatora- specifično opterećenje rashladne površine. Definira se kao odnos između količine kondenzirane pare u jedinici vremena i rashladne površine kondenzatora, odnosno izrazom

$$d_k = \frac{m_3}{F_k} \quad (6.2)$$

i kreće se od 0,01 do 0,02 kg/m<sup>2</sup>s.

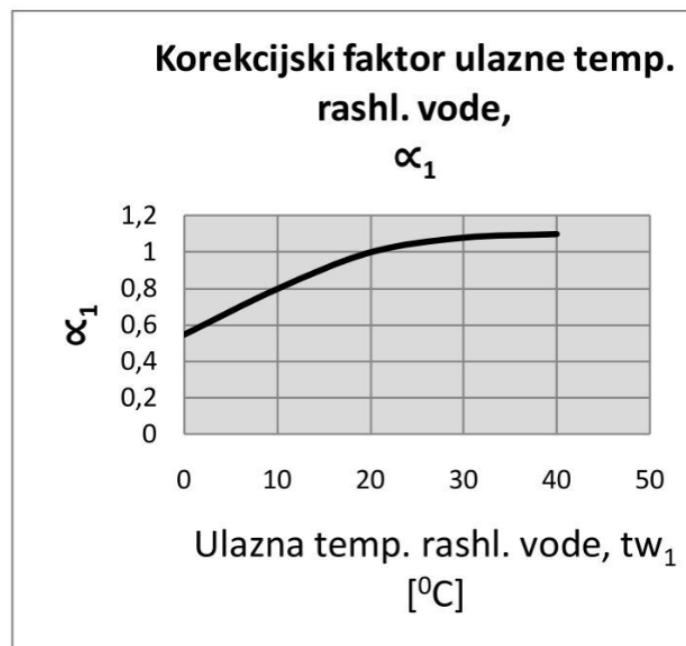
Usvaja se vrijednost  $d_k = 0,01 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $d_k = 36 \text{ kg/ m}^2\text{h}$

Koeficijent prolaza topline u kondenzatoru može se odrediti sljedećim izrazom

$$k = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot b \cdot k' \quad (6.3)$$

Koeficijent onečišćenja rashladne površine,  $b$  kreće se u rasponu od 0,75 do 0,95. Usvaja se vrijednost  $b = 0,75$ .

Korekcijski faktor ulazne temperature rashladne vode,  $\alpha_1$  određuje se iz dijagrama sa slike 6.2.

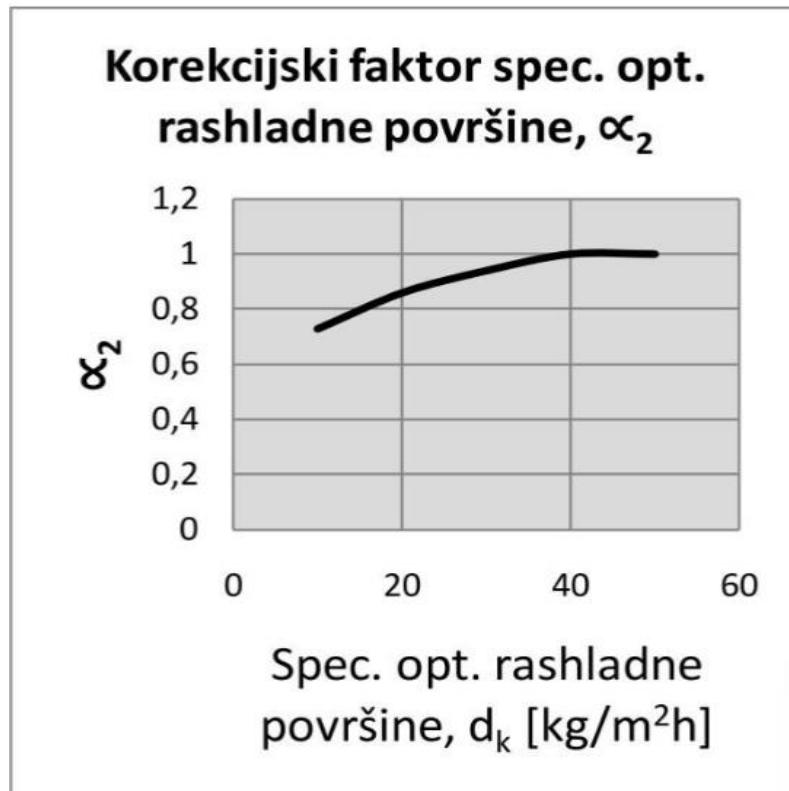


Slika 6.2 Dijagram korekcijskog faktora ulazne temperature rashladne vode [6]

$tw_1 = 26,5^\circ\text{C}$

Očitano:  $\alpha_1 = 1,07$

Korekcijski faktor specifičnog opterećenja rashladne površine,  $\alpha_2$  određuje se iz dijagrama sa slike 6.3.

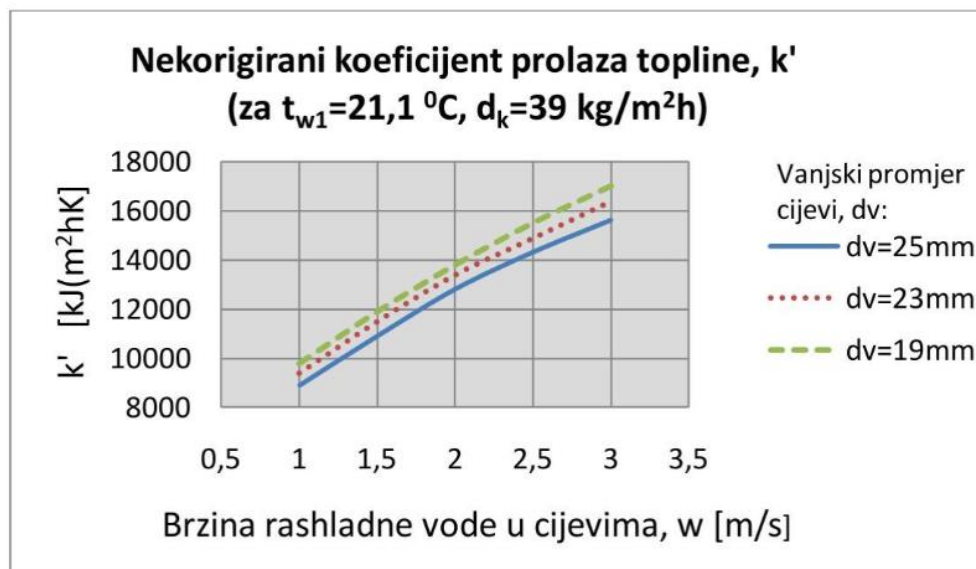


Slika 6.3 Korekcijski faktor specifičnog opterećenja rashladne površine [6]

$$d_k = 0,01 \text{ kg/m}^2\text{s} = 36 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

Očitano:  $\alpha_2 = 0,9$

Nekorrigirani koeficijent prolaza topline,  $k'$  određuje se iz dijagrama sa slike 6.4.



Slika 6.4 Nekorigirani koeficijent prolaza topline [6]

$d_v = 23 \text{ mm}$ ,  $w = 2 \text{ m/s}$

Očitano:  $k' = 13400 \text{ kJ/m}^2\text{hK} = 3,722 \text{ kW/m}^2\text{K}$

Izrazom (6.3) dobiva se koeficijent prolaza topline u kondenzatoru:

$k = 2,927167 \text{ kW/m}^2\text{K}$

Potrebno je izračunati i srednju razliku temperature pare i rashladne vode,  $\Delta t$ ., prema sljedećem izrazu

$$\Delta t = t_k - \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} \quad (6.4)$$

$\Delta t = 8,53^\circ\text{C}$

Potrebna rashladna površinu kondenzatora, računa se prema sljedećem izrazu

$$A_k = \frac{q}{k \cdot \Delta t} \quad (6.5)$$

$A_k = 283,81 \text{ m}^2$

Usvaja se vrijednost površine:  $A_k = 285 \text{ m}^2$

Potreban protok rashladne vode računa se prema izrazu

$$m_k = \frac{Q_k}{c_w \cdot (t_{w2} - t_{w1})} \quad (6.6)$$

$$m_k = 211,5568 \text{ kg/s}$$

Iz izraza(6.6) slijedi izraz za vodni faktor

$$m = \frac{m_k}{m_5} \quad (6.7)$$

$$m = 60,77084$$

Broj cijevi u jednom prolazu računa se prema izrazu:

$$n = \frac{4 \cdot m_k}{\rho \cdot d_u^2 \cdot \pi \cdot w} \quad (6.8)$$

$$n = 306,62$$

Usvaja se broj cijevi  $n = 307$

Odabire se dvostruki broj prolaza pa je ukupni broj cijevi  $n = 614$

Dalje se računa duljina kondenzatorskih cijevi prema izrazu

$$l = \frac{A_k}{d_v \cdot \pi \cdot n} \quad (6.9)$$

$$l = 6,397015 \text{ m}$$



## 6.2. Pumpa kondenzata

Pumpe su općenito strojevi koji se koriste za transportiranje fluida iz područja nižeg tlaka u područje višeg tlaka. Transport fluida odvija se kroz usisni cjevovod na način da se u radnom dijelu povećava ukupna mehanička energija i potom se ispušta kroz tlačni cjevovod.

Pumpa za kondenzat u postrojenju ima zadaću tlačiti kondenzat kroz predgrijače napojne vode ili do napojne pumpe. Konkretno, pumpa odvodi kondenzat iz kondenzatora prema otplinjaču i istovremeno povećava tlak kondenzata na potrebnu vrijednost od 1,45 bar, koja vlada u otplinjaču.



*Slika 6.5 Pumpa kondenzata [7]*

Parametri potrebni za proračun :

$m_3 = 3,481222765 \text{ kg/s}$	- količina izlazne pare iz turbine
$p_s = 1,45 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- tlak u spremniku vode
$p_k = 0,07 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- tlak u kondenzatoru pare
$\Delta p = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- pretpostavljeni pad tlaka u cijevima
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	- gravitacijsko ubrzanje
$\rho = 992,6 \text{ kg/m}^3$	- gustoća kondenzata pri određenom tlaku

Visinska razlika vode u kondenzatoru i spremniku napojne vode usvaja se:  $h_d = 2,5$  m

Za proračun stvarne snage pumpe kondenzata prvo je potrebno izračunati teorijsku snagu prema izrazu

$$P = m_3 \cdot \left[ \frac{p_s - p_k + \Delta p}{\rho} + g \cdot h_d \right] \quad (6.10)$$

$$P = 920,0848 \text{ W} = 0,920085 \text{ kW}$$

Stvarna, odnosno efektivna snaga pumpe izračunava se korištenjem teorijske snage pumpe, koja je već dobivena, i koeficijenta iskoristivosti pumpe,  $\eta$ .

Vrijednosti koeficijenta iskoristivosti pumpe, variraju u rasponu između 0,6 i 0,9. Usvaja se srednja vrijednost od 0,75.

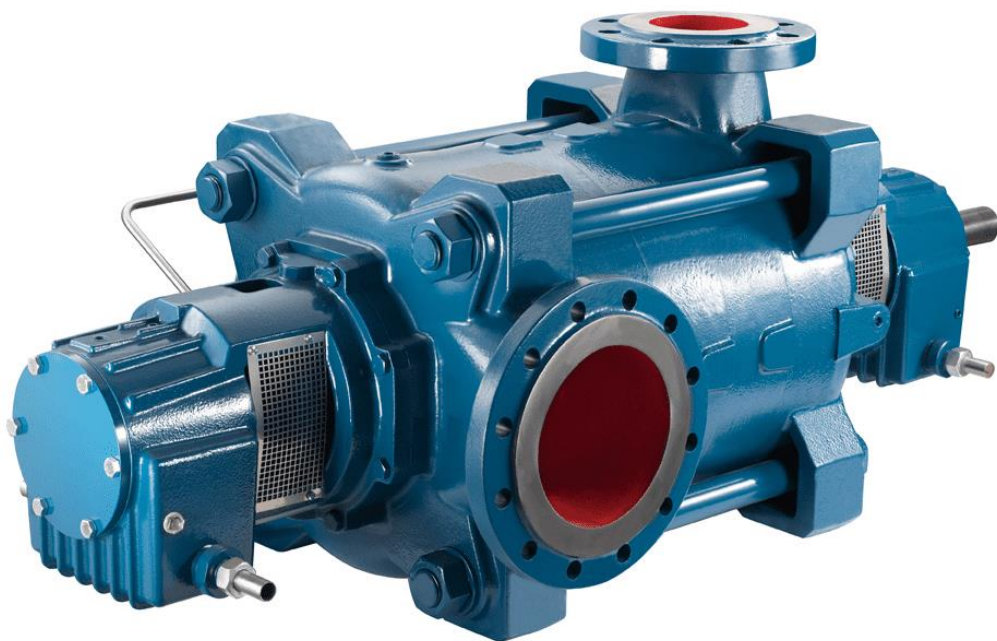
$$P_{ef} = \frac{P}{\eta} \quad (6.11)$$

$$P_{ef} = 1226,78 \text{ W} = 1,227 \text{ kW}$$

### 6.3. Napojna pumpa

Napojne pumpe su strojevi koji dovode napojnu vodu u generator pare i podižu njezin tlak na radni tlak generatora pare. Uobičajeno se koriste centrifugalne pumpe jer imaju kontinuiran protok koji ovisi o tlaku. Pumpe se mogu pokretati različitim metodama, no u suvremenim termoenergetskim postrojenjima najčešće se koriste elektromotorni pogoni ili motori s unutarnjim izgaranjem.

Da bi se osiguralo kontinuirano napajanje generatora pare, preporučljivo je koristiti dvije napojne pumpe. Optimalno je opremiti pumpe elektromotorima, ali ova je opcija potpuno sigurna samo ako je moguće prespojiti pumpe na dva neovisna izvora napajanja.



*Slika 6.6 Napojna pumpa [9]*

Parametri potrebni za proračun :

$m_{np} = 1,25 \cdot D = 1,25 \cdot 4,73 = 5,91 \text{ kg/s}$	- količina napojne vode
$p_s = 1,45 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- tlak u spremniku vode
$p_g = 66 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- tlak u generatoru pare
$\Delta p = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	- pretpostavljeni pad tlaka u cijevima
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	- gravitacijsko ubrzanje
$\rho = 951,02 \text{ kg/m}^3$	- gustoća napojne vode pri određenom tlaku

Razlika visina vode u spremniku vode i generatoru pare,  $h$ , računa se prema izrazu

$$h = h_g - h_d \quad (6.12)$$

Visina vode u generatoru pare,  $h_g$ , usvaja se:  $h_g = 4 \text{ m}$

$$h = 1,5 \text{ m}$$

Stvarna snaga napojne pumpe računa se prema izrazu(6.10)

$$P = m_{np} \cdot \left[ \frac{p_g - p_s + \Delta p}{\rho} + g \cdot h \right]$$

$$P = 41103,12 \text{ W} = 41,10 \text{ kW}$$

Kao i u prethodnom poglavlju, usvaja se vrijednosti koeficijenta iskoristivosti pumpe, od 0,75.

Stvarna, odnosno efektivna snaga, računa se prema izrazu (6.11) i iznosi

$$P_{ef} = \frac{P}{\eta}$$

$$P_{ef} = 54804,15 \text{ W} = 54,804 \text{ kW}$$

## 6.4. Parna turbina

Parne turbine su toplinski strojevi u kojima se toplinska energija sadržana u pari pretvara u kinetičku energiju, a potom se ta kinetička energija transformira u mehanički rad.

Turbine se dijele prema načinu i mjestu pretvorbe toplinske energije u kinetičku i prema tlaku pare na izlazu.

Prema načinu i mjestu pretvorbe turbine se dijele na:

- akcijske turbine – pretvorba energije zbiva se u statorskim lopaticama
- reakcijske turbine – pretvorba energije zbiva se djelomično u statorskim i djelomično u rotorskim lopaticama

Prema tlaku pare na izlazu turbine se dijele na:

- kondenzacijske turbine – para izlazi u kondenzator u kojem vlada podtlak
- protutlačne turbine – para izlazi pod tlakom koji je veći od atmosferskog te se dalje koristi za pogon manjih turbina u energetskom sustavu ili za opskrbu toplinskom energijom
- kondenzacijske turbine s oduzimanjem pare – para djelomično izlazi kroz oduzimanja za potrebe pomoćnih potrošača, a preostali dio izlazi u kondenzator

Pretvorba toplinske energije, u energiju pokretanja rotora turbine, proizlazi kao rezultat strujanja pare kroz nepokretne sapnice i pokretne rotorske lopatice. Odnosno pretvorba energije događa se zahvaljujući razlici ulaznih i izlaznih parametara pare, na koje sama turbina nema utjecaj, već su oni nametnuti izvana.

Na temelju postavljenih ulaznih parametara, vrste goriva, samoga postrojenja te dosadašnjeg proračuna izabire se parna turbina. Ovo kogeneracijsko postrojenje koristi kondenzacijsku turbinu s oduzimanjem pare te se iz dostupnog kataloga turbina firme Siemens, odabire parna turbina SST-200.



*Slika 6.7 Parna turbina Siemens tipa SST-200 [11]*

*6.1 Tehnički podaci parne turbine SST- 200 [11]*

Izlazna snaga	do 20 MW
Ulazni tlak pare	do 120 bar (a) / 1,740 psi
Ulazna temperatura pare	do 540°C / 1,004°F
Brzina turbine	do 12000 rpm

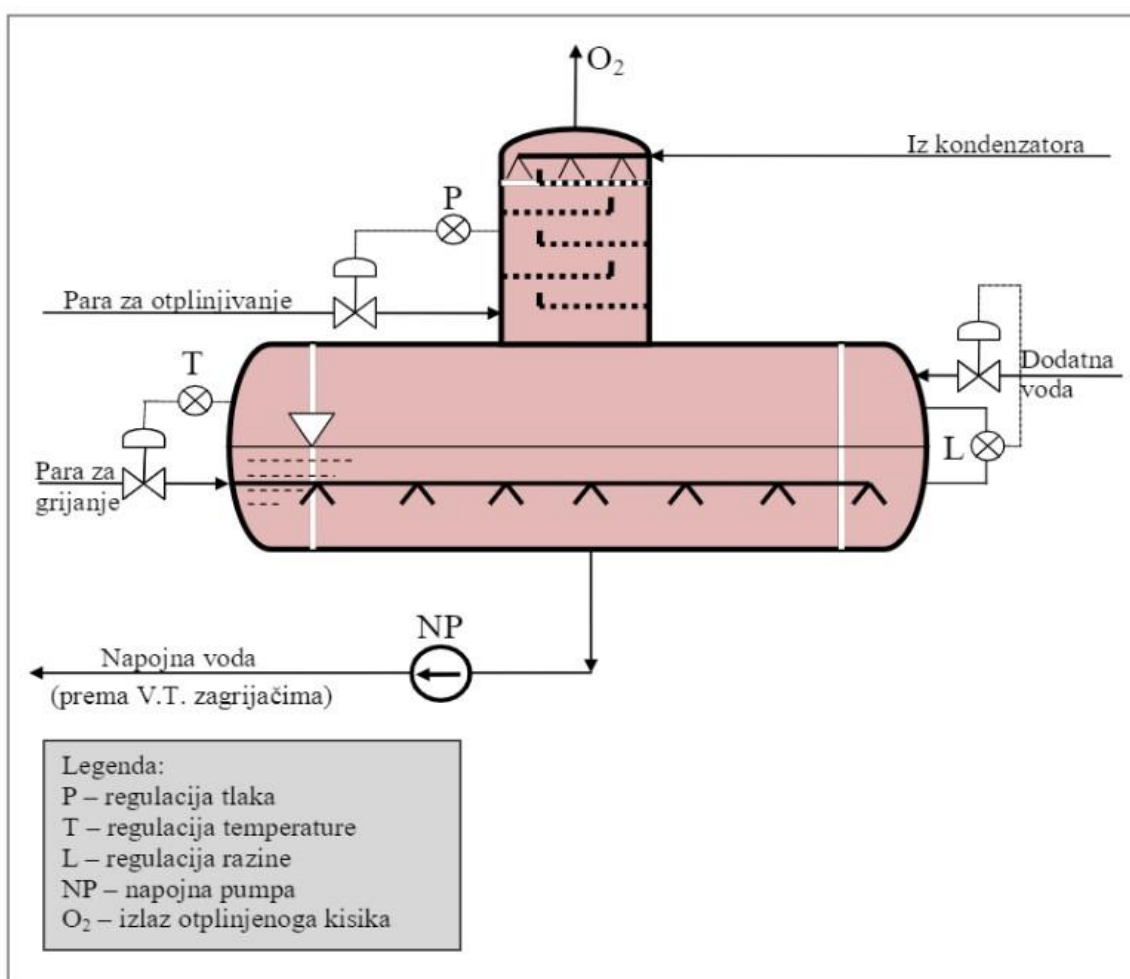
## 6.5. Otplinjač

U sustavu regenerativnog zagrijavanja, obično se koristi jedan zagrijač koji se izvodi s direktnim miješanjem. Ovaj zagrijač ima dvojaku funkciju, ujedno i služi za termičko otplinjavanje napojne vode.

Termičko otplinjavanje je proces koji se koristi za uklanjanje otopljenih plinova, poput CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>. Topivost plinova u vodi smanjuje se porastom temperature te pada na najmanju vrijednost kod temperature vrelišta.

Stoga se, u otplinjaču, primjenjuje direktno miješanje s parom u protustrujnome strujanju te uz raspršivanje kako bi se voda zagrijala na temperaturu isparavanja koja odgovara tlaku u otplinjaču. Ovaj postupak ima za cilj sprječavanje korozivnog djelovanja rastvorenih plinova u dijelovima termoenergetskog postrojenja.

**Shema otplinjača sa spremnikom napojne vode**



Slika 6.8 Shema otplinjača sa spremnikom napojne vode [12]

## 7. ZAKLJUČAK

Kogeneracijska postrojenja predstavljaju održivo i učinkovito rješenje za istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije, što ih čini obećavajućom tehnologijom koja se može koristiti za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i zaštitu okoliša. Što bi imalo pozitivan utjecaj na smanjenje stakleničkih plinova i održivijem energetsom razvoju.

Kada se izgradi postrojenje, ono donosi značaj doprinos lokalnom razvoju zapošljavanja i izvorima prihoda. Osim što otvara radna mjesta unutar samog postrojenja, ono potiče i razvoj poslovnih aktivnosti izvan samo postrojenja, koje su neophodne za njegovu operaciju, kao što su prijevoz i poljoprivreda .

Realizacija ovakvog kogeneracijskog postrojenja predstavljala bi optimalno iskorištenje prirodnih resursa na području Gorskog kotara, posebno drvne biomase i samih drvoprerađivačkih industrija. Kogeneracijska postrojenja temeljena na biomasi omogućila bi pretvaranje otpadaka drvne industrije, u vrijednu energiju. Na taj način, cijeli proces postaje izuzetno efikasan i održiv. Iako su početni troškovi investicije relativno visoki, dugoročno gledano, takva postrojenja se isplate. Ona postaju temelj održivog gospodarskog razvoja na području na kojem su izgrađena.

Stoga, zaključak je da ovakva izvedba kogeneracijskog postrojenja bila dugoročno održivo i smiono ulaganje, zbog već spomenute dostupne biomase te potrebe za istovremenom proizvodnjom toplinske i električne energije na tom području.



## LITERATURA

- [1] Glažar V., Bonefačić I. : „Kogeneracijski energetske sustavi“ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2021.
- [2] Hrvatin M., „Parno kogeneracijsko postrojenje na drvenu biomasu“, završni rad, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2019.
- [3] Borovac B., Senčić T., „Usporedba troškova drvoprerađivačkog pogona sa kogeneracijskim energetske sustavom na drvenu sječku i klasičnog drvoprerađivačkog pogona“, stručni članak, Tehnički fakultete Rijeka, Rijeka
- [4] Internet stranica: [www.regea.org](http://www.regea.org) , „Priručnik o gorivima iz drvene biomase“, 16.8.2023.
- [5] Internet stranica: <https://ju-priroda.hr/2017/08/sume-gorskog-kotara/> 16.8.2023.
- [6] Prelec Z: „Energetske postrojenja ( Kondenzatori pare) “ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka
- [7] S Internet stranice: <https://ttk.hr/en/product/pumps/>
- [8] Stipković V., „Simulacija rada kružnog procesa s pregrijanom parom“, završni rad, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka
- [9] S Internet stranice: <https://pfspumps.com/products/application-specific/boiler-feed-water-pumps/boiler-feed-water-pumps/>
- [10] Prelec Z: „Energetske postrojenja ( Parne turbine) “ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka
- [11] S Internet stranice: [https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:1957c70c-6d96-4716-b239-428a53fdff4b/se-brochure-industrial-steam-turbines-2021.pdf?ste\\_sid=396e906922551d42a9914684653fd6d9](https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:1957c70c-6d96-4716-b239-428a53fdff4b/se-brochure-industrial-steam-turbines-2021.pdf?ste_sid=396e906922551d42a9914684653fd6d9) , „Katalog parnih turbina, Siemens“, 5.9.2023.
- [12] Prelec Z: „Energetske postrojenja ( Regenerativni zagrijači napojne vode) “ , predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka

## POPIS OZNAKA

- $A_k$  - potrebna rashladna površina kondenzatora
- $b$  - koeficijent rashladne površine
- $c$  - maseni udio ugljika
- $c_w$  - specifična toplina vode
- $D$  - količina proizvedene pare u generatoru pare
- $d_k$  - specifično opterećenje rashladne površine
- $D_g$  - potrebna količina goriva za kotao
- $d_u$  - unutarnji promjer cijevi kondenzatora
- $d_v$  - vanjski promjer cijevi kondenzatora
- $F_k$  - rashladna površina kondenzatora
- $g$  - gravitacijsko ubrzanje
- $h$  - entalpija fluida
- $h$  - maseni udio vodika
- $h$  - razlika visina vode u spremniku vode i generatoru pare
- $h_d$  - visinska razlika vode u kondenzatoru i spremniku vode
- $H_d$  - donja ogrjevna moć goriva koja sadrži 0% vlage
- $H_{dw}$  - donja ogrjevna moć goriva koja sadrži različite postotke vlage
- $h_g$  - visina vode u generatoru pare
- $k$  - koeficijent prolaza topline
- $k'$  - nekorigirani koeficijent prolaza topline
- $l$  - duljina kondenzatorskih cijevi
- $m$  - količina fluida
- $m$  - vodni faktor
- $m_k$  - potreban protok rashladne vode
- $m_{np}$  - količina napojne vode
- $n$  - broj prolaza u jednom prolazu
- $o$  - maseni udio kisika
- $p$  - tlak

$P$	- teorijska snaga
$P_{ef}$	- stvarna/ efektivna snaga
$\Delta p$	- pretpostavljeni pad tlaka u cijevima
$p_g$	- tlak u generatoru pare
$p_k$	- tlak u kondenzatoru pare
$p_s$	- tlak u spremniku vode
$Q$	- količina topline
$Q_k$	- količina oslobođene energije izgaranja goriva
$s$	- maseni udio sumpora
$t$	- temperatura
$\Delta t$	- srednja razlika temperature pare i rashladne vode
$t_k$	- temperatura kondenzatora
$t_{w1}$	- temperatura ulazne vode u kondenzator
$t_{w2}$	- temperatura izlazne rashladne vode
$w$	- maseni udio vlage
$\alpha_1$	- korekcijski faktor ulazne temperature rashladne vode
$\alpha_2$	- korekcijski faktor specifičnog opterećenja rashladne vode
$\Phi$	- promjer cijevi
$\eta$	- koeficijent iskoristivosti pumpe
$\eta_{i,t}$	- koeficijent iskoristivosti idealnog/ teorijskog procesa
$\eta_{et}$	- koeficijent efektivne iskoristivosti
$\eta_g$	- koeficijent iskoristivost generatora električne energije
$\eta_k$	- koeficijent iskoristivost kotla
$\eta_m$	- koeficijent mehaničke iskoristivosti
$\rho$	- gustoća fluida

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Usporedba odvojene proizvodnje i kogeneracijskog postrojenja [2].....	2
Slika 2.2 Shematski prikaz kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom turbinom uz regulirano oduzimanje [1].....	3
Slika 4.1 Toplinska shema kogeneracijskog postrojenja.....	5
Slika 4.2 Efektivna iskoristivost turbine u zavisnosti od snage [8] .....	7
Slika 4.3 Mehanička iskoristivost turbine u zavisnosti od snage [8].....	7
Slika 4.4 Bilanca topline otplinjača.....	11
Slika 4.5 Bilanca topline regenerativnog zagrijača .....	11
Slika 4.6 Iskoristivost generatora električne energije u zavisnosti od snage [8] .....	13
Slika 5.1 Kemijski sastav krute biomase [4] .....	15
Slika 5.2 Dijagramski prikaz vrijednosti ogrjevnice u zavisnosti od stupnja vlage u gorivu .	18
Slika 6.1 Shematski prikaz kondenzatora pare [6] .....	20
Slika 6.2 Dijagram korekcijskog faktora ulazne temperature rashladne vode [6] .....	22
Slika 6.3 Korekcijski faktor specifičnog opterećenja rashladne površine [6].....	23
Slika 6.4 Nekorigirani koeficijent prolaza topline [6].....	24
Slika 6.5 Pumpa kondenzata [7].....	26
Slika 6.6 Napojna pumpa [9].....	28
Slika 6.7 Parna turbina Siemens tipa SST-200 [11] .....	31
Slika 6.8 Shema otplinjača sa spremnikom napojne vode [12].....	32

## POPIS TABLICA

5.1 Kemijski sastav drvene biomase kao goriva [4] .....	16
5.2 Ovisnost vrijednosti ogrjevnice o sadržaju vlage o gorivu .....	18
5.3 Potrošnja goriva.....	19
6.1 Tehnički podaci parne turbine SST- 200 [11].....	31

## SAŽETAK

U ovom završnom radu, razvijeno je i proračunato tehničko rješenje parno-turbinskog kogeneracijskog postrojenja koje koristi drvenu biomasu kao izvor energije. Idejno rješenje je na području Gorskog kotara, točnije na području grada Delnica. Prema zadanim parametrima izrađen je koncept postrojenja s toplinskom shemom, proračunom energetske bilance te je proračunata potrošnja goriva (drvne biomase). I na kraju je izabrana, proračunata i opisana glavna oprema postrojenja.

Ključne riječi: kogeneracijsko postrojenje, drvena biomasa, gorivo, voda, para, parna turbina, kondenzator.

## **SUMMARY**

In this final thesis, a calculated technical solution of a steam–turbine cogeneration plant, that uses woody biomass as an energy source, was developed. The conceptual solution is in the area of Gorski kotar, more precisely in the area of the town Delnice. With the default parameters, the concept of the plant with thermal scheme, energy balance calculation and fuel consumption was designed. And finally the main equipment of the plant was selected, calculated and described.

Key words: cogeneration plant, woody biomass, fuel, water, steam, steam turbine, condenser.