

# Analiza učinkovitosti kogeneracijskog postrojenja na otpad

---

**Krizmanić, Petar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:899856>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Petar Krizmanić**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider, dipl. ing.

Student:

Petar Krizmanić

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Danielu R. Schneideru, dipl. ing. na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem i asistentu Stjepku Katuliću, dipl. ing. na pomoći i velikoj susretljivosti tijekom izrade ovog rada

Petar Krizmanić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 02-03-2015 Prilog
Klasa: 602-04/15-6/3
Ur.broj: 15-703-15-155

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petar Krizmanić** Mat. br.: 0035179815

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza učinkovitosti kogeneracijskog postrojenja na otpad**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Efficiency analysis of the waste-to-energy CHP plant**

Opis zadatka:

Među današnjim načinima proizvodnje toplinske i električne energije posebno mjesto zauzimaju postrojenja koja koriste otpad kao gorivo. Korištenjem lokalne sirovine (otpada, koji se ne može reciklirati ili na drugi način iskoristiti) kao goriva doprinosi se većoj energetske neovisnosti kroz diversifikaciju energetskih izvora odnosno smanjenje korištenja uvoznih fosilnih goriva dok se s druge strane u velikoj mjeri rješava problem zbrinjavanja komunalnog otpada.

U okviru završnog rada potrebno je napraviti termodinamički proračun kogeneracijskog postrojenja na otpad 13 MW električne snage i 30 MW toplinske snage koja za svoj pogon koristi kruti komunalni otpad.

Pri tome treba:

1. Napraviti matematički model kogeneracijskog postrojenja na otpad u jednom od programskih alata (npr. Excel/Visual Basic, MATLAB™) koji će obuhvatiti modele generatora pare, turbine te ostalih osnovnih komponenti postrojenja.
2. Izračunati stupanj iskoristivosti postrojenja kao i emisije po MWh proizvedene energije odnosno toni izgorjenog otpada.
3. Analizirati različite režime rada kogeneracijskog postrojenja u smislu različitih omjera proizvedene električne energije i topline.
4. Također treba ispitati da li se tražena energija u određenim režimima rada može proizvesti iz raspoložive količine otpada ili je potrebno uključiti dodatne kotlove na prirodni plin.

Kogeneracijsko postrojenje sastoji se od dva generatora pare, od kojih svaki ima nominalnu toplinsku snagu od 28 MW, i kondenzacijske parne turbine s oduzimanjem (5 bar, 190 °C). Postrojenje je potrebno dimenzionirati tako da se osigura 13 MW električne snage i 30 MW toplinske snage za daljinsko grijanje grada. Ukupna godišnja količina otpada na raspolaganju za proizvodnju energije je 140.000 t/god.

Detaljnije informacije potrebne za izradu rada kandidat će dobiti od mentora.

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

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
25. studenog 2014.	1. rok: 26. veljače 2015. 2. rok: 17. rujna 2015.	1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015. 2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Daniel R. Schneider

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. KOGENERACIJA .....	2
2.1. Podjela kogeneracijskih postrojenja.....	3
2.1.1. Kogeneracijski sustav s protutlačnom parnom turbinom.....	4
2.1.2. Kogeneracijski sustav s kondenzacijskom parnom turbinom s oduzimanjem pare.....	6
2.1.3. Kogeneracijski sustav s plinskom turbinom i kotlom utilizatorom .....	7
3. KRUTI KOMUNALNI OTPAD .....	8
3.1. Energetsko iskorištavanje krutog komunalnog otpada .....	8
3.2. Proizvodnja energijes paljivanjem otpada .....	9
3.2.1. Proizvodnja električne energije.....	11
4. KOGENERACIJSKO POSTROJENJE NA KRUTI KOMUNALNI OTPAD .....	13
4.1. Matematički model postrojenja.....	14
4.1.1. Generator pare.....	14
4.1.1.1. Toplinska snaga generatora pare.....	15
4.1.1.2. Maseni protok pare .....	16
4.1.2. Parna turbina s reguliranim oduzimanjem pare .....	17
4.1.2.1. Visokotlačni stupanj turbine .....	18
4.1.2.2. Niskotlačni stupanj turbine .....	18
4.1.3. Proizvedena električna energija .....	18
4.1.4. Izmjenjivač topline sustava grijanja.....	19
4.2. Toplinski konzum .....	19
4.2.1. Isporučena toplinska energija .....	21
4.3. Godišnja potrošnja krutog komunalnog otpada .....	22
4.4. Emisije dimnih plinova .....	22
4.4.1. Emisije ugljikovog dioksida (CO <sub>2</sub> ).....	23
4.4.2. Emisije suporovog dioksida (SO <sub>2</sub> ).....	24
4.4.3. Emisije dušikovih oksida (NO <sub>x</sub> ).....	25
4.5. Termodinamički stupanj iskoristivosti postrojenja .....	26
5. ANALIZA RAZLIČITIH REŽIMA RADA KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA NA KRUTI KOMUNALNI OTPAD .....	27
5.1. Opterećenje generatora pare: 100 % u sezoni grijanja i 100 % van sezone grijanja .	27
5.2. Opterećenje generatora pare: 75 % u sezoni grijanja i 55 % van sezone grijanja .....	29
5.3. Usporedba rezultata simulacije .....	31
6. ZAKLJUČAK.....	33

---

LITERATURA.....	34
PRILOZI.....	35

**POPIS SLIKA**

Slika 1	Usporedba odvojene proizvodnje električne i toplinske energije i kogeneracije [1] .....	2
Slika 2	Kogeneracijski sustav s protutlačnom parnom turbinom [2] .....	5
Slika 3	Kogeneracijski sustav s kondenzacijskom turbinom s oduzimanjem pare [2].....	6
Slika 4	Kogeneracijski sustav s plinskom turbinom i kotlom utilizatorom [2] .....	7
Slika 5	Trokomponentni dijagram [7] .....	10
Slika 6	Shema kogeneracijskog postrojenja na otpad .....	13
Slika 7	Ovisnost toplinske snage generatora pare o masenom protoku .....	15
Slika 8	Ovisnost toplinske snage generatora pare o opterećenju.....	16
Slika 9	Ovisnost protoka o opterećenju generatora pare .....	17
Slika 10	Prosječna satna razdioba toplinskog konzuma izvan sezone grijanja .....	20
Slika 11	Prosječna satna razdioba toplinskog konzuma u sezoni grijanja .....	21
Slika 12	Prosječna satna razdioba električne energije izvan sezone grijanja (100 % - 100 %) %) .....	28
Slika 13	Prosječna satna razdioba električne energije u sezoni grijanja (100 % - 100 %)..	28
Slika 14	Prosječna satna razdioba električne energije u sezoni grijanja (75 % - 55 %)..	30
Slika 15	Prosječna satna razdioba električne energije izvan sezone grijanja (75 % - 55 %) .....	30



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Sastav krutog komunalnog otpada [4].....	23
Tablica 2. Rezultati simulacije za opterećenje: 100 % u sezoni grijanja i 100 % izvan sezone grijanja.....	29
Tablica 3. Rezultati simulacije za opterećenje: 75 % u sezoni grijanja i 55 % izvan sezone grijanja.....	31
Tablica 4. Razlike pojedinih parametara za dva različita režima rada postrojenja .....	32

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$c_{NOX}$	-	Učinkovitost uklanjanja dušikovih oksida iz dimnih plinova
$c_{SO2}$	-	Učinkovitost uklanjanja sumporova dioksida iz dimnih plinova
$D_0$	kg/s	Maseni protok pare na izlazu iz generatora pare
$D_1$	kg/s	Maseni protok pare kroz izmjenjivač sustava grijanja
$D_2$	kg/s	Maseni protok pare kroz niskotlačni stupanj turbine
$EF$	kg/t <sub>otp</sub>	Emisijski faktor za dušikove okside
$h_0$	kJ/kg	Specifična entalpija na izlazu iz generatora pare
$h_1$	kJ/kg	Specifična entalpija na izlazu iz visokotlačnog stupnja turbine
$h_2$	kJ/kg	Specifična entalpija na izlazu iz niskotlačnog stupnja turbine
$h_3$	kJ/kg	Specifična entalpija na izlazu iz izmjenjivača sustava grijanja
$H_d$	MJ/kg	Ogrjevna vrijednost otpada
$m_C$	kg/t <sub>otp</sub>	Masa ugljika u toni otpada
$M_C$	kg/kmol	Molarna masa ugljika
$m_{CO2}$	kg/t <sub>otp</sub>	Masa ugljikovog dioksida u toni otpada
$M_{CO2}$	kg/kmol	Molarna masa ugljikovog dioksida
$m_{CO2,god}$	kg	Godišnja emisija ugljikovog dioksida
$m_{CO2,Pe+Q}$	kg/MWh	Godišnja emisija ugljikovog dioksida po MWh proizvedene energije
$m_{NOX}$	kg/t <sub>otp</sub>	Masa dušikovih oksida u toni otpada
$m_{NOX,god}$	kg	Godišnja emisija dušikovih oksida
$m_{NOX,Pe+Q}$	kg/MWh	Godišnja emisija dušikovih oksida po MWh proizvedene energije
$m_{otp,god}$	t	Količina otpada potrošena u jednoj godini
$m_{otp,sg}$	t	Količina otpada potrošena u sezoni grijanja
$m_S$	kg/t <sub>otp</sub>	Masa sumpora u toni otpada
$M_S$	kg/kmol	Molarna masa sumpora
$m_{SO2}$	kg/t <sub>otp</sub>	Masa sumporovog dioksida u toni otpada
$M_{SO2}$	kg/kmol	Molarna masa sumporovog dioksida
$m_{SO2,god}$	kg	Godišnja emisija sumporovog dioksida
$m_{SO2,Pe+Q}$	kg/MWh	Godišnja emisija sumporova dioksida po MWh proizvedene energije
$n_C$	kmol/t <sub>otp</sub>	Količina ugljika u toni otpada
$n_{CO2}$	kmol/t <sub>otp</sub>	Količina ugljikovog dioksida u toni otpada
$n_{d,sg}$	-	Broj dana sezone grijanja

$n_{d,vsg}$	-	Broj dana izvan sezone grijanja
$n_S$	kmol/t <sub>otp</sub>	Količina sumpora u toni otpada
$n_{SO_2}$	kmol/t <sub>otp</sub>	Količina sumporovog dioksida u toni otpada
$P_E$	MW	Električna snaga
$P_{E,god}$	MWh	Električna energija proizvedena u jednoj godini
$P_{GP}$	MW	Toplinska snaga generatora pare
$P_{NT}$	MW	Snaga nikotlačnog stupnja turbine
$P_T$	MW	Snaga turbine
$P_{VT}$	MW	Snaga visokotlačnog stupnja turbine
$Q_d$	MWh	Toplinska energija proizvedena u jednom danu
$Q_{d,sg}$	MWh	Toplinska energija proizvedena u jednom danu u sezoni grijanja
$Q_{d,vsg}$	MWh	Toplinska energija proizvedena u jednom danu izvan sezone grijanja
$Q_{dov,god}$	MWh	Ukupna toplina predana vodi u generatoru pare u jednoj godini
$Q_{dov,sg}$	MWh	Toplina koja se predaje vodi u generatoru pare u sezoni grijanja
$Q_{dov,vsg}$	MWh	Toplina koja se predaje vodi u generatoru pare izvan sezone grijanja
$Q_{god}$	MWh	Toplinska energija proizvedena u jednoj godini
$Q_{sg}$	MWh	Toplinska energija proizvedena u sezoni grijanja
$Q_T$	MW	Toplinska snaga predana u izmjenjivaču sustava grijanja
$Q_{Ti}$	MWh	Toplinska energija proizvedena u jednom satu
$Q_{vsg}$	MWh	Toplinska energija proizvedena izvan sezone grijanja
$\eta_{GP}$	%	Iskoristivost generatora pare
$\eta_{meh,el}$	%	Mehanička iskoristivost turbine i iskoristivost generatora električne energije
$\eta_{uk}$	%	Ukupna iskoristivost postrojenja

## **SAŽETAK**

U radu su analizirani različiti režimi rada kogeneracijskog postrojenja na kruti komunalni otpad. Opisan je proces kogeneracije kao i različite vrste kogeneracijskih procesa. Obradene su osnove upotrebe krutog komunalnog otpada za iskorištavanje energije. Prikazan je matematički model korišten pri izradi programa za simulaciju rada postrojenja, prikaz proračuna emisija CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> te NO<sub>x</sub> te prikaz godišnje potrošnje otpada koji se koristi kao gorivo u postrojenju.

Ključne riječi: kogeneracija, otpad, analiza učinkovitosti, emisije dimnih plinova

## 1. UVOD

Proces kogeneracije obuhvaća istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije. Prednost pred postrojenjima, u pogledu iskoristivosti, koja proizvode samo električnu, odnosno samo toplinsku energiju leži u činjenici da se toplina preostala nakon proizvodnje električne energije ne baca u okoliš nego iskorištava za proizvodnju toplinske energije, a i u činjenici da ima veću efikasnost pa emitira manju količinu emisija štetnih plinova po MWh energije.

Kogeneracijska postrojenja primjenjuju se prvenstveno na područjima u kojima postoji istovremeni zahtjev za električnom i toplinskom energijom, od gradskih toplana pa do malih kogeneracijskih postrojenja čija je zadaća osigurati paru za električnu i toplinsku energiju za lokalne potrebe.

Kruti komunalni otpad u današnjem društvu predstavlja problem jer ga je potrebno zbrinjavati na odlagalištima za koja često nema dovoljno prostora, također dolazi i do otpora javnosti vezano uz otvaranje odlagališta na novim lokacijama, kao i do otpora prema već postojećim odlagalištima. Uz to, na odlagalištima i oko njih često vladaju uvjeti koji su opasni po zdravlje ljudi. Porastom životnog standarda raste i količina komunalnog otpada u gradovima ili naseljima pa je problem zbrinjavanja sve veći.

Korištenjem otpada kao goriva djelomično se rješava problem njegova zbrinjavanja, a glavna prednost je iskorištavanje energije koja bi inače bila izgubljena. Paralelno s tim povećava se energetska neovisnost područja na kojem se nalazi postrojenje kroz smanjenje korištenja uvoznih fosilnih goriva.

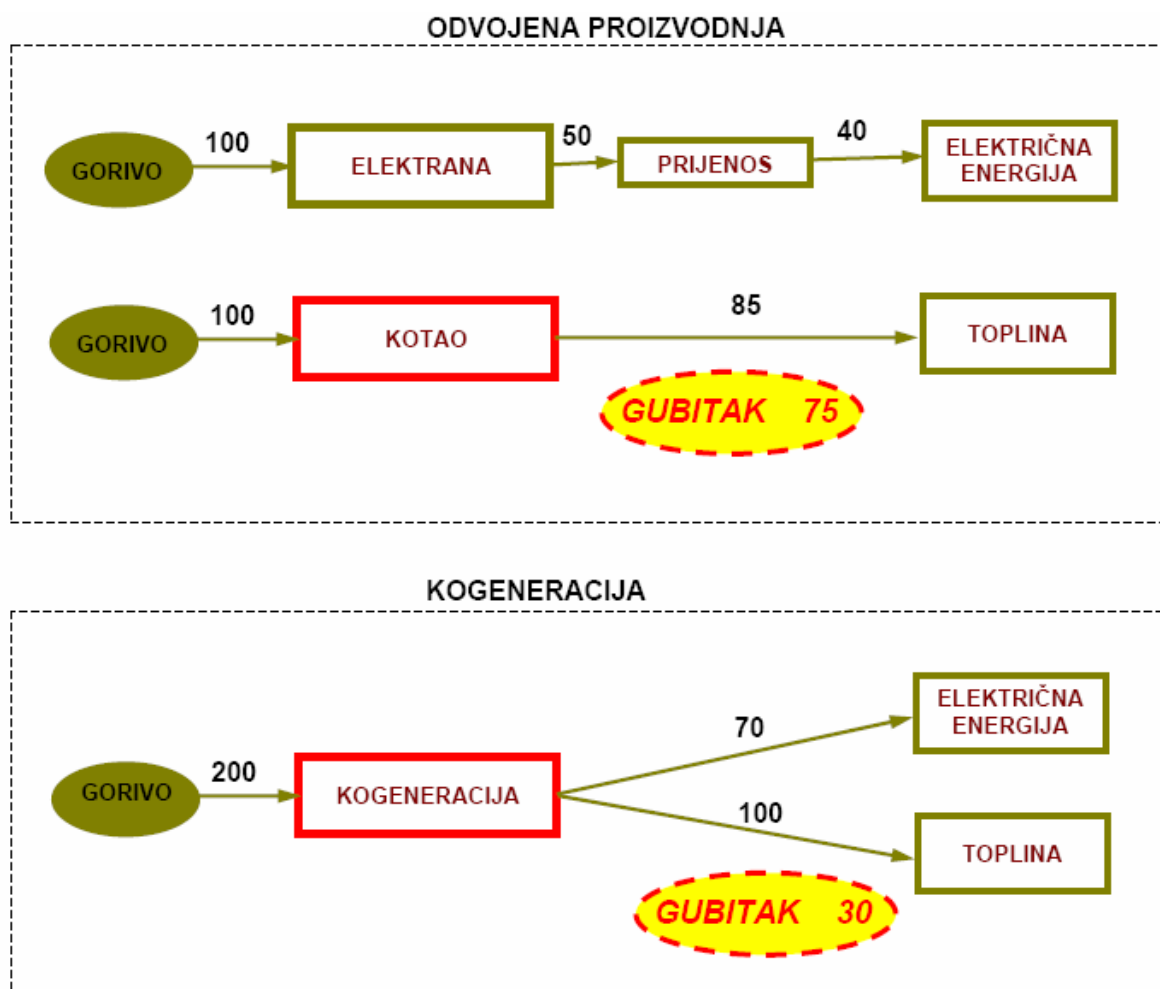
Upotrebom komunalnog otpada kao goriva u kogeneracijskim postrojenjima, koja sama po sebi imaju višu iskoristivost, još se dodatno opravdava takav način proizvodnje energije.

U ovom radu analizirat će se rad kogeneracijskog postrojenja na kruti komunalni otpad.

## 2. KOGENERACIJA

Zajednička proizvodnja električne i toplinske energije ili kogeneracija predstavlja jedan od ključnih načina racionalnog gospodarenja energijom. Kogeneracijska postrojenja daju znatno bolju energetske iskoristivost i uštedu fosilnih goriva, čime se ujedno smanjuje zagađenje okoliša u odnosu na odvojenu proizvodnju električne i toplinske energije.

Kogeneracija se može primjeniti svugdje gdje postoji istovremena potreba za električnom i toplinskom energijom. Prednosti kogeneracijskih postrojenja, u odnosu na klasične sustave s odvojenom proizvodnjom električne i toplinske energije, jasno su vidljive ako se usporede gubici koji nastaju pri proizvodnji energije u oba promatrana sustava[Slika 1].



Slika 1 Usporedba odvojene proizvodnje električne i toplinske energije i kogeneracije [1]

Primjena kogeneracijskih sustava prvenstveno je zanimljiva zbog njihove visoke energetske učinkovitosti te zbog ekonomskih i ekoloških prednosti koje one donose. Kogeneracijska postrojenja imaju i manju emisiju štetnih ispušnih plinova (npr.  $CO_2$ ,  $SO_2$  i  $NO_x$ .) po jedinici proizvedene energije. Najznačajnije prednosti kogeneracije, u odnosu na odvojenu proizvodnju električne i toplinske energije su:

- ušteda primarne energije,
- kvalitetnija opskrba energijom i veća pouzdanost,
- smanjenje štetnog utjecaja na okoliš,
- veća ekonomska isplativost postrojenja.

## 2.1. Podjela kogeneracijskih postrojenja

Koncept kogeneracije se temelji na istovremenoj proizvodnji toplinske i električne energije iz jednoga energetskog izvora. Danas se koriste različite izvedbe kogeneracijskih postrojenja s tim da osnovu svakog postrojenja čini pogonski stroj koji kemijsku ili toplinsku energiju transformira u mehaničku energiju, tj. snagu. Najčešće upotrebljavane su plinske i parne turbine te motori s unutarnjim izgaranjem.

Kogeneracijska postrojenja se prema primjeni dijele na tri kategorije:

- industrijske termoelektre,
- termoelektre – toplane,
- mala postrojenja.

Kogeneracijska postrojenja možemo podijeliti i prema gorivu:

- prirodni plin,
- ugljen,
- loživo ulje,
- biomasu,
- otpad.

Kogeneracijska postrojenja možemo podijeliti na više tipova:

- Kogeneracijski sustav s parnom turbinom,
  1. Protutlačnom,
  2. kondenzacijskom s oduzimanjima.
- Kogeneracijski sustav s plinskom turbinom i kotlom utilizatorom,
  1. bez dodatnog loženja,
  2. s dodatnim loženjem.

- Kogeneracijski sustav s motorom s unutarnjim izgaranjem,
  1. bez dodatnog loženja,
  2. s dodatnim loženjem.

U posljednje vrijeme, zbog relativno visoke cijene goriva i strogih propisa vezanih za očuvanje okoliša, posebno značajan razvoj postigla su kombinirana plinsko-parna turbinska postrojenja za proizvodnju električne energije. Taj razvoj im je omogućio da su ona danas postala najekonomičnija i najperspektivnija postrojenja za opskrbu električnom energijom.

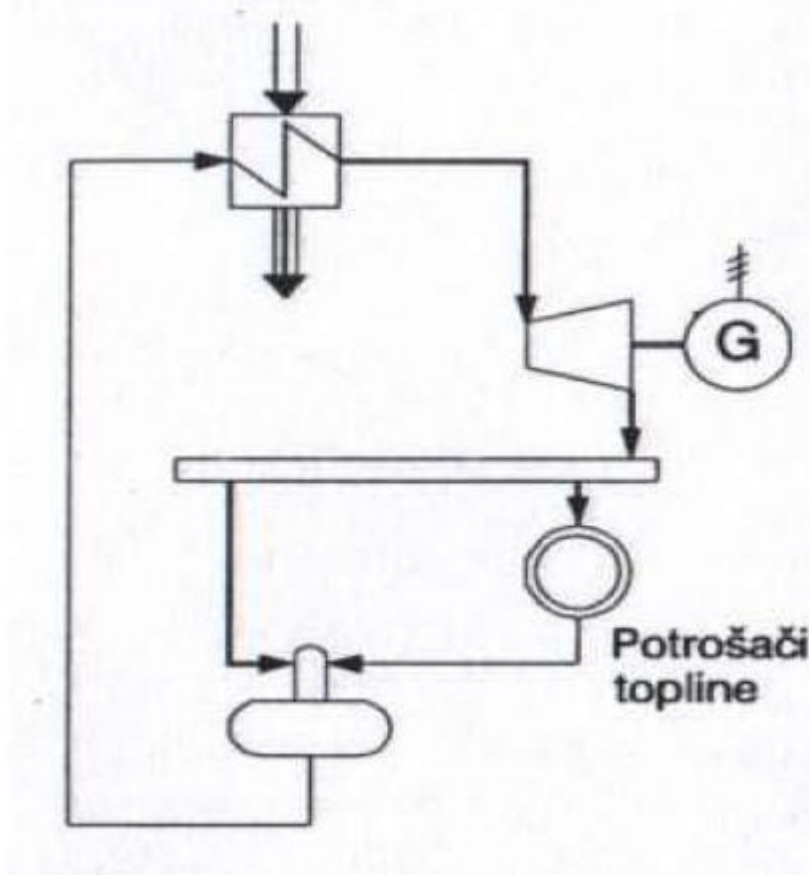
Mnoge zemlje, a posebice one koje imaju dovoljno zemnog plina, za razvoj svoje energetike odabrale su kombinirana plinsko-parna turbinska postrojenja. Plinska i parna turbinska postrojenja moguće je spojiti u kombinirane procese na različite načine. S obzirom na način spajanja plinskoturbinskog i parnoturbinskog postrojenja, do danas izgrađene kombi-procese moguće je svrstati u ove osnovne skupine:

- s kotlom utilizatorom,
- s dodatnim izgaranjem goriva,
- s izmjenjivačem topline za grijanje napojne vode,
- s kotlom utilizatorom za paralelnu proizvodnju vodene pare s klasičnim parnim kotlom,
- sa zajedničkim ložištem parnog kotla pod tlakom i komorom izgaranja,
- s rasplinjavanjem ugljena,
- s parnim kotlom za izgaranje goriva u fluidiziranom sloju.

### **2.1.1. Kogeneracijski sustav s protutlačnom parnom turbinom**

Kogeneracijski sustav s protutlačnom parnom turbinom je najjednostavniji sustav za proizvodnju mehaničke i toplinske energije. U ovakvom sustavu para, proizvedena u generatoru pare, ekspandira u protutlačnoj turbini do protutlaka te se dalje razvodi u sustav za korištenje toplinske energije[Slika 2].





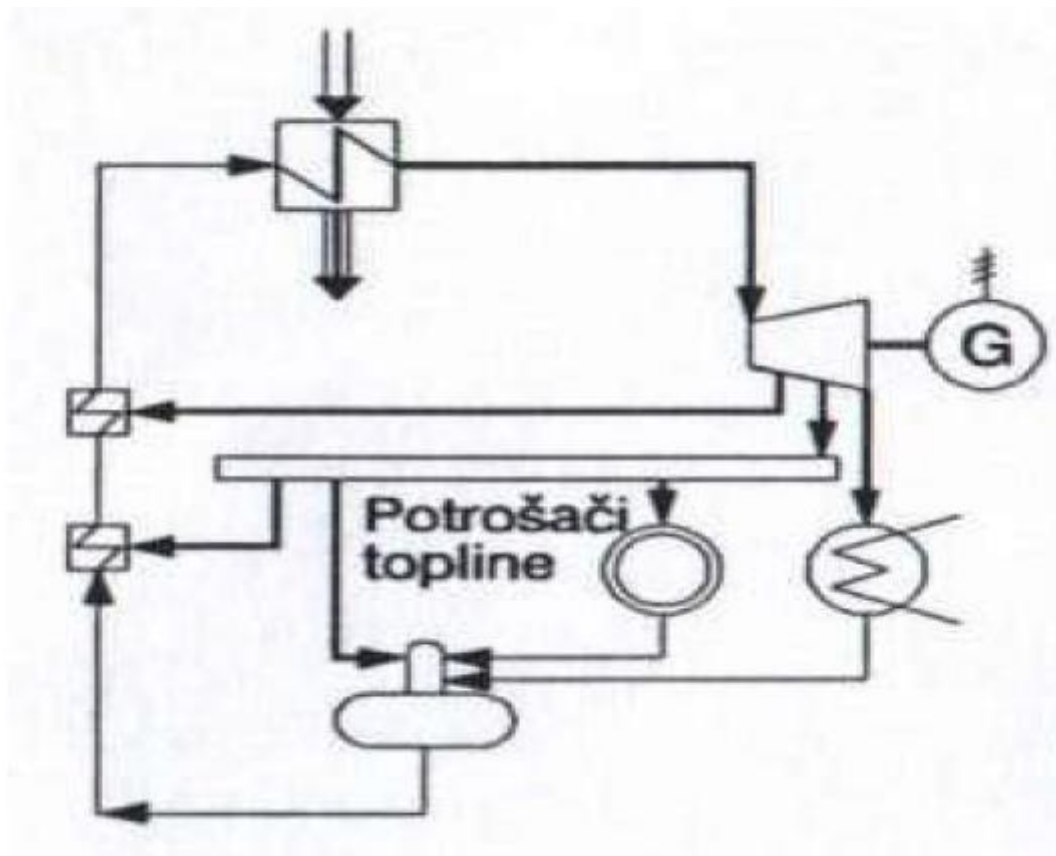
Slika 2 Kogeneracijski sustav s protutlačnom parnom turbinom [2]

Kogeneracijsko parno-turbinsko postrojenje moguće je podijeliti u dva osnovna dijela od kojih jedan čini postrojenje za proizvodnju i dobavu pare i turbinsko postrojenje u kojemu se unutarnja energija pare, njenom ekspanzijom, pretvara u kinetičku energiju, tj. u mehanički rad u obliku vrtnje rotora turbine. Osim navedanog, da bi parnoturbinsko postrojenje moglo funkcionirati potrebno je imati postrojenje za pripremu vode, postrojenje za pripremu i dobavu goriva, dobavu zraka i svu potrebnu opremu i armaturu.

Ovakav sustav prikladan je za ugradnju u energane većih industrijskih pogona koji troše mnogo pare za grijanje i kao takav je najekonomičniji i najjednostavniji za upravljanje i održavanje. Najveći nedostatak ovog sustava je nemogućnost proizvodnje električne energije ako se istodobno ne troši i odgovarajuća količina pare za zagrijavanje, koja bi ekspanzijom u turbini proizvela tu energiju. Proces se obično podešava da zadovolji potrebe u toplinskoj energiji, a generator električne energije se paralelno spaja s vanjskom mrežom. U slučaju manjka električne energije potrebne zarad sustava ona se uzima iz mreže, a u slučaju viška predaje se mreži.

### 2.1.2. Kogeneracijski sustav s kondenzacijskom parnom turbinom s oduzimanjem pare

Kogeneracijski sustav s kondenzacijskom turbinom s oduzimanjem pare najčešće je primjenjiv tamo gdje je zbog osiguranja stalne i sigurne opskrbe električnom energijom, pored proizvodnje toplinske energije, nužan autonoman izvor, kao npr. u rafinerijskim, petrokemijskim i sličnim procesnim pogonima koji su vrlo osjetljivi na prekide u opskrbi energijom[Slika 3] [2].

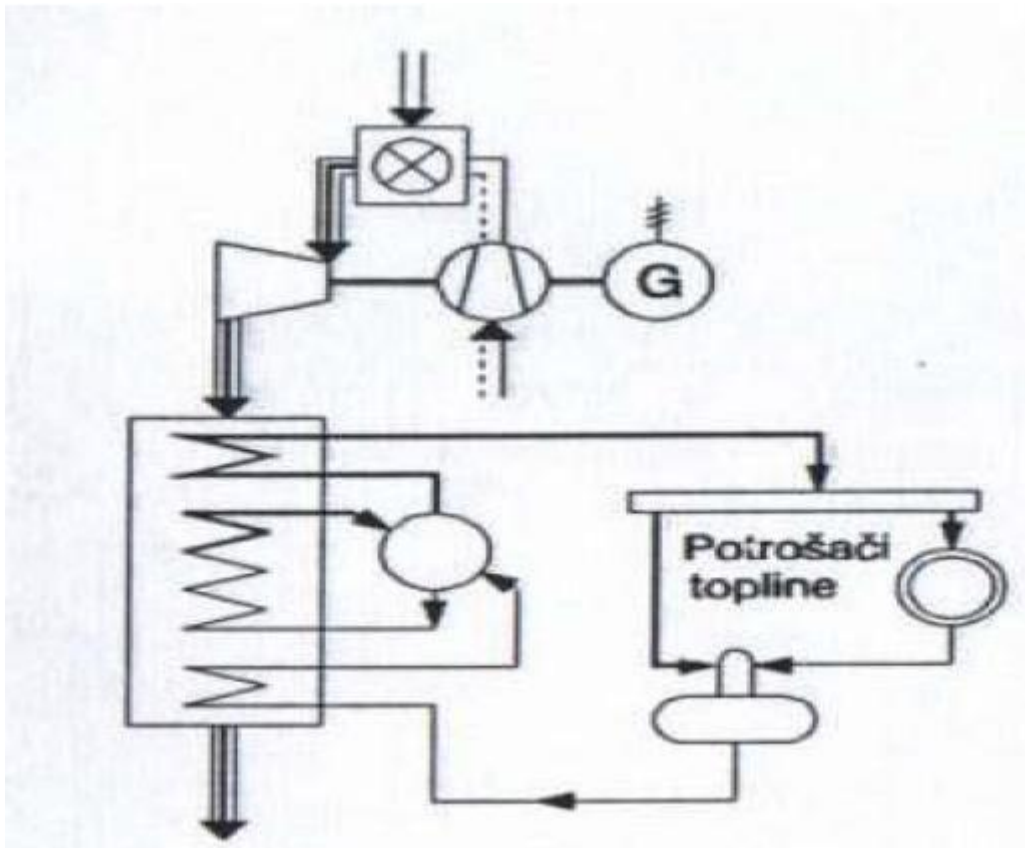


Slika 3 Kogeneracijski sustav s kondenzacijskom turbinom s oduzimanjem pare [2]

Iz slike je vidljivo da se dio oduzimate pare odvodi za potrošače topline, odnosno za potrebe odvijanja nekog tehnološkog procesa. Dio uduzete pare koristi se za regenerativno zagrijavanje kondenzata. Preostali dio pare kroz posljednje stupnjeve turbine odvodi se u kondenzator. Ovakva postrojenja imaju manju toplinsku iskoristivost od postrojenja s protutlačnim turbinama iz razloga što dodavanjem kondenzacijskoga djela nastaje gubitak izlazeće pare u kondenzatoru kojeg kod protutlačnih turbina nema.

### 2.1.3. Kogeneracijski sustav s plinskom turbinom i kotlom utilizatorom

Kogeneracijski sustav s plinskom turbinom u sprezi je s generatorom pare na ispušne plinove. Pojednostavljena shema prikazana je na [Slika 4]. Iz plinskih turbina se ispušnim plinovima zbog njihove visoke temperature (do 600 °C) ispušta i velika količina topline. Ta toplina se pomoću kotla utilizatora može rekuperirati, odnosno iskoristiti za grijanje ili za razne tehnološke potrebe u procesnoj industriji.



Slika 4 Kogeneracijski sustav s plinskom turbinom i kotlom utilizatorom [2]

### 3. KRUTI KOMUNALNI OTPAD

Kruti komunalni otpad danas više ne predstavlja neželjenu materiju koje je potrebno nekako zbrinuti, već predstavlja izvor energije. Europska strategija za gospodarenje otpadom nalaže sljedeći redoslijed u prevenciji i gospodarenju otpadom: prevencija, priprema za ponovnu upotrebu, recikliranje, ostala korisna upotreba (npr. iskorištavanje energije) i odlaganje [5]. Prema tome je vidljivo da odlagališta moraju biti zadnja opcija u gospodarenju otpadom, rezervirana samo za otpad koji se više ne može korisno upotrijebiti. Za otpad koji se ne može reciklirati, ili učinkovito reciklirati, otvara se prilika za toplinsku obradu s ciljem iskorištavanja energije koju sadrži.

#### 3.1. Energetsko iskorištavanje krutog komunalnog otpada

Toplinskom obradom otpada se smatra svaki termokemijski proces koji se odvija pri relativno visokim temperaturama i koji uzrokuje promjene u kemijskoj strukturi obrađenih materijala iz otpada. Tri su glavna procesa za energetsko iskorištavanje otpada: izgaranje, rasplinjavanje i piroliza.

Danas je najrašireniji proces toplinske obrade otpada izgaranje, odnosno spaljivanje otpada. Spaljivanje otpada radi iskorištavanja energije generalno se odnosi na proizvodnju električne i/ili toplinske energije.

U prošlosti su glavni razlozi spaljivanja otpada bili značajno smanjenje mase (oko 70-80%) i volumena (oko 80-90%) što je omogućavalo više mjesta na odlagalištima, kao i sprečavanje truljenja otpada zbog higijenskih razloga [6].

Za razliku od prethodnih desetljeća, danas su dostupne razvijenije tehnologije koje se koriste u obradi otpada, kruti komunalni otpad danas sadrži materijale bogatije energijom pa samim time ima i viši potencijal za iskorištavanje energije, a i povećanje broja stanovnika nekog područja, odnosno viši stupanj gospodarskog razvoja društva uvjetuje veće dostupne količine otpada.

Donja ogrjevna vrijednost ( $H_d$ ) krutog komunalnog otpada u EU kreće se u granicama od 10 MJ/kg do 10,3 MJ/kg [8]. Proizvodnjom energije iz otpada postižu se uštede primarnih oblika energije, s druge strane se iz otpada koji bi inače bio spaljen u spalionici, bez iskorištavanja u njemu sadržane energije, dobiva energija koja se može dalje upotrebljavati.

U krutom komunalnom otpadu sadržan je i ugljik u prosječnom masenom udjelu od 25 % [7]. Kad govorimo o ugljiku posebno je zanimljivo razmotriti porijeklo ugljika u otpadu. Ugljik je u krutom komunalnom otpadu sadržan u različitim materijalima kao što su hrana, biljni otpad, drvo, papir, karton, tekstil i plastika. Procjenjuje se da je više od polovice ugljika sadržanog u krutom komunalnom otpadu biogenog porijekla, što znači da je određeni udio ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) u dimnim plinovima također biogenog porijekla, dok je drugi dio fosilnog porijekla [7]. U tom kontekstu može se govoriti o obnovljivosti dijela ugljika iz otpada. Zbog ove činjenice o otpadu se može govoriti kao o obnovljivom izvoru energije. Obnovljivost ugljika rezultira i smanjenim naknadama na emisiju  $\text{CO}_2$  pa se prilikom izračuna naknada u obzir uzima samo udio koji je nastao iz ugljika fosilnog porijekla [4].

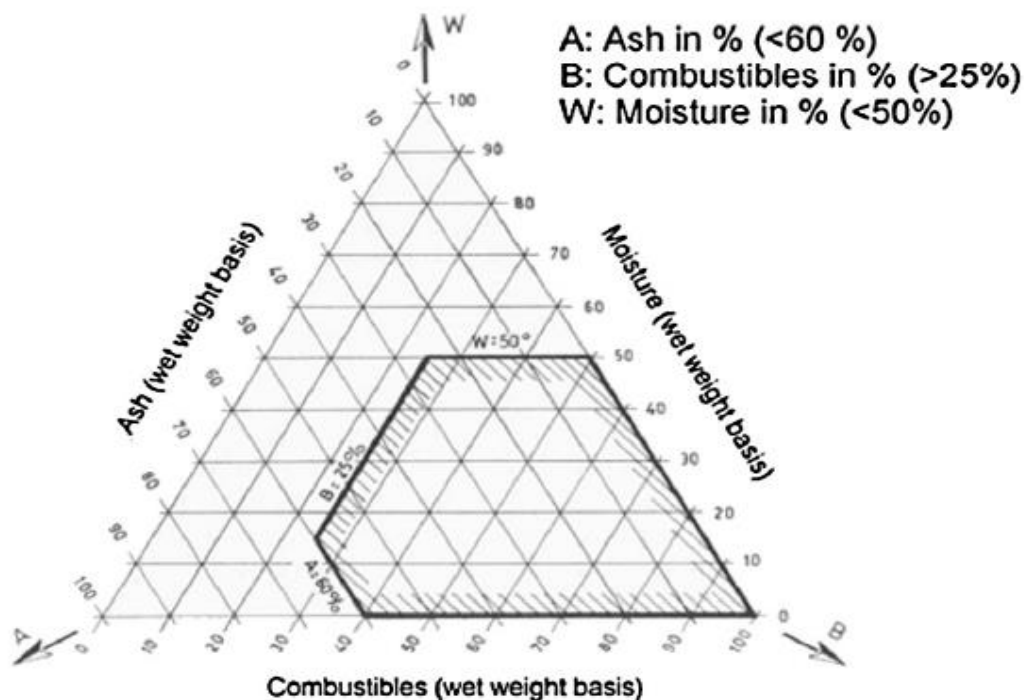
Prema tome otpad prestaje biti problem i postaje raspoloživo gorivo, a uz to se rješava problem zbrinjavanja otpada i doprinosi se većoj energetskej neovisnosti.

### 3.2. Proizvodnja energije paljivanjem otpada

Izgaranje je proces u kojem se treba ostvariti što potpunija oksidacija svih gorivih elemenata sadržanih u gorivu.

U postupku spaljivanja kruti komunalni otpad se može izravno ubacivati u ložište ili se prije ubacivanja podvrgava mehaničkoj obradi. Svrha mehaničke obrade je povišenje zapaljivosti otpada (npr. povećanje ogrjevne vrijednosti uklanjanjem dijela vlage i pepela) te uklanjanje nekih sastojaka radi zadovoljenja tehničkih parametara i propisa za zaštitu okoliša (npr. klora i žive) [9].

Problem koji se javlja kod spaljivanja neobrađenog otpada je da on često sadrži visoki udio vlage i pepela pa je u ložište potrebno ubacivati pomoćno gorivo. Otpad može izgarati bez upotrebe pomoćnog goriva, kad mu je donja ogrjevna vrijednost ( $H_d$ ) iznad 5 – 7 MJ/kg. Donja ogrjevna vrijednost uglavnom je određena sadržajem vlage i pepela u otpadu te pada s porastom njihovog sadržaja. Sastav otpada dobiven neposrednom analizom masenih udjela gorivih tvari, vlage i pepela može se prikazati u trokomponentnom dijagram [Slika 5] u kojem je također moguće označiti područje unutar kojeg je sastav otpada takav da u ložište nije potrebno dovoditi pomoćno gorivo, osjenčano područje na dijagramu. Da bi otpad mogao izgarati samostalno maseni udio vlage mora biti ispod 50%, maseni udio pepela ispod 60% i maseni udio gorivih tvari iznad 25% [7].



Slika 5 Trokomponentni dijagram [7]

Kruti komunalni otpad je heterogena mješavina raznih tvari različitih kemijskih i fizikalnih svojstava kao i različite veličine čestica. Upravo zbog različite veličine čestica, za izgaranje krutog komunalnog otpada troši se više vremena nego za ostala kruta goriva.

Tip i projektiranje ložišta za spaljivanje otpada uvelike ovisi o činjenicama da se radi o krutom gorivu te da se sastoji od relativno velikih čestica. Trenutno su u široj primjeni tri osnovne tehnologije izgaranja: izgaranje na nepomičnoj ili pomičnoj rešetci, izgaranje u rotacijskim pećima i izgaranje u fluidiziranom sloju. Od navedenih tehnologija izgaranja danas je najzastupljenije izgaranje na pomičnoj rešetci koje omogućuje najveći kapacitet u smislu unosa energije u ložište.

Za izgaranje otpada potrebna je velika količina zraka kako bi se postiglo čim potpunije izgaranje. Pretičak zraka za izgaranje ovisno o karakteristikama otpada iznosi od 40 – 150%, što vodi do velike količine dimnih plinova pa time raste i gubitak energije.

Proizvodnja energije ostvaruje se preko generatora pare, koji je u većini slučajeva integriran u ložište postrojenja. U generatoru pare se oduzima toplina vrućim dimnim plinovima, nastalim izgaranjem otpada, koja se koristi za proizvodnju pare. Kad postrojenje isporučuje samo toplinsku energiju proizvodi se suhozasićena para, dok se kod potrebe za

električnom energijom ili potreba za električnom i toplinskom energijom proizvodi pregrijana para koja ekspandira u parnoj turbini stvarajući mehanički rad koji se u generatoru električne energije pretvara u električnu snagu. Kod zahtjeva samo za električnom energijom koristi se kondenzacijska parna turbina, a kod vezane proizvodnje toplinske i električne energije, ovisno o primjeni, protutlačna parna turbina ili kondenzacijska parna turbina s oduzimanjem.

### **3.2.1. Proizvodnja električne energije**

U pogledu proizvodnje samo električne energije stupanj iskoristivosti postrojenja na otpad je dosta niži nego kod postrojenja na fosilna goriva.

Glavni uzroci relativno niskog stupnja iskoristivosti u usporedbi sa postrojenjima na fosilna goriva su[7]:

- Mala veličina postrojenja,
- Relativno niski parametri pare (tlak i temperatura pregrijane pare),
- Relativno visok tlak u kondezatoru,
- Jednostavna izvedba postrojenja (bez međupregrijača pare i samo nekoliko zagrijača napojne vode),
- Velika stopa potrošnje energije unutar postrojenja,
- Dosta veliki gubitak na toplini dimnih plinova.

Veličina postrojenja, pogotovo kada se radi o spaljivanju krutog komunalnog otpada, uglavnom ovisi o dostupnoj količini otpada kojim se poslužuje postrojenje. Uz to, manja postrojenja nailaze na manji otpor lokalne zajednice. Zbog male instalirane snage specifični troškovi opreme su dosta visoki pa da bi se troškove zadržalo na isplativoj razini postrojenje se oprema sa relativno jednostavnom opremom. U ovom slučaju mogućnost za tehničkim poboljšanjima koja bi podigla učinkovitost postrojenja je ograničena ekonomskim razlozima.

Površine izmjenjivača topline izložene su visokim temperaturama, kao i metalnim kloridima u letećem pepelu i klorovodiku u dimnim plinovima, što ubrzava napredovanje visokotemperaturne korozije. Kako se napredovanje korozije ubrzava na višim temperaturama izmjenjivačkih površina, nužno je držati njihovu temperaturu na nižim vrijednostima kako bi ih se zaštitilo. Niže temperature izmjenjivačkih površina uvjetuju s druge strane niže parametre proizvedene pare, što snižava iskoristivost postrojenja.

Zbog visokih specifičnih troškova opreme postrojenja i/ili nedostatka izvora rashladne vode u ovakvim se postrojenjima većinom koriste zrakom hlađeni kondenzatori. Kod zrakom hlađenih kondenzatora tlak u kondenzatoru je dosta viši nego kod onih hlađenih vodom. Red veličine kondenzatorskog tlaka u ovom slučaju kreće se oko 0,15 bar [7].

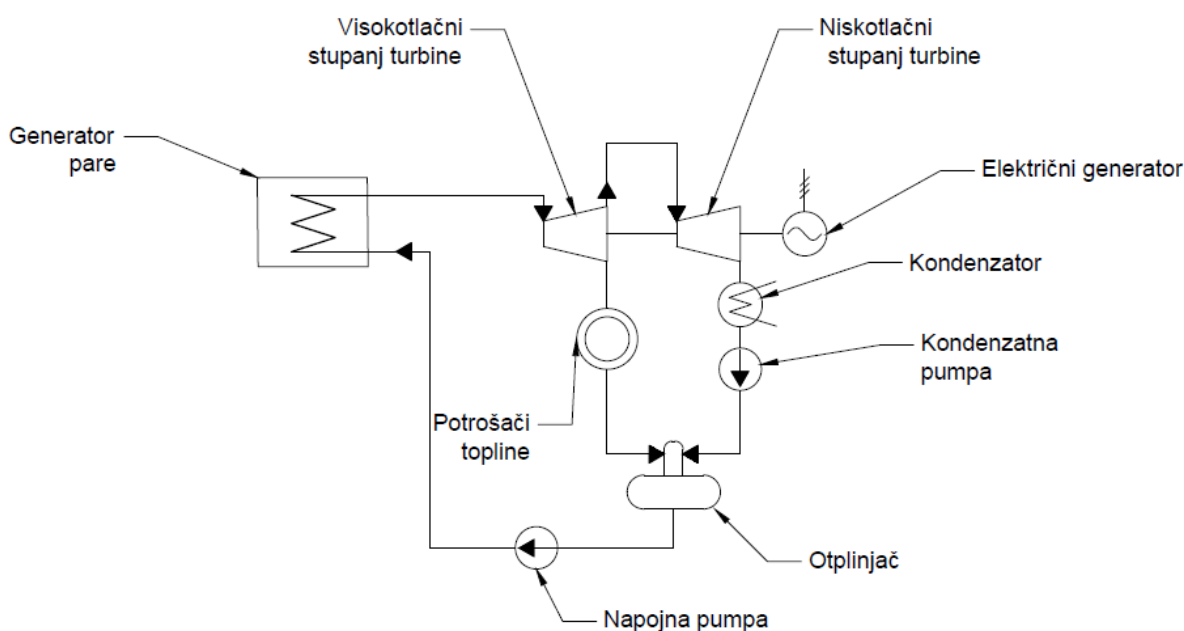
U ložištima postrojenja za izgaranje otpada potrebno je dovesti mnogo zraka za izgaranje pa time raste pretičak zraka, a s pretičkom zraka i količina dimnih plinova. Što je veća količina dimnih plinova to oni više energije izbacuju u okoliš za danu temperaturu izlaza iz ložišta.

Kod izgaranja otpada koji sadrži mnogo štetnih sastojaka koji izlaze u dimnim plinovima pa se posebna pažnja mora posvetiti uklanjanju štetnih sastojaka iz dimnih plinova. Pogon uređaja za uklanjanje štetnih sastojaka troši mnogo električne energije pa je s time isporučena električna energija manja, što opet smanjuje iskoristivost postrojenja.



#### 4. KOGENERACIJSKO POSTROJENJE NA KRUTI KOMUNALNI OTPAD

Kogeneracijsko postrojenje na otpad sastoji se od dva generatora pare od kojih svaki ima nominalnu toplinsku snagu 28 MW, kondenzacijske parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare koja se sastoji od jednog visokotlačnog i jednog niskotlačnog stupnja, generatora električne energije i izmjenjivača topline za potrebe grijanja te od ostalih komponenti [Slika 6].



Slika 6 Shema kogeneracijskog postrojenja na otpad

Godišnje je, za potrebe rada postrojenja, dostupno 140000 t otpada. U slučaju nedostatka otpada kao goriva postrojenje je opremljeno kotlovima na prirodni plin, kako ne bi moralo izlaziti iz pogona.

Izgaranjem otpada u ložištu razvija se toplinska energija koja se, u generatoru pare, iskorištava za proizvodnju pregrijane pare. Pregrijana para se zatim isporučuje u visokotlačni turbinski stupanj u kojem ekspandira do stanja oduzimanja. Jedan dio masenog protoka pare, koji ovisi o toplinskim zahtjevima potrošača topline, iz visokotlačnog turbinskog stupnja

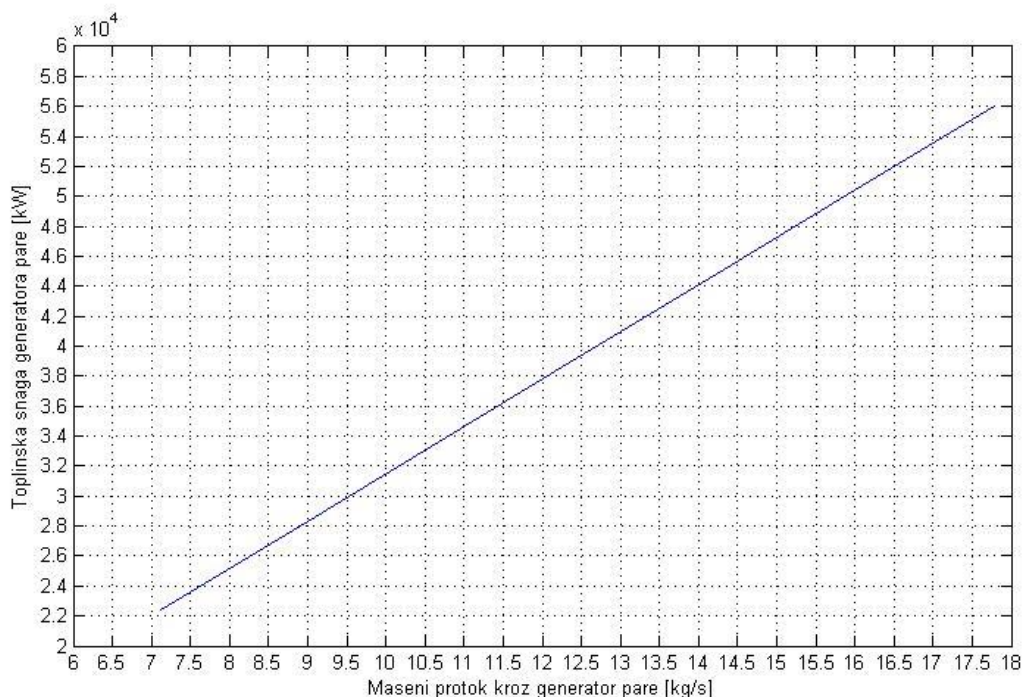
odvaja se za potrebe izmjene topline u izmjenjivaču sustava grijanja. U izmjenjivaču sustava grijanja para potpuno kondenzira, na tlaku oduzimanja, do stanja vrele kapljevine i ulazi u otplinjač. Preostali dio pare vodi se u niskotlačni turbinski stupanj u kojem ekspandira do kondenzatorskog tlaka te se odvodi u kondenzator u kojem potpuno kondenzira do stanja vrele kapljevine koja se kondenzatnom pumpom odvodi u otplinjač. U otplinjaču dolazi do miješanja navedenih dviju struja. Iz otplinjača se voda pomoću napojne pumpe odvodi u generator pare čime se zatvara kružni proces.

#### **4.1. Matematički model postrojenja**

Matematički model postrojenja napravljen je u programskom alatu MATLAB<sup>TM</sup>. Matematički model obuhvaća modele generatora pare, turbine i izmjenjivača topline sustava grijanja koji su se pokazali dovoljnim za simulaciju rada postrojenja u smislu prikaza proizvedene električne energije, toplinske energije isporučene u sustav grijanja, emisija CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, i NO<sub>x</sub> po toni spaljenog otpada, odnosno po MWh proizvedene energije te ukupne iskoristivosti postrojenja u ovisnosti o različitom opterećenju generatora pare.

##### **4.1.1. Generator pare**

U postrojenju se nalaze dva generatora pare, svaki nominalne toplinske snage 28 MW što zajedno daje 56 MW instalirane ulazne toplinske snage ( $P_{GP}$ ). Kako je nominalna toplinska snaga generatora pare već zadana, za matematički model preostalo je samo odrediti iznose toplinske snage za različita opterećenja generatora pare u smislu različitih masenih protoka napojne vode, odnosno pare. U modelu je zbog jednostavnosti proračuna uzeta linearna veza između opterećenja i toplinske snage, odnosno opterećenja i protoka pare, stoga je i međusobna veza između protoka pare i razvijene toplinske snage u generatoru pare također linearna [Slika 7].



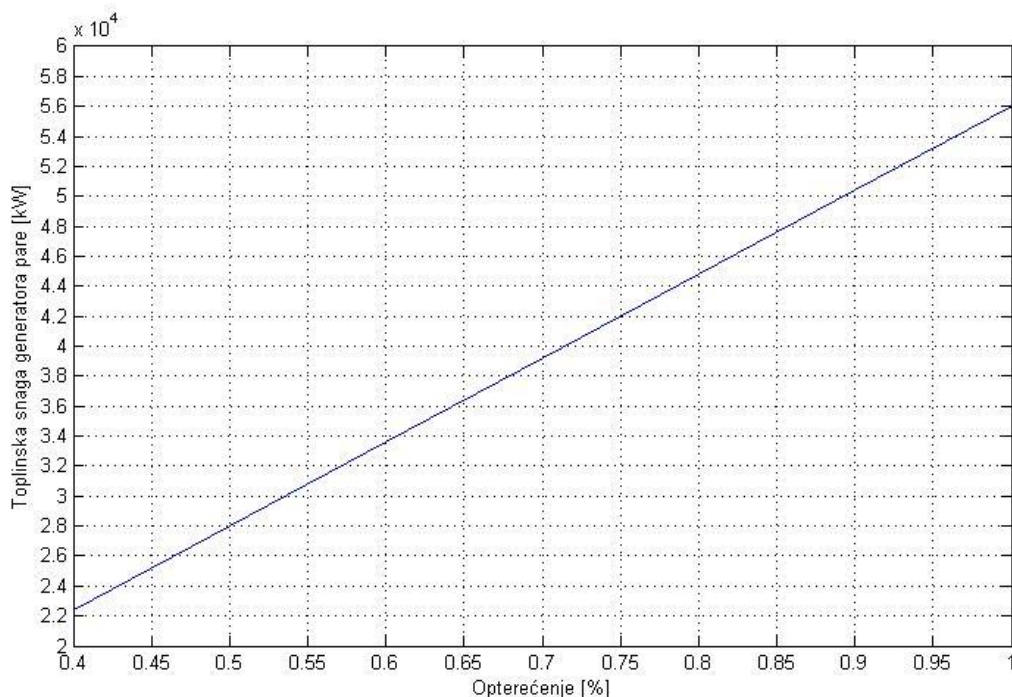
**Slika 7 Ovisnost toplinske snage generatora pare o masenom protoku**

Iz dijagrama je vidljivo da porastom protoka raste i razvijena toplinska snaga u generatoru pare, također se vidi da se pri nominalnom protoku od 17,78 kg/s, odnosno 64 t/h, razvija nominalna toplinska snaga od 56 000 kW, odnosno 56 MW.

Za minimalno opterećenje generatora pare uzeta je vrijednost od 40% što uglavnom odgovara stvarnom minimalnom opterećenju generatora pare. Opterećenje je zatim podjeljeno u interval od 40 % do 100 %.

#### 4.1.1.1. Toplinska snaga generatora pare

Raspodijela toplinske snage generatora pare u ovisnosti opterećenju dobivena je izračunavanjem odgovarajuće snage za minimalno opterećenje jednog generatora pare te je napravljen interval toplinskih snaga od 11,2 MW, snaga koja odgovara opterećenju generatora od 40 %, do 28 MW, odnosno snaga koja odgovara opterećenju generatora pare od 100 %. Zatim su pomoću linearne interpolacije funkcijom *interp1* dobivene različite vrijednosti toplinskih snaga za određeni stupanj opterećenja. Na poslijetku je zbrojem toplinskih snaga razvijenih u oba generatora pare dobivena ukupna toplinska snaga dva generatora pare. Odnos ukupne toplinske snage generatora pare i opterećenja prikazan je u dijagramu [Slika 8].

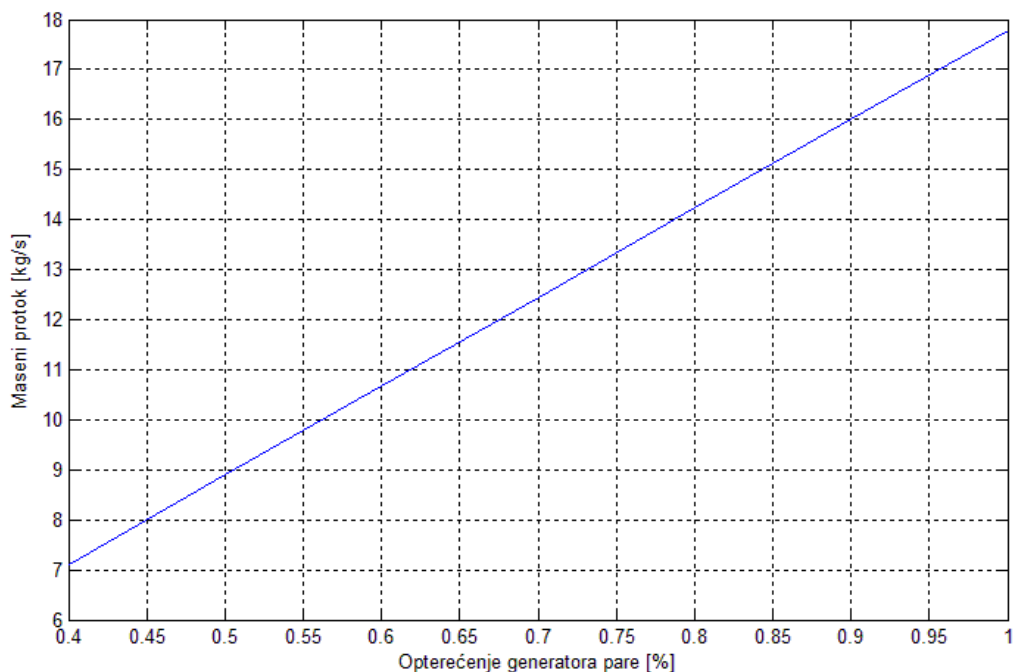


**Slika 8 Ovisnost toplinske snage generatora pare o opterećenju**

Iz dijagrama je vidljivo da za opterećenje od 100 % dva generatora pare zajedno razvijaju nominalnu toplinsku snagu od 56 MW, odnosno 56000 kW.

#### 4.1.1.2. Maseni protok pare

Ovisnost masenog protoka pare kroz generator pare također je dobivena pomoću linearne interpolacije, uzevši da pri minimalnom opterećenju generatora pare od 40 % protok pare kroz jedan generator pare iznosi 3,56 kg/s, odnosno 12,8 t/h, dok pri opterećenju od 100 % imamo nominalni maseni protok kroz jedan generator pare od 8,89 kg/s, odnosno 32 t/h. Korištenjem funkcije *interp1* dobivene su različite vrijednosti protoka pare u ovisnosti o opterećenju. Zbrojem odgovarajućih protoka pare iz oba generatora pare dobivena je ovisnost ukupnog protoka kroz sustavi opterećenja. Odnos ukupnog protoka kroz sustav prikazan je na dijagramu [Slika 9].



**Slika 9 Ovisnost protoka o opterećenju generatora pare**

Iz dijagrama je vidljivo da pri 100 % opterećenja generatora pare maseni protok pare ( $D_0$ ) iznosi nominalnih 17,78 kg/s, odnosno 64 t/h.

#### 4.1.2. Parna turbina s reguliranim oduzimanjem pare

Turbina se sastoji od jednog visokotlačnog dijela i jednog niskotlačnog dijela. Pri nominalnom opterećenju pregrijana para masenog protoka ( $D_0$ ) od 64 t/h, pri tlaku ( $p_0$ ) od 47 bar i temperaturi ( $T_0$ ) od 400 °C ulazi u visokotlačni stupanj turbine u kojem ekspandira do tlaka oduzimanja proizvodeći pritom snagu. Na kraju visokotlačnog stupnja vrši se oduzimanje pare pri tlaku ( $p_1$ ) od 5 bar i temperaturi ( $T_1$ ) od 190 °C za potrebe grijanja. preostala para tih parametara ulazi u niskotlačni dio turbine u kojem ekspandira do kondenzatorskog tlaka ( $p_k$ ) od 0,05 bar, proizvodeći pritom snagu. Snaga visokotlačnog dijela zbrojena sa snagom niskotlačnog dijela turbine daje ukupnu snagu razvijenu u turbini, koja pokreće generator električne energije, koji pak proizvodi električnu energiju.

Snaga [kW] turbine određena određena je sljedećim izrazom:

$$P_T = P_{VT} + P_{NT} \quad (1)$$

Pri čemu je:

$P_{VT}$  – snaga razvijena u visokotlačnom dijelu turbine [kW],

$P_{NT}$  – snaga razvijena u niskotlačnom dijelu turbine [kW].

#### 4.1.2.1. Visokotlačni stupanj turbine

Snaga [kW] visokotlačnog dijela turbine određena je izrazom:

$$P_{VT} = D_0 \cdot (h_0 - h_1) \quad (2)$$

Gdje je:

$D_0$  – maseni protok pare kroz visokotlačni stupanj turbine [kg/s],

$h_0$  – specifična entalpija pare na ulazu u visokotlačni dio turbine [kJ/kg],

$h_1$  – specifična entalpija pare na izlazu iz visokotlačnog dijela turbine [kJ/kg].

#### 4.1.2.2. Niskotlačni stupanj turbine

Snaga [kW] niskotlačnog dijela turbine određena je izrazom:

$$P_{NT} = D_2 \cdot (h_1 - h_2) \quad (3)$$

Gdje je:

$D_2$  – maseni protok pare kroz niskotlačni stupanj turbine [kg/s],

$h_1$  – specifična entalpija pare na ulazu u niskotlačni dio turbine [kJ/kg],

$h_2$  – specifična entalpija pare na izlazu iz niskotlačnog dijela turbine [kJ/kg].

#### 4.1.3. Proizvedena električna energija

Proizvedena električna energija s jedne strane ovisi o raspodijeli toplinskog konzuma, dok s druge strane ovisi o opterećenju generatora pare. Kod povećanja proizvodnje toplinske energije smanjuje se maseni protok pare kroz niskotlačni stupanj turbine, a time i sama proizvodnja električne energije. U slučaju smanjenog opterećenja generatora pare radi se o smanjenom masenom protoku pare kroz sustav pa tako i kroz turbinu što opet uzrokuje smanjenu proizvodnju električne energije.

Proizvedena električna snaga računa se prema sljedećem izrazu:

$$P_E = P_T \cdot \eta_{meh,el} \quad (4)$$

Gdje je:

$\eta_{meh,el}$  – mehanička iskoristivost turbine i iskoristivost generatora električne energije.

#### 4.1.4. Izmjenjivač topline sustava grijanja

Izmjenjivač topline sustava grijanja služi za predaju toplinske energije sustavu daljinskog grijanja. Toplinska snaga predana sustavu daljinskog grijanja u izmjenjivaču topline opisana je sljedećim izrazom:

$$Q_T = D_1 \cdot (h_1 - h_3) \quad (5)$$

Gdje je:

$D_1$  – maseni protok pare kroz izmjenjivač topline [kg/s],

$h_1$  – specifična entalpija pare na ulazu u izmjenjivač topline [kJ/kg],

$h_3$  – specifična entalpija pare na izlazu iz izmjenjivača topline [kJ/kg].

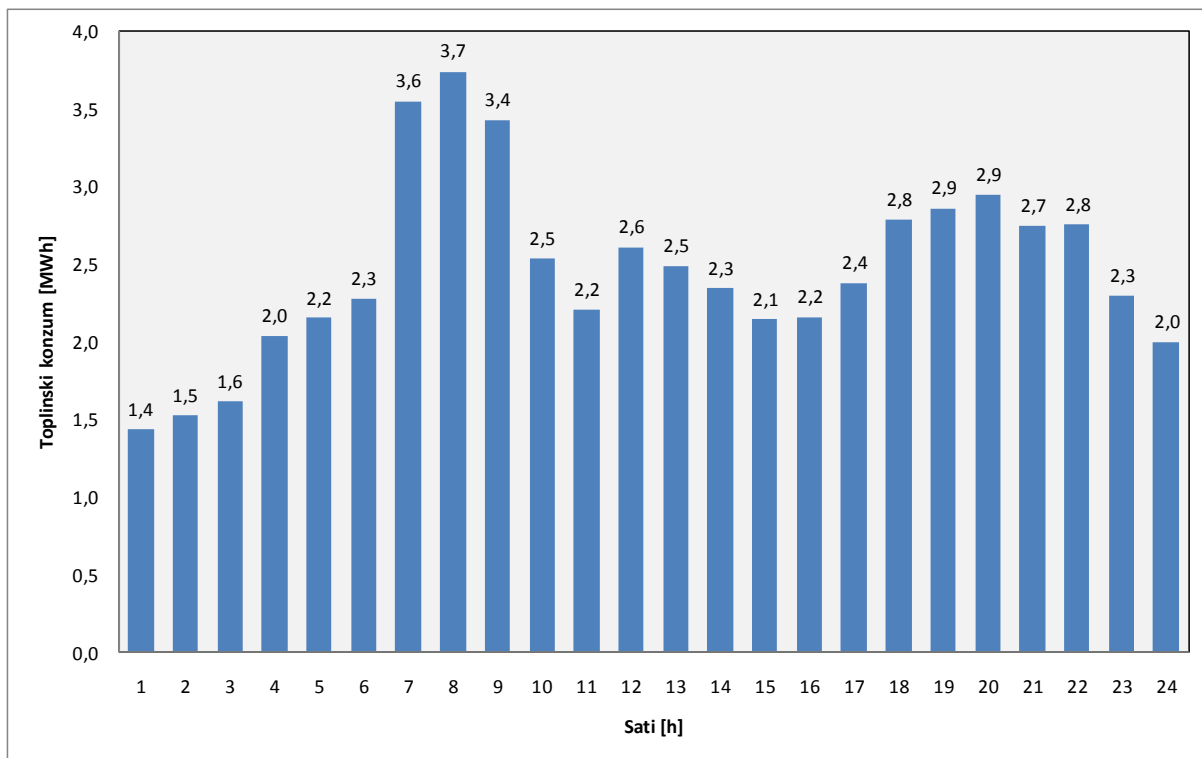
## 4.2. Toplinski konzum

Toplinski konzum kod sustava daljinskog grijanja je toplinska energija koja se isporučuje potrošačima, a služi uglavnom za potrebe grijanja i pripreme potrošne tople vode (PTV) u kućanstvima. Količina toplinske energije koju treba isporučiti uvjetovana je zahtjevima potrošača, a oni najviše ovise o temperaturama zraka koji vladaju u okolišu. Zbog promjena vanjske temperature zraka tokom godine iznos isporučene topline potrošačima se unutar godine mijenja. Iz te činjenice sljedi glavna podjela količine isporučene toplinske energije na razdoblje u sezoni grijanja, kada se ona koristi i za grijanje i za pripremu PTV te na razdoblje van sezone grijanja, kada se uglavnom troši na pripremu PTV s minimalnim zahtjevom u ljetnim mjesecima. Toplinski konzum se osim na godišnjoj razini, razlikuje na satnoj, dnevnoj i mjesečnoj razini, opet ovisno o navedenim uvjetima.

Radi pojednostavljenja je kod analize rada postrojenja napravljena gruba podjela prosječne satne razdiobe toplinskog konzuma na toplinski konzum u sezoni grijanja i toplinski konzum van sezone grijanja. Prosječna satna razdioba toplinskog konzuma za sezonu grijanja uzeta je za referentno postrojenje te zatim skalirana kako bi se dobile vrijednosti toplinskog konzuma za postrojenje koje se opisuje u radu. U nedostatku prosječne satne razdiobe toplinskog konzuma van sezone grijanja, razdioba izvan sezone grijanja izračunata je množeći razdiobu za sezonu grijanja s faktorom 0,15 kako bi okvirno odgovarala stvarnoj razdiobi. Razdiobe toplinskog konzuma prikazane su dijagramima [Slika 10] i [Slika 11].

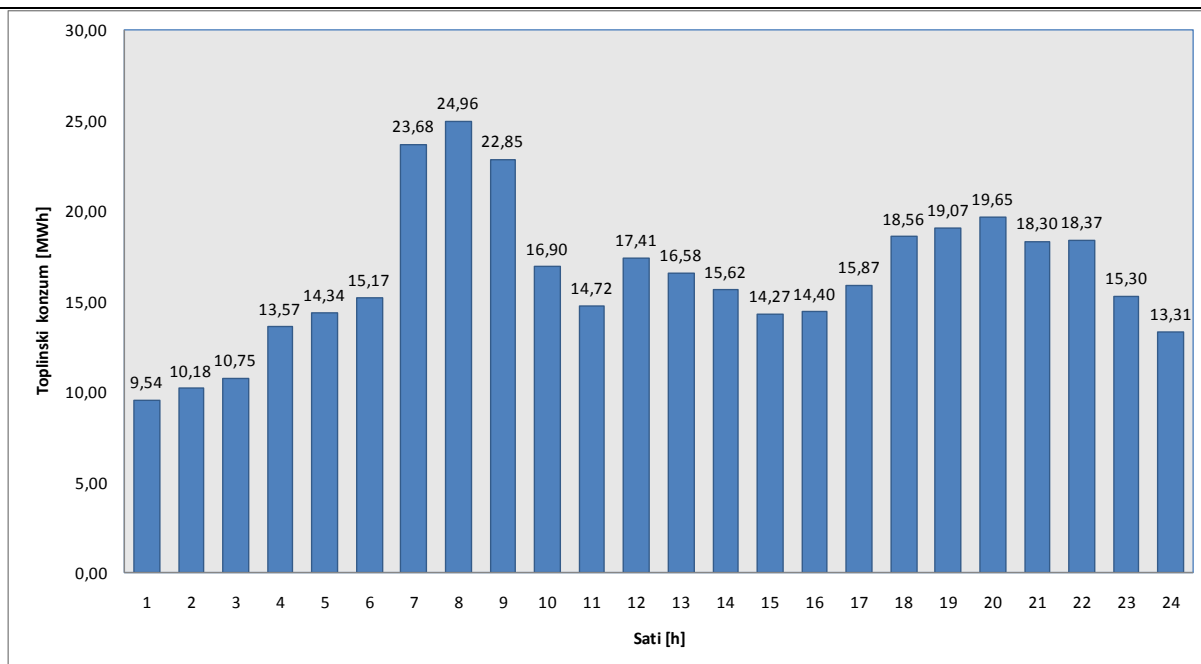
Pretpostavljeno je da je vrijeme trajanja sezone grijanja 167 dana, također je pretpostavljeno da je postrojenje, zbog redovitih održavanja i servisa, van sezone grijanja izvan pogona 15 dana pa slijedi da je postrojenje van sezone grijanja u pogonu 183 dana.

U svim režimima rada postrojenja konzum proizvedene toplinske energije bio je konstantan za razdoblje u sezoni grijanja, kao i u razdoblju van sezone grijanja. Razlog tome je što se radi o postrojenju čija je primarna zadaća osigurati toplinsku energiju potrošačima.



Slika 10 Prosječna satna razdioba toplinskog konzuma izvan sezone grijanja





Slika 11 Prosječna satna razdioba toplinskog konzuma u sezoni grijanja

#### 4.2.1. Isporučena toplinska energija

Isporučena toplinska energija u jednom danu:

$$Q_d = \sum_{i=1}^{24} Q_{Ti} \quad (6)$$

Gdje je:

$Q_{Ti}$  – toplinska energija isporučena u jednom satu [MWh].

Isporučena toplinska energija u razdoblju sezone grijanja:

$$Q_{sg} = n_{d,sg} \cdot Q_{d,sg} \quad (7)$$

Gdje je:

$n_{d,sg}$  – broj dana u sezoni grijanja,

$Q_{d,sg}$  – isporučena toplinska energija u jednom danu sezone grijanja [MWh].

Isporučena toplinska energija u razdoblju van sezone grijanja:

$$Q_{vsg} = n_{d,vsg} \cdot Q_{d,vsg} \quad (8)$$

Gdje je:

$n_{d,vsg}$  – broj dana van sezone grijanja,

$Q_{d,vsg}$  – isporučena toplinska energija u jednom danu van sezone grijanja [MWh].

Ukupna toplinska energija isporučena u jednoj godini:

$$Q_{god} = Q_{d,sg} + Q_{d,vsg} \quad (9)$$

### 4.3. Godišnja potrošnja krutog komunalnog otpada

Potrošnja otpada kao goriva u izravnoj je vezi s toplinom koja se predaje vodi u generatoru pare. Kruti komunalni otpad koji se koristi kao gorivo u postrojenju ima donju ogrjevnu vrijednost  $H_d = 10 \text{ MJ/kg}$  [4]. Količina goriva potrošena u sezoni grijanja računa se iz izraza:

$$m_{op,sg} = \frac{Q_{dov,sg}}{H_d \cdot \eta_{GP}} \quad (10)$$

Gdje je:

$Q_{dov,sg}$  – ukupna toplina predana vodi u generatoru pare u sezoni grijanja [MWh],

$H_d$  – donja ogrjevna vrijednost krutog komunalnog otpada [MWh/t],

$\eta_{GP}$  – iskoristivost generatora pare.

Količina otpada koja se utroši na pogon postrojenja van sezone grijanja:

$$m_{op,vsg} = \frac{Q_{dov,vsg}}{H_d \cdot \eta_{GP}} \quad (11)$$

Gdje je:

$Q_{dov,vsg}$  – ukupna toplina predana vodi u generatoru pare izvan sezone grijanja [MWh].

Ukupna količina otpada koja se utroši na pogon postrojenja u jednoj godini:

$$m_{op,god} = m_{op,sg} + m_{op,vsg} \quad (12)$$

### 4.4. Emisije dimnih plinova

Proračun emisija dimnih plinova bazira se na emisijama ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), suporovog dioksida ( $\text{SO}_2$ ) te dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ), jer imaju najveći utjecaj na okoliš i jer se za njihove emisije plaćaju određene naknade. Emisije ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i suporovog dioksida ( $\text{SO}_2$ ) računaju se iz stehiometrijskih jednadžbi, dok se emisije dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) određuju prema emisijskim faktorima ( $EF$ ).

Kruti komunalni otpad je mješavina raznih tvari različitih fizikalnih i kemijskih svojstava. Za određivanje emisije dimnih plinova vrlo je važno poznavati sastav otpada. Sastav krutog komunalnog otpada koji se koristio pri izradi ovog rada iskazan je u [Tablica 1] [4].

**Tablica 1. Sastav krutog komunalnog otpada [4]**

Tvar	Maseni udio [%]
Voda	20
Pepeo	25
Ugljik	29
Vodik	3
Dušik	0,9
Kisik	18
Sumpor	0,3
Fluor	0,02
Klor	0,5
Ostalo	3,28
Ukupno	100

#### 4.4.1. Emisije ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>)

Ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) nastaje pri potpunom izgaranju ugljika. Stehiometrijska jednadžba izgaranja ugljika, odnosno stvaranja CO<sub>2</sub>:



Količina ugljika u jednoj toni otpada:

$$n_c = \frac{m_c}{M_C} = \frac{290}{12,011} = 24,14 \frac{\text{kmol}}{\text{t}_{\text{otp}}} \quad (14)$$

Gdje je:

$m_c$  – masa ugljika u jednoj toni otpada i iznosi [kg<sub>C</sub>/t<sub>otp</sub>],

$M_C$  – molarna masa ugljika [kg/kmol].

Emisija CO<sub>2</sub> po toni otpada tada iznosi:

$$m_{CO_2} = n_{CO_2} \cdot M_{CO_2} = 24,14 \cdot 44.011 = 1062 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{t}_{\text{otp}}} \quad (15)$$

Gdje je:

$n_{CO_2}$  – količina CO<sub>2</sub> u jednoj toni otpada [kmol/t<sub>otp</sub>],

$M_{CO_2}$  – molarna masa CO<sub>2</sub> [kg/kmol].

Godišnja emisija CO<sub>2</sub>:

$$m_{CO_2, \text{god}} = m_{CO_2} \cdot m_{\text{otp, god}} \quad (16)$$

Emisija CO<sub>2</sub> po MWh proizvedene energije u jednoj godini:

$$m_{CO_2, P_E+Q} = \frac{m_{CO_2, \text{god}}}{P_{E, \text{god}} + Q_{\text{god}}} \quad (17)$$

Gdje je:

$P_{E, \text{god}}$  – godišnja proizvodnja električne energije [MWh],

$Q_{\text{god}}$  – godišnja proizvodnja toplinske energije [MWh].

#### 4.4.2. Emisije suporovog dioksida (SO<sub>2</sub>)

Sumporov dioksid (SO<sub>2</sub>) nastaje pri potpunom izgaranju sumpora. Stehiometrijska jednadžba izgaranja sumpora, odnosno stvaranja SO<sub>2</sub>:



Količina sumpora u jednoj toni otpada:

$$n_S = \frac{m_S}{M_S} = \frac{3}{32} = 0,09375 \frac{\text{kmol}}{\text{t}_{\text{otp}}} \quad (19)$$

Gdje je:

$m_S$  – masa sumpora u jednoj toni otpada [kgS/t<sub>otp</sub>],

$M_S$  – molarna masa sumpora [kg/kmol].

Emisija SO<sub>2</sub> po toni otpada tada iznosi:

$$m_{SO_2} = n_{SO_2} \cdot M_{SO_2} = 0,09375 \cdot 64 = 6 \frac{\text{kg}_{SO_2}}{\text{t}_{\text{otp}}} \quad (20)$$

Gdje je:

$n_{SO_2}$  – količina SO<sub>2</sub> u jednoj toni otpada [kmol/t<sub>otp</sub>],

$M_{SO_2}$  – molarna masa SO<sub>2</sub> [kg/kmol].

Godišnja emisija SO<sub>2</sub>:

$$m_{SO_2, god} = m_{SO_2} \cdot m_{otp, god} \cdot (1 - c_{SO_2}) \quad (21)$$

Gdje je:

$c_{SO_2}$  – učinkovitost uklanjanja  $SO_2$  iz dimnih plinova i iznosi 0,98 [4].

Emisija  $SO_2$  po MWh proizvedene energije u jednoj godini:

$$m_{SO_2, P_E+Q} = \frac{m_{SO_2, god}}{P_{E, god} + Q_{god}} \quad (22)$$

Gdje je:

$P_{E, god}$  – godišnja proizvodnja električne energije [MWh],

$Q_{god}$  – godišnja proizvodnja toplinske energije [MWh].

#### 4.4.3. Emisije dušikovih oksida ( $NO_x$ )

Dušikovi oksidi nisu direktan produkt izgaranja pa se njihova emisija ne izračunava iz stehiometrijskih jednadžbi. Kao što je već navedeno njihova emisija se određuje iz emisijskih faktora  $EF$ . Emisijski faktor za otpad ovisi o vrsti otpada i postupku kojem je podvrgnut. Emisijski faktor za izgaranje krutog komunalnog otpada je  $EF = 1,8 \text{ kg/t}_{otp}$  [4]. Pa je emisija  $NO_x$  po toni otpada:

$$m_{NO_x} = EF = 1,8 \frac{\text{kg}_{NO_x}}{\text{t}_{otp}} \quad (23)$$

Godišnja emisija  $NO_x$ :

$$m_{NO_x, god} = m_{NO_x} \cdot m_{otp, god} \cdot (1 - c_{NO_x}) \quad (24)$$

Gdje je:

$c_{NO_x}$  – učinkovitost uklanjanja  $NO_x$  iz dimnih plinova i iznosi 0,8 [4].

Emisija  $NO_x$  po MWh proizvedene energije u jednoj godini:

$$m_{NO_x, P_E+Q} = \frac{m_{NO_x, god}}{P_{E, god} + Q_{god}} \quad (25)$$

Gdje je:

$P_{E, god}$  – godišnja proizvodnja električne energije [MWh],

$Q_{god}$  – godišnja proizvodnja toplinske energije [MWh].

#### 4.5. Termodinamički stupanj iskoristivosti postrojenja

Termodinamički stupanj iskoristivosti kogeneracijskog postrojenja jednak je omjeru ukupne proizvedene energije (električne i toplinske) i toplinske energije koja se oslobađa u ložištu generatora pare.

Izraz za termodinamički stupanj iskoristivosti postrojenja:

$$\eta_{uk} = \frac{P_{E,god} + Q_{god}}{Q_{dov,god}} \cdot \eta_{GP} \quad (26)$$

Gdje je:

$Q_{dov,god}$  – ukupna toplina predana vodi u generatoru pare u jednoj godini [MWh]

## 5. ANALIZA RAZLIČITIH REŽIMA RADA KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA NA KRUTI KOMUNALNI OTPAD

Kao što je već navedeno u prethodnom poglavlju pod različitim režimima rada postrojenja misli se na promjenu opterećenja generatora pare. Kako je toplinski konzum određen potrebama potrošača on će biti konstantan za pojedino razdoblje godine.

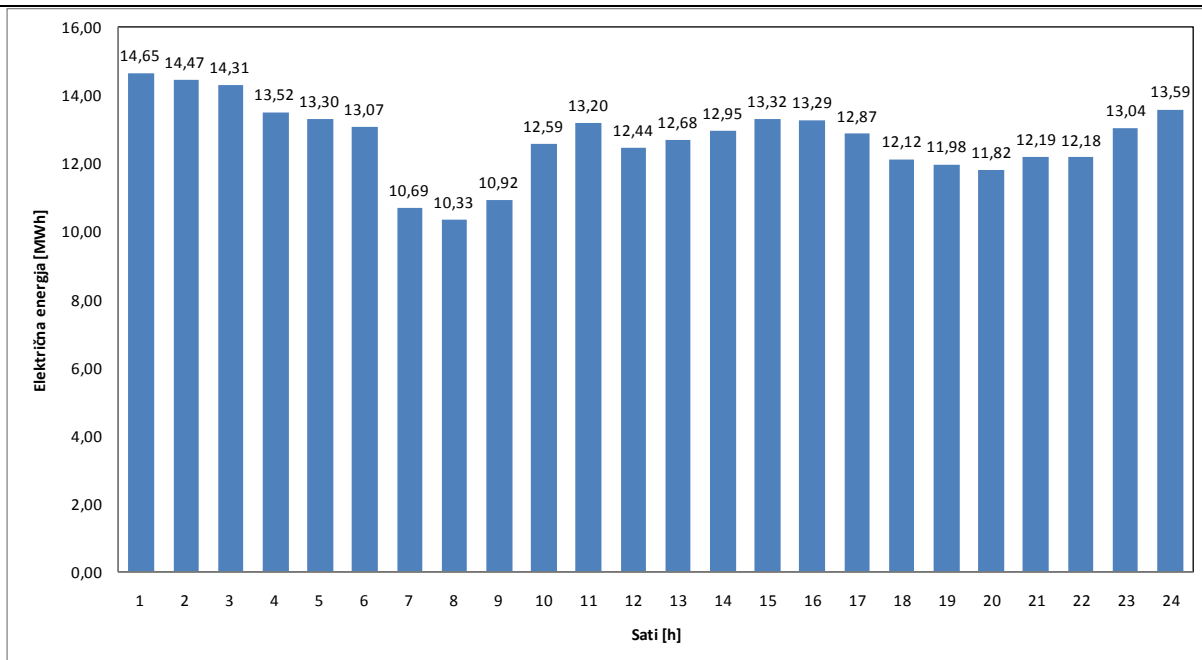
Prvo će se analizirati rad postrojenja pri punom opterećenju generatora pare u sezoni grijanja, kao i van sezone grijanja, a zatim pri opterećenju od 75 % u sezoni grijanja i 55 % van sezone grijanja.

U analizi rada postrojenja pratit će se količina godišnje potrošenog goriva, ukupna proizvedena električna i toplinska energija u jednoj godini, godišnje emisije dimnih plinova i stupanj iskoristivosti postrojenja.

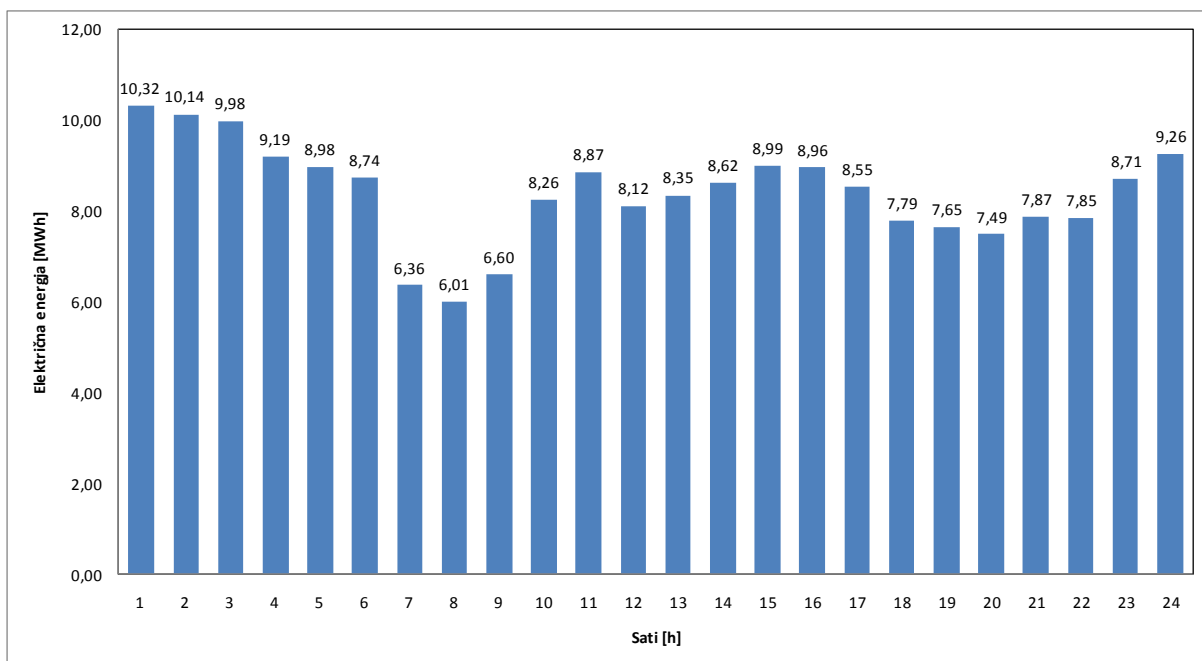
Proizvedena količina toplinske energije u jednoj godini je jednaka za sve scenarije i iznosi  $Q_{god} = 76486$  MWh/god.

### 5.1. Opterećenje generatora pare: 100 % u sezoni grijanja i 100 % van sezone grijanja

Kako je vidljivo iz dijagrama, [Slika 12] i [Slika 13] krivulja satno proizvedene električne energije ima suprotan oblik od krivulje satne razdiobe proizvedene toplinske energije. Razlog tome je smanjenje proizvodnje električne energije pri porastu proizvodnje toplinske energije. Također je vidljivo da je u razdoblju izvan sezone grijanja proizvedeno više električne energije nego u sezoni grijanja što odgovara većoj proizvodnji toplinske energije u sezoni grijanja.



Slika 12 Prosječna satna razdioba električne energije izvan sezone grijanja (100 % - 100 %)



Slika 13 Prosječna satna razdioba električne energije u sezoni grijanja (100 % - 100 %)

U [Tablica 2] su dani rezultati simulacije rada postrojenja. Vidljivo je da vrijednost potrošene količine otpada u godini  $m_{otp, god} = 176030 \text{ t/god}$  prelazi raspoloživu količinu otpada od 140000 t/g pa će biti potrebno uključiti pomoćne kotlove na prirodni plin.

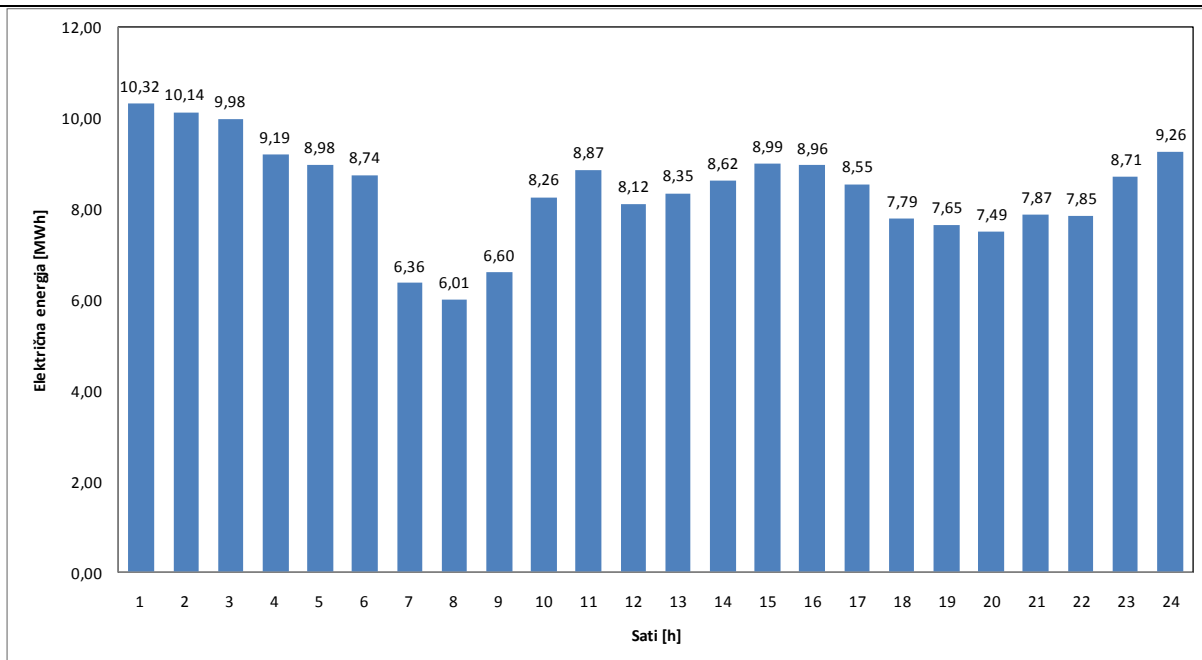


**Tablica 2. Rezultati simulacije za opterećenje: 100 % u sezoni grijanja i 100 % izvan sezone grijanja**

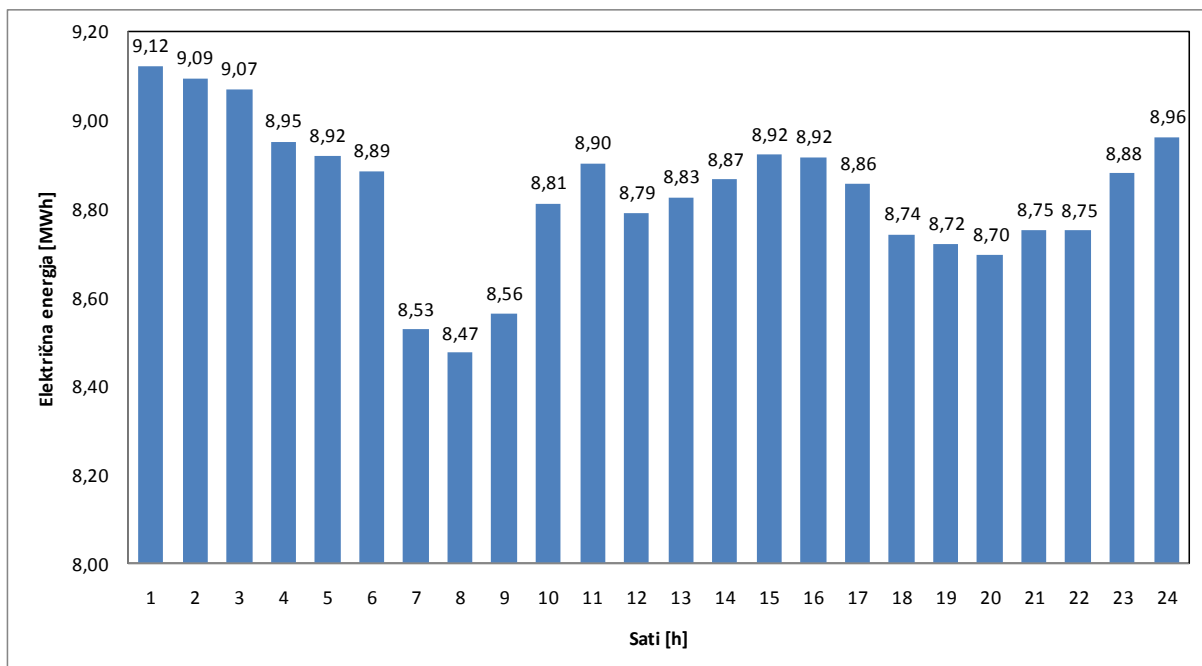
Parametar	Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
Proizvedena električna energija	$P_{e,god}$	124030	MWh/god
Potrošena količina otpada	$m_{otp,god}$	176030	t/god
Emisije CO <sub>2</sub> po MWh proizvedene energije	$m_{CO_2,PE+Q}$	932	kg/MWh
Emisije SO <sub>2</sub> po MWh proizvedene energije	$m_{SO_2,PE+Q}$	0,11	kg/MWh
Emisije NO <sub>x</sub> po MWh proizvedene energije	$m_{NO_x,PE+Q}$	0,47	kg/MWh
Termodinamički stupanj iskoristivosti	$\eta_{uk}$	41,01	%

## 5.2. Opterećenje generatora pare: 75 % u sezoni grijanja i 55 % van sezone grijanja

Kako je vidljivo iz dijagrama, [Slika 14] i [Slika 15] u pojedinim satima razdiobe električne energije razdoblja izvan sezone grijanja proizvedeno je manje električne energije nego za isto razdoblje u sezoni grijanja, dok je u ostalim satima električna energija izvan sezone grijanja veća nego u sezoni grijanja. Razlog smanjene proizvodnje električne energije u nekim satima izvan sezone grijanja u odnosu na onu u sezoni grijanja je smanjenje opterećenja generatora pare izvan sezone, što znači i manji protok kroz turbinu. Također je iz dijagrama satne razdiobe toplinskog konzuma [Slika 10] i [Slika 11] vidljivo da je u tim satima toplinski konzum najmanji u danu.



Slika 14 Prosječna satna razdioba električne energije u sezoni grijanja (75 % - 55 %)



Slika 15 Prosječna satna razdioba električne energije izvan sezone grijanja (75 % - 55 %)

U [Tablica 3] su dani rezultati simulacije rada postrojenja. Vidljivo je da je vrijednost potrošene količine otpada u godini  $m_{otp, god} = 111130t/god$ , što je manje od raspoložive

količine otpada od 140000 t/g pa neće biti potrebno uključivati pomoćne kotlove na prirodni plin.

**Tablica 3. Rezultati simulacije za opterećenje: 75 % u sezoni grijanja i 55 % izvan sezone grijanja**

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
Proizvedena električna energija	$P_{e,god}$	72472	MWh/god
Potrošena količina otpada	$m_{otp,god}$	111130	t/god
Emisije CO <sub>2</sub> po MWh proizvedene energije	$m_{CO_2,PE+Q}$	792	kg/MWh
Emisije SO <sub>2</sub> po MWh proizvedene energije	$m_{SO_2,PE+Q}$	0,09	kg/MWh
Emisije NO <sub>x</sub> po MWh proizvedene energije	$m_{NO_x,PE+Q}$	0,40	kg/MWh
Termodinamički stupanj iskoristivosti	$\eta_{uk}$	48,25	%

### 5.3. Usporedba rezultata simulacije

Usporedbom rezultata za dva različita opterećenja generatora pare uočene su razlike u izlaznim podacima između dvije varijante simulacije koje su prikazane u [Tablica 4]. Vidljiva je značajna razlika u iznosu proizvedene električne energije što je posljedica smanjenog opterećenja generatora pare u oba razdoblja godine u drugoj varijanti. U režimu rada van sezone grijanja kada postoji velik potencijal za proizvodnju električne energije opterećenje generatora pare smanjeno je na svega 55 % pa je taj potencijal ostao neiskorišten. Što se tiče potrošnje goriva u drugoj varijanti potrošeno je dosta manje goriva, što je pak logična posljedica smanjenog opterećenja generatora pare. Emisije dimnih plinova su niže u drugoj varijanti. Kako emisije padaju sa smanjenjem potrošnje goriva i porastom proizvedene energije, niži rezultat u drugoj varijanti sugerira da se potrošnja goriva smanjila u većoj mjeri

nego proizvedena električna energija. Stupanj iskoristivosti je ovisan o omjeru ukupne proizvedene energije i topline oslobođene u ložištu. Stupanj iskoristivosti u drugoj varijanti je viši, što znači da se toplina dovedena gorivom smanjila u većoj mjeri u odnosu na smanjenje proizvedene električne energije, uz činjenicu da je proizvedena toplinska energija ista u obje varijante.

**Tablica 4. Razlike pojedinih parametara za dva različita režima rada postrojenja**

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
Razlika proizvedene električne energije	$\Delta P_{e,god}$	51558	MWh/god
Razlika potrošene količine otpada	$\Delta m_{otp,god}$	64900	t/god
Razlika emisija CO <sub>2</sub> po MWh proizvedene energije	$\Delta m_{CO_2,PE+Q}$	140	kg/MWh
Razlika SO <sub>2</sub> emisija MWh proizvedene energije	$\Delta m_{SO_2,PE+Q}$	0,02	kg/MWh
Razlika emisija NO <sub>x</sub> po MWh proizvedene energije	$\Delta m_{NO_x,PE+Q}$	0,07	kg/MWh
Razlika Termodinamičkih iskoristivosti	$\Delta \eta_{uk}$	- 7,24	%

U obje varijante stupanj iskoristivosti postrojenja je vrlo malen, što se pripisuje činjenici da pregrijana para ima niske parametre te da je zbog pojednostavljenja simulacije razdioba toplinskog konzuma grubo podijeljena na razdoblje u sezoni i van sezone grijanja koje zauzima veći dio godine. Zbog minimalnog toplinskog konzuma van sezone grijanja, kad puno više protoka prolazi kroz kondenzacijski dio turbine, postrojenje je praktično radilo u režimu klasičnih termoelektrana koje imaju daleko niži stupanj iskoristivosti od kogeneracijskih postrojenja.

## 6. ZAKLJUČAK

S obzirom da se u današnjem društvu količina otpada neprestano povećava te je istovremeno sve manje mjesta za klasično odlaganja otpada, postrojenja koja koriste otpad kao gorivo u procesu dobivanja energije čine se kao idealno rješenje ovog problema. S jedne strane smanjuje količina otpada koju treba zbrinjavati, a s druge strane otpad, koji bi inače trunuo na odlagalištima ili bio spaljen u klasičnim spalionicama, služi kao gorivo za dobivanje energije. Uvođenjem u pogon postrojenja za proizvodnju energije iz otpada dogodio se dramatičan zaokret u kojem je otpad, koji je prije predstavljao problem te se za njegovo zbrinjavanje trošila energija, postao atraktivno gorivo za proizvodnju energije.

Postrojenje koje je bilo predmet ovog rada predstavlja postrojenje male nazivne snage te pokriva mali udio ukupne proizvodnje energije, što je i ubičajeno za otpad kao gorivo, pa pravi potencijal ovakvog načina proizvodnje energije ne treba tražiti u kvaliteti samog termodinamičkog procesa, već u postupnom povećanju njihova broja na svjetskoj razini.

Postrojenja za iskorištavanje energije spaljivanjem otpada mnogo su manja u pogledu nazivne snage u odnosu na postrojenja koja koriste fosilna goriva. Također otpad ima mnogo manju ogrjevnu vrijednost od većine fosilnih goriva. Razmatrajući ove činjenice isprva se može činiti kako su postrojenja na otpad lošija od klasičnih postrojenja na fosilna goriva, što je usko termodinamički gledano i točno, no kad se gleda šira slika u kojoj se nešto što je prije bilo neželjeno i nije predstavljalo nikakav izvor energije postalo nešto iz čega se proizvodi energija pa makar i sa nižim stupnjem iskoristivosti mora se priznati da takva postrojenja pružaju veliki potencijal za proizvodnju energije danas, kao i u budućnosti.

## LITERATURA

- [1] Lončar, D, Krajačić, Ž., Vujanović M., Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu, Zagreb, 2009
- [2] Bogdan, Ž: Termoenergetska postrojenja, skripta
- [3] Uredba o jediničnim naknadama, korektivnim koeficijentima i pobližim kriterijima i mjerilima za utvrđivanje naknade na emisiju u okoliš ugljikovog dioksida, „Narodne novine“, br. 73/07, (<http://www.nn.hr/sluzbeni-list/sluzbeni/index.asp>), 2007.
- [4] Schneider, D. R., Lončar D., Bogdan Ž.: Cost Analysis of Waste-to-Energy Plant, *Strojarstvo*, 2009., 52, str. 369 – 378
- [5] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on the Incineration of Waste I, 2000.
- [6] Gohlke, O., Martin, J.: Drivers for innovation in waste-to-energy technology, *Waste management*, 2007., str. 214–219
- [7] Lombardi, L., Carnevale, E., Corti, A.: A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste, *Waste management*, 10.1016/j.wasman.2014.11.010
- [8] Reimann, D.O.: CEWEP Energy Report III. (Status 2007–2010), ([http://www.cewep.eu/information/publicationsandstudies/studies/climate-protection/978.CEWEP\\_Energy\\_Efficiency\\_Report\\_Status\\_.html](http://www.cewep.eu/information/publicationsandstudies/studies/climate-protection/978.CEWEP_Energy_Efficiency_Report_Status_.html)), 2012.
- [9] Cimpal, C., Wenzel, H.: Energy implications of mechanical and mechanical–biological treatment compared to direct waste-to-energy, *Waste management*, 2013., 33, str. 1648 - 1658

## **PRILOZI**

I. CD-R disc