

# TERMOELEKTRANE NA DRVNU BIOMASU

---

**Tomašević, Mario**

**Graduate thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:331369>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

**MARIO TOMAŠEVIĆ**

**ZAVRŠNI RAD**

**TERMOELEKTRANE NA DRVNU  
BIOMASU**

Split, rujan 2023

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnika

**Predmet:** Obnovljivi izvori energije

**ZAVRŠNI RAD**

**Kandidat:** Mario Tomašević

**Naslov rada:** Termoelektrane na drvenu biomasu

**Mentor:** dr. sc. Slobodanka Jelena Cvjetković prof. struč. stud.

Split, rujan 2023.

# SADRŽAJ

SAŽETAK.....	1
SUMMARY.....	2
1. UVOD.....	3
2. ENERGIJA BIOMASE .....	4
2.1. Prednosti energije biomase.....	4
2.2. Nedostatci energije biomase.....	4
2.3. Drvna biomasa.....	6
3. TERMOELEKTRANE NA DRVNU BIOMASU.....	9
3.1. Glavni dijeovi termoelektrane.....	10
3.1.1. Ložište za čvrsta goriva.....	10
3.1.2. Voda za parne kotlove.....	11
3.1.3. Kondenzator parne turbine.....	12
3.1.4. Površinski kondenzator.....	13
3.1.5. Kondenzator miješanja.....	13
3.1.6. Generator pare.....	14
3.1.7. Parna turbina.....	15
3.2. Kogeneracija.....	17
3.2.1. Kogeneracijsko postrojenje „Bottom cycle“.....	19
3.2.2. Kogeneracijsko postrojenje „Topping cycle“.....	19
3.2.3. „Topping cycle“ s protutlačnom turbinom.....	21
3.2.4. „Topping cycle“ s motorn s unutrašnjim izgaranjem.....	21
3.2.5. „Topping cycle“ s turbinom s reguliranim oduzimanjem pare.....	22
3.3. Izračuni iskorištenja i efikasnosti kogeneracije.....	23
3.3.1. Omjer proizvedene električne i toplinske energije.....	26
3.3.2. Dijagrami opterećenja.....	27
4. KOGENERACIJSKO POSTROJENJE NA DRVNU BIOMASU „ENERGANA ŽUPANJA“.....	29
4.1. Princip rada kogeneracijskog postrojenja na drvnu biomasu „Energana Županja“.....	29
4.2. Održavanje postrojenja i pojedinih dijelova.....	33
5. GLAVNE ZNAČAJKE TERMOELEKTRANE NA DRVNU BIOMASU.....	36

5.1. Smanjenje emisije stakleničkih plinova.....	36
5.2. Povećanje energetske neovisnosti.....	37
5.3. Poticanje lokalne ekonomije.....	37
6. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40
POPIS SLIKA.....	41

## SAŽETAK

### TERMOELEKTRANE NA DRVNU BIOMASU

Drvena biomasa obnovljivi je izvor energije, koji se koristi u postupku kogeneracije, istovremene proizvodnje električne i toplinske energije u termoelektranama. Sirovina je niske gospodarske vrijednosti te je ima u značajnim količinama u obliku čvrste tvari biološkog podrijetla (drveće, grmlje) ili kao nusproizvod strojne obrade drva u industriji (otpadna drvena masa, piljevina). Sirovinu nije potrebno prerađivati prije upotrebe. Termoelektrane na drvnu biomasu imaju veliku isplativost zbog učinkovitog termodinamičkog korištenja goriva te su korisne u smanjenju ovisnosti o neobnovljivim sirovinama za proizvodnju električne energije.

Kogeneracija će se prikazati pripadajućim izračunima te principom rada termoelektrane na primjeru kogeneracijskog postrojenja na drvnu sječku „Energana Županja“.

Prednosti elektrana na drvnu biomasu u odnosu na druge načine proizvodnje električne energije su niska emisija stakleničkih plinova, povećanje energetske neovisnosti očuvanjem rezervi fosilnih goriva, poticanje lokalne ekonomije te ruralni razvitak u predjelima bogatim šumama i agrarnim sredinama.

## **SUMMARY**

### **WOOD BIOMASS THERMAL POWER PLANTS**

Wood biomass is a renewable source of energy, which is used in the process of cogeneration. Cogeneration is the simultaneous production of electricity and thermal energy in thermal power plants. The raw material is of low economic value and is available in significant quantities in the form of a solid substance of biological origin (trees, bushes) or as a by-product of wood processing in industry (waste wood, sawdust). The raw material does not need to be processed before use. Wood biomass thermal power plants are highly profitable due to the efficient thermodynamic use of fuel and are useful in reducing dependence on non-renewable sources for the production of electricity.

Cogeneration will be presented with associated calculations and the principle of operation of the thermal power plant using the example of the woodchip cogeneration plant "Energana Županja".

The advantages of wood biomass power plants compared to other ways of producing electricity are low greenhouse gas emissions, increasing energy independence by preserving fossil fuel reserves, stimulating the local economy and rural development in areas rich in forests and agricultural environments.

## 1. UVOD

Od razvoja tehničkih sustava proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije u 20. stoljeću, proizvodnja električne energije postala je neophodna za opstanak i razvitak čovječanstva. Od svakodnevnog korištenja u kućanstvima do upotrebe električne energije u industriji te njezinoj pretvorbi u druge korisne oblike energije. Električna energija proizvodi se iz sirovina ili izvora koji se u potpunosti ili djelomično obnavljaju u prirodi. Energetika je najbitniji gospodarski sektor u svijetu, koji teži sve većem iskorištenju oblika energije koji se u potpunosti obnavljaju u prirodi – obnovljivih izvora energije. Budući da raste utjecaj negativnih klimatskih promjena zbog onečišćenja okoliša i atmosfere uzrokovanim učinkom staklenika te globalnim porastom potražnje električne energije, potaknut je razvoj proizvodnje električne energije iz biomase kao prihvatljivija alternativa tekućim fosilnim gorivima. Danas je korištenje biomase kao izvora električne energije sve učestalije. Biomasa je obnovljivi izvor energije, nastao iz ostataka životinjskog ili biljnog porijekla. Biomasa se koristi kao gorivo za proizvodnju električne i toplinske energije, te je podijeljena na životinjski otpad, drvnu biomasu i nedrvnu biomasu. Termoelektrane na drvni otpad najučinkovitije su te imaju najmanji negativan utjecaj na okoliš. Spaljivanjem drvnih otpadaka oslobađa se ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ), kojeg biljke i bakterije ponovno koriste u procesu fotosinteze. Proces oslobađanja i trošenja ugljičnog dioksida naziva se prirodni kružni proces ugljičnog dioksida. Elektrane na drvnu biomasu u procesu proizvodnje koriste kogeneracijsko postrojenje na drvnu biomasu. Princip rada zasniva se na izgaranju drvne sječke, pomoću čega se stvara para koja pokretanjem turbine i generatora proizvodi električnu energiju. Ostatak pare može se koristiti za proizvodnju toplinske energije i dalju distribuciju.



## **2. ENERGIJA BIOMASE**

Biomasa je obnovljivi izvor energije, nastao iz ostataka biljnog i životinjskog porijekla. Može se podijeliti na:

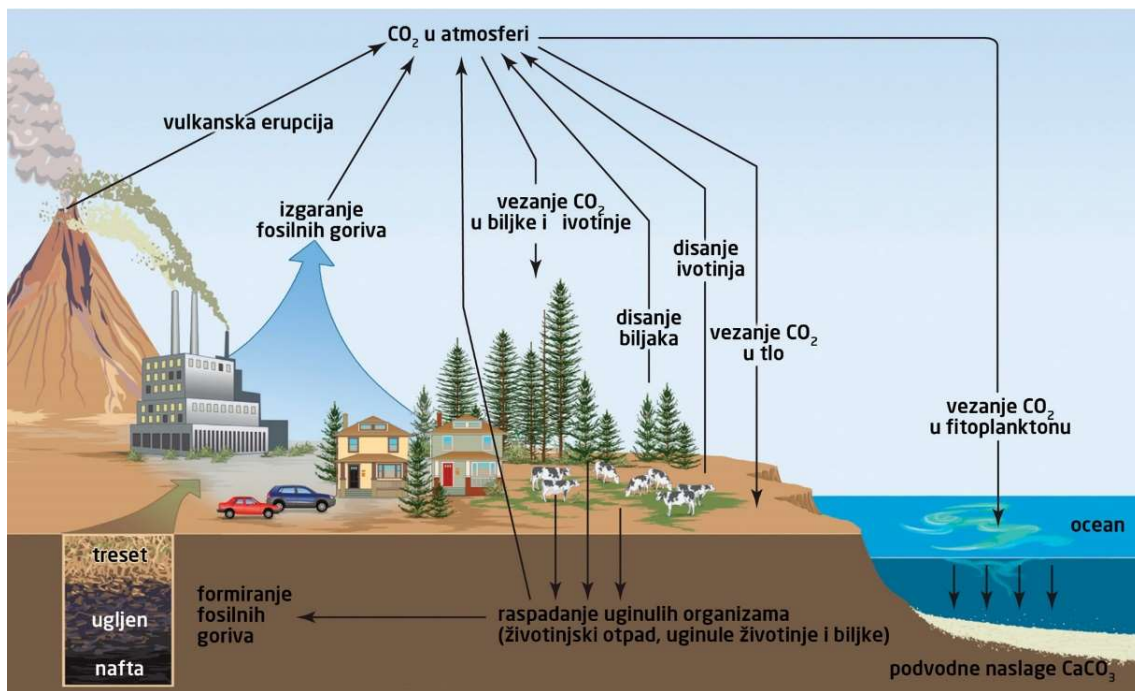
- ostatke biljaka (drveće, trava, alge),
- poljoprivredne i šumske ostatke,
- drvne piljevine i ogrjevno drvo,
- drvni otpad granja, kore i slame,
- ostatci drvne industrije,
- ostatci stabljika kukuruza, suncokreta, vinove loze i maslina,
- voća i povrća iz poljoprivrede,
- životinjski ostatci iz stočarstva i životinjski izmet.

Također, moguće je koristiti komunalni i industrijski otpad koji je prethodno potrebno pročistiti od neželjenih materijala. Prihvatljivost korištenja biootpada iz drvne mase temelji se na ugljikovom ciklusu biljaka i bakterija. Ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) iz atmosfere i vode za sintezu organskih spojeva. Prednosti i nedostaci energije biomase važni su za ekonomsku isplativost termoelektrana, ekološku osviještenost o potrebi smanjenja biootpada te za razvoj ruralnih područja. Korištenje biomase za pri proizvodnji energije pokazalo je više prednosti nego nedostataka.

### **2.1. Prednosti energije biomase**

Prednost biomase kao izvora za proizvodnju električne energije je što su sirovine produkti biljnog i životinjskog svijeta koji je u potpunosti obnovljiv, te se smatra neiscrpnim izvorom. Izgaranjem biomase nastaju znatno manje emisije  $\text{CO}_2$ , značajno je smanjeno ispuštanje čvrstih čestica, dušika i sumpora u atmosferu. Biomasa je dostupnija i jeftinija od ostalih sirovina za proizvodnju električne energije. Za izgradnju termoelektrane na biomasu potrebna je dobra prometna povezanost ili blizina velikih proizvođača bio otpada jer je ovaj oblik sirovina pogodan za transport. Doprinos ekonomskom rastu ruralnih područja je značajan jer otvara priliku za napredak poljoprivrednog sektora iskorištavanjem ostataka usjeva, čime smanjuje potrebu za zbrinjavanjem otpada.

Koristeći ostatke biljnog i životinjskog svijeta, stvara se zatvoreni krug ispuštanja i iskorištavanja ugljičnog dioksida (slika 2.1.). Većom upotrebom energije biomase smanjuje se ovisnost o fosilnim gorivima.



Slika 2.1. Kruženje ugljika u prirodi

Izvor: Encyclopaedia Britannica/UIG (pristupio 28.04.2023.)

## 2.2. Nedostaci energije biomase

Nedostatak biomase je potreba za velikim prostorom skladištenja sirovina. Proizvodnjom energije iz biomase, potreban je utrošak veće energije za proces, jer biomasa sadrži vlagu koju je potrebno isušiti prije spaljivanja.

Izgaranjem biomase dobije se:

- 8.2 do 20 MJ/kg iz drva,
- 5.8 do 17.7 MJ/kg iz biljnih ostataka,
- 37.2 MJ/kg iz biodizela,
- 26.8 MJ/kg iz etanola.

Iz jedne litre nafte dobije se 42 MJ energije. S toga, izgaranje biomase ima znatno manju energetska vrijednost te je potrebno više sirovina za postizanje ekvivalentne količine energije.

Ukoliko se ne vodi računa o pošumljavanju i obnavljanju biološkog svijeta nakon korištenja biomase kao izvora energije, može doći do nedostatka drveća i uništavanja prirodnih staništa, kao i zagađivanja okoliša ispuštanjem ugljičnog dioksida u atmosferu. Spaljivanje biomase mora se odvijati na temperaturama iznad 900°C čime se smanjuje emisija otrovnih plinova i pepela, što povećava cijenu samog procesa proizvodnje energije. [1]

### **2.3. Drvna biomasa**

Drvna biomasa smatra se ekonomski najpogodnijim izvorom za proizvodnju energije. Obuhvaća stabla s korijenjem, grmlje, umjetne i prirodne mješavine, te ostatke svih navedenih oblika. Drvna biomasa koja se koristi za proizvodnju električne i toplinske energije nastaje iz ostataka od sječe, ostataka nastalih preradom drva u drvnoj industriji i građevinarstvu, piljevine kao i drvnog otpada nastalog prilikom čišćenja parkova, zelenih površina, te voćnjaka i vinograda.[2]

Može se izravno pretvarati u energiju izgaranjem, proizvodnjom vodene pare za grijanje u kućanstvu ili industriji, ili proizvodnjom električne energije.

Osnovne značajke pri primjeni drvene biomase su:

- ogrjevnost (energetska vrijednost),
- fizikalno svojstvo koje utječe na ogrjevnost,
- kemijski sastav,
- temperatura samozapaljenja,
- temperatura izgaranja.

Drvnu biomasu možemo podijeliti na tri osnovna oblika:

- drvene sječke,
- peleti,
- briketi.

Drvna sječka (slika 2.2.) nastaje usitnjavanjem drvnih ostataka. Različitih je veličina i oblika. Prednost drvene sječke je što stanje, kvaliteta i oblik nemaju utjecaj na daljnje korištenje.

Drvena biomasa ima sljedeće karakteristike:

- velika efikasnost,
- dostupnost,
- jeftiniji proces proizvodnje.

Drvena sječka ima širu primjenu u odnosu na pelet i briket poput:

- proizvodnje papira,
- industrijsko i kućansko grijanja,
- direktne proizvodnje toplinske i električne energije (kogeneracija).



Slika 2.2. Drvena sječka

Izvor: <https://hamar-promet.hr/index.php/hr/o-biomasi-i-sjecki> (pristupio: 01.05.2023.)

Pelet (slika 2.3.) je drvena masa nastala prešanjem drvene piljevine pod velikim tlakom. Prednosti peleta su niska vlažnost (ispod 8%) i visoka energetska vrijednost izgaranja. U usporedbi sa ostalim energentima, čija se proizvodnja energije zasniva na izgaranju, cijena peleta je najniža i ne ovisi o cijeni plina i nafte. Koristi se za proizvodnju toplinske energije u automatiziranim sustavima grijanja. Postotak pepela nakon sagorijevanja manji je od 0.5%. Kilogram peleta može proizvesti približno 5 kWh toplinske energije. Količina dobivene energije iz 2 kg peleta ekvivalentna je jednoj litri loživog ulja. [3]



Slika 2.3. Pelet

Izvor: <https://www.petrol.hr/poslovna-rjesenja/energenti/energenti-od-biomase> (pristupio: 01.05.2023.)

Briket (slika 2.4.) je obrađena drvena biomasa nastala prešanjem sitnih drvnih ostataka, bez dodatnih materijala i vezivnih sredstava. Cilindričnog je oblika i u usporedbi s drvnom sječkom i peletom većih je dimenzija. Najčešća upotreba je ručno loženje s ciljem proizvodnje toplinske energije. U usporedbi sa peletom, udio vlage je veći, te iznosi do 18%, što i dalje daje dobru energetska učinkovitost pri izgaranju. Kao i kod peleta, kilogram briketa može proizvesti približno 5 kWh toplinske energije, dok je količina energije izgaranjem 2 kg briketa ekvivalentna jednoj litri loživog ulja. [3]



Slika 2.4. Briket

Izvor: <https://www.parketi-ratkovic.hr/product/drveni-briket/> (pristupio: 04.05.2023.)



### 3. TERMOELEKTRANE NA DRVNU BIOMASU

Termoelektrane (slika 3.1.) su postrojenja za proizvodnju toplinske i električne energije transformacijom kemijske energije u toplinsku, a zatim u električnu. Prema načinu pogona, dijele se na turbinske termoelektrane (plinska, parna i plinsko – parna) i termoelektrane s motorima s unutrašnjim izgaranjem (plinski, benzinski i Diesel motor). U plinskim termoelektranama, komprimirani zrak se dovodi u komore u kojima izgara gorivo. Smjesa nastalih plinova i zraka nakon izgaranja pogoni plinsku turbinu koja okreće kompresor i generator. Princip rada parne termoelektrane temelji se na izgaranju sirovine te stvaranju topline koja zatim zagrijava kotao s vodom iz koje nastaje para. Parom se pokreće turbina i generator gdje se mehanička energija pretvara u električnu. Kombinirane plinsko – parne termoelektrane imaju veći stupanj djelovanja. Takvim elektranama u generator pare parno-turbinskog postrojenja dolazi toplina plinova iz plinske turbine. U ovom procesu koriste se ložišta pod tlakom u kojima je ugrađen generator pare, gdje se voda zagrijava otpadnom toplinom iz plinske turbine. Najčešće se upotrebljavaju plinovita i tekuća goriva. Ukoliko se koriste goriva s velikom količinom otpadnih tvari, prije izgaranja moraju se rasplinjavati i čistiti u posebnim postrojenjima. Termoelektrane s kombiniranim procesom smatraju se ekološki prihvatljivijima jer zahtijevaju čisto gorivo. [4]



Slika 3.1. Termoelektrana

Izvor: <https://publishwall.si/nap.ba/qpost/248524> (pristupio: 10.05.2023.)

### 3.1. Glavni dijelovi termoelektrane

Termoelektrana dijeli se na nekoliko značajnijih dijelova:

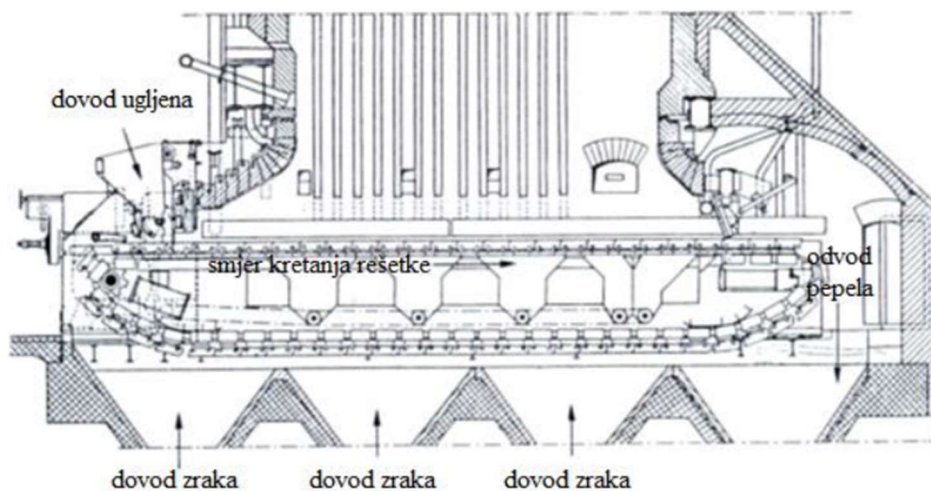
- ložište za čvrsta goriva,
- voda za parne kotlove,
- kondenzator parne turbine,
- generator pare,
- parna turbina.

#### 3.1.1. Ložište za čvrsta goriva

Dvije su tehnologije izgaranja čvrstih goriva u ložištu:

- gorivo raspršeno u prostoru (ugljena prašina),
- izgaranje u sloju na rešetki (slika 3.2.).

Izgaranje čvrstih goriva u ložištu raspršeno u prostoru novija je tehnologija, koja ima veću efikasnost. Kod ove tehnologije udio vlažnosti goriva je zanemariv te odabir goriva za izgaranje može biti lošije kvalitete. Cijena ovakvih postrojenja je veća od elektrana na izgaranje goriva na rešetki.



Slika 3.2. Lančana rešetka

Izvor: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1652/datastream/PDF/view>  
(pristupio: 20.05.2023.)

Izgaranje čvrstog goriva na rešetki starija je tehnologija koja zahtjeva pripremu biomase za izgaranje. Ova tehnologija pretežno se koristi kod manjih elektrana na kruta goriva. Kontrola i regulacija ostvaruje se uz pomoć zraka koji se upuhuje kroz rešetke za učinkovitije izgaranje biomase.

### 3.1.2. Voda za parne kotlove

Prirodna voda ne upotrebljava se u parnom kotlu zbog nečistoća. Prije puštanja vode u kotao potrebno je izvršiti kemijsku pripremu vode. Kemijska priprema vode (slika 3.3.) izvršava se dodavanjem soli, antiscalanta, natrijeva bisulfita i lužine, kojima se podiže pH vrijednost vode. Isparavanjem vode povećava se koncentracija otopljenih tvari u vodi, što dovodi do njihova izlučivanja u obliku taloga na stijenkama cijevi. Kemijska priprema vode služi za sprječavanje pregrijavanja i oštećenja uzrokovanim talogom koji ima znatno manju toplinsku vodljivost od metala. Demineralizacijom vode, uklanjanjem kisika i ugljikovog dioksida i povećanjem pH vrijednosti sprječava se nastajanje korozije u kotlu i turbini.



Slika 3.3. Dio postrojenja za kemijsku pripremu vode

Izvor: Osobni foto album

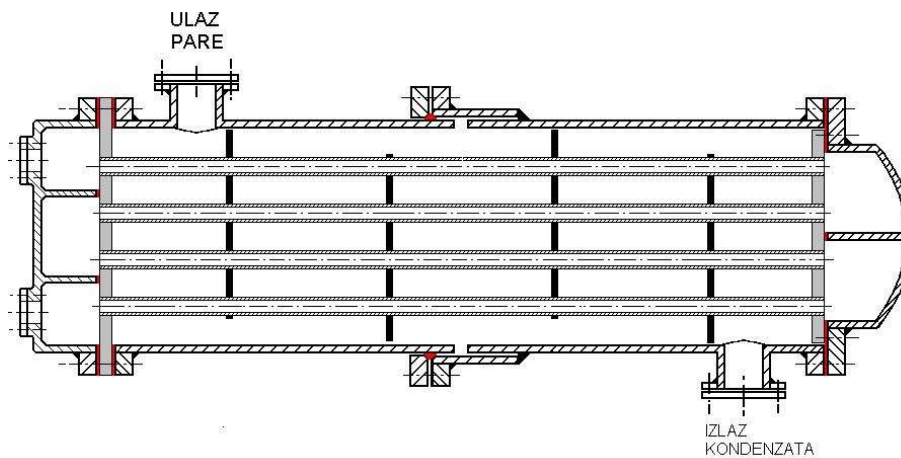


Svojstva koja mora zadovoljiti napojna voda:

- kemijska neutralnost,
- antikorozivnost,
- ograničena tvrdoća,
- električna vodljivost do 0,05 S/cm,
- bistroća,
- bezbojnost.

### 3.1.3. Kondenzator parne turbine

Kondenzator parne turbine (slika 3.4.) je izmjenjivač topline. Uloga kondenzatora je vraćanje pare u tekuću vodu. Hlađenjem, para kondenzira te se pretvara u tekućinu. Tlak unutar kondenzatora na kojem se taj proces odvija je nizak. Pri rashlađivanju dovedene pare, kondenzator mora koristiti tekućinu kojoj će se toplina pare predati. U kogeneracijskim postrojenjima ta toplina koristi se kao toplinska energija za grijanje.



Slika 3.4. Kondenzator parne turbine

Izvor: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1652/datastream/PDF/view> (pristupio: 20.05.2023.)

Kondenzator se dijeli na dvije izvedbe:

- površinski kondenzator,
- kondenzator miješanja.

#### 3.1.4. Površinski kondenzator

Površinski kondenzator ima oblik spremnika s velikom površinom za hlađenje i kondenziranje pare. Ispušna para, nakon prolaska kroz turbinu, dolazi do površinskog kondenzatora u kojemu se iz iste izvlači toplinska energija. Smanjenjem količine toplinske energije ispušne pare, ona kondenzacijom prelazi u tekuće stanje. Unutar površinskog kondenzatora nalazi se sustav cijevi kroz koji prolazi rashladni medij (hladna voda). Para ulazi u kondenzator i kruži oko cijevi kroz koje prolazi hladna voda, gdje hladna voda preuzima toplinu zbog čega nastaje kondenzacija. Kondenzirana tekućina se skuplja na dnu kondenzatora i odvodi natrag u sustav za ponovno zagrijavanje, kako bi se ponovno pretvorila u paru i koristila za pokretanje parne turbine. Površinski kondenzatori su učinkoviti jer omogućuju ponovno korištenje pare koja bi inače ostala neiskorištena.

#### 3.1.5. Kondenzator miješanja

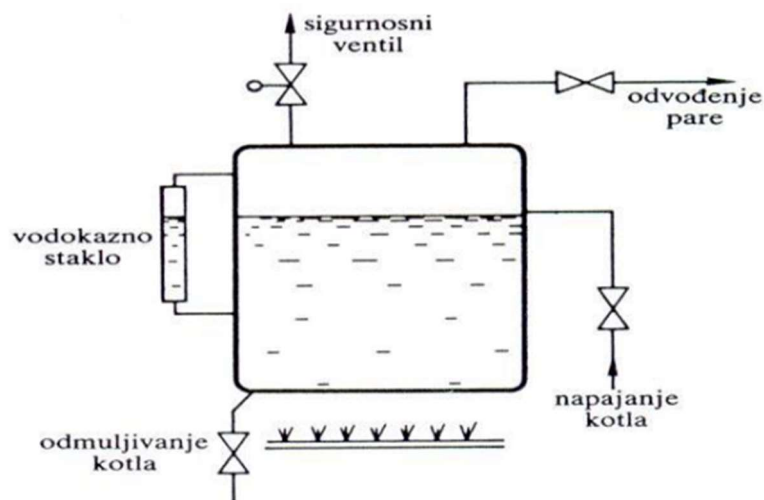
Kondenzator miješanja u parnim turbinama koristi se zbog poboljšanja efikasnosti i karakteristika sustava. Koristi se u kombinaciji s površinskim kondenzatorom kako bi se povećala kondenzacija pare. Para prilikom izlaska iz turbine ima visoku temperaturu i tlak te nije pogodna za izravno odvođenje u površinski kondenzator nego se usmjerava prema kondenzatoru miješanja. U kondenzatoru miješanja, para dolazi u kontakt s rashladnim medijem (hladna voda). Miješanjem pare i hladne vode dolazi do kondenzacije pare. Mješavina pare i vode koja se formira u kondenzatoru miješanja odlazi u površinski kondenzator, ali sa nižom temperaturom i pritiskom nego izlazna para iz turbine, što olakšava kondenzaciju u površinskom kondenzatoru.

Prednosti korištenja kondenzatora miješanja su:

- povećanje efikasnosti – kombinacijom pare i hladne vode u kondenzatoru miješanja, nastaje veća kondenzacija pare u površinskom kondenzatoru,
- smanjenje opterećenja površinskog kondenzatora,
- smanjenje korozije – miješanjem vode i pare u kondenzatoru miješanja, voda djeluje kao prirodni inhibitor korozije.

### 3.1.6. Generator pare

Generator pare (parni kotao) dio je energetske i toplinske postrojenja za proizvodnju vodene pare određenog tlaka i temperature (slika 3.5.). Ključna je komponenta koja vrši energetske pretvorbu topline u mehanički rad. Osnovna funkcija generatora pare je generiranje pare visokog tlaka i temperature koja zatim pokreće parnu turbinu povezanu s generatorom električne energije.



Slika 3.5. Parni kotao

Izvor: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1652/datastream/PDF/view>  
(pristupio: 20.05.2023)

Postupak generiranja pare u generatoru pare:

- kotao – izgaranjem goriva u kotlu oslobađa se visoka temperatura prenesena na vodu koja cirkulira kroz cijevi unutar kotla,
- prijenos topline – voda preuzima toplinu iz goriva procesom prijenosa topline te prolazi kroz cijevi kotla gdje apsorbira toplinu iz plamenika i dimnih plinova,
- pretvorba vode u paru – voda se zagrijava do temperature gdje prelazi iz tekućeg u plinovito stanje.
- parna turbina – para visoke temperature i tlaka ulazi u parnu turbinu pri velikoj brzini i pokreće rotirajuće lopatice. Rotacijom lopatica kinetička energija prelazi u mehaničku.
- generator električne energije – rotacijom lopatica turbine pokreće se generator koji pretvara mehaničku energiju u električnu.

Glavni parametri parnog kotla:

- temperatura pregrijane pare ( $^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{K}$ ),
- tlak parnog kotla ( $\text{Pa}$ ,  $\text{bar}$ ),
- kapacitet parnog kotla ( $\text{kg/s}$ ,  $\text{kg/h}$ ),
- korisnost parnog kotla  $\eta_{\text{gp}}$ .

Dijelovi i oprema parnog kotla su:

- ogrjevne površine generatora pare,
- tlačni dijelovi generatora pare,
- ložište, priključci za cijevi i ventili,
- vatrostalni ozid i toplinska izolacija,
- nosiva čelična konstrukcija. [5]

### 3.1.7. Parna turbina

Parna turbina (slika 3.6.) je stroj koji pretvara entalpiju pare u mehanički rad. Entalpija pare se ekspanzijom pretvara u kinetičku energiju mlaza pare, nakon čega se kinetička energija lopatica rotora pretvara u mehaničku energiju. Parna turbina služi za pogon generatora električne energije, pogon kompresora i slično.

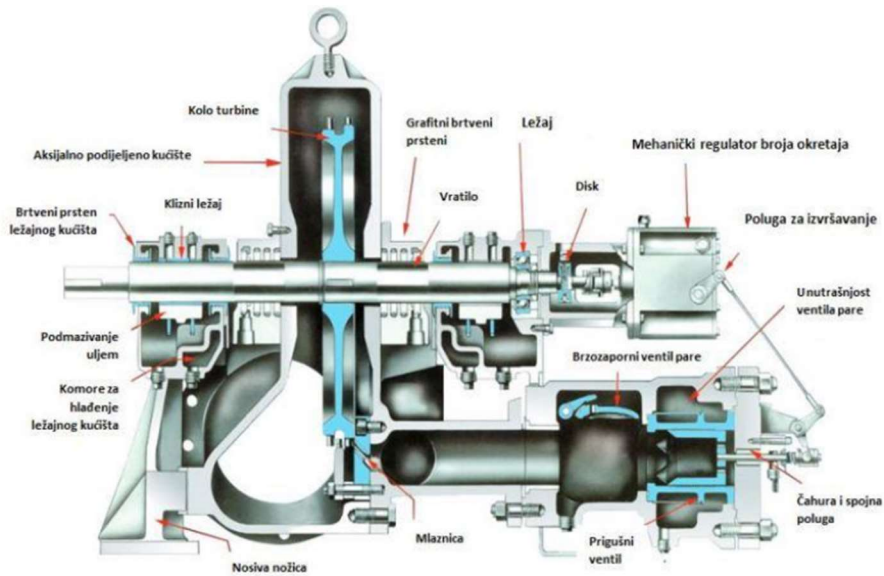
Podjela parnih turbina po korisnosti:

- jednostupanjske turbine,
- višestupanjske turbine.

Jednostupanjske i višestupanjske turbine razlikuju se po broju lopatica i mlaznica. Jednostupanjska turbina sastoji se od jednog reda lopatica i mlaznica, a višestupanjska turbina sastoji se od više redova lopatica i mlaznica.

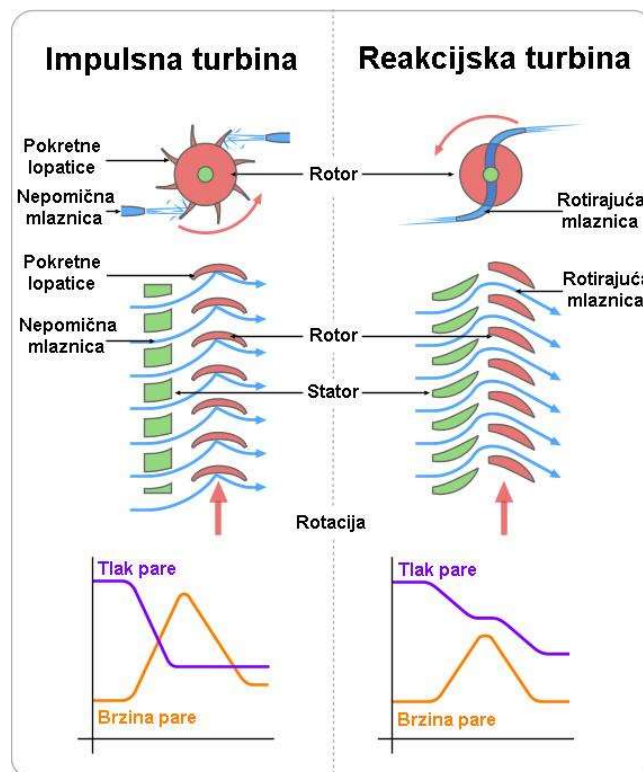
Podjela parnih turbina prema načinu ekspanzije pare:

- akcijske (impulsne) turbine (slika 3.7.),
- reakcijske turbine (slika 3.7.).



Slika 3.6. Parna turbina

Izvor: <https://strojarskaradionica.wordpress.com/2018/09/21/dijelovi-parne-turbine-za-laike/> (pristupio: 21.05.2023.)



Slika 3.7. Akcijska (impulsna) i reakcijska turbina

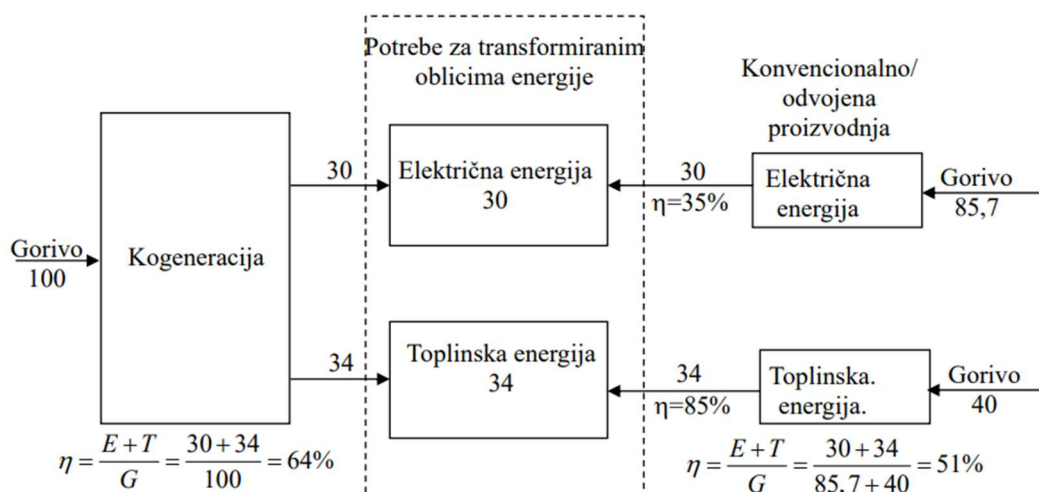
Izvor: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1652/datastream/PDF/view> (pristupio: 22.05.2023.)

U akcijskim turbinama, mlazovima pare usmjerenim na lopatice postiže se zakretni moment. Kod akcijske turbine pad tlaka i pad entalpije pretvara se u brzinu pare u kućištu turbine, tj. na statoru. Sva pretvorba energije događa se na statorskim lopaticama, dok rotorske lopatice služe samo za skretanje struje bez promjene kinetičke energije struje.

Kod reakcijskih turbina, na statorskim lopaticama toplina se djelomično pretvara u kinetičku energiju. Ovaj tip turbine postiže zakretni moment postupnim smanjivanjem tlaka od ulaza prema izlazu pare. Ostali dio pretvorbe energije odvija se na rotorskim lopaticama. Povećanjem brzine pare u reakcijskom turbini izvodi se smanjenjem presjeka kanala između lopatica u smjeru strujanja pare. [6]

### 3.2. Kogeneracija

Kogeneracija je istovremena proizvodnja električne i toplinske energije. Kogeneracija se temelji na povišenju učinkovitosti proizvodnje električne i toplinske energije. Glavni zadatak kogeneracijskog postrojenja (slika 3.9.) je proizvodnja toplinske energije, nakon čega slijedi proizvodnja električne energije. Uspoređujući financijske aspekte, električna energija lakše se prenosi na veće udaljenosti, što znači da je isplativija od toplinske energije.



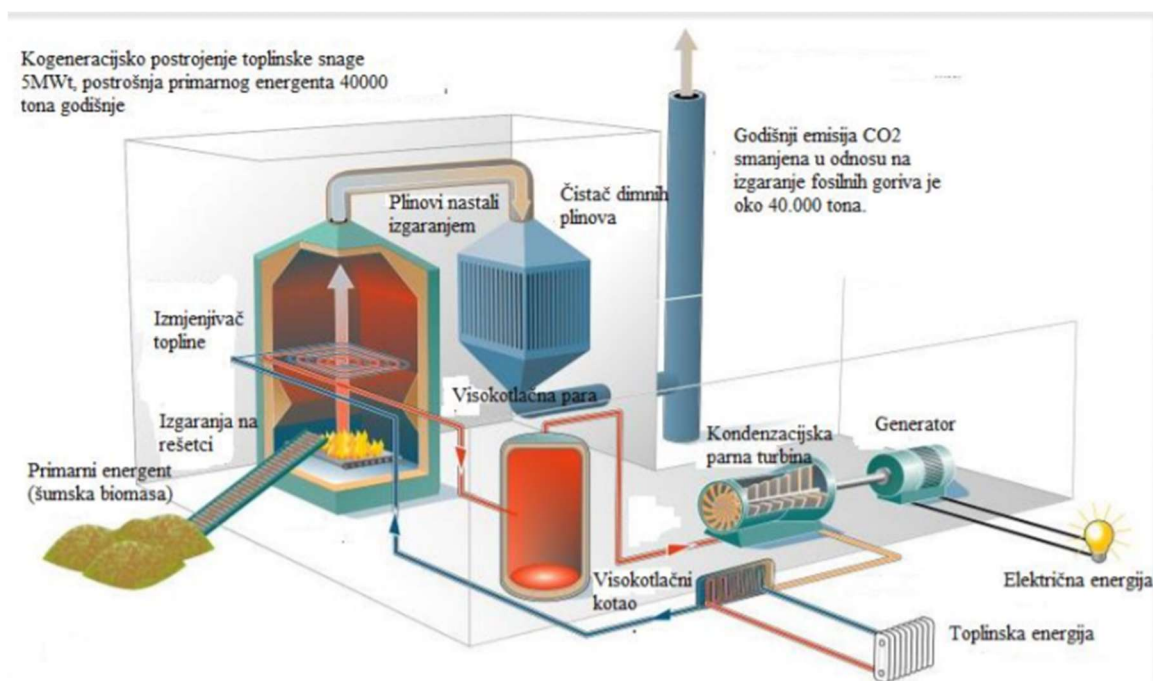
Slika 3.8. Usporedba proizvodnje električne i toplinske energije kogeneracijom i u odvojenim procesima

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_pred\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema_pred_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 02.06.2023.)

U kogeneracijskim postrojenjima, električna energija je sekundarni produkt samo iz razloga dobivanja iste uz pomoć toplinske energije. Toplinsku energiju potrebno pretvoriti u mehanički rad, kako bi se proizvela električna energija na generatoru.

Prema slici 3.8., u odvojenim procesima, vidljivo je da se od 87,5 jedinica goriva, uz iskoristivost od 35%, može dobiti 30 jedinica električne energije. Također, vidljivo je kako se od 40 jedinica goriva, uz iskoristivost od 85%, može dobiti 34 jedinice toplinske energije. Uspoređujući odvojeni proces i kogeneraciju, vidljivo je kako je za istu količinu proizvedene toplinske i električne energije, kod kogeneracije potrebna znatno manja količina goriva (odvojeni proces = 125,7 jedinica goriva, kogeneracija = 100 jedinica goriva). Stavljanjem navedenih vrijednosti u izraz za iskorištenje;  $\eta = \frac{E+T}{G}$ , gdje su E – električna energija, T – toplinska energija i G – gorivo, dobije se iskorištenje od 64% kod kogeneracije i 51% kod odvojenih procesa.

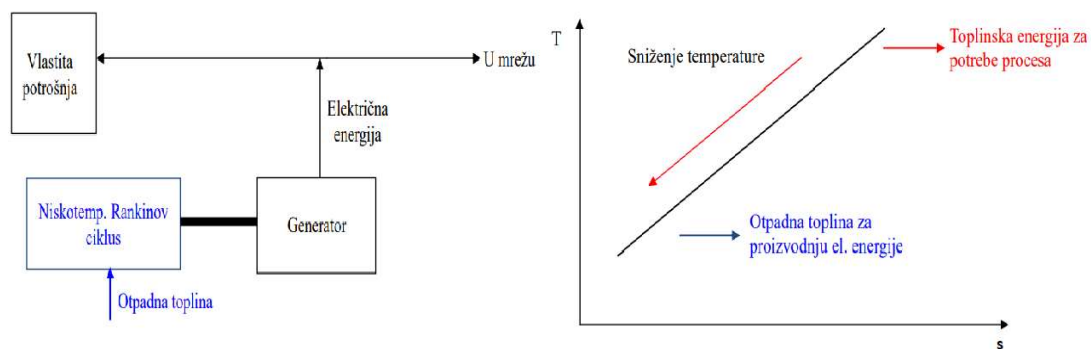


Slika 3.9. Kogeneracijsko postrojenje

Izvor: <https://repozitorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A566/datastream/PDF/view> (pristupio: 02.06.2023.)

### 3.2.1. Kogeneracijsko postrojenje „Bottom cycle“

„Bottom cycle“ kogeneracijsko postrojenje (slika 3.10.) radi na principu iskorištavanja otpadne topline relativno niske temperature. Izgaranjem biomase, proizvedena geotermalna energija, maseni tokovi industrijskog procesa i drugi izvori otpadne topline mogu biti izvori energije. Ova vrsta kogeneracije koristi se kada toplinski izvor nema dovoljno visoku temperaturu iskorištenja. Ovaj proces iskorištavanja otpadne topline zahtijeva odgovarajuću radnu tvar (izobutan, izopentan, izoheksan) u kružnom procesu koji je sličnih karakteristika kao voda ali znatno nižih temperatura, kako bi se iskoristila toplinska energija nižeg potencijala. Radna tvar djeluje u organskom Rankinovom ciklusu mehaničkog rada i električne energije prikazano na slici 3.11.



Slika 3.10. "Bottom cycle" kogeneracijsko postrojenje

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_\\_pred\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema__pred_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 02.06.2023.)

### 3.2.2. Kogeneracijsko postrojenje – „Topping cycle“

Kod „Topping cycle“ kogeneracijskog postrojenja (slika 3.11.), jedan od glavnih dijelova je primarni pokretač. Primarni pokretač je toplinski stroj koji je izvor mehaničkog rada za pokretanje električnog generatora, kao i izvor toplinske energije. Postoje tri oblika primarnog pokretača, a to su: parna turbina, plinska turbina i motor s unutarnjim izgaranjem. Protutlačna parna turbina ili parna turbina s reguliranim oduzimanjem kao primarni pokretač je izvor toplinske energije i mehaničkog rada. Plinska turbina kao primarni pokretač je izvor mehaničkog rada, a za proizvodnju vodene pare u generatoru pare koristi se otpadna toplina iz vrućih dimnih plinova.

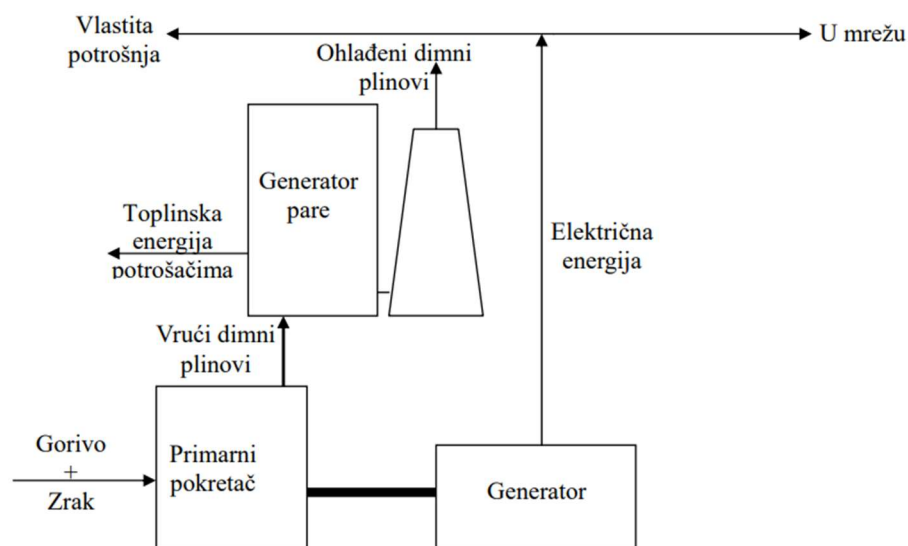


Motor s unutarnjim izgaranjem (Otto ili Diesel) istovremeno je izvor mehaničkog rada i otpadne topline. Otpadna toplina je toplinska energija nekog materijalnog toka iz industrijskog procesa ili procesa pretvorbe energije. Predajom energije u proces, toplinska energija iz procesa izlazi s višom ili nižom temperaturom. U otpadnim toplinama često leži veliki potencijal za uštedu energije. Ova vrsta kogeneracijskog postrojenja koristi se kada otpadna toplina ima dovoljno energije za pretvorbu u koristan oblik.

Proizvedena električna energija iz ovog procesa koristi se u dvije svrhe:

- za isporuku električne energije u mrežu,
- za pokrivanje vlastite potrošnje.

Ukoliko je kogeneracijsko postrojenje zasebni termoenergetski objekt, njegova svrha je proizvodnja električne i/ili toplinske energije za isporuku električnoj mreži. Kogeneracijsko postrojenje u sklopu industrijskog pogona prvo pokriva vlastitu potrošnju električne i/ili toplinske energije, te nakon toga ostatak proizvedene energije šalje u mrežu. U „topping cycle“ kogeneraciji prvo se proizvodi mehanički rad za pokretanje elektrogeneratora, nakon čega se preostala toplinska energija predaje potrošačima. Radni medij grije se na više parametre kako bi se povećala entalpija i tako povećala sposobnost dobivanja rada ekspanzijom radnog medija. Nakon toga se toplinska energija medija, koja je bitno nižeg potencijala, koristi kao izvor topline za potrošače kojima se isporučuje.



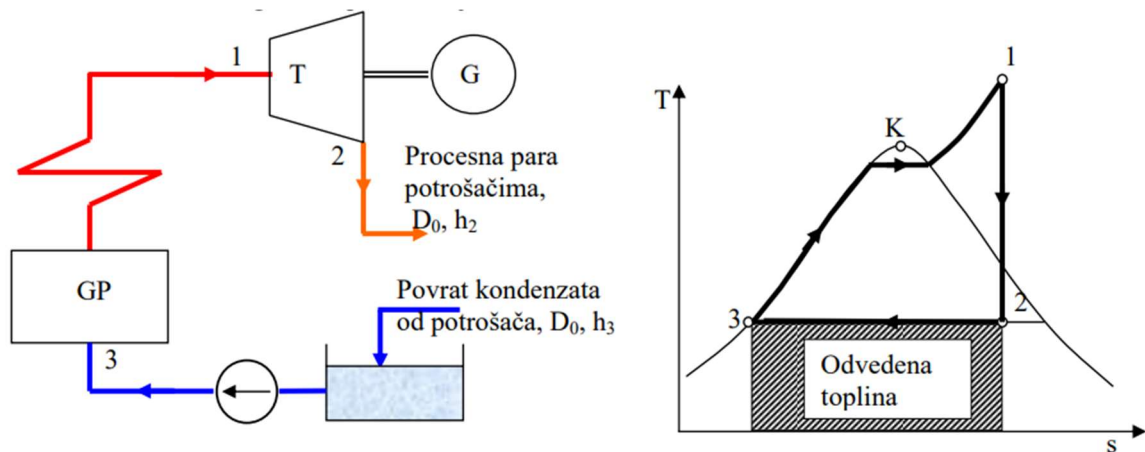
Slika 3.11. "Topping cycle" kogeneracijsko postrojenje

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_\\_pred\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema__pred_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 02.06.2023.)

### 3.2.3. „Topping cycle“ s protutlačnom turbinom

Proizvodnja električne i toplinske energije pomoću „topping cycle“ kogeneracijskog postrojenja s protutlačnom turbinom (Slika 3.12.) gdje se para proizvodi u generatoru pare (GP) do stanja pregrijanosti (1). Nakon toga pregrijana para ekspanzira u turbini (T), koja pokreće generator (G) čime se proizvodi električna energija. Nakon ekspanzije u turbini (2) sva para odvodi se do potrošača toplinske energije od kojega se vraća vreli kondenzat (3). Ova izvedba osmišljena je za potrošače koji imaju konstantnu i nepromjenjivu potrošnju.



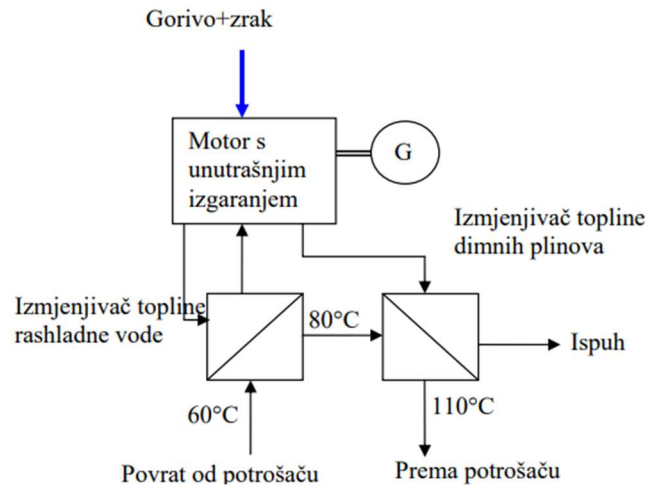
Slika 3.12. Shema protutlačne turbine s prikazom u T-s dijagramu

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_pre\\_d\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema_pre_d_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 02.06.2023.)

### 3.2.4. „Topping cycle“ s motorom s unutarnjim izgaranjem

Motor s unutarnjim izgaranjem može biti Otto ili Diesel i po snazi i parametrima nije usporediv s plinskim i parnim turbinama. Za pokretanje generatora i proizvodnju električne energije koristi se motor koji proizvodi mehanički rad. Dimni plinovi i rashladno sredstvo (rashladna tekućina ili voda) za održavanje radne temperature motora izvori su otpadnih toplina u motoru s unutarnjim izgaranjem. Rashladna voda koja se vrati od potrošača se u lijevo prikazanom izmjenjivaču topline (Slika 3.13.) pregrijava sa 60°C na 80°C, nakon čega odlazi u desni izmjenjivač topline i vrućim dimnim plinovima dodatno se pregrijava na 110°C, gdje se na kraju vraća potrošaču toplinske energije.



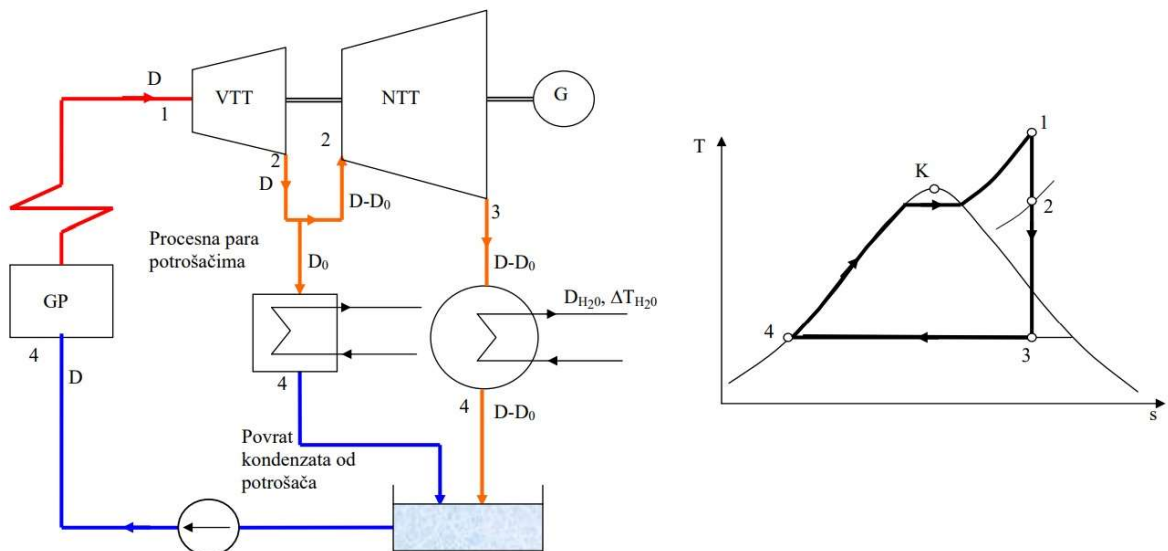
Slika 3.13. Kogeneracijsko postrojenje s motorom s unutarnjim izgaranjem

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_pred\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema_pred_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 02.06.2023.)

### 3.2.5. „Topping cycle“ s turbinom s reguliranim oduzimanjem pare

Turbina s reguliranim oduzimanjem (slika 3.14.) predstavlja fleksibilniju varijantu istovremene proizvodnje električne i toplinske energije.



Slika 3.14. Shema turbine s reguliranim oduzimanjem s prikazom u T-s dijagramu

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_pred\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema_pred_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 02.06.2023.)

Pregrijana para stanja 1, proizvedena u generatoru pare (GP) ekspandira u visokotlačnoj turbini (VTT) do točke 2, gdje se dio pare ( $D_0$ ) odvodi potrošačima, a ostatak pare ( $D - D_0$ ) nastavlja ekspandirati u niskotlačnoj turbini (NTT) do stanja 3 (kondenzatorskog tlaka). Visokotlačna i niskotlačna turbina povezane su istim vratilom s generatorom. Vreli kondenzat (4) nastaje kondenzacijom pare prilikom hlađenja kondenzatora rashladnom vodom. Vreli kondenzat nastao vraćanjem pare od potrošača skuplja se u spremniku odakle se kao pojna voda pumpom vraća u novi ciklus. Ovo postrojenje je fleksibilno jer se promjena količine oduzete pare kompenzira promjenom proizvedenog mehaničkog rada, tj. električne energije. To ne zahtijeva promjenu režima rada generatora pare (kotla), kao kod protutlačnog režima rada.

### 3.3. Izračuni iskorištenja i efikasnosti kogeneracije

Promatranjem slike 3.14., uz pretpostavke da je pretvorba mehaničke energije u električnu bez gubitaka, izvedeni su slijedeći izrazi:

Mehanička, odnosno električna snaga sastoji se od dva člana snage dobivene u visokotlačnoj turbini (VTT), odnosno niskotlačnoj turbini (NTT):

$$N_e = N_{VTT} + N_{NTT} = \frac{D * (h_1 - h_2) + (D - D_0) * (h_2 - h_3)}{3600} [kW_e] \quad (3.1.)$$

gdje je:

$D, D_0 \left[ \frac{kg}{k} \right]$  – količina proizvedene (oduzete) pare,

$h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$  – entalpija pare u odgovarajućoj točki prema T – s dijagrama na slici (turbina s reguliranim oduzimanjem pare).

Toplina odvedena u kondenzator (toplinska bilanca kondenzatora):

$$Q_c = (D - D_0) * (h_3 - h_4) = D_{H_2O} * c_{pH_2O} * \Delta T_{H_2O} \left[ \frac{kJ}{h} \right] \quad (3.2.)$$

gdje je:

$D_{H_2O} \left[ \frac{kg}{h} \right]$  – količina rashladne vode,

$c_{pH_2O} \left[ \frac{kJ}{kgK} \right]$  – specifična toplina vode,

$\Delta T_{H_2O} [K]$  – razlika temperatura za koju se zagrije rashladna voda.

Toplinska bilanca generatora pare (kotla) je:

$$Q_K = D * (h_1 - h_4) = D_G * H_d * \eta_K \left[ \frac{kJ}{h} \right] \quad (3.3)$$

gdje je:

$D_G \left[ \frac{kg}{h} \right], V_{pl} \left[ \frac{m^3}{h} \right]$  - satna potrošnja krutog, tekućeg ili plinovitog goriva,

$H_d \left[ \frac{kJ}{kg} \right], \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$  - donja toplinska vrijednost krutog, tekućeg ili plinovitog goriva.

Termodinamički stupanj iskorištenja:

$$\eta_t = \frac{N_e * 3600}{Q_K} \quad (3.4)$$

Toplina odvedena potrošačima:

$$Q_0 = D_0 * (h_2 - h_4) \left[ \frac{kJ}{h} \right] \quad (3.5)$$

Toplinski faktor iskorištenja:

$$f = \frac{N_e * 3600 + Q_0}{Q_K} = \frac{N_e * 3600 + Q_0}{D_G * H_d * \eta_K} \quad (3.6)$$

Ukoliko su poznati toplinski padovi, iz izraza ( $N_e$ ) može se dobiti električna snaga, koja se mijenja s promjenom količine oduzete pare kada je  $D_0 = \text{konst.}$

Postoje dva slučaja:

- $D_0 = 0$  – kondenzacijski režim bez oduzimanja pare i isporuke toplinske energije potrošačima, sva para koristi se za proizvodnju mehaničkog rada, tj. za proizvodnju električne energije,
- $D = D_0$  – protutlačni režim, sva para se oduzima u točki 2 (slika turbina s reguliranim oduzimanjem pare) i odvodi potrošačima.

Ovo postrojenje radi između dva režima rada.

Uz  $D = \text{konst.}$  i konstantne vrijednosti entalpija gore navedeni izrazi mogu se prikazati kao  $f(D_0)$ .

$$N_e = N_e(D_0)$$

$$N_e = \frac{-D_0 * (h_2 - h_3)}{3600} + \frac{D * (h_1 - h_3)}{3600} = a_1 * D_0 + b_1, a_1 < 0, \quad (3.7.)$$

Iz izvedenog izraza proizlazi oblik padajućeg pravca, tj. povećanjem količine oduzete pare smanjuje se proizvodnja električne, a povećava proizvodnja toplinske snage. Uvrštavanjem dobivenog izraza u izraz  $\eta_t$  dobije se padajući pravac za ovisnost termodinamičkog faktora iskorištenja o količini oduzete pare  $\eta_t = \eta_t(D_0)$ :

$$\eta_t = \frac{-D_0 * (h_2 - h_3)}{Q_K} + \frac{D * (h_1 - h_3)}{Q_K} = a_2 * D_0 + b_2, a_2 < 0 \quad (3.8.)$$

Nastali izraz i izraz  $Q_0$  uvrštava se u izraz  $f$  čime se dobije ovisnost toplinskog stupnja iskorištenja o količini oduzete pare  $f = f(D_0)$ :

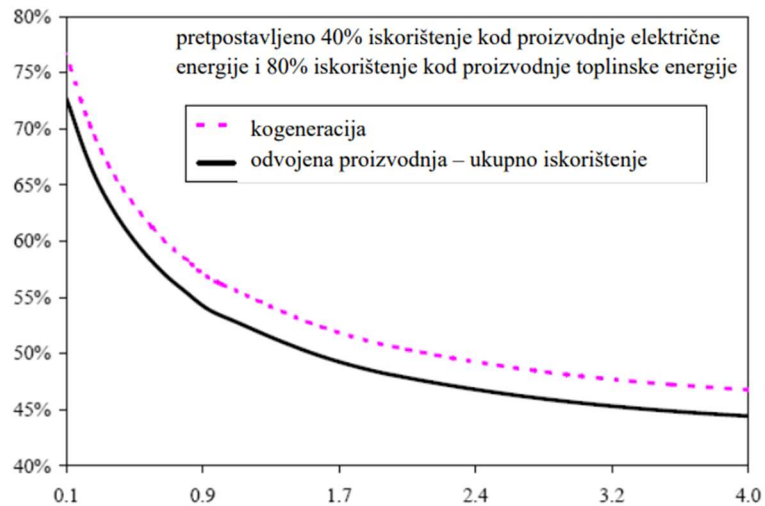
$$f = \eta_t + \frac{Q_0}{Q_K} = \frac{D_0 * (h_3 - h_4)}{Q_K} + \frac{D * (h_1 - h_3)}{Q_K} = a_3 * D_0 + b_3, a_3 > 0 \quad (3.9.)$$

Sada koeficijent pravca postaje pozitivan ( $a_3 > 0$ ) pa ova ovisnost poprima trend rastućeg pravca.

Električna snaga i termodinamički stupanj iskorištenja opadaju povećanjem količine oduzete pare, a toplinska snaga oduzete pare i toplinski faktor iskorištenja rastu. Porastom veličine  $f$  raste i ekonomičnost postrojenja. Za točniju procjenu efikasnosti i ekonomičnosti postrojenja potreban je izračun omjera proizvedene toplinske i električne energije, što se dobije uvođenjem vremena u razmatranje. Uvođenjem vremena u razmatranje dobije se iznos proizvedene energije predane potrošačima. [7]

### 3.3.1. Omjer proizvedene električne i toplinske energije

Za procjenu efikasnosti kogeneracijskog postrojenja računa se omjer proizvedene toplinske i električne energije [kJ, kWh] (slika 3.15.). Kao određeno razdoblje uzima se razdoblje rada kogeneracijskog postrojenja, tj. proizvodnje električne (E) i toplinske (T) energije. Omjer električne i toplinske energije označava se  $\frac{E}{T}$  i u njega se uvrštavaju stvarne vrijednosti energije.



Slika 3.15. Usporedba iskorištenja proizvodnje električne i toplinske energije

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_\\_pred\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema__pred_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 03.06.2023.)

Ukupan zbroj proizvedene energije (električne i toplinske) izražene u postotku:

$$U = E + T = 100\% \quad (3.10.)$$

Omjer proizvedene električne i toplinske energije može se izjednačiti sa:

$$\frac{E}{T} = \frac{E}{U - E} = \frac{E}{100 - E} \quad (3.11.)$$

Iz prethodnog omjera može se dobiti postotak proizvedene električne energije:

$$E = \frac{\frac{E}{T} * 100\%}{1 + \frac{E}{T}} \quad (3.12)$$

Padom omjera proizvedene električne i toplinske energije pada i ukupno iskorištenje kogeneracije, gdje se dolazi do zaključka da je kogeneracija isplativa samo pri manjim omjerima  $\frac{E}{T}$ .

### 3.3.2. Dijagrami opterećenja

Za učinkovitost i ekonomsku efikasnost kogeneracijskog postrojenja potrebno je prethodno planiranje. Ovakva postrojenja moraju zadovoljiti potrebe potrošača za proizvodnjom električne i toplinske energije, što je tehnički uvjetovano proizvodnjom i potrošnjom u realnom vremenu. Kako bi proizvodnja odgovarala potrošnji potrebno je predvidjeti potrebe potrošača, te ih uskladiti sa samom proizvodnjom i isporukom. Na temelju podataka prikupljenih u prethodnim periodima, izrađuju se dijagrami opterećenja (slika 3.16.), tj. potrošnje energije. Takvi dijagrami pokazuju potrebu određenog oblika energije u jednom satu ili danu i nazivaju se satnim ili dnevnim krivuljama potrošnje.



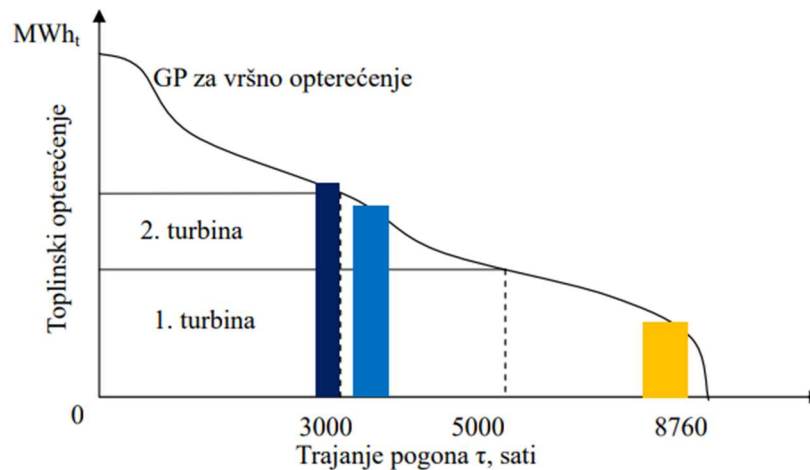
Slika 3.16. Satni dijagram potrošnje za toplinsku energiju

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_\\_pred\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema__pred_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 03.06.2023.)



Prema prikazanom godišnjem dijagramu opterećenja vidljiva je količina potrošene energije u prethodnoj godini podijeljena na sate (1 godina = 8760 sati), na temelju čega se prilagođava proizvodnja energije uz određena odstupanja. Očitavanjem dijagrama opterećenja, može se dobiti broj sati s istim energetske opterećenjem (stupci iste boje), što omogućuje izradu zbirnog dijagrama opterećenja (slika 3.17.).



Slika 3.17. Zbirni dijagram toplinskog opterećenja

Izvor:

[https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/8A\\_predavanje\\_Energetika\\_UE\\_prema\\_pred\\_u\\_Power\\_pointu\\_kogeneracija.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/8A_predavanje_Energetika_UE_prema_pred_u_Power_pointu_kogeneracija.pdf) (pristupio: 03.06.2023.)

Zbirni dijagram omogućuje da se na temelju poznatih podataka poveže potreba potrošnje i proizvođača koji tu potrošnju moraju zadovoljiti. Ujedno su podloga za planiranje i koncipiranje proizvodnog pogona s ciljem odabira optimalnog tehničkog i ekonomskog rješenja. Prema dijagramu vidljivo je da su najveće vrijednosti potrošnje najkraćeg trajanja, dok su niske vrijednosti potrošnje najduljeg trajanja.

Kako bi termoenergetsko postrojenje bilo učinkovito potrebna je kombinacija više zasebnih komponenti sustava. Za pokrivanje bazne potrošnje (donja trećina dijagrama) koristi se parna turbina s reguliranim oduzimanjem koja radi cijelu godinu konstantnom snagom. Porastom potrebe za energijom (npr. početak sezone grijanja), uključuje se druga turbina koja do tada nije bila u pogonu kako bi se pokrivala novonastale potrebe potrošača. (dio dijagrama iznad prve trećine). Druga turbina za pokrivanje povećanja potrošnje energije može biti plinska turbina s proizvodnjom pare. Ukoliko ni druga turbina ne može pokriti potrebe potrošača, uključuje se generator pare za pokrivanje vršnog opterećenja.

## 4. KOGENERACIJSKO POSTROJENJE NA DRVNU BIOMASU „ENERGANA ŽUPANJA“

Energana Županja (slika 4.1.) je kogeneracijsko postrojenje na drvnu biomasu instaliranog kapaciteta 4,90 MWe (električne energije) i 8,50 MWt (toplinske energije), puštena u rad u kolovozu 2019. godine. Kao gorivo koristi se drvena sječka. Godišnja proizvodnja joj je 41521 MWh električne energije. [8]



Slika 4.1. Kogeneracijsko postrojenje na drvnu biomasu "Energana Županja"

Izvor: <https://www.geen.eu/powerplant-zupanja?lang=16> (04.06.2023.)

### 4.1. Princip rada kogeneracijskog postrojenja na drvnu biomasu „Energana Županja“

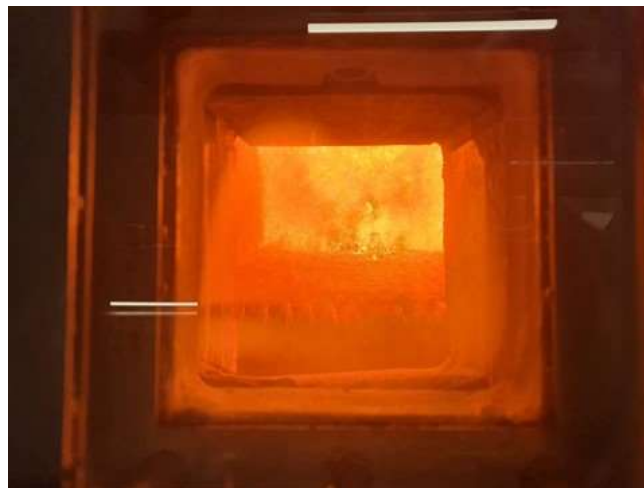
Početak proizvodnje energije u kogeneracijskom postrojenju Energana Županja kreće od kemijske pripreme vode. Prirodna voda sadrži razne tvari koje je potrebno ukloniti kako bi se iz spremnika, pojmim pumpama, voda pumpala u kotao. Svaki dan potrebno je dodavati sol, antiscalant (tvar za uklanjanje kamenca iz vode), lužinu kojom se podiže pH vrijednost vode i natrijev bisulfit. Isparavanjem vode povećava se koncentracija otopljenih tvari u vodi, što dovodi do njihova izlučivanja u obliku taloga na stijenkama cijevi. Materijal taloga ima znatno manju toplinsku vodljivost u odnosu na materijal cijevi, što uzrokuje pregrijavanja i oštećenja. Demineralizacijom vode, uklanjanjem kisika i ugljikovog dioksida, te povećanjem pH vrijednosti sprječava se nastajanje korozije u kotlu turbini.

Kemijski pripravljena voda pumpama se iz spremnika (slika 4.2.) pumpa u kotao, tj. generator pare. U kotlu se nalazi ložište (slika 4.3.) u kojemu izgara drvena sječka dozirana iz kontrolne sobe putem SCADA sustava. Sječka se dovodi iz petnaestominutnog spremnika koji se nakon svakog pražnjenja automatski puni.



Slika 4.2. Spremnici za vodu

Izvor: osobni foto album



Slika 4.3. Ložište

Izvor: osobni foto album

Na dnu ložišta nalazi se pokretna traka koja odvodi otpadni pepeo dobiven izgaranjem sječke u kontejner. Izgaranjem drvene sječke u kotlu, zagrijava se kemijski pripravljena voda koja isparava, te pri izlazu iz kotla ima određen tlak i temperaturu.

Para nastala u kotlu prolazi kroz pregrijače gdje se dodatno pregrijava na određeni tlak i temperaturu koju određuje SCADA sustav. Rezultat ovog procesa je dobivanje suhe pare, koja u daljnjem procesu pogoni turbinu.

Para nastala u kotlu, cijevima putuje kroz pregrijač, u kojemu se pregrijava na određenu temperaturu zbog boljeg stupnja djelovanja. Pregrijana para potom odlazi iz generatora pare (kotla) na slici 4.4., u parnu turbinu (slika 4.5.) gdje ekspandira i predaje mehanički rad generatoru preko reduktora (slika 4.4.). Reduktor je uređaj kojim se brzina vrtnje prilagođava traženim uvjetima rada.



Slika 4.4. Generator i reduktor

Izvor: osobni album



Slika 4.5. Parna turbina

Izvor: osobni album

Turbina preko reduktora pogoni generator, koji proizvodi električnu energiju, nakon čega se preko blok transformatora (slika 4.6.) distribuira u elektroenergetsku mrežu. Kako bi se zatvorio kružni proces, iskorištena para niskih parametara nakon što ekspandira u turbini odlazi u kondenzator (slika 4.7.) koji paru oduzima toplinu, hladi je i kondenzira (pretvara u vodu).



Slika 4.6. Transformator

Izvor: osobni foto album



Slika 4.7. Kondenzator

Izvor: osobni album



Nakon kondenzacije, preostala voda se pomoću pojne pumpe vraća ponovno na zagrijavanje. Iskorištena para koja ide u kondenzator na hlađenje, u kondenzatoru zagrijava vodu u cijevima. Zagrijana voda se usmjerava prema sušari, te iskorištava za smanjivanje vlažnosti drvne sječke (sušenje).

Pokretanje turbine izvršava se na turbinskom panelu, gdje se nalaze funkcijske grupe koje pokreću određene sustave turbine i generatora. Prije pokretanja turbine, pokreću se pomoćni pogoni, sustav podmazivanja, okretni stroj, sustav kondenzata, sustav brtvene pare i sustav evakuacije kondenzata. Sustav podmazivanja prvi je sustav koji se pokreće i odgovoran je za podmazivanje svih ležajeva unutra turbine i generatora. Okretni stroj je elektromotor koji je spojen na reduktor, nalazi se između turbine i generatora i služi za vrtnju rotora turbine pri brzini od 375 o/min zbog prevencije deformacije rotora turbine. Prilikom gašenja turbine okretni stroj nastavlja rad dok temperatura rotora turbine ne padne ispod 100°C.

Sustav kondenzata i evakuacije služi za uklanjanje kondenzata iz turbine pomoću vakuuma, kako bi se spriječilo oštećenje rotora ili lopatice turbine. Brtvena para je para koja dolazi na krajeve kućišta turbine i brtvi turbinu, visokotlačnu stranu s 30 bara i niskotlačnu stranu s 5 bara tlaka. Brtvena para dolazi iz glavnog parnog voda i sprječava propuštanje pare koja ide na lopatice turbine. Nakon pokretanja svih pomoćnih sustava, turbina se zagrijava na parametre zadane od strane proizvođača (350°C). Postizanjem željene temperature, glavni parni vod je pod pritiskom od minimalno 50 bara, turbina otvara ventile koji propuštaju paru te se turbina počinje vrtiti. Ukoliko su svi parametri zadovoljeni, brzina vrtnje turbine se povećava prema određenoj krivulji zbog izbjegavanja kritične brzine pri kojoj su velike vibracije. Prilikom pokretanja turbine potrebno je zatvoriti drenaže turbine određenim redoslijedom. Nakon postizanja nominalne brzine (10800 o/min) kreće sinkronizacija na mrežu. Sinkronizacija se izvršava pobudom generatora. Uspješnim spajanjem na mrežu generator daje snagu od minimalno 1 MW, te se postepeno diže na nominalnu snagu od 4,9 MW.

## **4.2. Održavanje postrojenja i pojedinih dijelova**

Termoelektrana se dijeli na dva osnovna dijela:

- kotlovsko postrojenje – proizvodnja toplinske energije,
- turbogenerator – proizvodnja električne energije.

Oba sustava podložna su ljudskim i prirodnim utjecajima, dotrajalo i istrošenosti dijelova zbog čega dolazi do kvarova i oštećenja. Kako bi postrojenje sigurno i pouzdano funkcioniralo, bitno je razviti plan održavanja s vremenskim rokovima i definiranim izvršiteljima. Izvršitelji aktivnosti održavanja mogu biti ili osoblje elektrane ili tvrtke specijalizirane za održavanje ovakvih sustava. Svaka aktivnost održavanja u postrojenju mora se dokumentirati i arhivirati kao dokaz stručnog održavanja postrojenja. Postupak održavanja i vođenja pogona izvršavaju zaposlenici koji su i operatori postrojenja. Organizacijska struktura funkcionira na način da, nadzorni radnik ima odgovornost za vođenje cjelokupnog postrojenja. Radnik na mehaničkom održavanju radi na puštanju u pogon svih uređaja, izvršavanja radova održavanja i zamjena komponenata svih mehaničkih sustava postrojenja. Radnik na električnom održavanju osposobljen je za vođenje, održavanje i zamjenu komponenata električnih sustava unutar postrojenja, bilo niskog ili visokog napona. Operator postrojenja vodi i upravlja radom postrojenja u normalnim i posebnim uvjetima rada koji su uzrokovani kvarom ili održavanjem.

Aktivnosti održavanja kotlovske postrojenja podijeljene su na:

- svakodnevne,
- tjedne, mjesečne,
- polugodišnje,
- godišnje.

Dnevne aktivnosti održavanja kotlovske postrojenja smatraju se preventivnim održavanjem i kontrolom.

Neke od dnevnih aktivnosti su praćenje:

- temperature dimnih plinova,
- količine goriva u ložištu,
- smjese zraka i goriva,
- razine hidrauličnog ulja sustava za podmazivanje.

Neke od tjednih aktivnosti su:

- čišćenje prostora za pepeo,
- kontrola deformiranosti i istrošenosti dijelova rešetke u ložištu,
- kontrola temperature ulja i
- kontrola propusnosti cijevi sustava za podmazivanje.

U mjesečne aktivnosti održavanja ubrajaju se:

- aktivnosti čišćenja ložišta od pepela, troske i negorivih ostataka rešetke,
- kontrola buke,
- kontrola temperature i podmazanosti ležajeva,
- kontrola ventilatora dimnih plinova.

Polugodišnje aktivnosti održavanja odnose se na neprekidni sustav napajanja, a to su:

- provjera mehaničke ispravnosti motora i električnog generatora,
- provjera ispravnosti sklopke za prebacivanje napajanja s elektroenergetskog sustava na sustav neprekidnog napajanja i obratno.

U godišnje aktivnosti održavanja svrstavaju se:

- planske provjere stanja sigurnosti pogona,
- provjera kvalitete radnog medija u kotlu.

Održavanje turbogeneratora u postrojenju dijeli se na:

- tjedne,
- godišnje,
- višegodišnje aktivnosti.

Aktivnosti kontrole i održavanja koje spadaju u tjedne vremenske aktivnosti najčešće se tiču sustava podmazivanja i pneumatskog sustava koji su neophodni za rad turbogeneratora, a to su:

- provjera razine masti i ulja automatskih podmazivača rotirajućih dijelova agregata,
- provjera vakuumskih pumpi za doziranje istih.



## 5. GLAVNE ZNAČAJKE TERMOELEKTRANE NA DRVNU BIOMASU

Drvena biomasa se smatra obnovljivim izvorom energije i često se naziva ugljično neutralnim gorivom, unatoč tome što može doprinijeti globalnom zatopljenju. Negativan utjecaj je moguć ako se poremeti ravnoteža sječe i sadnje drveća (urbanizacija zelenih površina ili krčenje šuma). Kada se umjesto fosilnih goriva upotrebljava drvena biomasa, ispušta se manja količina ugljikovog dioksida u atmosferu. Ugljik iz biomase (~50% mase drvene biomase) već je dio atmosferskog ugljičnog kruga. Drvena biomasa apsorbira ugljični dioksid tijekom svoga životnog ciklusa, te ga ispušta natrag u atmosferu pri upotrebi za dobivanje energije.

Jedan od glavnih ciljeva energetske politike Energetske unije i Europske unije (EU) je povećanje udjela obnovljivih izvora energije što pozitivno utječe na smanjenje emisija stakleničkih plinova, smanjenje ovisnosti o uvozu energenata i poticanju lokalne ekonomije.[9]

### 5.1. Smanjenje emisija stakleničkih plinova

Termoelektrane na drvenu biomasu imaju značajan utjecaj na smanjenje emisija stakleničkih plinova, a neki od načina na koje doprinose smanjenju emisija su:

- Obnovljivi izvor energije – drvena biomasa obnovljivi je izvor energije jer dolazi od biljnih materijala koji se obnavljaju putem prirodnih procesa, za razliku od fosilnih goriva, čija je količina ograničena i čije izgaranje potiče emisiju stakleničkih plinova. Drvena biomasa može se obnoviti održivim šumskim praksama.
- Smanjenje emisija CO<sub>2</sub> – korištenje drvene biomase kao goriva u termoelektranama umjesto fosilnih goriva poput nafte i ugljena, smanjuje emisije CO<sub>2</sub>. Drvena biomasa pri sagorijevanju emitira količinu CO<sub>2</sub> koju apsorbira prilikom ponovnog rasta biljke (zatvoren kružni tok CO<sub>2</sub> – neutralna emisija CO<sub>2</sub>).
- Smanjenje emisija drugih stakleničkih plinova – termoelektrane na drvenu biomasu smanjuju emisiju drugih stakleničkih plinova poput sumpornog dioksida SO<sub>2</sub> i dušikovog oksida NO<sub>x</sub>. Ove termoelektrane često koriste napredne tehnologije za sagorijevanje biomase koje omogućuju efikasnije izgaranje i smanjenje emisija tih plinova.

- Poticanje razvoja obnovljive energije – korištenje drvene biomase za proizvodnju električne energije promiče razvoj obnovljive energije. Ove termoelektrane mogu biti dio mješovitog energetskeg portfelja koji uključuje i druge izvore obnovljive energije poput energije vjetra i sunca. Diversifikacija proizvodnje energije smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima i doprinosi globalnoj tranziciji prema čistom energetskeg sustavu.

Termoelektrane na drvnu biomasu imaju i potencijalne negativne utjecaje na okoliš kao što su emisije čestica i drugih zagađivača. Kako bi se negativni utjecaji smanjili, potrebno je razvijati i koristiti najbolje dostupne tehnologije za smanjenje tih emisija i pridržavati se strogih regulatornih standarda kako bi se minimizirao njihov ukupni utjecaj na okoliš.

## **5.2. Povećanje energetske neovisnosti**

Termoelektrane na drvnu biomasu povećavaju energetskeg neovisnost. Drvna biomasa se prikuplja ili uzgaja na lokalnoj razini, što smanjuje uvoz biomase kao goriva za proizvodnju energije. Povećanjem lokalne proizvodnje drvene biomase smanjuje se potreba za uvozom fosilnih goriva poput nafte, plina ili ugljena. Termoelektrane koriste lokalno dostupne izvore drvene biomase poput drva, piljevine, poljoprivrednih ostataka ili otpadnih materijala čime se promiče iskorištavanje i zbrinjavanje lokalnog otpada i smanjuje potreba za uvozom drvene biomase. Cijene fosilnih goriva često su podložne velikim fluktuacijama na svjetskom tržištu. Korištenje biomase kao izvora energije pruža stabilniju i predvidljiviju cijenu, jer je većina biomase lokalno dostupna i ne podliježe globalnim cjenovnim promjenama.

Važno je napomenuti da se energetskeg neovisnost ne može postići isključivo korištenjem drvene biomase kao izvora energije, nego je potrebno kombinirati različite izvore energije i primijeniti energetskeg učinkovitost kako bi se smanjila ovisnost o fosilnim gorivima te osigurala dugoročna energetskeg neovisnost.

## **5.3. Poticanje lokalne ekonomije**

Termoelektrane na drvnu biomasu potiču razvoj lokalne ekonomije stvaranjem novih radnih mjesta. Izgradnja i rad termoelektrane zahtjeva različite vrste radne snage kao što su inženjeri, radnici za prikupljanje biomase, operateri, tehničari, održavatelji postrojenja i slično.

Termoelektrane zahtijevaju stalnu opskrbu biomasom, što stvara potražnju za lokalnom proizvodnjom drvene biomase poput piljevine, poljoprivrednih ostataka i slično. Konstantnom potražnjom drvene biomase potiče se razvoj sektora šumarstva i gospodarstva, te razvoj lokalne industrije prerade biomase. Velika potražnja biomase lokalnim poljoprivrednicima stvara mogućnost za dodatnom zaradom, prerađivanjem poljoprivrednih ostataka. Proizvodnja biomase često uključuje preradu, skladištenje i distribuciju biomase. Ovi procesi mogu biti izvedeni na lokalnoj razini, što stvara potrebu za lokalnim tvrtkama i dobavljačima koji pružaju usluge prerade, transporta i logistike. Izgradnjom i radom termoelektrane dolazi do povećanja poreznih prihoda za lokalne vlasti. Ti prihodi mogu se koristiti za poboljšanje infrastrukture, obrazovanja, zdravstva i drugih javnih usluga u lokalnoj zajednici. Termoelektrane na drvenu biomasu mogu privući investicije u lokalnoj zajednici, što dalje potiče rast lokalne ekonomije. Važno je maksimalno iskoristiti lokalnu ekonomiju i stvoriti okruženje koje podržava lokalne poduzetnike i koristi lokalne resurse na održiv način. Potrebno je osigurati transparentnost i pravednost u raspodjeli ekonomskih koristi lokalnoj zajednici kako bi se osigurala dugoročna održivost i dobrobit svih dionika.

## 6. ZAKLJUČAK

Biomasa je obnovljivi izvor energije, čime dobiva epitet neiscrpnog izvora. Prednosti biomase kao izvora energije je smanjenje emisija stakleničkih plinova, smanjenje korištenja fosilnih goriva kao jedne od glavne tvari zagađenja okoliša. Ekonomska isplativost je na strani biomase, posebice kada se govori o drvnoj biomasi (drvena sječka). Prednost drvene sječke je što ne zahtjeva dodatnu preradu kako bi koristila kao gorivo za proizvodnje električne i toplinske energije te je široko dostupna.

Termoelektrane na drvenu biomasu koriste kogeneracijski princip rada. Kogeneracijskim postrojenjima uz proizvodnju električne energije, proizvodi se i toplinska energije, koja se koristi ili za opskrbljivanje potrošača toplinskom energijom ili za dodatni proces postrojenja poput sušenja drvene sječke za smanjivanje udjela vlage. U završnom radu pojašnjen je način rada kogeneracije, princip rada kogeneracijskog postrojenja na drvenu sječku „Energana Županja“, njeni dijelovi, te prednosti i nedostaci termoelektrana na drvenu biomasu.

Istraživanjem i izračunima dolazi se do zaključka kako je kogeneracija, odnosno korištenje drvene biomase respektabilan izvor energije za potrebe proizvodnje energije u budućnosti. Ukoliko se uskladi sječa i sadnja drveća korištenog kao izvor biomase, i time zatvori kružni proces ugljika u prirodu, smatra se kako će drvena biomasa uvelike preuzeti energetske udio proizvodnje električne i toplinske energije. Također, uz biomasu potrebno je koristiti sve ostale izvore obnovljive energije, kako bi se usporio negativni utjecaj klimatskih promjena te umanjilo narušavanje biljnog i životinjskog staništa

## LITERATURA

- [1] <https://www.renovablesverdes.com/bs/prednosti-i-mane-energije-biomase/>  
(pristupio: 28.04.2023.)
- [2] <https://tehnika.lzmk.hr/drvna-biomasa/>  
(pristupio: 01.05.2023.)
- [3] <https://korak.com.hr/korak-017-ozujak-2007-briketi/>  
(pristupio: 04.05.2023.)
- [4] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17558>  
(pristupio: 10.05.2023.)
- [5] <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1652/datastream/PDF/view>  
(pristupio: 20.05.2023.)
- [6] <http://struna.ihjj.hr/naziv/reakcijska-turbina/4747/#naziv>  
(pristupio: 28.05.2023.)
- [7] [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/2\\_OIE\\_Jukic\\_biomasa%5B1%5D.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/2_OIE_Jukic_biomasa%5B1%5D.pdf)  
(pristupio: 02.06.2023.)
- [8] <https://www.geen.eu/powerplant-zupanja>  
(pristupio: 04.06.2023.)
- [9] [https://www.radioaktivniotpad.org/download/documents/read/proizvodnja-elektricne-energije\\_12](https://www.radioaktivniotpad.org/download/documents/read/proizvodnja-elektricne-energije_12)  
(pristupio: 10.06.2023.)
- [10] <https://tehnika.lzmk.hr/drvna-biomasa/>  
(pristupio: 10.07.2023.)
- [11] <https://enciklopedija.lzmk.hr/clanak.aspx?id=41114>  
(pristupio: 12.08.2023.)

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Kruženje ugljika u prirodi .....	5
Slika 2.2. Drvna sječka.....	7
Slika 2.3. Pelet.....	8
Slika 2.4. Briket.....	8
Slika 3.1. Termoelektrana.....	9
Slika 3.2. Lančana rešetka.....	10
Slika 3.3. Dio postrojenja za kemijsku pripremu vode .....	11
Slika 3.4. Kondenzator parne turbine.....	12
Slika 3.5. Parni kotao .....	14
Slika 3.6. Parna turbina .....	16
Slika 3.7. Akcijska (impulsna) i reakcijska turbina.....	16
Slika 3.8. Usporedba proizvodnje električne i toplinske energije kogeneracijom i u odvojenim procesima .....	17
Slika 3.9. Kogeneracijsko postrojenje.....	18
Slika 3.10. "Bottom cycle" kogeneracijsko postrojenje.....	19
Slika 3.11. "Topping cycle" kogeneracijsko postrojenje.....	20
Slika 3.12. Shema protutlačne turbine s prikazom u T-s dijagramu.....	21
Slika 3.13. Kogeneracijsko postrojenje s motorom s unutarnjim izgaranjem.....	22
Slika 3.14. Shema turbine s reguliranim oduzimanjem s prikazom u T-s dijagramu.....	22
Slika 3.15. Usporedba iskorištenja proizvodnje električne i toplinske energije .....	26
Slika 3.16. Satni dijagram potrošnje za toplinsku energiju.....	27
Slika 3.17. Zbirni dijagram toplinskog opterećenja .....	28
Slika 4.1. Kogeneracijsko postrojenje na drvenu biomasu "Energana Županja".....	29
Slika 4.2. Spremnici za vodu.....	30
Slika 4.3. Ložište.....	30
Slika 4.4. Generator i reduktor .....	31
Slika 4.5. Parna turbina .....	31
Slika 4.6. Transformator.....	32
Slika 4.7. Kondenzator .....	32