

# Toplinski proces termoenergetskog postrojenja

---

**Anjoš, Marino**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:980926>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Marino Anjoš**

**Toplinski proces termoenergetskog postrojenja**

Diplomski rad

U Puli, ožujak 2023. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Marino Anjoš**

**Toplinski proces termoenergetskog postrojenja**

Diplomski rad

**JMBAG: 2424007503, redoviti student**

**Studijski smjer: Energetika i inženjerstvo okoliša**

**Predmet: Toplinski strojevi**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: Strojarnstvo**

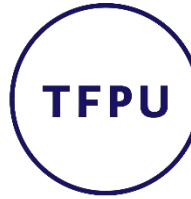
**Znanstvena grana: Termodinamika**

**Mentor: Doc. dr. sc. Igor Kegalj, dipl. ing.**

U Puli, ožujak 2023. godine

Doc. dr. sc. Igor Kegalj, dipl. ing.  
(Ime i prezime nastavnika)

Toplinski strojevi  
(Predmet)



Tehnički fakultet u Puli

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**

**ZADATAK TEME DIPLOMSKOG RADA**

**Pristupniku/ci**

Anjoš Marinu

**MBS: 2424007503**

**Studentu/ci stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad – tema diplomskog rada pod nazivom:**

**Toplinski proces termoenergetskog postrojenja**

**Sadržaj zadatka:** Za termoelektanu nazivne električne snage od 217 MW<sub>el</sub>, tlaka pare 145 bar i temperature pare 535 °C s jednim međupregrijanjem pare uz sedam regenerativnih zagrijača napojne vode potrebno je na temelju zadanih i proračunatih radnih parametara izraditi termodinamički proračun koji uključuje: termodinamičku shemu postrojenja, h-s dijagram parnog procesa, izračun oduzimanja pare turbini, izračun stupnja korisnosti termodinamičkog procesa, izračun potrošnje goriva za rad elektrane te korisnost postrojenja za dobivanje električne energije.

Kroz rad je potrebno prikazati tijek termodinamičkog procesa u postrojenju te opisati kompletno postrojenje. U radu je potrebno opisati postrojenje za odsumporavanje dimnih plinova kao i postrojenje za redukciju dušičnih oksida.

Može li termoelektana na ugljen prilagodbom novim energetske i okolišnim izazovima u Hrvatskoj opstati, s obzirom da je Vlada RH odlučila da elektrana mora prestati s radom najkasnije do 2033. godine?

Donijeti zaključak u kojemu se odražavaju bitne spoznaje u radu i kritički osvrt autora.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

Strojarstvo: redovni

**Datum: 12.3.2023.**

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_





## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Marino Anjoš, kandidat za magistra inženjera strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Diplomski rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Diplomskog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student: Marino Anjoš

Matični broj: 2424007503

U Puli, ožujak 2023. godine



## IZJAVA

o korištenju autorskog djela

Ja, Marino Anjoš dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj diplomski rad pod nazivom

### **TOPLINSKI PROCES TERMOENERGETSKOG POSTROJENJA**

koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

Student: Marino Anjoš

Matični broj: 2424007503

U Puli, ožujak 2023. godine

## ZAHVALA

Zahvaljujem se svome mentoru, doc. dr. sc. Igoru Kegalju, na pristupačnosti, nesebičnoj pomoći i stručnom vodstvu tijekom izrade ovo rada.

Zahvaljujem se tehničkom osoblju TE Plomin 2 a posebice Robertu Kranjcu na strpljivom objašnjavanju prilikom obilaska cijelog postrojenja, te na ustupljenoj dokumentaciji.

Zahvaljujem se i svojem bivšem profesoru sa Tehničkog fakulteta u Rijeci, doc. dr. sc. Vedranu Mrzljaku na ustupljenoj literaturi.

## Sadržaj

1. UVOD.....	3
1.1. Cilj rada.....	3
1.2. Hipoteza.....	3
1.3. Metode rada.....	4
1.4. Struktura rada.....	4
2. Općenito o elektranama.....	5
2.1. Parne elektrane.....	8
2.1.1. Princip rada parne elektrane (Clausius-Rankineov proces).....	8
2.2. Osnovni sustavi parne elektrane.....	11
2.2.1. Generator pare.....	11
2.2.2. Parna turbina.....	14
2.2.3. Kondenzator.....	19
2.3. Mogućnosti poboljšavanja stupnja djelovanja parnog procesa u elektrani.....	21
3. Termoelektrana Plomin.....	26
3.1. Povijest nastanka i razvitka elektrane.....	26
3.2. Značajke termoelektrane Plomin.....	27
3.2.1. Opis rada termoeenergetskog postrojenja TE Plomin 2.....	29
3.3. Pogonsko gorivo elektrane.....	34
3.4. Voda iz izvora Bubić Jama.....	36
3.4.1. Voda za tehnološke potrebe.....	36
3.4.2. Kemijska priprema vode.....	36
3.5. Dobivanje toplinske energije za potrebe rada elektrane.....	37
3.5.1. Kotlovsko postrojenje.....	37
3.5.2. Kotao.....	37
3.6. Turbina TE Plomin 2.....	39
3.6.1. Opis i karakteristike turbine.....	39
3.6.2. Opis tri stupnja turbine.....	43
3.7. Kondenzator i toplinski krug vode - pare.....	45
3.7.1. Korištenje morske vode za potrebe kondenzatora.....	47

---

3.7.2. Neregulirana oduzimanja pare turbini.....	51
3.7.3. Napojna voda.....	51
3.8. Električni generator.....	52
4. Sustavi za pročišćavanje dimnih plinova DeNO <sub>x</sub> i DeSO <sub>2</sub> .....	54
4.1. Redukcija dušičnih oksida (DeNO <sub>x</sub> ).....	54
4.2. Odsumporavanje plinova (DeSO <sub>2</sub> ).....	55
5. Toplinski proračun.....	56
5.1. Termodinamička shema i h-s dijagram parnog procesa u TE Plomin 2..	56
5.2. Dinamika toplinskog toka radnog medija.....	60
5.3. Oduzimanja pare turbini.....	60
5.4. Stupanj korisnosti termodinamičkog procesa.....	63
5.5. Izračun potrošnje goriva potrebne za rad elektrane.....	68
5.6. Korisnost postrojenja za dobivanje električne energije.....	68
6. Zaključak.....	69
Popis literature.....	71
Popis slika.....	73
Popis tablica.....	75
Sažetak i ključne riječi.....	76
Abstract and key words.....	77

## 1. UVOD

U svijetu je potreba za električnom energijom sve veća. Raspoloživi energenti za njenu proizvodnju putem energetske postrojenja su ugljen, prirodni plin, nuklearno gorivo, obnovljivi izvori energije kao što su sunce, vjetar, energija mora (energija valova, plime i oseke) i energija zemlje (dizalice topline).

Termoenergetsko postrojenje odnosno termoelektrana proizvodi električnu energiju. Energija se prenosi promjenom iz jednog oblika u novi oblik.

Općenito u termodinamičkom kružnom procesu dolazi do pretvorbe toplinske energije u mehanički rad (Clausius-Rankineov proces).

Taj se rad u termoelektrani koristi za vrtnju generatora da bi se dobila električna energija. U slučaju TE Plomin 2, kao i kod svake termoelektrane koja kao gorivo koristi ugljen, toplinski proces kreće od kemijske energije sadržane u gorivu (ugljenu) koje izgara u ložištu kotla elektrane. Kemijska se energija pretvara u toplinsku a u generatoru pare se ta toplina prenosi na radni medij, a to je vodena para. Kinetička energija vodene pare na lopaticama turbine stvara okretni moment koji ima za posljedicu rotaciju elektro generatora koji se nalazi na kraju lanca prijenosa energije ovoga sustava.

### 1.1. Cilj rada

Cilj ovog rada je upoznavanje s ovim kompleksnim sustavom proizvodnje električne energije i valoriziranje istog u smislu energetske neovisnosti i stabilnosti elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske naspram ostatka svijeta te sagledavanje specifičnosti termoelektrane na ugljen i njenih procesa. Isto tako, ne može se izbjeći pitanje ekologije kada je u pitanju jedina termoelektrana na ugljen u Hrvatskoj.

### 1.2. Hipoteza

Može li termoelektrana na ugljen prilagodbom novim energetske i okolišnim izazovima u Hrvatskoj opstati, s obzirom da je Vlada RH odlučila da elektrana mora prestati s radom najkasnije do 2033. godine?

### 1.3. Metode rada

Metode koje su primijenjene prilikom izrade ovog diplomskog rada:

- deskriptivna metoda
- metoda analize
- metoda sinteze
- induktivna metoda
- deduktivna metoda

### 1.4. Struktura rada

U prvom poglavlju, uvodom se predstavlja tema ovog diplomskog rada. Nakon uvoda opisuju se: cilj rada, hipoteza, metode i struktura rada.

U drugom poglavlju ovog diplomskog rada bit će govora općenito o elektranama i načinu dobivanja električne energije s posebnim naglaskom na parne elektrane. Bit će opisane funkcije svih najbitnijih elemenata parne elektrane.

U trećem poglavlju rada bit će govora u termoelektrani Plomin 2, od povijesti elektrane do opisa rada svakog pojedinog važnijeg podsustava unutar tog termoenergetskog postrojenja.

U četvrtom poglavlju bit će govora o sustavima za pročišćavanje dimnih plinova koje generira svojim radom termoelektrana Plomin 2. Radi se o sustavima za pročišćavanje dušikovih oksida ( $\text{DeNO}_x$ ) i o sustavima za pročišćavanje sumporovog oksida ( $\text{DeSO}_2$ ). U petom poglavlju obrađuje se toplinski proračun postrojenja.

## 2. Općenito o elektranama

Elektrane su energetska postrojenja u kojima se proizvodi električna energija. Možemo ih podijeliti na one koje koriste obnovljive izvore energije i one koje koriste neobnovljive izvore energije. Kada se govori o obnovljivim izvorima energije, misli se prvenstveno na energiju sunca (solarne elektrane), energiju vjetra (vjetroelektrane) te energiju plime i oseke (elektrane koje iskorištavaju energiju plime i oseke).

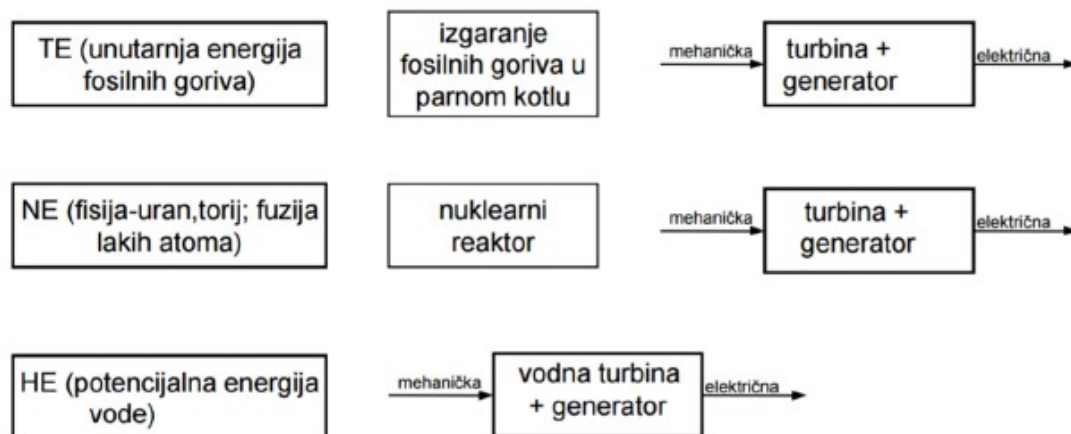
Pod neobnovljivim izvorima energije misli se na goriva koja su pogodna za izgaranje u ložištu elektrane radi dobivanja toplinske energije. Elektrane te vrste su termoelektrane i nuklearne elektrane. Termoelektrane mogu kao gorivo koristiti naftni derivat (mazut), kameni ugljen, produkte biomase i dr.

Termoelektrane možemo podijeliti i na vrstu toplinskog stroja koje koriste u svom radnom procesu. Tu se misli na parnu i plinsku turbinu. Kod plinske turbine izgaranjem goriva u komori izgaranja, dimni plinovi pokreću turbinu a to se gibanje prenosi na električni generator. Dok se kod parne turbine rotacija električnog generatora dobiva na indirektan način. Izgaranjem goriva dimni plinovi prenose toplinu na vodu u kotlu. Dobiva se para adekvatnih parametara koja će pokrenuti lopatice parne turbine koja se nalazi na istom vratilu sa električnim generatorom. Princip rada parne elektrane opisan je u nastavku rada.

Hidroelektrane svojim radom ipak utječu na lokalnu floru i faunu, zagrijavanjem vode i drugim posljedičnim utjecajima prolaskom kroz vodenu turbinu pa se ne bi moglo reći da spadaju pod čiste ekološke elektrane.

Na slici 1. prikazane su dvije termoelektrane i jedna hidroelektrana. Nuklearna elektrana je također termoelektrana jer toplinu dobivenu u nuklearnom reaktoru prenosi indirektnim putem s ozračene vode u primarnom krugu kroz stijenke cijevi putem provođenja i dvije konvekcije prijenosa topline, na vodu u sekundarnom krugu koja će se pretvoriti u paru i pogoniti parnu turbinu.





Slika 1. Način pretvorbe energije u elektranama [12]

Lako se može zaključiti da su hidroelektrane u ekonomskoj i ekološkoj prednosti budući da imaju besplatnu mehaničku energiju dobivenom razlikom visine vode od izvora do turbinskog bloka pa ne moraju trošiti nikakvo gorivo za pogon vodne turbine.

Mogućnosti hidroelektrana u svijetu nisu u iskorištene u dovoljnoj mjeri a potrebe za električnom energijom nadopunjavaju se pretežno s termoelektranama.

U Hrvatskoj postoji 28 hidroelektrana i 7 termoelektrana od kojih su 3 kondenzacijske i 4 termoelektrane toplane u kojima se proizvodi električna i toplinska energija za potrebe grijanja objekata [1].

Najopćenitija podjela elektrana je: Elektrane koje proizvode samo električnu energiju i elektrane- toplane koje proizvode električnu i toplinsku energiju.

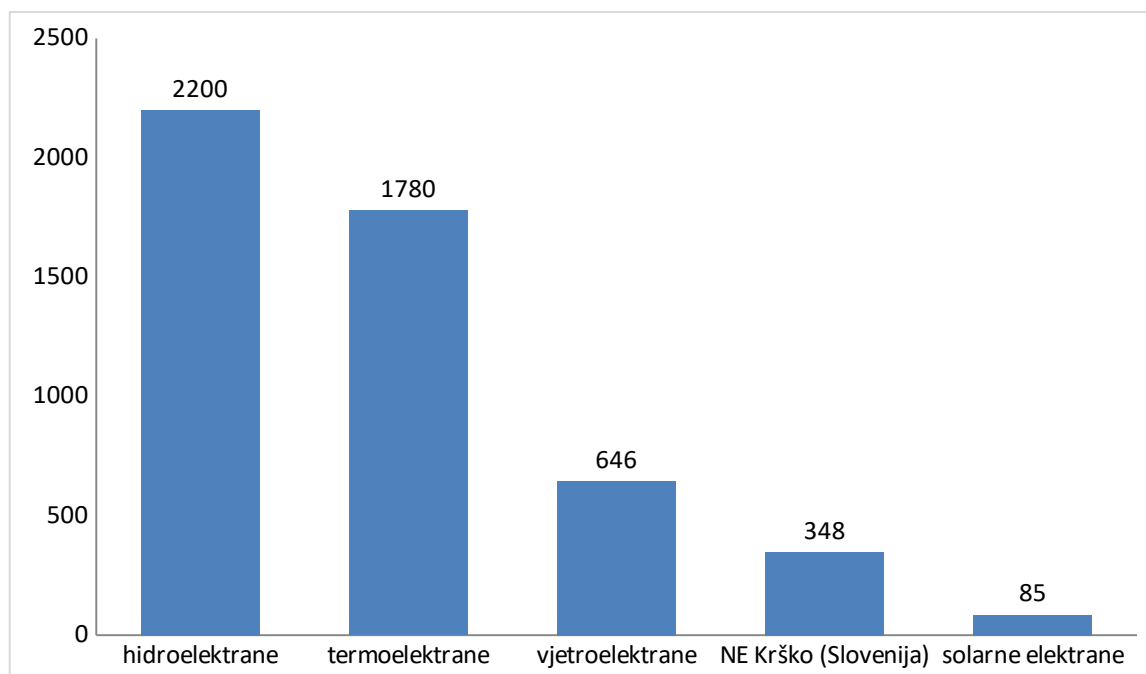
Kao što je vidljivo na slici 2. udio raspoloživih snaga elektrana u Hrvatskoj malo je više na strani hidroelektrana u odnosu na termoelektrane ali s obzirom da su hidroelektrane ovisne o vodostaju odnosno o akumulacijama vode one realno godišnje proizvedu manje električne energije od nazivnog potencijala.

U današnje vrijeme sve se više instaliraju elektrane koje iskorištavaju obnovljive izvore energije a to su solarne elektrane, vjetroelektrane, geotermalne elektrane i dr. koje će u budućnosti postepeno zamijeniti elektrane starijih tehnologija koje zagađuju okoliš. Nije zanemariv doprinos vjetroelektrana i solarnih elektrana u nas.

Republika Hrvatska prema međunarodnom ugovoru koristi polovicu od ukupno proizvedene električne energije iz NE Krško (Slovenija) [2].

Vlada u Sloveniji dala je 2021.godine energetska odobrenje slovenskoj kompaniji GEN Energiji, za planiranje i gradnju drugog bloka NE Krško. Cijena ovog projekta

kreće se prema procjenama od pet do osam milijardi eura. Premijeri Hrvatske i Slovenije održali su sastanak na tu temu. Postoji načelni dogovor o sudjelovanju Hrvatske u ovom projektu ali još se ništa nije konkretiziralo [3].



Slika 2. Raspoloživa snaga elektrana u RH u MW [2]

Energenti koji se koriste u termoelektranama u Hrvatskoj su prirodni plin, ekstra lako loživo ulje, ugljen, i bio-masa.

Loživo ulje kao energent za pogon termoelektrane nije ekonomski isplativ. Takva termoelektrana postoji u Rijeci na Urinju. Radi se o kondenzacijskoj termoelektrani snage 320 MW. Za potrebe rada kondenzatora koristi se morska voda. Mogućnost brze regulacije opterećenja u rasponu od 25% do 100 % velika je prednost pa se ta elektrana može koristiti kod vršnih opterećenja elektroenergetske mreže Hrvatske. [1] Prirodni plin je ekološki puno prihvatljiviji energent. Ali kako ekonomski razlozi često nadjačaju ekološke, takav primjer imamo kod TE Plomin 2 kod koje je bilo govora o promjeni energenta, od ugljena na prirodni plin, ali se od toga odustalo.

Primjer korištenja prirodnog plina u termoelektranama je TE-TO Zagreb ukupne nominalne snage za proizvodnju električne energije od 312 MW<sub>e</sub> i ukupne korisne toplinske energije za rad vrelovodnog sustava grijanja od 160 MW<sub>topl.</sub> Dva su proizvodna turbinska bloka (Blok K i Blok L). Svaki se sastoji od dvije plinske turbine

na prirodni plin i od parne turbine koja koristi toplinu plinova izgaranja iz plinske turbine za grijanje radnog medija. Da bi se postigli projektni parametri vodene pare u parnoj turbini, u ložištu dodatno izgara loživo ulje. Plinska turbina dakle proizvodi, mehaničku energiju (okretni moment na vratilu turbine) za pogon električnog generatora koji proizvodi električnu energiju, i toplinsku energiju iz plinova izgaranja za zagrijavanje radnog medija parne turbine. Parna turbina proizvodi mehaničku energiju za rad električnog generatora i toplinsku energiju koja se oduzima turbini za potrebe vrelovodnog sustava grijanja. TE-TO Zagreb je primjer kombi-kogeneracijskog postrojenja u kojem kombinira rad plinske i parne turbine pa time postiže veći ukupni stupanj iskoristivosti postrojenja [1].

Šumska biomasa, kao energent iz skupine obnovljivih izvora energije, koristi se u novijim bioelektranama- toplanama. Snage tih elektrana još uvijek nisu značajne u odnosu na ostale termoelektrane ali se kod ovakvih postrojenja otpadna toplina dimnih plinova koristi za centralizirani toplinski sustav grijanja u gradovima (primjer BE-TO Osijek, BE-TO Sisak) [1].

Ugljen kao energent za pogon termoelektrana, ekonomski je najisplativiji ali po pitanju ekologije je na zadnjem mjestu zajedno s loživim uljem.

TE Plomin 2 jedina je elektrana u Hrvatskoj koja koristi kao gorivo kameni ugljen. Ovaj energent je još uvijek ekonomski isplativ za proizvodnju električne energije (ugljen se uvozi pretežno iz Rusije). Od ukupno proizvedene električne energije u termoelektranama u Hrvatskoj Plomin 2 proizvede oko 31 % električne energije iako je njezin udio u snazi termoelektrana znatno manji. Razlog tome leži u činjenici da TE Plomin 2 ima najviše radnih sati godišnje u odnosu na preostale termoelektrane. U apsolutnim brojkama Plomin 2 godišnje sudjeluje odnosno u mrežu unese oko 12 % električne energije od ukupno proizvedene u Hrvatskoj [2].

## **2.1. Parne elektrane**

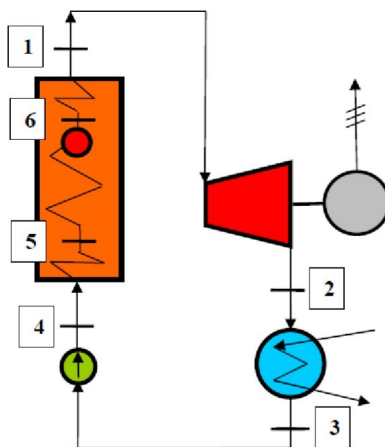
### **2.1.1. Princip rada parne elektrane (Clausius-Rankineov proces)**

Parna elektrana funkcionira na principu Clausius-Rankineovog procesa. To je kružni termodinamički proces koji toplinu pretvara u mehanički rad.

Proces se odvija između dvaju toplinskih spremnika (ogrijevnog i rashladnog spremnika odnosno generatora pare i kondenzatora). On se u idealnom slučaju

odvija između dvije izobare i dvije adijabate (slika 4.), a uključuje rad svih elemenata koji sudjeluju u procesu: Generatora pare, zagrijača napojne vode, isparivača, pregrijača, turbine, kondenzatora i napojnih pumpi.

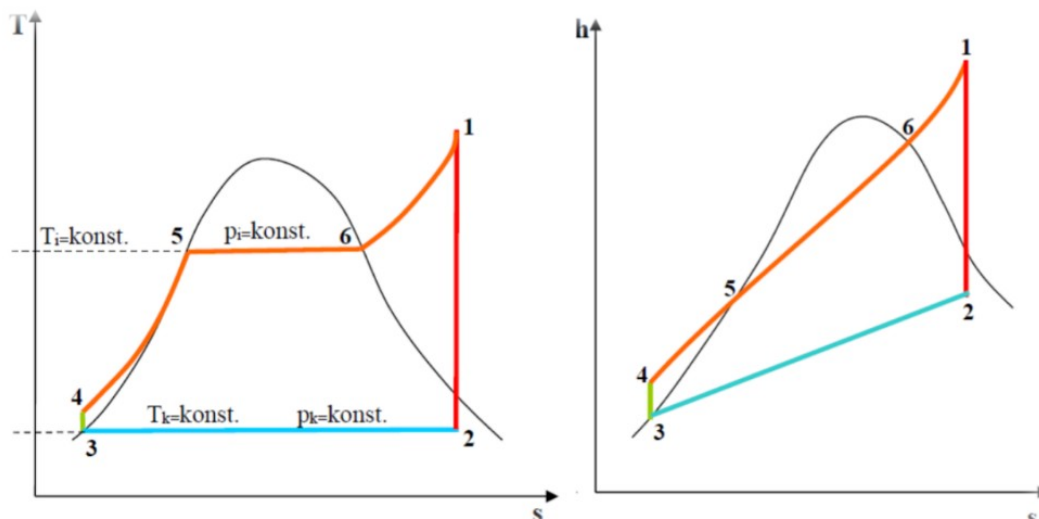
Što je veća razlika u temperaturi između ta dva toplinska spremnika dobiti će se više snage turbine i veći stupanj djelovanja. Temperatura i tlak vodene pare u generatoru pare ograničeni su granicama izdržljivosti materijala kotla i cijelog sustava, gdje će radni medij (vodena para) prolaziti. S druge strane, morska voda kao medij niže temperature, iskorištenoj će pari nakon ekspanzije u turbini odvoditi toplinu i to putem većeg broja cijevi u kondenzatoru (velika površina izmjene topline). Efikasnost rada kondenzatora ovisi o površini izmjene topline, temperaturi i protokom morske vode.



Slika 3. Toplinska shema Clausius-Rankineovog procesa [5]

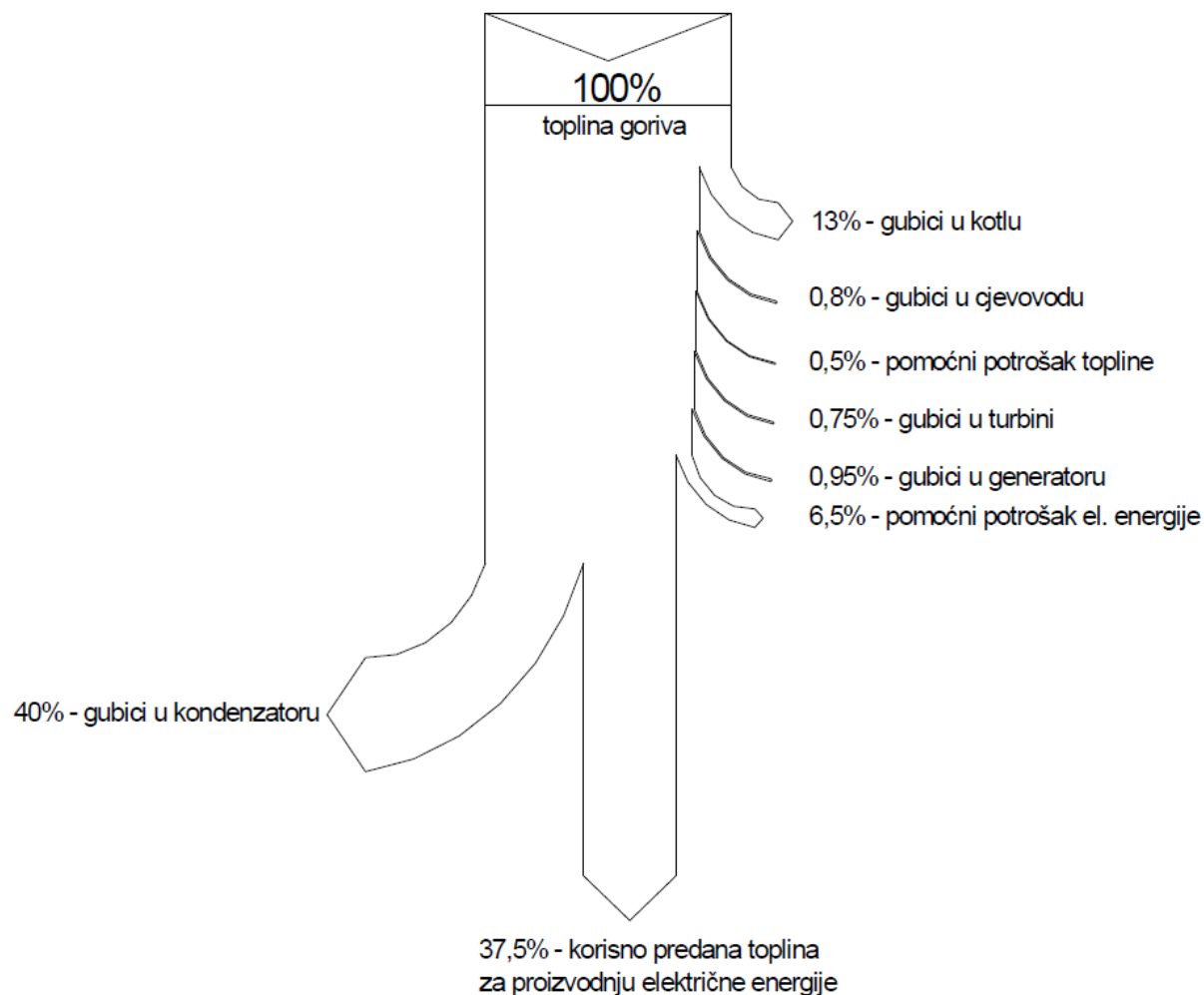
Slika 3. prikazuje osnovne komponente u Clausius-Rankineovom procesu. Kratki opis parnog procesa:

1-2 para ekspanzira u parnoj turbini, 2-3 prolaskom kroz kondenzator dolazi do promjene agregatnog stanja iz pare u vodu, 3-4 prolaskom kroz napojnu pumpu dolazi do porasta tlaka i temperature vode, 5-6 prolaskom kroz generator pare dolazi do promjene agregatnog stanja iz vode u paru, 6-1 para s vrlo malim udjelom vode ulazi u pregrijač te se pretvara u stanje suhozasićene pare, potom ulazi u turbinu.



Slika 4. T-s i h-s dijagrami Clausius-Rankineovog kružnog procesa parne elektrane  
[5]

Slika 5. opisuje teoretski ukupni stupanj djelovanja parnoturbinskog postrojenja ( 37,5 %). Najznačajniji su gubici u kondenzatoru i kotlu odnosno ona dva toplinska spremnika koja se spominju u definiciji Clausius-Rankineovog procesa. To su nepovratni toplinski gubici koje je nemoguće u potpunosti spriječiti zbog nepovrativosti u termodinamičkim procesima. O tome kako poboljšati stupanj djelovanja parnoturbinskog postrojenja biti će riječi u potpoglavlju 2.1.5.



Slika 5. Dijagram toplinskih tokova termoenergetskog postrojenja [8]

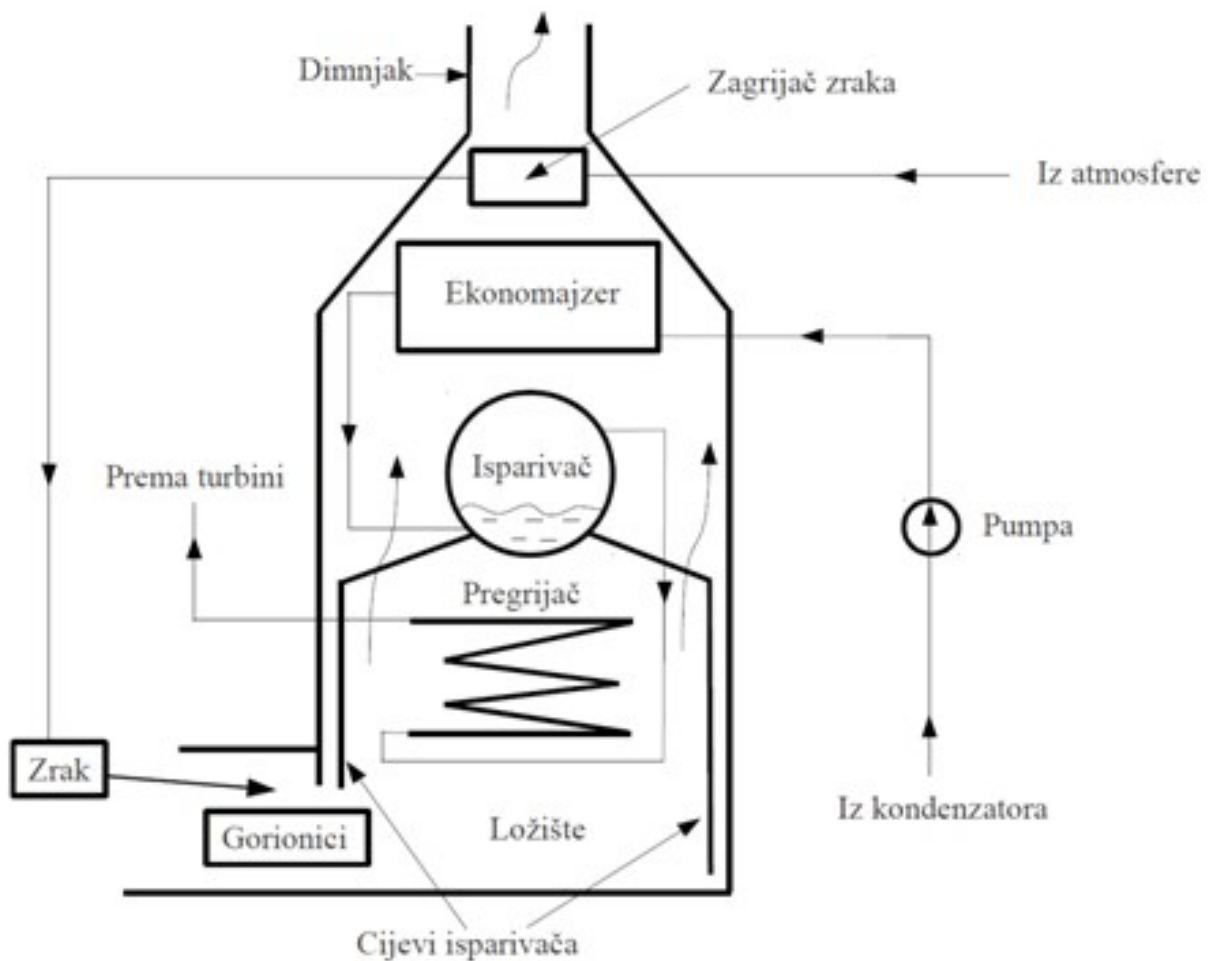
## 2.2. Osnovni sustavi parne elektrane

### 2.2.1. Generator pare

Parni kotao ili generator pare je jedan od najvažnijih uređaja parnoturbinskog postrojenja. U njemu se proizvodi para adekvatnih parametara za potrebe rada parne turbine. S obzirom da je turbina projektirana da isporučuje određenu snagu potrebni su i projektni parametri pare da bi se ta snaga i ostvarila. Kako je već spomenuto u uvodnom dijelu, u generatoru pare dolazi do prijenosa toplinske energije plinova izgaranja, iz ložišta gdje se događa brza oksidacija (izgaranje) ugljene prašine, prema vodenoj pari koja se nalazi u cijevima koje su smještene na vrhu ložišta.

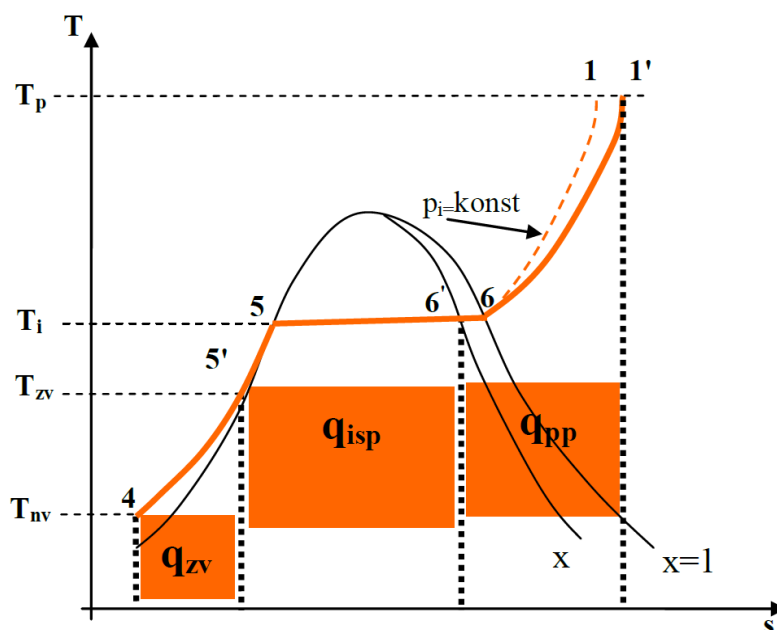
Dimni plinovi opstrujavaju oko tih cijevi i prenose toplinu na cijevi putem konvekcije i

zračenja. Toplina se dalje prenosi kroz stijenku cijevi prema vodenoj pari putem provođenja i konvekcije.



Slika 6. Okvirna shema generatora pare [4]

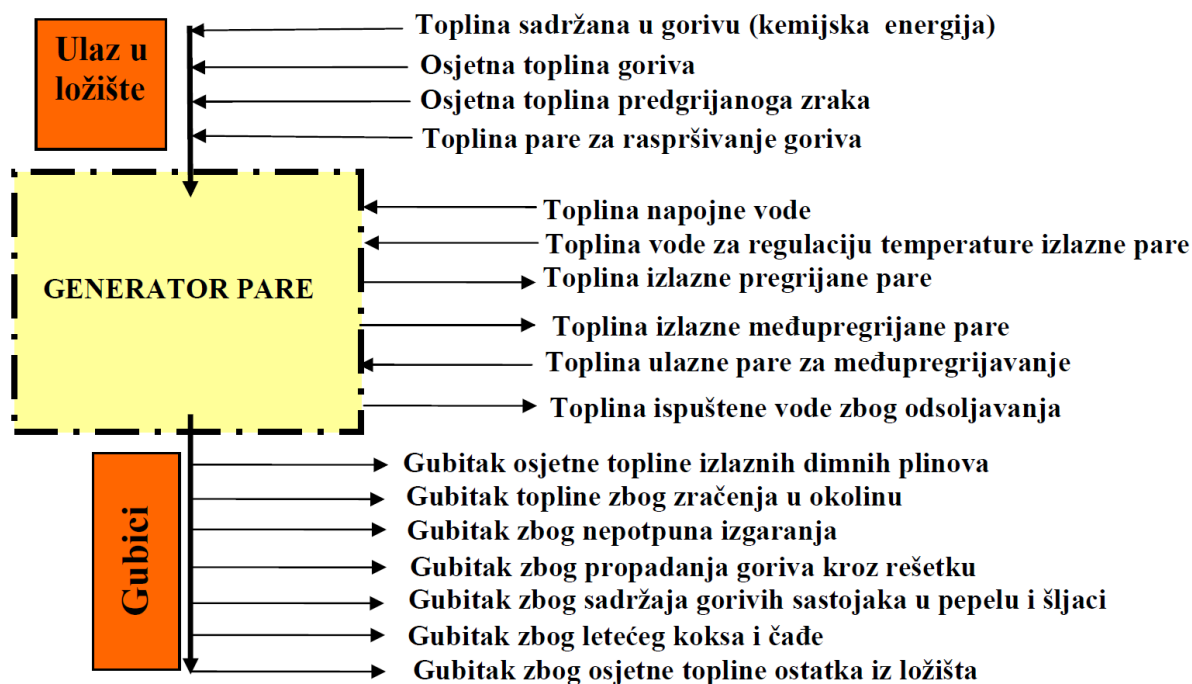
Slika 6. prikazuje okvirnu shemu generatora pare. Prema toj slici vidljivo je da je put vode-pare u biti zatvoreni krug, iz ložišta gdje se događa izgaranje goriva (kruto, tekuće ili plinovito) gdje se vodena para preko isparivača i pregrijača kreće prema turbini i nakon ekspanzije ulazi u kondenzator nakon kojega napojna pumpa tjera ukapljenu vrelu kapljevину u zagrijač napojne vode (ekonomajzer) gdje opet dolazi u isparivač.



Slika 7. Prikaz toplina generatora pare predanih pojedinim uređajima [13]

Slika 7. pokazuje gdje najviše topline odlazi iz generatora pare: u isparivaču se voda pretvara u vodenu paru a u pregrijaču se ta para pregrijava u temperaturu veću od suhozasićene pare (područje pregrijane pare do maksimalno 560 °C). Ekonomajzer služi za zagrijavanje napojne vode do stanja vrele kapljevine a koristi se toplinom pare oduzete turbini koja se prenosi indirektnim izmjenjivačem ili je smješten u dimovodnom dijelu kotla nakon pregrijača pare. Zagrijač zraka ugrijava zrak iz atmosfere prije ulaska u ložište pa se tako smanjuje potrošnja goriva odnosno gubici [4].





Slika 8. Toplinski tokovi generatora pare [13]

Prema slici 8. vidljivo je da je generator pare složen uređaj u kojemu struje topline iz više izvora i smjerova, pa kao svaki toplinski uređaj ima gubitaka.

Stupanj korisnosti generatora pare kreće se od 0,90 do 0,94 [5].

### 2.2.2. Parna turbina

Parna turbina je termodinamički stroj u kojemu se toplinska energija sadržana u vodenoj pari pretvara u kinetičku energiju strujanja pare te potom u mehanički rad (vrtnju rotora).

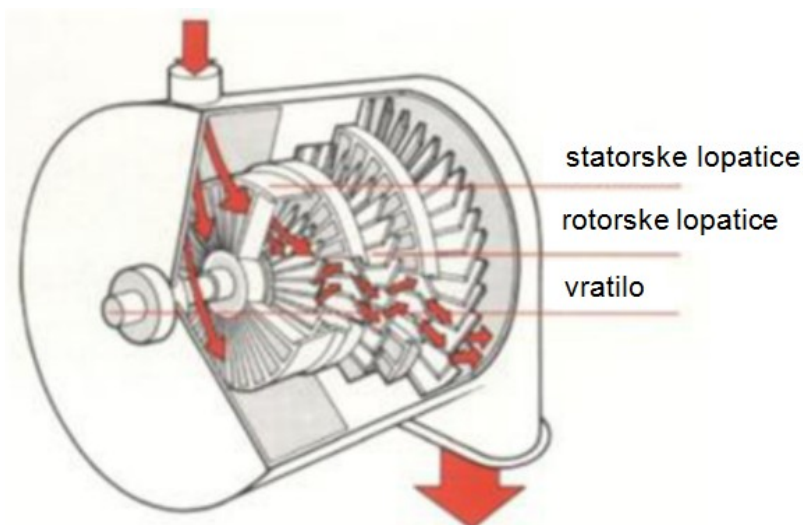
U svjetskim termoelektranama su snage turbina dostigle 1300 MW [6].

Turbine se mogu podijeliti na parne, vodene, plinske i zračne. Osnovna je razlika u radnom mediju što ih pokreće.

U nastavku objašnjen je princip rada parne turbine.

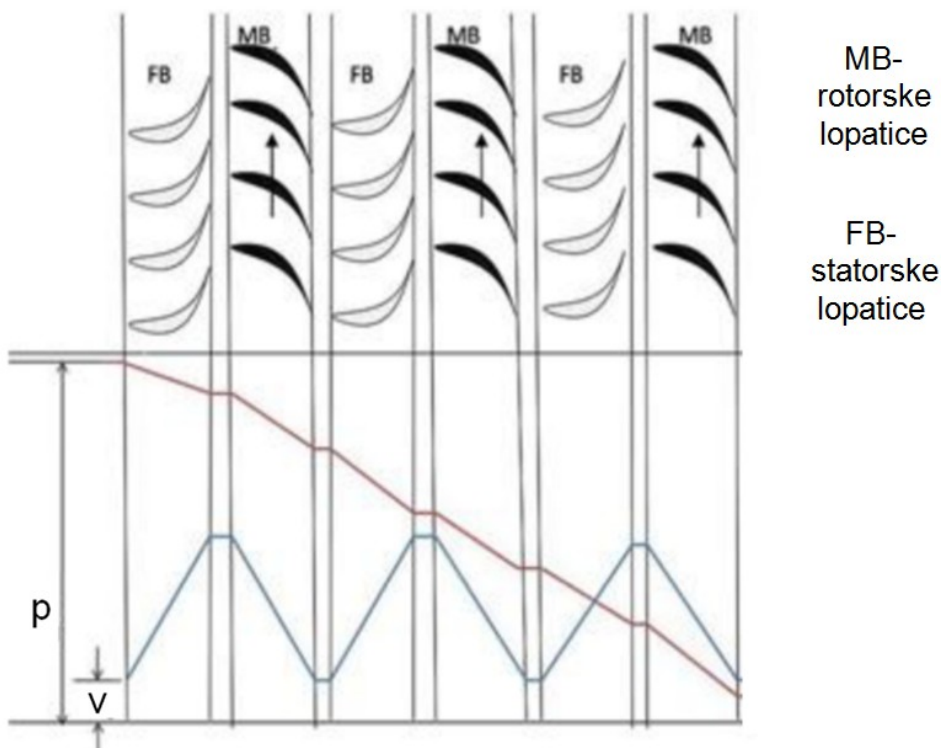
Osnovni dijelovi u kućištu parne turbine su statorske i rotorske lopatice. Statorske lopatice su nepomične, smještene u kućištu turbine. Rotorske lopatice su pomične jer su smještene na rotoru. Para nastrojava iz statorskih lopatica (slika 9.) na rotorske lopatice kojima predaje svoju kinetičku energiju te se tako stvara okretni moment na

rotoru turbine. Ovaj proces između jednog para statorskih i rotorskih lopatica nazivamo pretvorbom energije u stupnju turbine.



Slika 9. Strujanje pare kroz statorske i rotorske lopatice turbine [7]

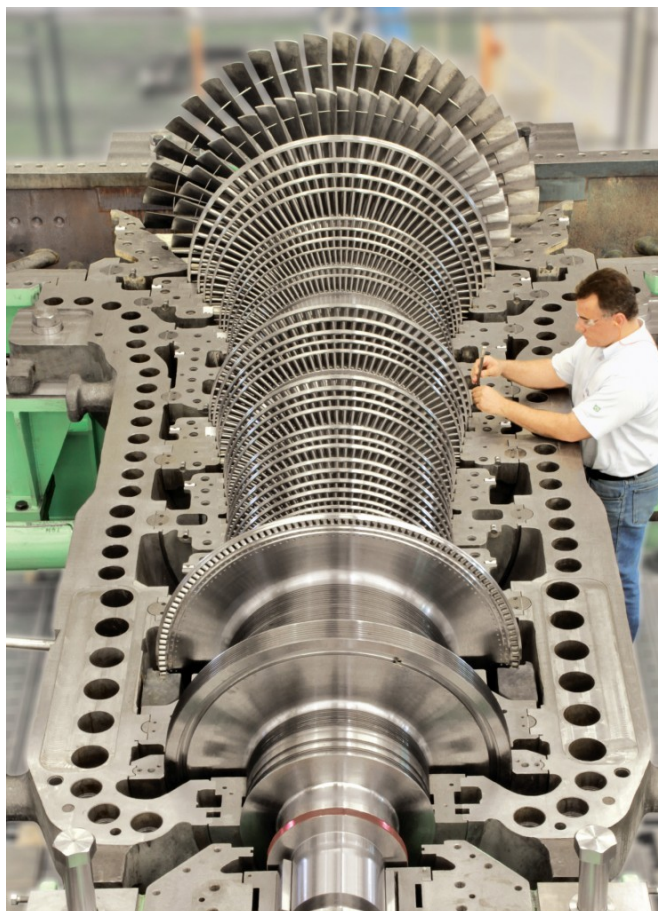
Dakle u statoru se toplinska energija pretvara u kinetičku energiju a u rotoru se kinetička energija pretvara u mehanički rad. Kod turbina sa više stupjeva izlazni parametri pare prethodnog stupnja su ulazni parametri u slijedeći stupanj turbine [4].



Slika 10. Prikaz strujanja pare kroz tri stupnja parne turbine [7]

Na slici 10. prikazani su profili statorskih i rotorskih lopatica u parnoj turbini, a ispod njih je graf brzina i tlakova pare kroz tri stupnja turbine.

Vidljivo je da brzina pare skokovito mijenja smjer (prijelaz iz statorskih u rotorske lopatice naizmjenice) ali po apsolutnim vrijednostima ne i iznos, a na samom prelasku iz statora u rotor para miruje dok joj put prema rotoru ne otvori brzozatvarajući ventil. Dok tlak pare, prilikom prelaska iz jednog stupnja u drugi, polagano pada. To znači da se gubi entalpija pare odnosno da je para predala energiju na vratilo turbine.



Slika 11. Otvoreno kućište parne turbine [4]

Na slici 11. vidi se rotor parne turbine jer je otvoreno kućište turbine radi remonta. U nastavku predložen je primjer za usporedbu koliko je energija vodene pare sa adekvatnim parametrima u parnoj turbini nadmoćna u odnosu na energiju vode koja se koristi u hidroelektranama:

"Sadržaj energije vode kod hidrauličkih turbina određen je naporom  $hu$  (razlika u visini gornjeg i donjeg spremnika, umanjena za gubitke trenja). Tako za maksimalni napor (2500 m) dobijemo specifični rad  $w = 24,5$  kJ/kg. Takav specifičan rad može se obraditi u stupnju hidrauličke turbine."

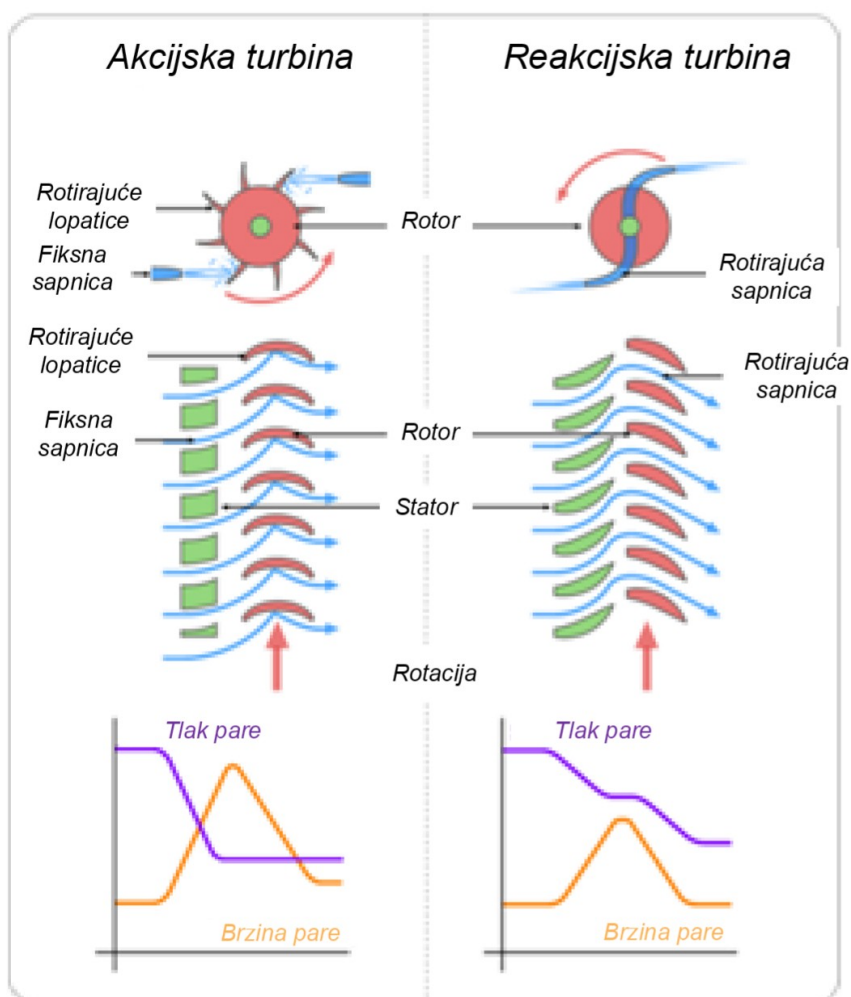
"Za razliku od vode, specifični rad pare je iznimno velik. Ako para ekspandira u turbini sa tlaka:  $p = 3,5 \text{ MPa}$ ,  $T = 600 \text{ °C}$ ,  $h_1 = 3678,4 \text{ kJ/kg}$ , na tlak:  $p = 5 \text{ kPa}$ ,  $h_2 = 2270 \text{ kJ/kg}$ , tada je specifični rad (specifična energija)  $w = h_1 - h_2$ ,  $w = 1408,4 \text{ kJ/kg}$  (cca. 57 puta više u odnosu na hidrauličke turbine)." <sup>1</sup>

Kako je već spomenuto, u parnoj turbini energija pare mijenja svoj oblik, i to iz toplinskog u kinetički. Pa prema mjestu i načinu pretvorbe energije, parne turbine možemo podijeliti na akcijske i reakcijske [5].

"Vijenac statorskih i rotorskih lopatica čini jedan stupanj turbine (1S + 1R). U akcijskom stupnju para ekspandira samo u statorskim lopaticama. Danas se više ne proizvode čisto akcijski stupnjevi, već akcijski stupnjevi sa malim postotkom reakcije, što znači da para djelomično ekspandira i u rotorskim lopaticama. U reakcijskom stupnju su statorske lopatice ugrađene direktno u kućište, a rotorske su lopatice ugrađene direktno u vratilo (bubanj)." <sup>2</sup>

Prema načinu i mjestu odvodnje pare iz turbine razlikujemo kondenzacijske (TE Plomin 2), protutlačne i kondenzacijske s oduzimanjem pare (termoelektrane-toplane). Kod kondenzacijske turbine para izlazi u kondenzator u kojemu vlada podtlak dok kod protutlačne para izlazi pod tlakom većim od atmosferskog te se koristi za pogon manjih turbina ili za opskrbu toplinskom energijom [5].

Na slici 12. prikazani su dijagrami brzine i tlaka strujanja pare kroz akcijsku i reakcijsku turbinu kao i način strujanja pare.



Slika 12. Prikaz strujanja pare kroz jedan stupanj akcijske i reakcijske turbine [14]

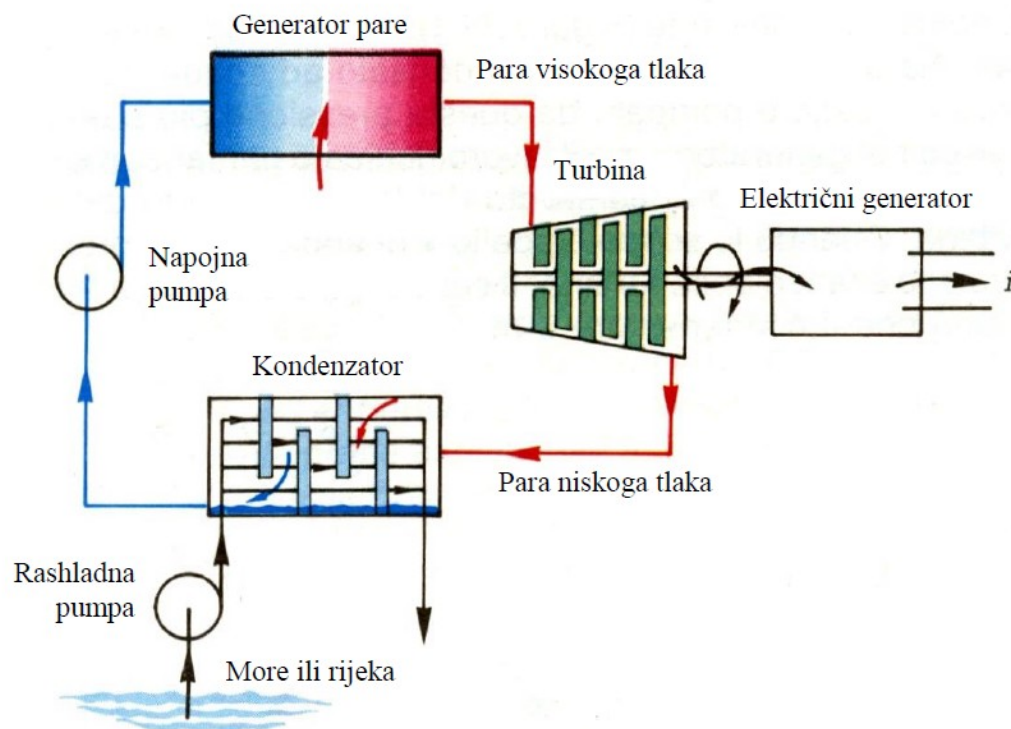
(<sup>1</sup> Citat : Mrzljak V.: Predavanja- Toplinski strojevi i uređaji 2, Tehnički fakultet Rijeka, 2022.)

(<sup>2</sup> Citat : Branko Staniša: Energetska postrojenja, Tehnički fakultet Rijeka, 2000.)

## 2.2.3. Kondenzator

Kao bitni element u termoenergetskom postrojenju- parnoj elektrani, kondenzator ima funkciju izmjenjivača topline. Potrebno je potrošenu paru sa zadnjeg stupnja turbine ukapljiti kako bi se napojnom pumpom ona vratila u generator pare za ponovni ciklus. (slika 13.)

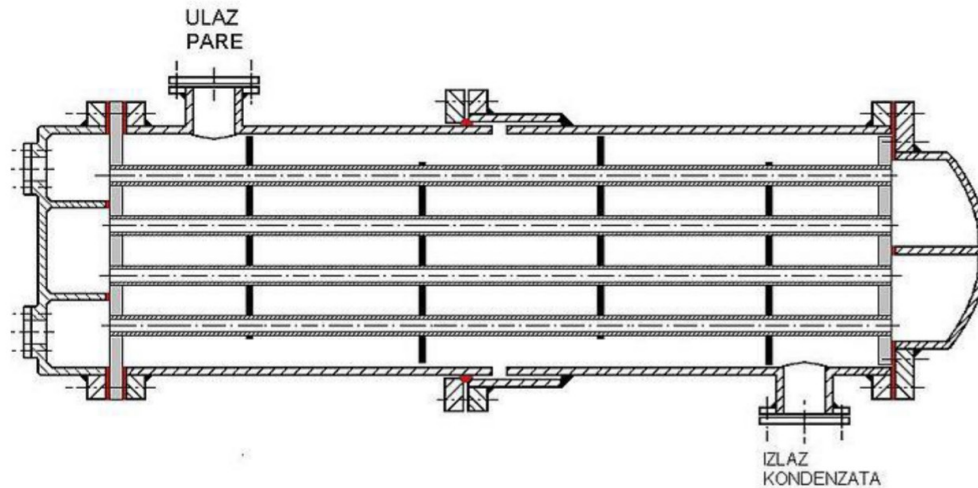
Kondenzator se sastoji iz velikog broja cijevi u kojima struji morska voda znatno niže temperature od temperature pare a oko cijevi struji para iz turbine. Para predaje toplinu vodi, snizuje joj se znatno tlak (manji od atmosferskog) i povećava gustoća te se na taj način pretvara u tekuću vodu.



Slika 13. Shematski prikaz strujanja vode-pare kroz parnoturbinsko postrojenje [4]



Da bi se postigao što veći termodinamički stupanj djelovanja para se ukapljuje na što nižem tlaku odnosno želi se postići što veća razlika entalpija između pare na ulazu u turbinu i pare u kondenzatoru. Na slici 14. prikazan je kondenzator u presjeku.



Slika 14. Jednostavni prikaz kondenzatora u presjeku [12]

Zadaci kondenzatora su: snižavanje tlaka pare sa zadnjeg stupnja turbine i kondenziranje u tekuću vodu, rekuperiranje topline pare, odvajanje plinova iz kondenzirane pare [4].

Što je veći protok rashladne vode kroz kondenzator veće je odvođenje topline pari je i manja razlika u temperaturi rashladne vode između ulaza i izlaza iz kondenzatora što je važno radi očuvanja prirodne ravnoteže u vodi izvora.

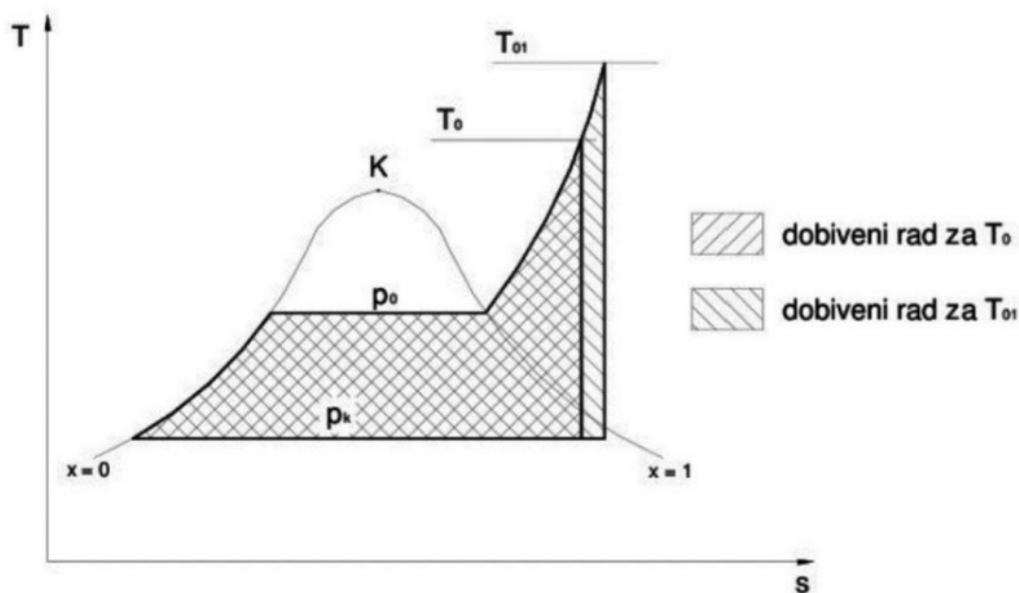
### 2.3. Mogućnosti poboljšavanja stupnja djelovanja parnog procesa u elektrani

Postoji pet mogućnosti poboljšavanja korisnosti odnosno stupnja djelovanja parnog procesa a to su:

#### 1. Podizanjem temperature svježoj pregrijanoj pari

Podizanjem temperature svježoj pregrijanoj pari povećava se razlika entalpija radnog medija i samim time dobiva se veći rad na turbini i termodinamički stupanj djelovanja procesa. Na slici 15. prikazan je T-s dijagram na kojem se vidi povećanje korisnog rada kao posljedica posljedica podizanja temperature pari.

Taj postupak ima svoje granice. Temperaturu pare na ulazu u turbinu ograničavaju primijenjeni materijali (maksimalne temperature su 540 . 560 °C) [8].



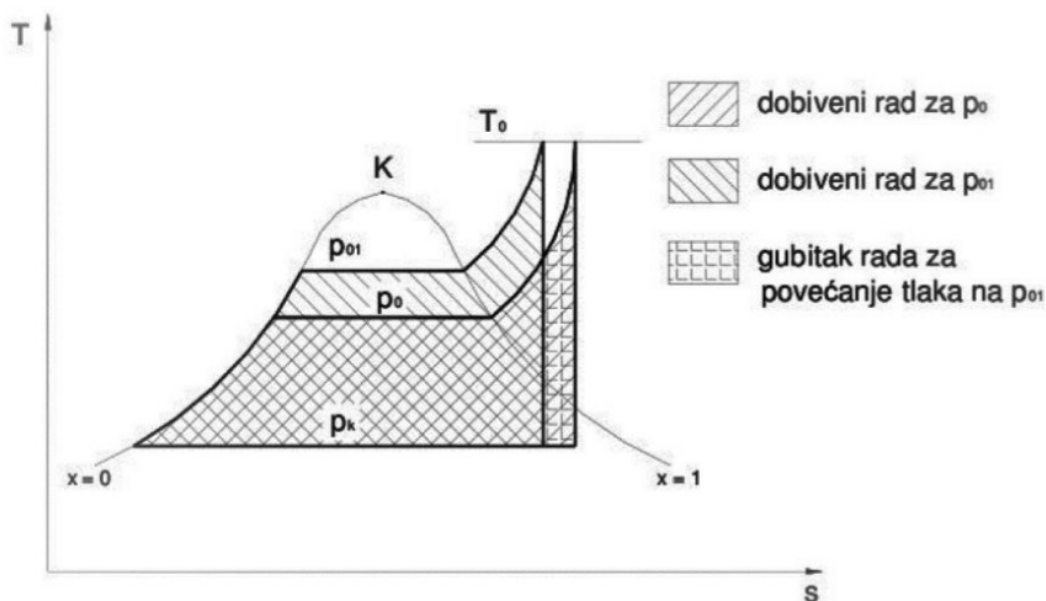
Slika 15. T-s dijagram podizanja temperature svježeg pare [8]

Ovom se metodom smanjuju toplinski gubici u procesu. Razlog tome leži u činjenici da dolazi do smanjenja vlažnosti pare na izlaznim stupnjevima turbine. Isto tako pružuje se životni vijek lopaticama turbine zbog manje vlage u pari.



## 2. Podizanjem tlaka svježoj pregrijanoj pari

Ovim se načinom također povećava temperatura radnog medija što ima za posljedicu povećanje termodinamičkog stupnja djelovanja procesa ali kako se na slici 16. vidi javljaju se gubici u radu radi povećanja vlažnosti radnog medija na zadnjim stupnjevima turbine pa je potrebno uz povećanje tlaka povećati i temperaturu radnog medija.

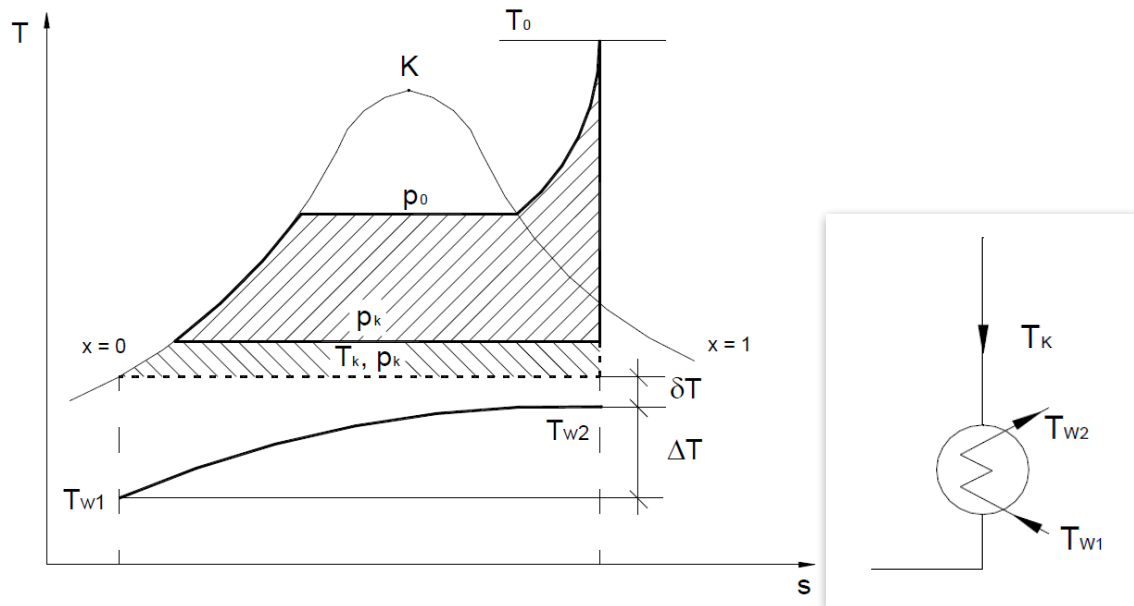


Slika 16. T-s dijagram podizanja tlaka svježe pare [8]

## 3. Spuštanjem tlaka u kondenzatoru

Spuštanjem tlaka u kondenzatoru postiže se veća razlika entalpija radnog medija. Na ovaj se način povećava rad turbine a samim time i stupanj djelovanja termodinamičkog procesa.

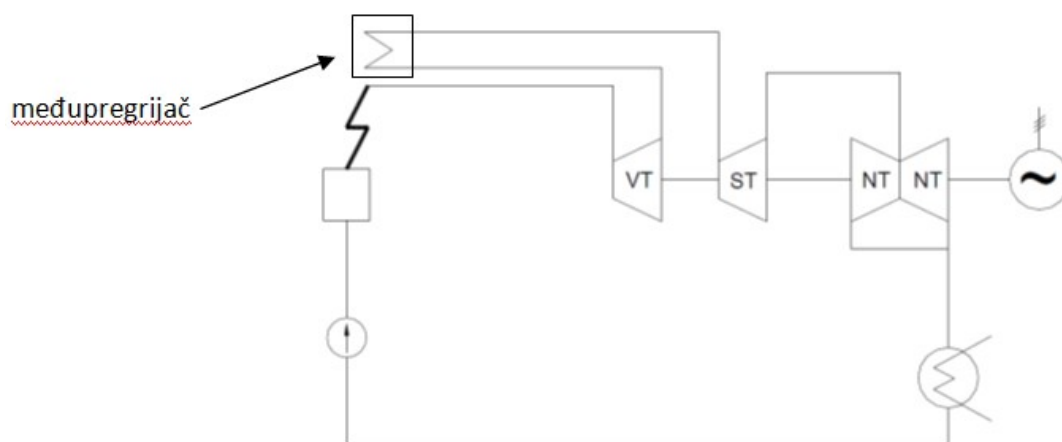
Prema slici 17. vidljivo je povećanje rada procesa i da se para u indirektnom susretu sa rashladnom vodom pretvara u vodu (proces kondenzacije pri konstantnom tlaku i temperaturi)



Slika 17. T-s dijagram snižavanja tlaka u kondenzatoru [8]

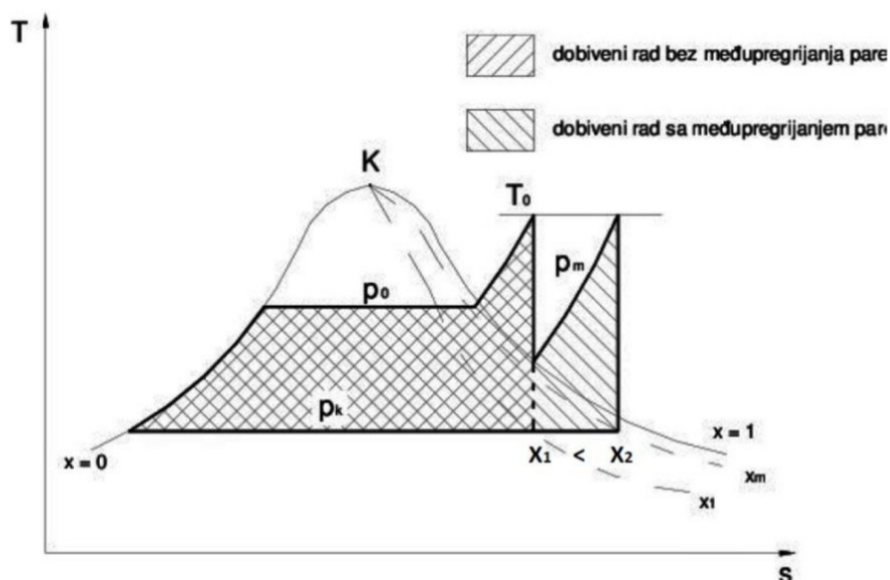
#### 4. Međupregrijavanjem pare

Kada para preda kinetičku energiju visokotlačnom dijelu turbine, odvodi se u međupregrijač (kao što je prikazano na slici 18.) gdje se para pregrijava te ulazi sa novim parametrima u srednjetačnu turbinu. Ovim se načinom smanjuje vlažnost pare i povećava entalpija kao i stupanj djelovanja.



Slika 18. Shematski prikaz parnoturbinskog postrojenja sa pregrijačem pare [8]

Na slici 19. prikazan je T-s dijagram na kojem se vidi povećanje korisnog rada kao posljedica međupregrijavanja pare.



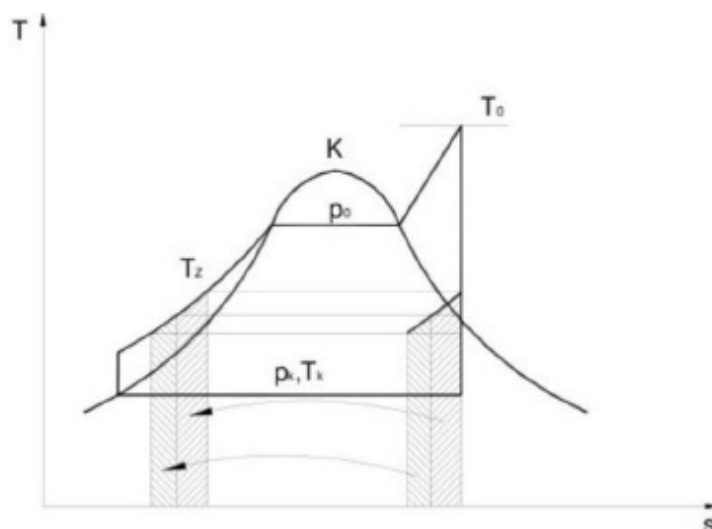
Slika 19. T-s dijagram međupregrijavanja pare [8]

##### 5. Regenerativnim zagrijavanjem kondenzata (napojne vode)

Kako bi se smanjili gubici u procesu, jedan se dio pare oduzima turbini za potrebe zagrijavanja napojne vode. Predaja topline može se vršiti direktno, miješanjem pare i vode (otvoreni zagrijači napojne vode) ili indirektno (zatvoreni zagrijači napojne vode), izmjenom topline između pare i vode kroz stijenku cijevi. Tako nastaje vrela kapljevina koja odlazi u generator pare [8].

Na slici 20. prikazan je T-s dijagram na kojem se vidi povećanje korisnog rada kao posljedica regenerativnog zagrijavanja kondenzata.

U tim se izvedbama kondenzat ugrije pa je manje topline potrebno u generatoru pare za postizanje potrebnih parametara (povišenje srednje temperature) za ulaz u turbinu [8].



Slika 20. T-s dijagram regenerativnih zagrijača napojne vode [8]

Postoji problem na zadnjim stupnjevima turbine kada su se pari snizili tlak i temperatura jer je predala kinetičku energiju na lopatice turbine i tada dolazi do povećanja gustoće radnog medija odnosno smanjenja specifičnog volumena. To je tzv. mokra para odnosno para koja ima više udjela vode u sebi i ta voda čini štetu na lopaticama turbine (erozija lopatica). Slika 21. prikazuje eroziju lopatica na zadnjem stupnju turbine. Na slici se jasno vide oštećenja koja su nastala tijekom eksploatacije turbine.



Slika 21. Erozija lopatica na zadnjem stupnju turbine [5]

Tome se doskače međupregrijavanjem pare između visokotlačnog i srednjetačnog stupnja turbine jer je cilj imati suhozasićenu paru koja ne oštećuje toliko lopatice turbine i koja ima veću entalpiju radi postizanja većeg rada odnosno stupnja djelovanja. Problemu se doskače i posebnom zaštitom lopatica zadnjeg stupnja turbine gdje se povećava površinska tvrdoća odnosno otpornost na habanje. Čim smo postigli veći stupanj djelovanje procesa (više dobivamo u odnosu na ono što ulažemo u proces) logično smanjujemo potrošnju goriva i manje su emisije dimnih plinova.

### 3. Termoelektrana Plomin

#### 3.1. Povijest nastanka i razvitka elektrane

Odluka da se TE Plomin 2 izgradi donesena je 1984. godine a u srpnju 1985. godine potpisan je ugovor sa zajednicom domaćih izvođača "INGRA" i ubrzo se krenulo sa izgradnjom elektrane u kojoj su sudjelovale tvrtke iz tadašnje Jugoslavije: "Rijeka-gradnja", "Đuro Đaković", "Metalna" Ljubljana, "Jugoturbina" Karlovac, "Končar" Zagreb. HEP i njemačka elektro- energetska tvrtka RWE Energie iz Essena osnovali su 1996. godine TE Plomin d. o. o. zajedničko mješovito društvo za dovršetak i eksploataciju elektrane Plomin 2. Iste godine TE Plomin 2 sklapa ugovor s konzorcijem tvrtki "AEE Austrian Energy & Environment" iz Graza, "Siemens" iz Njemačke i "Đuro Đaković" iz Slavonskog Broda za nastavak gradnje TE Plomin 2. Elektrana je dovršena 1999. godine. Parna turbina potiče od proizvođača "ABB-Tvornica parnih turbina" Karlovac snage 210 MW a generator je proizveden u "Končaru" Zagreb [7].

"Generator je trofazni, dvopolni, hlađen vodikom, sinkroni, nazivne snage 247 MVA, faktora snage od 0,85 i napona od 13,8 kV. Proizvedena se električna energija predaje u 220 kV mrežu preko blok- transformatora od 13,8/240 kV [7].

Blok je po prvi puta sinkroniziran 14.9.1999. godine a svečano je pušten u rad 2.12.1999. godine. TE Plomin d. o. o. je kao investitor preuzeo elektranu od izvođača radova 13.5.2000. godine a komercijalna proizvodnja bloka počela je 21.5.2000. godine." <sup>3</sup>

(<sup>3</sup> Citat: Kranjac R., specijalistički diplomski rad "Analiza opravdanosti retrofita turbine 210 MW TE Plomin blok 2", Politehnika Pula, 2014.)

### 3.2. Značajke termoelektrane Plomin

S obzirom na povoljnu lokaciju za dobavu tehnološke vode za proizvodnju pare (voda izvora Bubić jame koja se demineralizira) i morske vode potrebne za kondenzaciju pare te mogućnosti dobave ugljena brodom a i cestovnom povezanošću termoelektrana Plomin (slika 22.) izgrađena je u Plominskom zaljevu i jedina je aktivna termoelektrana na ugljen u Hrvatskoj [1].

Kolika je državna važnost TE Plomin 2 govori podatak da ova elektrana proizvodi oko 12 % od ukupno proizvedene električne energije u Hrvatskoj [2].



Slika 22. Termoelektrana Plomin 2 [9]

"Postrojenje TE Plomin kondenzacijska je termoelektrana koja se sastoji od dvije proizvodne jedinice Bloka A i Bloka B koje imaju svaka svoj kotao i po jednu parnu turbinu. Blok A odnosno TE Plomin 1 snage 125 MW proizvodila je električnu energiju od 1969. do 2018. godine kada je prestalo je važiti Rješenje o objedinjenim uvjetima zaštite okoliša (Okolišna dozvola), tako da je danas u pogonu jedino blok B odnosno TE Plomin 2."<sup>4</sup>

U TE Plomin 1 ugrađen je generator pare proizvođača Sulzer sa 16 plamenika. Postižu se parametri pare: Temperatura 535°C i tlak 135 bar. Kapacitet generatora



pare je 385 t/h svježe pare. Kao gorivo za pogon elektrane koristio se kameni ugljen kao i kod TE Plomin 2 danas. Turbina TE Plomin 1 proizvedena je po engleskoj licenci. Radi se o akcijskoj turbini, koja sadrži tri odvojena kućišta. Ima šest nereguliranih oduzimanja pare. Elektrogenerator marke Dolmel proizveden je u Poljskoj. Nazivna snaga elektrogeneratora je 150 MVA, napona 13,8 kV te faktora snage 0,8. Elektrogenerator je spojen direktno na blok-transformator od 13,8/121 kV [7].

Para se oduzima turbini kako bi se putem regenerativnih zagrijača napojne vode povisila temperatura vodi prije ulaska u generator pare. Time se povećava stupanj korisnosti termodinamičkog procesa. Ovaj proces će biti opisan na primjeru TE Plomin 2 u potpoglavlju 3.2.1.

Ponovno pokretanje rada termoelektrane Plomin 1 zbog energetske krize u Europi, predmet je rasprave ovih dana. S obzirom da je Plomin 1 prekinuo s radom zbog nedopuštenih vrijednosti dimnih plinova kao posljedica izgaranja ugljena, u medijima se spominje korištenje odvojenog komunalnog otpada i/ili bio-mase koji bi se koristio kao gorivo za dobivanje potrebnih parametara pare za pogon turbine.

"Blok B odnosno TE Plomin 2 snage 210 MW počela je s radom 2000.godine. Postrojenje je izgradilo društvo TE Plomin d.o.o., u vlasništvu 50% HEP d.d. i 50% RWE, Njemačka. S danom 1. kolovoza 2017. godine društvo TE Plomin d.o.o. pripojeno je HEP-u d.d., a poslovanje se nastavlja u okviru društva HEP – Proizvodnje d.o.o." <sup>4</sup>

Godine 2017. retrofitom niskotlačnog dijela turbine od strane tvrtke Alstom, nominalna snaga turbine TE Plomin 2 povećana je na 217 MW. Predstavnici elektrane, HEP TE Plomin, uzevši u obzir cijenu investicije, prihvatili su ponudu za retrofit niskotlačnog dijela turbine (povećanje snage za 2,9 %) s obzirom da je više snage donosio u odnosu na srednjetačni i visokotlačni dio turbine u retrofitu (povećanje snage za 1,76 %). Cijena retrofita turbine bila je oko 70 000 000 kuna što je prema proračunu inženjera TE Plomin 2 isplativo unutar 3 godine rada [7].

Glavni pogonski objekti, kotao i zgrada strojarnice izgrađeni su u nastavku Bloka 1. Svi ostali objekti osim pumpne stanice rashladne morske vode, luke za dovoz ugljena i deponija pepela, nalaze se unutar ograđenog prostora elektrane [9].

Ispust plinova izgaranja iz elektrane ide kroz 340 m visok dimnjak (najviša građevina u Hrvatskoj) od armiranog betona unutar kojeg se nalazi šamotna dimovodna cijev.

Nadalje, na prostoru elektrane postoje sustavi tehnološke vode, sustav pomoćnog goriva te sustavi obrade oborinskih i sanitarnih i otpadnih tehnoloških voda [10].

Instalirani su i low-NO<sub>x</sub> plamenici, uređaj za odsumporavanje (mokri postupak s vapnencem, tzv. DeSO<sub>x</sub>) i elektrostatski filter. Gips koji se dobije kao proizvod mokrog postupka odsumporavanja s vapnencem zbrinjava tvrtka Holcim d.o.o. Koromačno za potrebe proizvodnje cementa [10].

O ovim sustavima biti će riječ pri kraju ovoga rada.

(<sup>4</sup> Citat : HEP Proizvodnja d.o.o., Proizvodnja električne i toplinske energije, 2016. )

### 3.2.1. Opis rada termoenergetskog postrojenja TE Plomin 2

Ova termoelektrana ima visokotlačnu, srednjetačnu i niskotlačnu turbinu. Visokotlačna i srednjetačna turbina smještene zrcalno na istom vratilu, ležajevi (oslonci) nalaze se prije visokotlačne turbine, između srednjetačne i niskotlačne i nakon niskotlačne turbine. Električni generator tvrtke Končar nalazi se na kraju lanca prijenosa energije u ovom sustavu odnosno spojen je sa niskotlačnim dijelom turbine kao što je prikazano na slici 23 [11].



Slika 23. Spoj turbine i elektro-generatora (crveno kućište) [autor]



Nakon što je predala kinetičku energiju turbini, para se odvodi do kondenzatora. Sklop kondenzatora se sastoji od velikog broja cijevi da bi se dobila velika površina izmjene topline u ovom indirektnom izmjenjivaču topline. U cijevima struji morska voda velikog protoka ( $8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i temperature znatno niže od temperature pare a oko cijevi opstrujava para koje je ekspandirala na posljednjem stupnju turbine. Temperatura mora ovisi o godišnjem dobu. O tome će detaljnije biti opisano u poglavlju 3.7.

U kondenzatoru se vakuumskim pumpama odsisavaju svi plinovi (zrak, ugljični dioksid, dušik, kisik). Para se ukapljuje pod niskim tlakom (4,6 kPa).

Termoelektrana ima dva regenerativna visokotlačna zagrijača napojne vode, jedan otplinjač i četiri regenerativna niskotlačna indirektna izmjenjivača.

Kondenzat se uz pomoć kondenzatnih pumpi odvodi kroz četiri niskotlačna regenerativna zagrijača, gdje se toplina pare oduzeta niskotlačnoj i srednjetačnoj (samo četvrti zagrijač) turbini prenosi na kondenzat. Dolazi do porasta temperature napojne vode. Radni se medij usmjerava u spremnik napojne vode a potom kroz dvije pumpe napojne vode (slika 24.). Napojne pumpe podižu tlak napojnoj vodi na 188 bar [11].

O svim tim procesima biti će riječi u nastavku rada.

Slika 24. prikazuje 3 napojne pumpe (od kojih je jedna u rezervi). Radi se o pumpama pogonjenim asinkronim motorima snage 4100 kW [9].



Slika 24. Tri napojne pumpe u elektrani [autor]

Radni se medij usmjerava kroz otplinjač koji toplinu dobiva od oduzimanja pare na srednjetačnoj turbini te kroz dva visokotlačna regenerativna zagrijača (slika 25.).

Prvi zagrijač toplinu dobiva od oduzimanja pare srednjetačnoj turbini, dok drugi zagrijač toplinu dobiva od oduzimanja pare visokotlačnoj turbini. Dolazi do porasta temperature pari na  $250^{\circ}\text{C}$ .

U pregrijaču pare unutar kotla, radni medij se dodatno zagrijava i to na temperaturu od  $530^{\circ}\text{C}$  čime prelazi u stanje suhozasićene (pregrijane) pare koja potom ulazi u turbinu. Cilj upotrebe svih zagrijača pare u postrojenju je smanjenje toplinskih gubitaka u kružnom termodinamičkom ciklusu, te se na taj način povećava ukupna korisnost postrojenja.



Slika 25. Visokotlačni regenerativni zagrijači napojne vode [autor]

Na iduće dvije slike (slika 26. i slika 27.), radi lakšeg razumijevanja ovog složenog termoenergetskog sustava, prikazan je pojednostavljeni (shematski) prikaz cjelokupnog postrojenja. U nastavku rada biti će objašnjene funkcije najvažnijih uređaja u elektrani.







### 3.3. Pogonsko gorivo elektrane

Kao gorivo u termoelektrani koristi se kameni ugljen s donjom ogrjevnom vrijednosti od 24 do 29,3 MJ/kg i sadržajem sumpora od 0,3 do 1,4 %. Elektrana je prvotno bila projektirana da koristi ugljen iz raških ugljenokopa ali se gašenjem rudnika Tupljaka 1999.godine prešlo na uvozni ugljen. Slika 28. prikazuje Plominski zaljev kroz kojeg se dovoze brodovi u pristan, luku posebne namjene Plomin za istovar ugljena.



Slika 28. Istovar ugljena s broda tipa "Panamax" [7]

Ugljen se doprema brodovima tipa "Panamax" nosivosti oko 65 000 tona do pristana, luke posebne namjene Plomin (pristanište dugo 210 m ) [7].



Slika 29. Zatvoreni pužni transporter ugljena na tračnicama u pristanu [autor]

Energent kameni ugljen nabavlja se na svjetskom tržištu (većinom iz Rusije). Iskrčavanje i prijenos ugljena vrši se uz pomoć zatvorenog pužnog transportera (slika 29.) koji se kreće po tračnicama u pristanu, te se otprema transportnim trakama (slika 30.) pred samu elektranu na deponiju ugljena (slika 31.). Deponija ugljena je kapaciteta 240 000 tona (godišnja potrošnja ugljena za potrebe TE Plomin 2 je oko 600 000 tona tj. oko 1700 tona dnevno).



Slika 30. Transportni sustav ugljena prema elektrani [autor]

Ugljen se transportira u ovim cijevima tj. transportnim trakama (slika 30.) elektromotornim pogonom uz pomoć reduktora i doprema se na veliko odlagalište pred samu elektranu ili u bunkere kotla. Granulacija dovezenog ugljena s broda je već mala ali se taj ugljen dodatno melje u ugljenu prašinu za potrebe kvalitetnog izgaranja u ložištu generatora pare. Nadalje postoje 4 uređaja tzv. dodavača koji doziraju ugljen u 4 mlina koji dalje ide u ložište [10].



Slika 31. Odlagalište ugljena pred elektranom [autor]



### 3.4. Voda iz izvora Bubić Jama

#### 3.4.1. Voda za tehnološke potrebe

Izvor vode Bubić Jama nalazi se u blizini termoelektrane. Ta se voda crpi pumpama koje vodu tlače do 84 metara nadmorske visine u dva rezervara sirove vode Sv. Matej ukupnog kapaciteta 500 m<sup>3</sup>. Potom se gravitacijskim cjevovodom (DN 200) voda spušta prema elektrani gdje se koristi za potrebe parnog postrojenja i u svrhu protupožarne zaštite. Spremnici sirove vode (slika 32.) su spojeni i na vodoopskrbni sustav grada Labina radi osiguravanja neometanog rada elektrane u svim uvjetima [10].



Slika 32. Spremnici sirove vode pred elektranom [autor]

#### 3.4.2. Kemijska priprema vode

U sklopu elektrane nalaze se dvije jedinice za kemijsku pripreme vode (KPV) kapaciteta 2x15 m<sup>3</sup>/h (slika 33.) i 2x25 m<sup>3</sup>/h (slika 32.). Voda se iz izvora Bubić Jama priprema za potrebe rada parnoturbinskog postrojenja putem potpune demineralizacije ionskom izmjenom.



Slika 33. Spremnici demineralizirane vode unutar elektrane [autor]

### 3.5. Dobivanje toplinske energije za potrebe rada elektrane



#### 3.5.1. Kotlovsko postrojenje

Proizvođač postrojenja generatora pare (slika 34.) je "Đuro Đaković", Slavonski Brod, po licenci Sulzer. Ugljen se iz bunkera kontinuirano dovodi u mlinove gdje se melje u ugljenu prašinu koja se uz pomoć zraka pod tlakom preko sapnica uvodi u ložište [9].

Već spomenuti sustav DeNO<sub>x</sub>-a zaslužan je za razine dušičnih oksida ispod graničnih vrijednosti. Kada plinovi izgaranja predaju toplinu po visini svim uređajima (isparivaču, pregrijaču pare, ekonomajzeru i predgrijaču zraka) tada se pročišćavaju (pepeo i neizgoreni sastojci plinova izgaranja) u elektrostatskom otprašivaču te se razina sumpornog dioksida snižava u sustavu DeSO<sub>2</sub>. Na kraju plinovi silom uzgona izlaze u atmosferu kroz dimnjak elektrane visok 340 m [9].

Slika 34. Postrojenje generatora pare TE Plomin 2 [autor]

U kotlu se nalaze cijevi različitih promjera i materijala ovisno u kojoj su zoni kotla smještene.

Otplinjač, ekonomajzer, pregrijač pare i međupregrijač čine sustav voda-para i to je sastavni dio protočnog generatora pare tipa Sulzer.

#### 3.5.2. Kotao

Jednocjevni protočni kotao s prisilnom cirkulacijom tipa Sulzer. Kotao ima 24 plamenika u šest ravnina. Stupanj djelovanja generatora pare: 92,9 %

Osnovni tehnički podaci kotla:

- proizvodnja svježe pare: 670 t/h
- tlak svježe pare: 145 bar
- temperatura svježe pare: 535 °C [10]





Na slici 35. vidi se ložište generatora pare TE Plomin 1. To postrojenje više nije u funkciji pa je zato bilo moguće slikati unutrašnjost generatora pare gdje se vide i cijevi preko kojih se pari predaje toplina potrebna za postizanje adekvatnih parametara.

Dok je Blok A (TE PLomin 1) bio u funkciji neki su objekti bili zajednički za oba bloka, kao što su sustav dopreme ugljena, postrojenje za obradu otpadnih voda, transport i deponij šljake i pepela kao nusprodukta izgaranja ugljena, dimnjak (visine 340 m), sustav rashladne morske vode (potrebne za kondenzator) te opskrba sirovom vodom iz lokalnog izvora Bubić jama [12].

Slika 35. Ložište generatora pare  
TE Plomin 1 [autor]

Kada je elektrana u remontu iz bilo kojeg razloga odnosno ne proizvodi struju, prekretni stroj (elektromotor) prikazan na slici 36., okreće turbinu sve dok temperatura kućišta turbine ne padne ispod 150 °C. Razlog tome je što su temperature cijelog turbinskog sklopa odnosno vratila tijekom normalnog rada tolike da bi zaustavljanjem turbine dovelo do savijanja vratila turbine. Nastale bi nepopravljive i velike ekonomske štete za cijelu elektranu. Najskuplji je tzv. hladni start elektrane (zastoj u radu od minimalno 3 dana) kada je za ponovno pokretanje proizvodnje potrebno utrošiti oko 50 tona ekstra lakog loživog ulja da bi ložište prešlo na kameni ugljen kao gorivo. Takvih hladnih startova godišnje ima u prosjeku 7-8.

Ekonomski i ekološki su blaže varijante starta rada elektrane kada su zastoji kraći od 3 dana, tada su procedure drugačije.

Na slici 36. prikazan je prekretni stroj turbine. To je elektromotor koji uz pomoć reduktora okreće turbinu za vrijeme zastoja u proizvodnji struje. On se nalazi na suprotnoj strani u odnosu na električni generator stoga se između nalazi turbina.



Slika 36. Prekretni stroj turbine [autor]

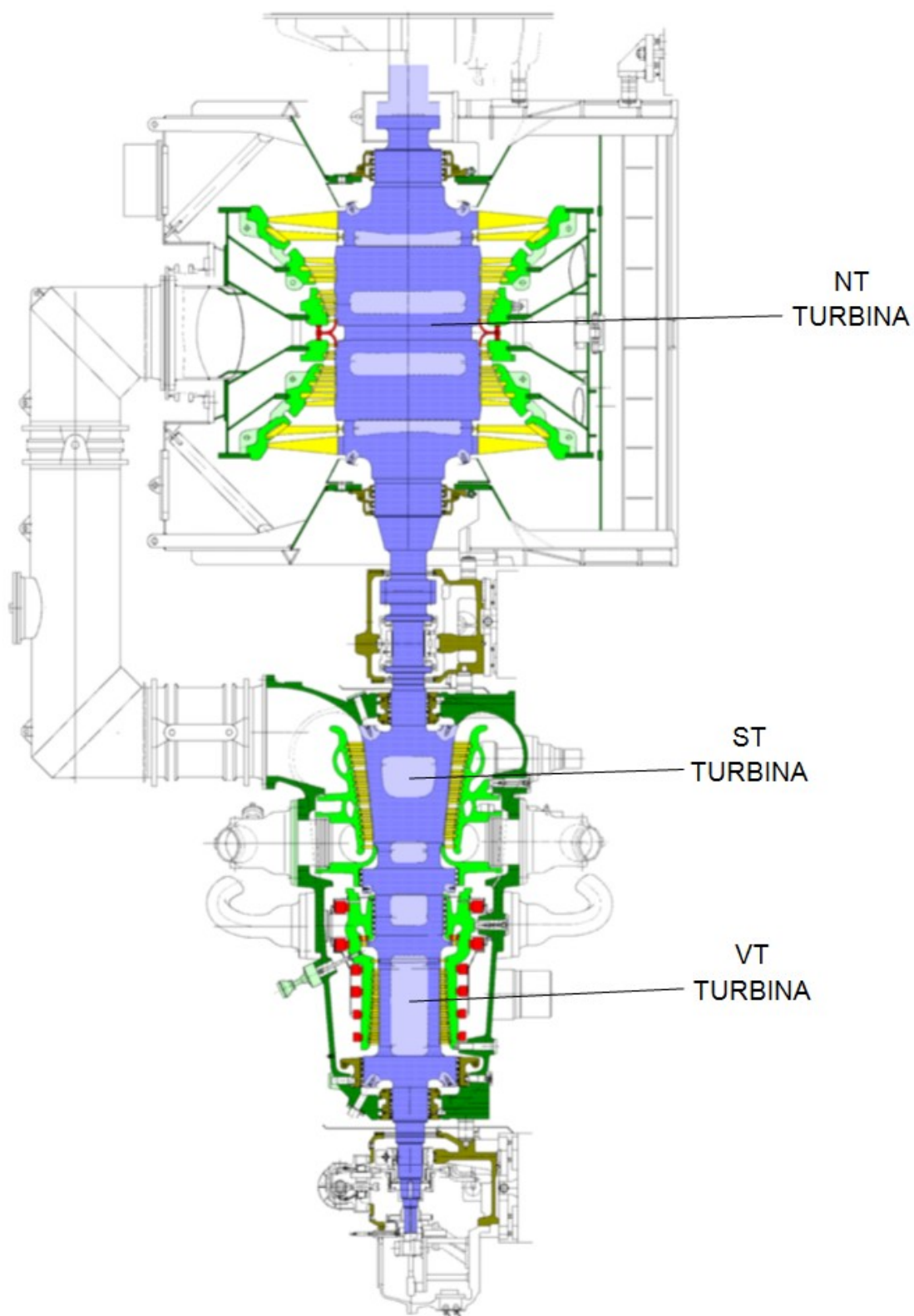
### 3.6. Turbina TE Plomin 2

#### 3.6.1. Opis i karakteristike turbine

Kondenzacijska turbina, s međupregrijanjem, proizvedena je u Tvornici parnih turbina – ABB Karlovac. Na slici 37. prikazano je turbinsko postrojenje TE Plomin 2. Turbina je dvokučišna, s kombiniranim visokotlačnim i srednjotlačnim kućištem te dvoizlaznim niskotlačnim kućištem, sa sedam nereguliranih oduzimanja.



Slika 37. Turbinsko postrojenje izvana [autor]



Slika 38. Uzdužni presjek turbine bloka 2 [7]

Kod turbine TE Plomin 2 ekspanzija se događa kroz čitav stupanj (kroz statorske i rotorske lopatice) pa se takva turbina naziva reakcijskom [7].

Slika 38. prikazuje uzdužni presjek turbine bloka B. Na toj se slici jasno vidi kako su odvojeni visokotlačni i srednjetačni dio turbine od niskotlačnog dijela, ali su na istom vratilu.

Snaga VT turbine iznosi 56 MW, ST turbine 71,8 MW i NT turbine 93,5 MW. (podaci iz postrojenja)

Najviše snage daje NT turbina iz više razloga: Površina lopatica u turbini je daleko veća od preostala dva stupnja turbine. Razlog tome je što je tlak u NT turbini puno niži (7,07 bar) i volumen pare puno veći naspram druga dva stupnja turbine, pa da bi se dobila sila na lopaticama rotora potrebna je veća površina lopatica. Drugi razlog veće snage NT turbine je utjecaj kondenzatora koji daje podtlak radnom mediju (usisava radni medij iz NT turbine) i time povećava snagu NT turbini. Nije ni zanemariv podatak da je upravo ovaj zadnji stupanj turbine bio podvrgnut retrofitu te mu se povećala snaga, kako je opisano poglavlju 3.2.

Po izlaznom tlaku vidi se da je turbina kondenzacijska jer para izlazi u kondenzator (ekspandira) do gotovo čistog vakuuma (0,046 bar). Turbina je dvokučišna s kombiniranim zajedničkim visokotlačnim i srednjetačnim i dvoizlaznim niskotlačnim kućištem uz spojeve za 7 nereguliranih oduzimanja pare koja predaju toplinu napojnoj vodi [7].

Osnovni tehnički podaci:

- nazivna snaga turbine: 217 MW
- maksimalna snaga: 221,7 MW
- minimalna snaga: 125 MW
- tlak i temperatura pare na ulazu u VT dio turbine: 145 bar i 530°C
- tlak i temperatura pare na ulazu u ST dio turbine: 38 bar i 530°C
- potrošnja pare: 649,5 t/h
- specifična potrošnja topline: 8075 kJ/kWh
- broj okretaja: 3000 o/min
- tlak u kondenzatoru: 0,046 bar
- protok rashladne morske vode: 8,4 m<sup>3</sup>/s (30240 m<sup>3</sup>/h )
- vlastita potrošnja bloka 18,8 MW
- neto stupanj djelovanja bloka 37 %
- temperatura rashladne morske vode na ulazu u kondenzator: 20 °C [7]

Nazivna snaga je ona koju turbina može davati u trajnom pogonu i to se najčešće podudara sa najvećom mogućom korisnošću turbine. Maksimalna snaga turbine se može postići samo kratkotrajno (npr. povećanjem tlaka pare).

Minimalna snaga je najmanja snaga koju može pružiti turbina a da svi sustavi rade stabilno (npr. sustav hlađenja). Te Plomin 2 radi na nominalnoj snazi a povremeno radi na snazi kada su uvjeti u Hrvatskoj povoljniji kod hidroelektrana (povoljne količine dostupne vode) [7].

U tablici 1. prikazani su nazivni parametri turbine za dva različita opterećenja. Prvi redak u tablici označava u postocima opterećenje turbine, dok je u drugom retku vidljivo koliku snagu isporučuje turbina. Podizanje snage turbine vrši se povećanjem potrošnje ugljene prašine u ložištu generatora pare. Prema ovoj tablici, vidljivo je da se tlak radnog medija u kondenzatoru povećava pri povećanju snage turbine. Razlog tome je što su temperatura i protok morske vode u kondenzatoru jednaki za sva opterećenja turbine, dok se sa zadnjeg stupnja turbine prvi većoj snazi dovodi i veća količina topline vodene pare.

Tablica 1. Nazivni parametri turbine za dva različita opterećenja [12]

Opterećenje	100	81,5	%
Snaga	209,584	170,823	MW
Brzina vrtnje	3000	3000	1/min
Tlak svježe pare	140	140	bar
Temperatura svježe pare	530	530	°C
Temperatura pare iza međupregirjavanja	530	530	°C
Tlak kondenzatora	0,046	0,040	bar
Temperatura rashladne vode	20	20	°C



U tablici br. 2 prikazani su tlakovi u procesu ekspanzije pare u visokotlačnoj i srednjetlačnoj turbini. Jasno je vidljivo da je tlak pare značajno manji na srednjetlačnoj turbini nakon što je para predala svoju kinetičku energiju visokotlačnoj (VT) turbini. Tada se para preusmjerava u međupregrijač pare te potom ulazi na drugu ekspanziju u srednjetlačni (ST) dio turbine sa jednakom temperaturom kao na ulazu u VT turbinu ali sa značajno nižim tlakom.

Tablica 2. Iznos tlakova na visokotlačnom i srednjetlačnom dijelu turbine [12]

Visokotlačni dio turbine	
Pogonski tlak	139 bara pretlaka
Pogonska temperatura	530 °C
Srednjetlačni dio turbine	
Pogonski tlak	38 bara pretlaka
Pogonska temperatura	530 °C

### 3.6.2. Opis tri stupnja turbine

Regulacija snage na način da se isključuju pojedine skupine sapnica karakteristika je turbine s prvim akcijskim stupnjem (Curtis stupnjem). Na taj je način izvedena visokotlačna (VT) turbina jednotočno s Curtis stupnjem. Od čeličnog lijeva izvedeno je dvostruko kućište (vanjsko i unutarnje). Horizontalno u visini osi rotora položena je razdjelna ploha vanjskog kućišta. Za 50° u odnosu na horizontalu zakrenuta je razdjelna ploha unutarnjeg kućišta radi dovođenja pare na akcijske lopatice. Specijalnim elastičnim vijcima spojena je gornja i donja polovica vanjskog kućišta na razdjelnoj plohi. Elastični vijci i stezni prsteni upotrebljavaju se radi velikog tlaka i temperature za spajanje i brtvljenje dvije polovice kućišta. Montaža steznih prstena vrši se u zagrijanom stanju prema uputama proizvođača a kada se ohlade oni stegnu kućište. Izvedba i poredak oslonaca i učvršćenja vanjskog kućišta je takva da

kućište može slobodno dilatirati u svim pravcima i da se položaj središnje osi ne mijenja.

Vanjsko i unutarnje kućište razdijeljeni horizontalno na visini rotorske osi sastavni je dio srednjetačne (ST) turbine. Isto vrijedi kao i za VT turbinu što se tiče fiksiranja kućišta i stabilnosti osi rotora.

Zavareno vanjsko kućište i kućište nosača lopatica, lijevani nosači koji su fiksirani u kućište nosača lopatica, sastavni su dijelovi niskotlačne (NT) turbine koji su povezani vijcima i podijeljeni horizontalno u visini osi rotora.

VT/ST rotor, NT rotor i rotori generatora i budilice čine rotorski niz postrojenja. Krutim su spojkama s prirubnicama povezani svi rotori. Rotori su izrađeni tlačnim ljevom i zavarivanjem spojeni u funkcionalnu cjelinu.

Četiri su oslonca odnosno klizna ležaja koji nose kompletni sklop turbina-generator.

Na početku VT turbine (prednji ležajni blok), između ST i NT turbine (radijalno-aksijalni ležaj), prednji i stražnji ležajni blok generatora položaji su ležajeva. Temelj na kojemu leži turbina preuzima gotovo sve sile koje se javljaju tijekom rada s obzirom da su ležajni blokovi fiksirani sidrenim vijcima [7].



Slika 39. Srednjetačni dio turbine [autor]

Na slici 39. vidi se izolacija ST turbine koja se postavlja radi smanjenja gubitaka topline i preventivno radi sigurnosti.

Kako je već spomenuto u potpoglavlju 2.1.5., na zadnjem stupnju turbine lopatice su izložene povećanoj koncentraciji vode u radnom mediju, koja oštećuje lopatice.

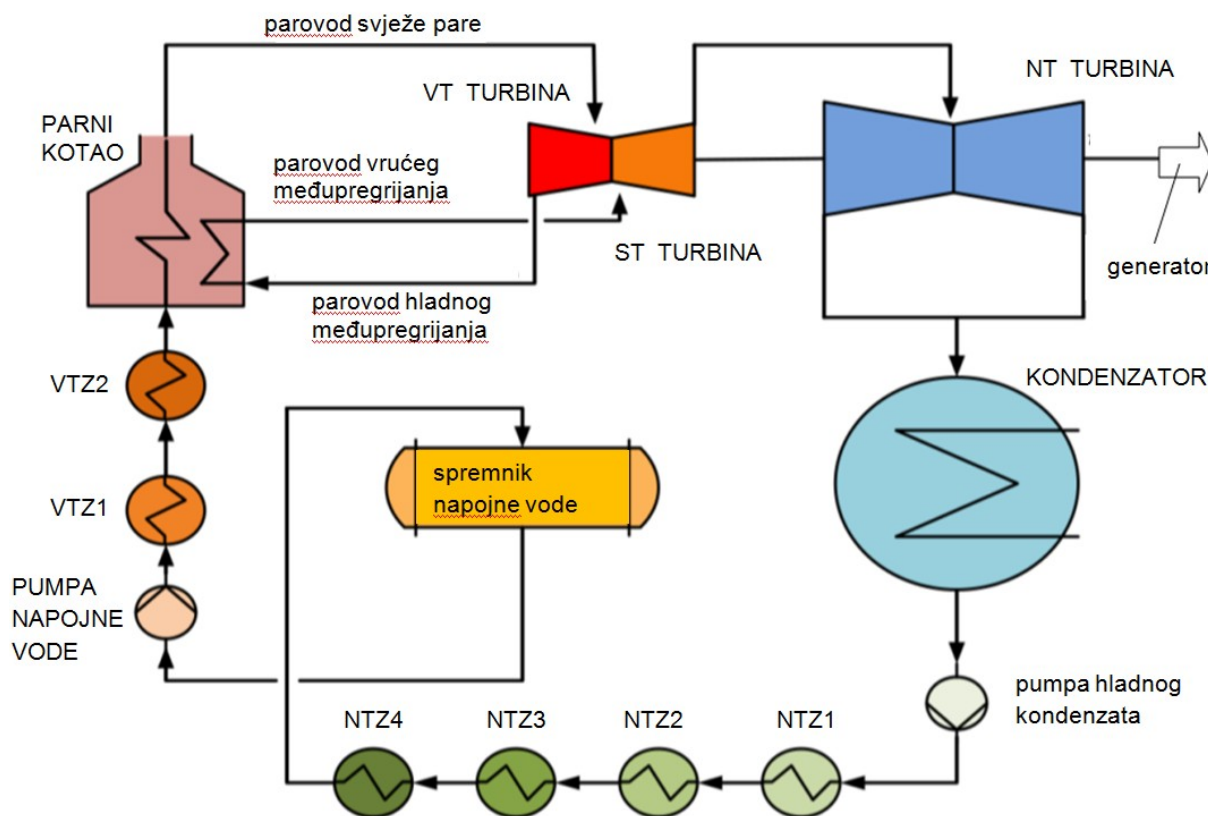
Prilikom remonta turbine, pregledavaju se zadnje lopatice na NT turbini te postoje tri stupnja oštećenja koja se mogu pojaviti: Prvi stupanj je promjena boje na lopatici u odnosu na susjednu lopaticu (ne zahtijeva intervenciju). Drugi stupanj oštećenja je blaga pojava rupica kao posljedica pittinga. (ne zahtijeva intervenciju jer nije toliki stupanj oštećenja a realno se povećala površina lopatice i smanjilo se opterećenje iste)

Treći stupanj oštećenja je kada je erozija tolika da se smanjila funkcija lopatice. (zahtijeva zamjenu lopatice)

Nekada su se lijepile posebno tvrde pločice na lopaticama zadnjih stupnjeva turbine ali je dolazilo do havarija u postrojenju kada bi se te pločice odlijepile.

### 3.7. Kondenzator i toplinski krug vode - pare

Na slici 40. prikazan je pojednostavljeni prikaz cirkulacije u krugu voda-para. Putem brzozatvarajućih ventila visokog tlaka i regulacijskih ventila visokog tlaka svježa para iz smjera kotla ulazi u visokotlačni (VT) dio turbine gdje ekspandira (predaje kinetičku energiju). Nakon toga se para odvodi međupregrijačima da bi se postigla jednaka temperatura (ali ne i tlak) svježe pare na ulasku u ST turbinu.



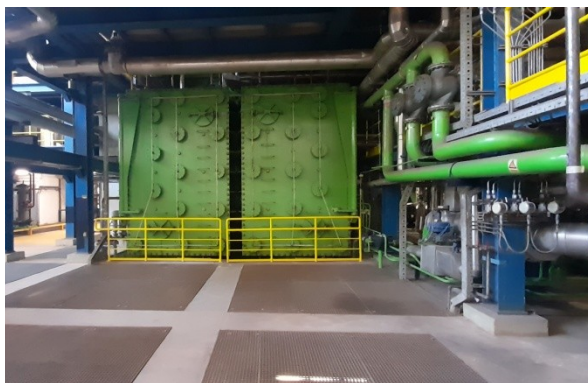
Slika 40. Pojednostavljeni prikaz cirkulacije u krugu voda-para [7]



Međupregrijana se para opet, preko brzozatvarajućih i regulacijskih ventila ali sada srednjeg tlaka, odvodi u srednjetačni (ST) dio turbine na drugu ekspanziju.

Potom se preko prestrujnog cjevovoda para direktno vodi iz ST u NT (niskotlačnu) turbinu gdje ekspandira do kondenzacijskog tlaka.

Tada para ulazi u kondenzator gdje se događa promjena agregatnog stanja iz plinovitog u tekuće, odnosno para se kondenzira i pada na dno kondenzatora (*hotwell*). U kondenzatoru morska voda velikog protoka prolazi kroz cijevi i oduzima toplinu pari koja opstrujava oko tih cijevi. Na slici 41. vidi se kondenzator TE Plomin 2 (bloka 2), a na slici 42. (kondenzator u fazi remonta) vide se cijevi od kojih je sastavljen [7].



Slika 41. Kondenzator bloka 2 [autor]  
remonta[12]



Slika 42. Kondenzator u fazi

Kondenzat se putem kodenzatnih pumpi odvodi u regenerativne niskotlačne zagrijače, koji dobivaju toplinu iz nereguliranih oduzimanja pare turbini, pa prema spremniku napojne vode i napojnim pumpama. Krug vode-pare se zatvara nakon što pumpe napojne vode podignu tlak napojnoj vodi koja ulazi kroz dva visokotlačna zagrijača u kotao. Visokotlačni zagrijači toplinu dobivaju iz nereguliranih oduzimanja pare turbini [7].

Tehnički podaci kondenzatora pare prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Tehnički podaci kondenzatora pare [12]

Maks.količina odlazne pare - sposobnost zaprimanja kondenzatora	124 kg/sek ili 447 t/h
Pogonski tlak (vakuum)	0,046 bara
Koncesioni tlak	1,8 bara
Sposobnost akumulacije sakupljača kondenzata kondenzatora (normalna / maks)	13 / 22 m <sup>3</sup>
Temperatura rashladne vode na ulazu	10-25 °C
Temperatura rashladne vode na izlazu	27,5 °C
Tlak na izlazu	1,3 - 2,5 bara
Količina rashladne morske vode	Cca 8700 kg/sek Cca 31320 t/h
Ulazna temperatura kondenzata	90 °C
Ulazna/izlazna temper. Rashladne vode	65 °C
Ulazni/pomoćni tlak rashladne vode	2,5 bara
Para injektora – tlak / temperatura	14,5 bara / 280 °C (pogonski podaci)

### 3.7.1. Korištenje morske vode za potrebe kondenzatora

Blok 2 koristi morsku vodu za potrebe rada kondenzatora i za hlađenje svih sustava u sklopu pogona (hladnjaci međurashladne demineralizirane vode, hladnjaci ulja za podmazivanje turbine, hladnjaci upravljačkog ulja za turbinu, hladnjaci H2 generatora, hladnjaci brtvenog ulja za generator) [10].

Za potrebe nekada aktivne TE Plomin 1 postoje dvije pumpe i za aktivnu TE Plomin 2 ugrađene su tri pumpe. Pumpna stanica se nalazi na udaljenosti od 2,5 km od same elektrane odnosno od kondenzatora. Usisni cjevovodi su dužine 166 m (od usisa u

moru do pumpne stanice). Putem pumpnih agregata morska se voda crpi iz mora na dubini od 24 m (tolika crpna dubina mora potrebna je radi stabilnijih nižih temperatura tokom cijele godine) i prepumpava se u preljevnu komoru. Na slikama 43. i 44. prikazana je pumpa morske vode u strojarnici čije će specifikacije biti prikazane u nastavku rada. U zajedničkoj zgradi pumpne stanice instalirano je 5 vertikalno montiranih agregata [10].



Slika 43. Pumpa TE Plomin 2 u pumpnoj stanici uz more [autor]



Slika 44. Vratilo pumpe i tlačna cijev TE PLomin 2 locirano ispod pumpe [autor]

Pumpe tlače morsku vodu kroz cijevi promjera 1,2 m do preljevne komore gdje voda prelazi u otvoreni dovodni kanal prema elektrani. Tom prilikom se zbog razlike u visini prema elektrani odnosno nagibu otvorenog dovodnog kanala (dužina dovodnog kanala je 2146m, dubina je 3,8 m a nagib 0,5 ‰), morska voda slobodnim padom spušta u smjeru elektrane do filterske stanice. U tom prečistaču postoji grubo sito (rešetke) ali i rotacijska sita, koji služe za odstranjivanje nečistoća i živih organizama iz morske vode. Prva filtracija morske vode vrši se već na dubini od 24 m gdje se voda uzima iz mora. Druga filtracija morske vode je u filterskoj stanici pred elektranom a nakon toga postoji sistem čišćenja morske vode instaliran na cijevi pred kondenzatorom (slika 45.) [10].

Nakon što se morska voda iskoristi za potrebe rada kondenzatora, ispušta se u rijeku Boljunčicu. Temperaturna razlika, ulazne vode u kondenzator i izlazne vode u rijeku

Boljunčicu, maksimalno je 8 °C. Ta se maksimalna razlika u temperaturi, radi zaštite lokalne flore i faune, koristila prilikom izrade proračuna rashladnog sustava [10].

Višak se morske vode preljeva u potok Bišac preko bočnog preljeva pred filterskom stanicom. Protok morske vode je 8 m<sup>3</sup>/s što govori o potrebama kondenzatora ovog parnoturbinskog postrojenja. Od filterske stanice prema elektrani vode armirano-betonske cijevi promjera 2 m, dok se unutar same elektrane prema kondenzatoru one spajaju na čelične cijevi istog promjera (slika 45.) [10].



Slika 45. Kondenzatorska cijev i uređaj Taprogge [autor]

Na slijedećoj stranici prikazane su specifikacije o pumpama morske vode koje se nalaze u pumpnoj stanici uz more. Ti su podaci dobiveni od tehničkog osoblja TE Plomin 2. U pumpnoj stanici nalaze se pumpe morske vode za potrebe rada TE Plomin 2 i pumpe morske vode za potrebe rada TE Plomin 1 koje više nisu u funkciji. Na slici 46. prikazan je rotor pumpe morske vode TE Plomin 2.



Proizvođač pumpi morske vode je "Litostroj"  
Ljubljana, od čega su tri pumpe tipa Vi4,  
2/95 i dvije pumpe tipa 90Vi18.

Tehnički podaci pumpi su slijedeći:

**Pumpe KKS oznaka BPAC10/20/30**

- tip pumpe Vi4, 2/95

Broj komada:	3
Godina ugradnje:	1989.
Izvedba:	vertikalna vijčana
Količina pumpanja:	$q = 3,18-3,42 \text{ m}^3/\text{s}$
Visina pumpanja:	$H = 18-20 \text{ m}$
Broj okretaja:	$n = 595 \text{ min}^{-1}$
Potrebna snaga:	$P = 846,5 \text{ kW}$

**Pumpe KKS oznaka APAC10/20**

- tip pumpe 90Vi18

Broj komada:	2
Godina ugradnje:	1969.
Izvedba:	vertikalna vijčana
Količina pumpanja:	$q = 2,4-2,5 \text{ m}^3/\text{s}$
Visina pumpanja:	$H = 19,4-20 \text{ m}$
Broj okretaja:	$n = 580 \text{ min}^{-1}$
Potrebna snaga:	$P = 650 \text{ kW}$



Slika 46. Rotor pumpe morske vode  
TE Plomin 2 [autor]

Specifikacije o pumpama dobivene su od tehničkog osoblja TE Plomin 2.

Za potrebe pomoćne rashladne vode u elektrani (hladnjaci međurashladne demii vode, hladnjaci ulja za podmazivanje turbine, hladnjaci upravljačkog ulja za turbinu, hladnjaci H2 generatora, hladnjaci brtvenog ulja za generator) vrši se oduzimanje morske vode iz rashladnog sustava koja ide prema kondenzatoru (dovodni cjevovod). Nakon što se iskoristi pomoćna rashladna voda, usmjerava se u odvodni kondenzatorski cjevovod koji vodi do izljevne komore pa prema otvorenom izljevnom kanalu (dužina kanala je 282 m) put rijeke Boljunčice [10].

Sustav za čišćenje kondenzatorskih cijevi Taprogge (za TE Plomin 1 i 2 naručitelj: HEP d.d. Izradili: APO d.o.o. Tehničko-tehnološko rješenje usklađenja postojećih postrojenja TE Plomin 2 EKONERG d.o.o.) ugrađen je u rashladni sustav ove elektrane. Ovaj uređaj (slika 45.) čisti kondenzatorsku cijev od nečistoća i time filtrira morsku vodu ispuštanjem spužvenih kuglica u vodu. Te se kuglice automatski prikupljaju, očiste i ponovno ubacuju u cijev [10].

### 3.7.2. Neregulirana oduzimanja pare turbini

Na slici 40. shematski su prikazani regenerativni zagrijači napojne vode. Da bi se povećao stupanj djelovanja ovog parnog postrojenja konstruirana su sedam nereguliranih oduzimanja turbini.

1. Za privod regenerativnom zagrijaču (NTZ1)- oduzimanje pare iz NT turbine obostrano iza 6. reda lopatica
2. Za privod regenerativnom zagrijaču (NTZ2)- oduzimanje pare iz desnog toka NT turbine iza 4. reda lopatica
3. Za privod regenerativnom zagrijaču (NTZ3)- oduzimanje pare iz lijevog toka NT turbine iza 2. reda lopatica
4. Za privod regenerativnom zagrijaču (NTZ4)- oduzimanje pare iz ispuha srednjetlačne turbine
5. Za privod otplinjaču spremnika napojne vode, oduzimanje pare iz srednjetlačne turbine iza 12. reda lopatica
6. Za privod regenerativnom zagrijaču (VTZ2), oduzimanje pare iz srednjetlačne turbine iza 6. reda lopatica
7. Radi opskrbe regenerativnog zagrijača (VTZ1) oduzimanje pare iz ispuha visokotlačne turbine [7]

U trećem poglavlju biti će prikazana toplinska shema TE Plomin 2 gdje će se jasno vidjeti oduzimanja pare turbini.

### 3.7.3. Napojna voda

Kao što je na slici 40. prikazano, u spremnik napojne vode dolazi niskotlačnim zagrijačima zagrijana napojna voda pod tlakom kondenzatne pumpe. Napojna pumpa povlači vodu iz spremnika i tjera kroz dva visokotlačna zagrijača napojne vode te potom u generator pare. Kao što je već spomenuto u potpoglavlju 3.2.1. radi se o pumpama (tri pumpe od kojih je jedna u rezervi) pogonjenim asinkronim motorima snage 4100 kW. Jedna od tih pumpi prikazana je na slici 47. Napojna pumpa podiže tlak napojnoj vodi na 188 bar, a potom visokotlačni zagrijači podižu temperaturu napojne vode na 250 °C. Potom radni medij ulazi u kotao gdje zbog otpora strujanja kroz cijevi pada tlak na 145 bar ali temperatura poraste na 535 °C.



Slika 47. Pumpa napojne vode TE Plomin 2 [autor]

### 3.8. Električni generator



Slika 48. Generator TE Plomin 2 [9]

Trofazni dvopolni, vodikom hlađen sinkroni generator (slika 48.) ugrađen je na kraju vratila turbine TE Plomin 2. S obzirom na vodik, kućište statora konstruirano je po standardima o plinonepropusnosti. Segmenti od dinamo limova čine statorski paket. Masivni komad od visokolegiranog nikal-krom-molidben čelika čini tijelo rotora [9].

Tablica 4. Nazivni podaci generatora TE Plomin 2 [12]

Nazivna snaga	247 MVA
Tip	S2596-2
Max dopuštena prividna snaga kod 50 Hz u području $U_n \pm 7,5\%$ za izvedenu klasu izolacije	266 MVA
Nazivni faktor snage ( $\cos \varphi$ )	0,85
Nazivni napon	13800 V $\pm 7,5\%$
Nazivna struja	10334A
Nazivna jalova snaga kod $\cos \varphi = 0$	209,9 MVA
Frekvencija	50 Hz
Nominalni broj okretaja	3000 o/min

U tablici 4. prikazani su najvažniji podaci o generatoru. Morska voda hladi vodik putem cijevi u hladnjaku vodika (slika 49.) a u tablici 5. upisani su neki parametri vodika i morske vode u rashladnom sustavu generatora TE Plomin 2 [12].

Tablica 5. Nazivni parametri rashladnih medija elektro-generatora TE Plomin 2 [12]

Vodik	
Tlak	0,4 MPa
Temperatura	40 °C
Čistoća	min 98%
Vlažnost	max 15g/m <sup>3</sup>
Morska voda	
Temperatura	max 27 °C



Slika 49. Hladnjaci za vodik  
- radni medij morska voda [12]



## 4. Sustavi za pročišćavanje dimnih plinova DeNO<sub>x</sub> i DeSO<sub>2</sub>

Izgaranjem ugljene prašine u ložištu elektrane nastaju dimni plinovi štetni po zdravlje ljudi, biljnog i životinjskog svijeta. Najštetniji produkti iz dimnjaka elektrane su pepeo, sumporov dioksid i dušikov oksid. Nakon izlaska iz generatora pare, toplina se dimnih plinova predaje rotacijskom izmjenjivaču topline. Kolo se prilikom rotacije na jednom dijelu ugrijava dimnim plinovima i akumulira toplinu u svoju sačastu strukturu izrađenu limovima, a na drugom dijelu tu toplinu predaje zraku koji nastrujava tlačnim ventilatorom te potom ulazi u ložište elektrane. Nadalje plinovi prolaze kroz elektrostatski otprašivač koji iz njih izdvaja pepeo. Taj se pepeo odvozi u silos pepela. Preostala dva štetna sastojka tretiraju u novijim sustavima o kojima će biti riječ u slijedeća dva potpoglavlja [11].

### 4.1. Odsumporavanje plinova (DeSO<sub>2</sub>)

Postrojenje za izdvajanje sumpora iz dimnih plinova (odsumporavanje, DeSO<sub>2</sub>) nalazi se u sklopu termoelektrane Plomin 2 od 2000. godine.

Prolaskom kroz elektrostatski otprašivač, dimni se plinovi odvođe uz pomoć ventilatora u postrojenje za odsumporavanje (FGD- flue- gas desulfurization). Suspenzijom vapnenca dimni se plin ispiru u tzv. mokrom postupku. Dolazi do redukcije SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HCl.

Umjesto u postrojenje za obradu sumporovog oksida, dimni se plinovi mogu putem zaklopki preusmjeriti prema dimnjaku ali to je propisom dozvoljeno maksimalno 72 sata godišnje.

Slika 50. prikazuje opisano postrojenje. Vapnenac pomiješan s vodom dolazi u doticaj s dimnim plinovima. Oko 7 tona/h gipsa (CaSO<sub>4</sub>) nastaje ovim postupkom, kojeg tvrtka Holcim odvozi za potrebe proizvodnje cementa [11].



Slika 50. Postrojenje za obradu sumporovog dioksida [autor]

#### 4.2. Redukcija dušičnih oksida (DeNO<sub>x</sub>)

Uređaj za uklanjanje dušikovih oksida iz dimnih plinova (DeNO<sub>x</sub>) nalazi se u sklopu elektrane od 2017. godine.

Princip rada ovog sustava sličan je radu katalizatora za dizelske motore. Amonijak koji je potreban za funkcioniranje ovog sustava pročišćavanja dimnih plinova, nalazi se u spremniku u sklopu elektrane. Miješa se s vodom u točno doziranom omjeru u tzv. dušičnu vodu.

Slika 51. prikazuje sustav za doziranje mješavine amonijaka i vode. Kako je za uspješnu kemijsku reakciju između amonijaka, vode i dimnih plinova potrebna visoka temperatura, dušična se voda uštrcava posebnim mlaznicama na vrhu ložišta [11].



Slika 51. Tlačni sustav dušične vode [11]

## 5. Toplinski proračun

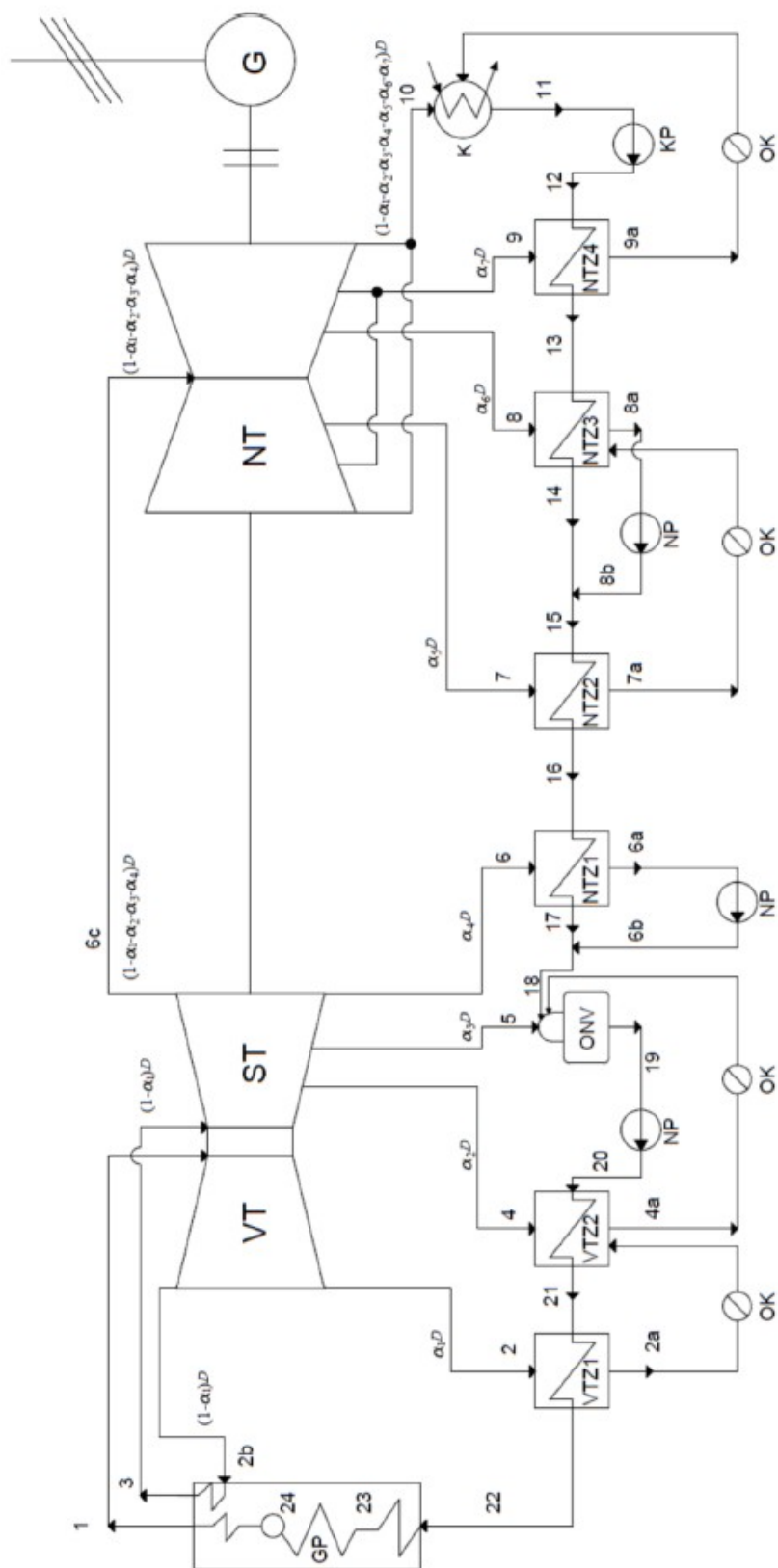
### 5.1. Termodinamička shema i h-s dijagram parnog procesa u TE Plomin 2

TE Plomin 2 radi sa slijedećim parametrima pare: Tlak svježe pare iznosi 145 bar i temperatura pare iznosi 535 °C. Snaga elektrane je 217 MW. Ovaj sustav čine i jedno međupregrijavanje pare, sedam regenerativnih zagrijača napojne vode i jedan otplinjavač. Dva zagrijača su visokotlačna a četiri su niskotlačna. Za funkcioniranje ovog postrojenja izračunati će se potrebna količina pare. Ona se proizvodi u generatoru pare. Ta para je potrebna za pokretanje turbine ali i za rad zagrijača napojne vode, kada se oduzima turbini.

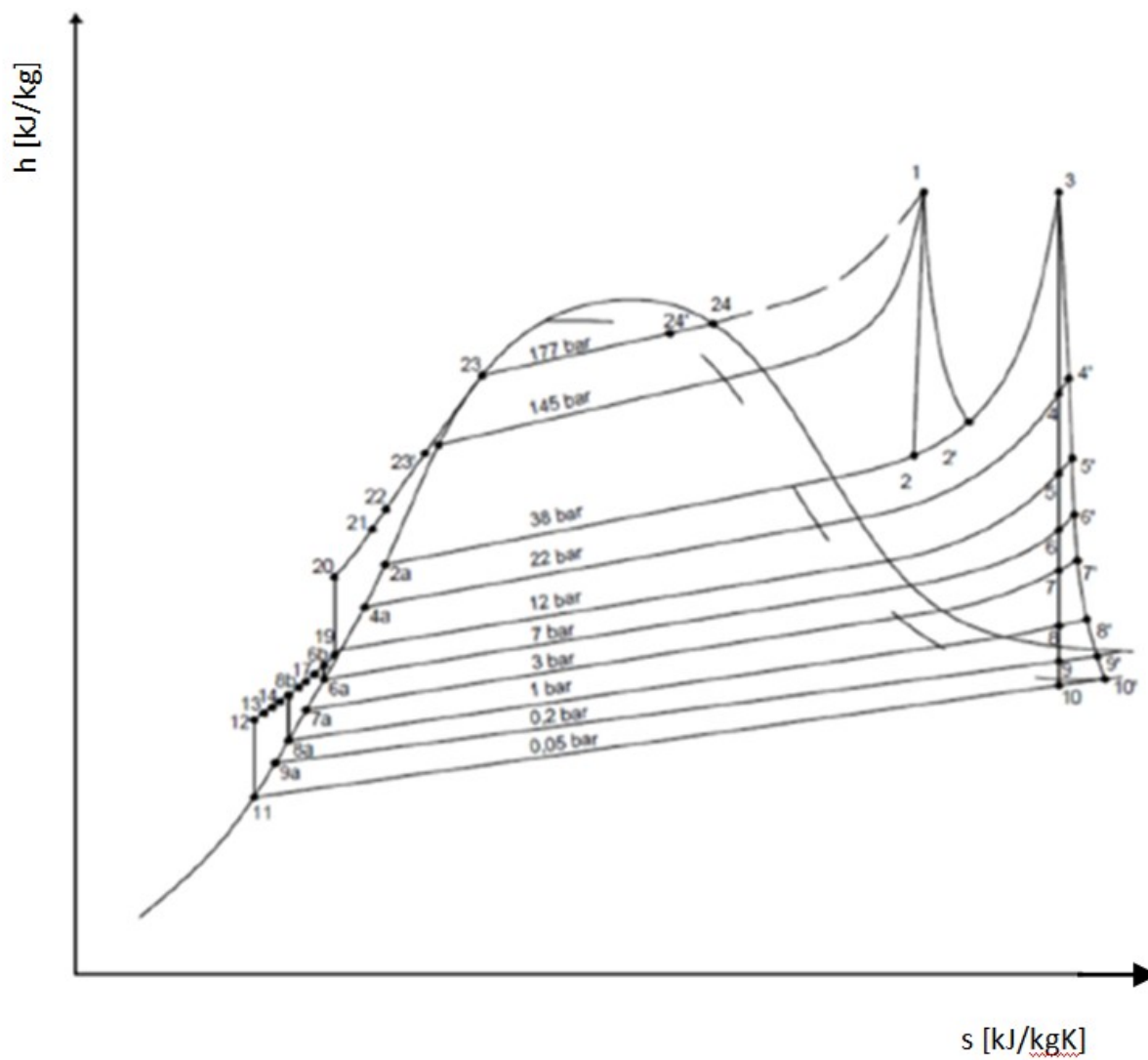
Podaci o tlakovima i temperaturama pare na oduzimanjima turbini i kod pregrijavanja pare dobiveni su od stručnog vodstva elektrane.

Na slici 52. prikazana je termodinamička shema TE Plomin 2 gdje se jasno vidi na kojem se dijelu procesa vrše oduzimanja pare turbini. Na slici 51. prikazan je h-s dijagram TE Plomin 2 s prikazanim tlakovima oduzimanja pare.

U tablici 6. prikazani su parametri pare po svim točkama procesa iz h-s dijagrama sa slike 53. Vrijednosti označene sa crticom predstavljaju realan proces tj. dobivene iz očitavanja s mjernih točaka u samom postrojenju, dok su preostale vrijednosti na oduzimanjima pare teoretske, odnosno određene su prema adijabatskoj ekspanziji.



Slika 52. Termodinamička shema TE Plomin 2 [11]



Slika 53. Prikaz h-s dijagrama TE Plomin 2 [11]

Tablica 6. parametri pare po točkama procesa [autor]

Stanje	$p$ [bar]	$T$ [°C]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/(kgK)]
1	146	535	3430	6,529
2	39,5	340	3065	6,529
2'	39,5	348	3087	6,573
2a	39,5	249	1083	2,790
2b	39,5	249	2801	2,790
3	39,5	529	3530	7,203
4	23,3	438	3330	7,203
4'	23,3	449	3350	7,252
4a	23,3	220	946,5	2,522
5	12,5	349	3150	7,203
5'	12,5	365	3175	7,271
6	7,07	274	3010	7,203
6'	7,07	298	3056	7,291
6a	7,07	165	697,1	1,991
6b	12,6	165,1	697,7	1,991
6c	7,07	298	3056	7,291
7	3,16	178	2820	7,203
7'	3,16	212	2905	7,389
7a	3,16	134	556	1,683
8	1,6	113	2696	7,203
8'	1,6	115	2717	7,465
8a	1,6	112	473	1,455
8b	12,6	112	474,2	1,455
9	0,17	74	2374	7,203
9'	0,17	74	2629	7,961
9a	0,17	74	251	0,822
10	0,06	36,18	2260	7,203
10'	0,06	36,18	2467	7,801
11	0,06	36,18	151,5	0,5207
12	12,6	37	152,7	0,5207
13	12,6	55	232	0,77
14	12,6	94	399	1,252
15	12,6	96	406	1,271
16	12,6	128	543	1,622
17	12,6	161	676	1,941
18	12,6	161,5	677	1,95
19	12,6	190	799	2,22
20	188	191	818	2,22
21	188	217	934	2,458
22	188	221	949	2,52
23	188	356	1722	3,86
23'	188	306	1367	3,272
24	188	356	2524	5,130
24'	188	356	2490	5,12



## 5.2. Dinamika toplinskog toka radnog medija

Svježa para temperature 535 °C i tlaka 145 bar dovedena do brzozatvarajućeg ventila, ekspandira kroz VT turbinu do tlaka od 39,5 bar. Dio te pare odlazi kroz neregulirano oduzimanje prvom visokotlačnom zagrijaču napojne vode a veći dio ide u međupregrijač pare gdje se podiže temperatura pare na 529 °C.

Potom para iz međupregrijača ulazi i ekspandira u ST turbini pri tlaku od 38,2 bar. U ovom dijelu procesa slijede oduzimanja pare prema drugom visokotlačnom zagrijaču pod tlakom od 23,3 bar, otplinjavaču pod tlakom od 12,5 bar i prvom niskotlačnom zagrijaču pod tlakom od 7,07 bar. Para ulazi u NT turbinu pod tlakom od 7,07 bar i ekspandira. Ovdje se dio pare odvaja u drugi niskotlačni zagrijač pod tlakom od 3,16 bar, u treći niskotlačni zagrijač pod tlakom od 1 bar i četvrti niskotlačni zagrijač pod tlakom od 0,17 bar. Tlak u kondenzatoru iznosi 6 kPa uz temperaturu radnog fluida od 37 °C.

## 5.3. Oduzimanja pare turbini

Da bi se odredila sva količina pare dobivene u generatoru pare i izračunala korisnost toplinskog procesa, potrebno je odrediti udjele pare na svim oduzimanjima.

Oduzimanje pare prema prvom visokotlačnom zagrijaču napojne vode dobiva se prema izrazu (1.0):

$$h_{22} - h_{21} = \alpha_1 \cdot (h_2 - h_{2a}), \quad (1.0)$$

uz korigirano  $h_2'$  (iz realno očitanih parametara u postrojenju) udio oduzete pare prema prvom visokotlačnom zagrijaču slijedi prema izrazu (1.1):

$$\alpha_1 = \frac{h_{22} - h_{21}}{h_2' - h_{2a}} = \frac{949 - 934}{3087 - 1083} \quad (1.1)$$

$$\alpha_1 = 0,007485 \frac{kg_{\text{oduzete pare}}}{kg_{\text{pare na ulazuu turbini}}}$$

Oduzimanje pare na drugom visokotlačnom zagrijaču napojne vode dobiva se prema izrazu (1.2):

$$(1-\alpha_1) \cdot h_{20} + \alpha_1 \cdot h_{2a} - h_{21} = \alpha_2 \cdot (h_{4a} - h_4') \quad (1.2)$$

Udio oduzete pare prema drugom visokotlačnom zagrijaču slijedi prema izrazu (1.3):

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1 \cdot (h_{20} - h_{2a}) + h_{21} - h_{20}}{h_4' - h_{4a}} \quad (1.3)$$

$$\alpha_2 = \frac{0,007485 \cdot (818 - 1083) + 934 - 818}{3350 - 946,5}$$

$$\alpha_2 = 0,047437 \frac{kg_{\text{oduzete pare}}}{kg_{\text{pare na ulazuu turbinu}}}$$

Oduzimanje pare prema otplinjavaču dobiva se prema izrazu (1.4):

$$\alpha_3 \cdot h_5' + \alpha_2 \cdot h_{4a} + 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 \cdot h_{18} = (1 - \alpha_1) \cdot h_{19} \quad (1.4)$$

Udio oduzete pare prema otplinjavaču slijedi prema izrazu (1.5):

$$\alpha_3 = \frac{(1 - \alpha_1) \cdot h_{19} - \alpha_2 \cdot h_{4a} - h_{18} \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2)}{h_5' - h_{18}} \quad (1.5)$$

$$\alpha_3 = \frac{(1 - 0,007485) \cdot 799 - 0,047437 \cdot 946,5 - 677 \cdot (1 - 0,007485 - 0,047437)}{3175 - 677}$$

$$\alpha_3 = 0,04335 \frac{kg_{\text{oduzete pare}}}{kg_{\text{pare na ulazuu turbinu}}}$$

Oduzimanje pare prema prvom niskotlačnom zagrijaču napojne vode dobiva se prema izrazu (1.6):

$$\alpha_4 \cdot h_6' - h_{6a} - h_{16} = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 \cdot (h_{17} - h_{16}) \quad (1.6)$$

Udio oduzete pare prema prvom niskotlačnom zagrijaču napojne vode slijedi prema izrazu (1.7):

$$\alpha_4 = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot (h_{17} - h_{16})}{(h_6' - h_{6a} - h_{16})} \quad (1.7)$$



$$\alpha_4 = \frac{(1 - 0,007485 - 0,047437 - 0,04335) \cdot (676 - 543)}{3056 - 697,1 - 543}$$

$$\alpha_4 = 0,06604 \frac{kg_{oduzete\ pare}}{kg_{pare\ na\ ulazuu\ turbinu}}$$

Oduzimanje pare prema drugom niskotlačnom zagrijaču napojne vode dobiva se prema izrazu (1.8):

$$\alpha_5 \cdot h_7' - h_{7a} = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 \cdot (h_{16} - h_{15}) \quad (1.8)$$

Udio oduzete pare prema drugom niskotlačnom zagrijaču napojne vode slijedi prema izrazu (1.9):

$$\alpha_5 = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot (h_{16} - h_{15})}{(h_7' - h_{7a})} \quad (1.9)$$

$$\alpha_5 = \frac{(1 - 0,007485 - 0,047437 - 0,04335 - 0,06604) \cdot (543 - 406)}{2905 - 556}$$

$$\alpha_5 = 0,048743 \frac{kg_{oduzete\ pare}}{kg_{pare\ na\ ulazuu\ turbinu}}$$

Oduzimanje pare prema trećem niskotlačnom zagrijaču napojne vode dobiva se prema izrazu (2.0):

$$\alpha_6 \cdot h_8' - h_{8a} - h_{13} = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 \cdot h_{14} - \alpha_5 \cdot h_{7a} - (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5) \cdot h_{13} \quad (2.0)$$

Udio oduzete pare prema trećem niskotlačnom zagrijaču napojne vode slijedi prema izrazu (2.1):

$$\alpha_6 = \frac{((1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot h_{14} - \alpha_5 \cdot h_{7a}) - (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5) \cdot h_{13}}{(h_8' - h_{8a} - h_{13})} \quad (2.1)$$

$$\alpha_6 = \frac{(1 - 0,007485 - 0,047437 - 0,04335 - 0,06604) \cdot 399 - 0,048743 \cdot 556}{2717 - 473 - 232}$$

$$= \frac{(1 - 0,007485 - 0,047437 - 0,04335 - 0,06604 - 0,048743) \cdot 232}{2717 - 473 - 232}$$

$$\alpha_6 = 0,061514 \frac{kg_{\text{oduzete pare}}}{kg_{\text{pare na ulazuu turbinu}}}$$

Oduzimanje pare prema četvrtom niskotlačnom zagrijaču napojne vode dobiva se prema izrazu (2.2):

$$\alpha_7 \cdot (h_{9'} - h_{9a}) = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot (h_{13} - h_{12}) \quad (2.2)$$

Udio oduzete pare prema četvrtom niskotlačnom zagrijaču napojne vode slijedi prema izrazu (2.3)

$$\alpha_7 = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot (h_{13} - h_{12})}{(h_{9'} - h_{9a})} \quad (2.3)$$

$$\alpha_7 = \frac{(1 - 0,007485 - 0,047437 - 0,04335 - 0,06604 - 0,048743 - 0,061514) \cdot (232 - 152,7)}{2629 - 251}$$

$$\alpha_7 = 0,024191 \frac{kg_{\text{oduzete pare}}}{kg_{\text{pare na ulazuu turbinu}}}$$

Izračunom svih udjela oduzimanja pare turbini može se nastaviti s toplinskim proračunom.

#### 5.4. Stupanj korisnosti termodinamičkog procesa

Teoretski stupanj korisnosti termodinamičkog procesa računa se bez uključivanja gubitaka u procesu a može se prikazati pomoću izraza:

$$\eta_t = \frac{\text{dobivena mehanička energija} - \text{potrošena mehanička energija}}{\text{dovedena toplinska energija}} \quad (2.4)$$

Prema adijabatskoj ekspanziji na VT turbini, ST turbini i NT turbini dobiva se teoretska mehanička energija koju možemo izraziti na slijedeći način:

$$\begin{aligned} & ((h_1 - h_2) + (1 - \alpha_1) \cdot (h_3 - h_4) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h_4 - h_5) \\ & + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot (h_5 - h_6) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot (h_6 - h_7) \\ & + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5) \cdot (h_7 - h_8) \\ & + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot (h_8 - h_9) \\ & + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7) \cdot (h_9 - h_{10}) \\ & = ((3430 - 3065) + (1 - 0,007487) \cdot (3530 - 3330) + (1 - 0,007487 - 0,047437) \cdot \end{aligned} \quad (2.5)$$

( 3330 - 3150 )

$$\begin{aligned}
&+(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335) \\
&\cdot (3150 - 3010) + (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604) \cdot (3010 - 2820) \\
&\quad + (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743) \cdot \\
&\quad \quad + (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 - 0,061514) \cdot (2696 - 2374) + (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 - 0,061514) \cdot (2696 - 2374) \\
&= 1418,082 \text{ kJ/kg}
\end{aligned}$$

Za potrebe pogona kondenzatne pumpe i triju napojnih pumpi troši se mehanička energija u sustavu. Kada se ona računa bez gubitaka onda se može prikazati na slijedeći način:

$$\begin{aligned}
&(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot (h_{12} - h_{11}) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot (h_{8b} - h_{8a}) + \\
&(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot (h_{6b} - h_{6a}) + (1 - \alpha_1) \cdot (h_{20} - h_{19}) \quad (2.6) \\
&= (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 - 0,061514) \cdot (151,5 - 152,7) + (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604) \cdot (474,2 - 473) \\
&(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335) \cdot (697,7 - 697,1) + (1 - 0,007487) \cdot (818 - 799) \\
&= 19,530 \text{ kJ/kg}
\end{aligned}$$

Teoretska toplinska energija koja je dovedena u generator pare računa se bez gubitaka a potrebna je za dobivanje adekvatnih parametara pare u pregrijaču i međupregrijaču. Ona se može izraziti na slijedeći način:

$$\begin{aligned}
&(h_1 - h_{22}) + (1 - \alpha_1) \cdot (h_3 - h_{2b}) \quad (2.7) \\
&= (3430 - 949) + (1 - 0,007487) \cdot (3530 - 2801) = 3204,541 \text{ kJ/kg}
\end{aligned}$$

Teoretska korisnost termodinamičkog procesa se sada može izraziti na slijedeći način:

$$h_t = \frac{1418,081 - 19,53}{3204,541} = 0,4364 = 43,64 \%$$

Teoretska korisnost termodinamičkog procesa ne uključuje realne gubitke topline u procesu. Prema njoj se od ukupno dovedene toplinske energije 43,64 % pretvara u koristan rad.

Da bi se odredila stvarna korisnost sklopa turbina-pumpa potrebno je uvažiti gubitke tako da se koriste iskustveno određeni stupnjevi korisnosti turbine i pumpe:

$$h_{i,VT} = 0,9, h_{i,ST} = 0,87, h_{i,NT} = 0,85, \text{ za pumpe: } h_{i,P} = 0,85$$

Sada se korisnost sklopa turbina-pumpa može izraziti na slijedeći način:

$$h_{i,(t-p)} = \frac{\text{dicirani mehanički rad turbine} - \text{indicirani mehanički rad pumpi}}{\text{teoretski mehanički rad turbine} - \text{teoretski mehanički rad pumpi}} \quad (2.8)$$

$$h_{i,(t-p)} = \frac{w_{i,t} - w_{i,p}}{w_{t,t} - w_{t,p}}$$

$$\begin{aligned} w_{i,t} = & (h_1 - h_2') + (1 - \alpha_1) \cdot (h_3 - h_4') + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h_4' - h_5') + \\ & (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot (h_5' - h_6') + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot (h_6' - h_7') + \\ & (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5) \cdot (h_7' - h_8') + \\ & (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot (h_8' - h_9') + \\ & (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7) \cdot (h_9' - h_{10}') \\ w_{i,t} = & (3430 - 3087) + (1 - 0,007487) \cdot (3530 - 3350) + (1 - 0,007487 - 0,047437) \cdot (3350 - 3175) + \\ & (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335) \cdot (3175 - 3056) + (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604) \cdot (3056 \\ & + \\ & (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743) \cdot (2905 - 2717) + \\ & (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 - 0,061514) \cdot (2717 - 2629) + \\ & (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 - 0,061514 - 0,024191) \cdot (2629 - 2467) \\ w_{i,t} = & 1245,218 \text{ kJ/kg} \\ w_{i,p} = & (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot (h_{12} - h_{11}) \cdot 1/h_{i,p} \quad (3.0) \end{aligned}$$

$$+(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot (h_{8b} - h_{8a}) \cdot 1/h_{i,p} + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot (h_{6b} - h_{6a}) \cdot 1/h_{i,p}$$

$$+(1 - \alpha_1) \cdot (h_{20} - h_{19}) \cdot 1/h_{i,p}$$

$$w_{i,p} = (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 -$$

$$0,061514) \cdot (152,7 - 151,5) \cdot \frac{1}{0,85} + (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604)$$

$$\cdot (474,2 - 473) \cdot \frac{1}{0,85} +$$

$$(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335) \cdot (697,7 - 697,1) \cdot \frac{1}{0,85} +$$

$$(1 - 0,007487) \cdot (818 - 799) \cdot \frac{1}{0,85}$$

$$w_{i,p} = 24,976 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{t,t} = (h_1 - h_2) + (1 - \alpha_1) \cdot (h_3 - h_4) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h_4 - h_5) +$$

$$(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot (h_5 - h_6) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot (h_6 - h_7) + \quad (3.1)$$

$$(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5) \cdot (h_7 - h_8) +$$

$$(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot (h_8 - h_9) +$$

$$(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7) \cdot (h_9 - h_{10})$$

$$w_{t,t} = (3430 - 3065) + (1 - 0,007487) \cdot (3530 - 3330) +$$

$$(1 - 0,007487 - 0,047437) \cdot (3330 - 3150) +$$

$$(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335) \cdot (3150 - 3010) +$$

$$(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604) \cdot (3010 - 2820) +$$

$$(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743) \cdot$$

$$(2820 - 2696) + (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 -$$

$$- 0,061514) \cdot$$

$$(2696 - 2374) +$$

$$(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 - 0,061514 - 0,024191) \cdot (2374 - 2260)$$

$$w_{t,t} = 1261,248 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{t,p} = (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot (h_{12} - h_{11}) + \quad (3.2)$$

$$(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot (h_{8b} - h_{8a}) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot (h_{6b} - h_{6a}) +$$

$$(1 - \alpha_1) \cdot (h_{20} - h_{19})$$

$$w_{t,p} = (1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604 - 0,048743 -$$

$$0,061514) \cdot$$

$$(152,7 - 151,5) +$$

$$(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335 - 0,06604) \cdot (474,2 - 473) +$$

$$(1 - 0,007487 - 0,047437 - 0,044335) \cdot (697,7 - 697,1) +$$

$$(1 - 0,007487) \cdot (818 - 799)$$

$$w_{t,p} = 21,269 \text{ kJ/kg}$$

Sada se može izraziti korisnost sklopa turbina-pumpa na slijedeći način:

$$h_{i,(t-p)} = \frac{1245,18 - 24,9758}{1418,082 - 21,2691} \cdot 0,8735 = 87,35 \%$$

Stvarna (indicirana) korisnost sklopa turbina-pumpa uvažava gubitke koji nastaju zbog stupnjeva korisnosti turbine i pumpi. Prema njoj se od teoretski mogućeg korisno proizvedenog rada 87,35 % pretvara u koristan rad.

Nakon što smo izračunali teoretske i indicirane korisnosti i uz iskustveno određene mehaničke i električne korisnosti elektro-generatora ( $h_{m,el} = 0,98$ ,  $h_{eg} = 0,96$ ), možemo odrediti količinu pare koja je potrebna za rad elektrane.

$$D = \frac{P_E}{(h_1 - h_{22}) + (1 - \alpha_1) \cdot (h_3 - h_2)} \cdot (1 / (h_t \cdot h_{i,(t-p)} \cdot h_{m,el} \cdot h_{eg})) \quad (3.3)$$

$$D = \frac{217000}{(3430 - 949) + (1 - 0,007487) \cdot (3530 - 3065)}$$

$$\cdot \frac{1}{0,4364 \cdot 0,8735 \cdot 0,98 \cdot 0,96}$$

$$D = 205,634 \text{ kg/s} = 740,283 \text{ t/h}$$



Da bi ovo postrojenje moglo raditi snagom od 217 MW, generator pare mora proizvesti 740,283 t/h svježeh pare.

### 5.5. Izračun potrošnje goriva potrebne za rad elektrane

Da bi se odredila potrošnja goriva koristiti će se približne vrijednosti donje ogrjevne moći goriva ( $H_d=25000$  kJ/kgG) i korisnosti generatora pare ( $h_{GP}= 0,9$ ) i parovoda ( $h_P= 0,99$ ). Za točniji rezultat potrošnje goriva trebalo bi te vrijednosti izračunati u daljnjem proračunu.

$$B = (D \cdot (h_1 - h_{22}) + (1 - \alpha_1) \cdot (h_3 - h_2)) \cdot (1 / (h_{GP} \cdot h_P \cdot H_d)) \quad (3.4)$$

$$B = \frac{205,634 \cdot (3430 - 949) + (1 - 0,007487) \cdot (3530 - 3087)}{0,9 \cdot 0,99 \cdot 25000}$$

$$B = 20,61 \text{ kg/s} = 74,203 \text{ t/h}$$

Da bi generator pare proizveo količinu pare koja je potrebna za rad elektrane potrebno je da u ložištu izgara 74,203 t/h kamenog ugljena.

### 5.6. Korisnost postrojenja za dobivanje električne energije

$$h_{ef, uk} = h_{GP} \cdot h_P \cdot h_t \cdot h_{i,(t-p)} \cdot h_{m,el} \cdot h_{eg} \quad 3.5)$$

$$h_{ef, uk} = 0,9 \cdot 0,99 \cdot 0,4364 \cdot 0,8735 \cdot 0,98 \cdot 0,96$$

$$h_{ef, uk} = 0,3195 = 31,95 \%$$

Ova korisnost pokazuje da od ukupno dovedene toplinske energije u generator pare, 31,95 % pretvara se u električnu energiju.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom se radu opisala kompleksnost ovakvog tipa postrojenja sa svim potrebnim sustavima i podsustavima.

Toplinski proračun je na kraju pokazao relativno nisku korisnost postrojenja za dobivanje električne energije (31,95 %) što znači da se oko dvije trećine dovedene topline gubi u termodinamičkom procesu. Da bi se pristupilo povećavanju korisnosti postrojenja potrebno je obratiti pozornost na najveće toplinske gubitke, a oni se događaju u kondenzatoru i kotlu. S obzirom da je TE Plomin 2 kondenzacijska termoelektrana gubici u kondenzatoru su neizbježni. Kondenzator je povoljno optimiran smanjenjem tlaka do gotovo vakuuma (6 kPa).

Što se tiče kotla, njegov je učin 92,9 % pa bi jedan od načina povećanja korisnosti postrojenja bio nabava novog kotla sa većim učinkom ili njegova modernizacija.

Poboljšanje energetske učinkovitosti postrojenja proces je koji zahtijeva angažman struke koja treba ispitati energetske i ekonomske benefite ulaganja.

Postrojenje TE Plomin 2 je u radu dvadesetak godina, tijekom kojih su se procesi optimizirali koliko se moglo sa postojećom opremom i materijalima.

Postojale su inicijative i projekti za prelazak na prirodni plin kao energent koji je manje štetan za okoliš ali se od toga odustalo.

Bitno je istaknuti važnu ulogu TE Plomin 2 u održavanju stabilnosti elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske. Naime TE Plomin 2 je, za razliku od hidroelektrana koje su osjetljive na sušna razdoblja tokom godine, stabilan dobavljač električne energije i kao takva bitan partner za lokalnu i generalno državnu stabilnost električne mreže. Kameni se ugljen porijeklom iz Indonezije dovozi iz francuskih luka u Plomin. Uprava elektrane je morala pronaći drugog poslovnog partnera za dobavu ugljena s obzirom da se do rata u Ukrajini kameni ugljen dobavljao iz Rusije.

Zbog energetske krize u Europi razmatra se i vraćanje u rad TE Plomin 1 koja je prekinula proizvodnju električne energije 2018. godine. Takav se trend ponovnog pokretanja termoelektrana na ugljen pojavljuje i u drugim zemljama. (Njemačka, Kina) Razlog tome je dostupnost ugljena kao jeftinog energenta u odnosu na krizom izazvanu cijenu i problematičnu dobavu prirodnog plina.

Smatram da je hipoteza potvrđena kroz ovaj rad jer je TE Plomin 2 ugradnjom sustava za pročišćavanje dimnih plinova  $\text{DeNO}_x$  i  $\text{DeSO}_2$  postala ravnopravna s bilo kojom sličnom termoelektranom u Europi što se tiče emisija štetnih plinova. Dodatno, uz energetske krize u Europi smatram da će Vlada RH trebati razmotriti produženje rada elektrane do 2040. godine do kada ima dozvolu za rad iako je bilo najavljeno prestanak rada elektrane do 2033. godine.

**Popis literature:**

- [2] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja Republike Hrvatske, Energija u Hrvatskoj 2019., 2020.
- [4] Mrzljak V.: Predavanja- Toplinski strojevi i uređaji 2, Tehnički fakultet Rijeka, 2022.
- [5] Prelec, Z. : Energetska postrojenja, Parne turbine, Tehnički fakultet Rijeka, 2000.
- [6] A. Kostyuk, V. Frolov: Steam and Gas Turbines, Mir Publishers, 1988.
- [7] Kranjac R., specijalistički diplomski rad "Analiza opravdanosti retrofita turbine 210 MW TE Plomin blok 2", Politehnika Pula, 2014.
- [8] Branko Staniša: Energetska postrojenja, Tehnički fakultet Rijeka, 2000.
- [9] Končar- Inženjering za energetiku i transport d.d., Termoelektrana Plomin 2, Zagreb, 2004.
- [10] HEP Proizvodnja d.o.o., Tehničko-tehnološko rješenje usklađenja postojećeg postrojenja TE Plomin 2, Zagreb, 2013.
- [11] Đukić D., diplomski rad "Termoenergetska analiza procesa u parnoj elektrani", Tehnički fakultet Rijeka, 2021.
- [12] Vozila D., završni rad "Termoelektrana Plomin", Tehnički fakultet Rijeka, 2017.
- [13] Zmagoslav Prelec: Energetski uređaji, Tehnički fakultet Rijeka, 1998.
- [14] Sagar Polisetti, Sai Charan, Mounika Miryala: Fabrication and Study of the Parameters Affecting the Efficiency of a Bladeless Turbine, 2017 IJSRST, Volume 3, Issue 1

[15] Miškić B., završni rad "Termoelektrana Plomin C: Varijanta na ugljen", Tehnički fakultet Rijeka, 2020.

### **Literatura s interneta**

[1] HEP Proizvodnja d.o.o., Proizvodnja električne i toplinske energije, 2016., pristupljeno 4.4.2022.

[3] <https://www.novilist.hr/novosti/gospodarstvo/hep-za-gradnju-drugog-bloka-nuklearke-krsko-da-je-vec-izgraden-bili-bismo-mirni-po-pitanju-struje-za-buducnost/,2022.>, pristupljeno 25.5.2022.

**Popis slika**

Slika 1. Način pretvorbe energije u elektranama [12].....	5
Slika 2. Raspoloživa snaga elektrana u RH u MW [2].....	6
Slika 3. Toplinska shema Clausius-Rankineovog procesa [5].....	8
Slika 4. T-s i h-s dijagrami Clausius-R. kružnog procesa parne elektrane[5].....	9
Slika 5. Dijagram toplinskih tokova termoenergetskog postrojenja [8].....	10
Slika 6. Okvirna shema generatora pare [4].....	11
Slika 7. Prikaz toplina generatora pare predanih pojedinim uređajima [13].....	12
Slika 8. Toplinska bilanca generatora pare [13].....	13
Slika 9. Strujanje pare kroz statorske i rotorske lopatice turbine [7].....	14
Slika 10. Prikaz strujanja pare kroz tri stupnja parne turbine [7].....	14
Slika 11. Otvoreno kućište parne turbine [4].....	15
Slika 12. Prikaz strujanja pare kroz jedan stupanj akcijske i reakcijske turbine[14]...	17
Slika 13..Shematski prikaz strujanja vode- pare kroz parnoturbinsko postrojenje[4].	18
Slika 14. Jednostavni prikaz kondenzatora u presjeku [12].....	19
Slika 15. T-s dijagram povećanja temperature svježe pare [8].....	20
Slika 16. T-s dijagram povećanja tlaka svježe pare [8].....	21
Slika 17. T-s dijagram snižavanja tlaka u kondenzatoru [8].....	22
Slika 18. Shematski prikaz parnoturbinskog postrojenja sa pregrijačem pare [8].....	22
Slika 19. T-s dijagram međupregrijavanja pare [8].....	23
Slika 20. T-s dijagram regenerativnih zagrijača napojne vode [8].....	23
Slika 21. Erozijska lopatica na zadnjem stupnju turbine [5].....	24
Slika 22. Termoelektrana Plomin 2 [9].....	26
Slika 23. Spoj turbine i elektro-generatora (crveno kućište) [autor].....	28
Slika 24. Tri napojne pumpe u elektrani [autor].....	29
Slika 25. Visokotlačni regenerativni zagrijači napojne vode [autor].....	30
Slika 26. Osnovna tehnološka shema (1. dio) [9].....	31
Slika 27. Osnovna tehnološka shema (2. dio) [9].....	32
Slika 28. . Istovar ugljena s broda tipa "Panamax" [7].....	33
Slika 29. Zatvoreni pužni transporter ugljena na tračnicama u pristanu [autor].....	33
Slika 30. Transportni sustav ugljena prema elektrani [autor].....	34
Slika 31. Odlagalište ugljena pred elektranom [autor].....	34



---

Slika 32. Spremnici sirove vode pred elektranom [autor].....	35
Slika 33. Spremnici demineralizirane vode unutar elektrane [autor].....	35
Slika 34. Postrojenje generatora pare TE Plomin 2 [autor].....	36
Slika 35. Ložište generatora pare TE Plomin 1 [autor].....	37
Slika 36. Prekretni stroj turbine [autor].....	38
Slika 37. Turbinsko postrojenje izvana [autor].....	38
Slika 38. Uzdužni presjek turbine bloka 2 [7].....	39
Slika 39. Srednjetlačni dio turbine [autor].....	43
Slika 40. Pojednostavljeni prikaz cirkulacije u krugu voda-para [7].....	44
Slika 41. Kondenzator bloka 2 [autor].....	45
Slika 42. Kondenzator u fazi remonta[12].....	45
Slika 43. Pumpa TE Plomin 2 u pumpnoj stanici uz more [autor].....	46
Slika 44. Vratilo pumpe i tlačna cijev TE Plomin 2 locirano ispod pumpe [autor].....	46
Slika 45. Kondenzatorska cijev i uređaj Taprogge [autor].....	47
Slika 46. Rotor pumpe morske vode TE Plomin 2 [autor].....	48
Slika 47. Pumpa napojne vode TE Plomin 2 [autor].....	50
Slika 48. Generator TE Plomin 2 [9].....	50
Slika 49. Hladnjaci za vodik- radni medij morska voda [12].....	51
Slika 50. Postrojenje za obradu sumporovog dioksida [autor].....	55
Slika 51. Tlačni sustav dušične vode [11].....	55
Slika 52. Termodinamička shema TE Plomin 2 [11].....	57
Slika 53. Prikaz h-s dijagrama TE Plomin 2 [11].....	58

---

## Popis tablica

Tablica 1. Nazivni parametri turbine za dva različita opterećenja [12].....	41
Tablica 2. Iznos tlakova na visokotlačnom i srednjotlačnom dijelu turbine [12].....	41
Tablica 3. Tehnički podaci kondenzatora pare [12].....	45
Tablica 4. Nazivni podaci generatora TE Plomin 2 [12].....	51
Tablica 5. Nazivni parametri rashladnih medija elektro-generatora [12].....	51
Tablica 6. parametri pare po točkama procesa [11].....	59

## Sažetak i ključne riječi

Termoenergetsko postrojenje odnosno termoelektrana proizvodi električnu energiju. U ovom se diplomskom radu govorilo o termoelektrani na ugljen Plomin 2 snage 217 MW. U elektrani se proizvodi para potrebna za rad parne turbine sa temperaturom od 530 °C i tlaka 145 bar.

Kroz ovaj rad obradili su se svi najvažniji sustavi i podsustavi u elektrani te je napravljen toplinski proračun u kojem se došlo do korisnosti postrojenja i potrošnje pare i ugljena potrebnih za funkcioniranje ovog kompleksnog termoenergetskog sustava. Došlo se do zaključka za potrebom modernizacije elektrane radi povećanja stupnja korisnosti cijelog postrojenja.

U radu su se obradili sustavi za pročišćavanje dimnih plinova DeNO<sub>x</sub> i DeSO<sub>2</sub> koji su sastavni dio elektrane. Radom tih sustava Plomin 2 je konkurentna sa sličnim termoelektranama na ugljen u Europi u pogledu emisija štetnih plinova.

Ključne riječi: termoelektrana, toplinski proračun, stupanj korisnosti, DeNO<sub>x</sub> i DeSO<sub>2</sub>

## **Abstract and key words**

Thermal energy plant or thermal power plant produces electricity.

In this master's thesis, the Plomin 2 coal-fired thermal power plant with a capacity of 217 MW was discussed. The power plant produces the steam required for the operation of the steam turbine with a temperature of 530 °C and a pressure of 145 bar.

Through this work, all the most important systems and subsystems in the power plant were processed and a thermal calculation was made, in which the utility of the plant and the consumption of steam and coal necessary for the functioning of this complex thermal energy system were arrived at. A conclusion was reached for the need to modernize the power plant in order to increase the degree of usefulness of the entire plant.

In the work, the systems for purification of the flue gases DeNO<sub>x</sub> and DeSO<sub>2</sub>, which are an integral part of the power plant, were processed. With the operation of these systems, Plomin 2 is competitive with a similar coal-fired thermal plants in Europe in terms of harmful gas emissions.

Keywords: thermal power plant, heat calculation, degree of usefulness, DeNO<sub>x</sub> and DeSO<sub>2</sub>