

# Analiza ugradnje dodatnog turbogeneratorskog postrojenja u postojeće kogeneracijsko postrojenje

---

Musulinić, Bojan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:744370>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-17**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA UGRADNJE DODATNOG TURBOGENERATORA U  
POSTOJEĆE KOGENERACIJSKO POSTROJENJE**

Rijeka, rujan 2024.

Bojan Musulin

0069078045

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA UGRADNJE DODATNOG TURBOGENERATORA U  
POSTOJEĆE KOGENERACIJSKO POSTROJENJE**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Vladimir Glažar

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

Rijeka, rujan 2024.

Bojan Musulin

0069078045

## IZJAVA

S punom odgovornošću izjavljujem da sam ja, Bojan Musulin, diplomski rad pod nazivom „Analiza ugradnje dodatnog turbogeneratorskog postrojenja u postojeće kogeneracijsko postrojenje“ izradio samostalno, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora izv. prof. dr. sc. Vladimira Glažara.

Rijeka, rujan 2024.

Bojan Musulin

---

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Vladimiru Glažaru na stručnoj pomoći, razumijevanju, strpljenju i vremenu prilikom izrade ovog rada.

Također zahvaljujem se i svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na podršci prilikom pisanja rada te tijekom cijelog školovanja.

## Sadržaj:

1.	UVOD .....	1
2.	KOGENERACIJSKA POSTROJENJA.....	2
2.1.	Izvedbe kogeneracijskih postrojenja .....	2
2.1.2.	Parno kogeneracijsko postrojenje s kondenzacijskom parnom turbinom uz oduzimanje pare .....	4
2.1.3.	Kogeneracijsko postrojenje na bazi plinske turbine.....	5
2.1.4.	Kogeneracija na bazi kombiniranog ciklusa .....	8
2.1.5.	Kogeneracijski sustav s dizelskim motorom.....	9
2.1.7.	Kogeneracijski sustav rafinerije nafte Rijeka.....	10
3.	TEHNIČKI OPIS POSTROJENJA.....	12
3.1.	Glavni dijelovi kogeneracijskog postrojenja.....	12
3.1.1.	Generator pare .....	12
3.1.2.	Parna turbina .....	13
3.1.3.	Kondenzator .....	16
3.1.4.	Otplinjivač vode .....	17
4.	ANALITIČKI PRORAČUN KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA.....	19
4.1.	Toplinski padovi po jedinici mase .....	20
4.2.	Toplinski proračun generatora pare.....	22
4.2.1.	Toplinska bilanca generatora pare.....	22
4.3.	Reduciranje temperature pare na prvom oduzimanju .....	23
4.4.	Reduciranje temperature pare na drugom oduzimanju .....	24
4.5.	Toplinski proračun kondenzatora.....	25
4.6.	Proračun predgrijača vode.....	30
4.7.	Proračun otplinjača.....	34
4.8.	Proračun pumpi .....	36

4.9. Proračun redukcijske stanice .....	38
4.10. Proračun izgaranja goriva.....	40
4.10.1. Proračun potrošnje goriva .....	40
4.10.2. Proračun izgaranja.....	41
5. SIMULACIJA POSTROJENJA U RAČUNALNOM PROGRAMU .....	46
5.1. Analiza rezultata provedene simulacije.....	48
5.2. Analiza ugradnje dodatnog turbogeneratora u postojeće kogeneracijsko postrojenje .....	49
6. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA I USPOREDBA.....	53
6.1. Iskoristivost proizvodnje električne energije .....	55
6.2. Ukupna energetska iskoristivost.....	56
6.3. Ukupna eksergetska iskoristivost .....	57
6.4. Udjel pretvorbe toplinske energije goriva .....	58
6.5. Faktor pretvorbe toplinske energije goriva .....	59
6.6. Faktor vrijednosti proizvedene energije .....	60
7. ZAKLJUČAK .....	64
LITERATURA.....	65
POPIS OZNAKA .....	66
POPIS SLIKA .....	68
POPIS TABLICA.....	69
POPIS PRILOGA.....	70
SAŽETAK.....	71
SUMMARY .....	72

## 1. UVOD

Energija koju je čovjek počeo prvu koristiti bila je toplinska energija te je ona bila pokretač ljudske civilizacije, bez nje danas ne bi bilo uvjeta za ugodan i normalan život. U većim gradovima i industrijskim centrima toplinska energija koristi se za energiju koja uz električnu, pokreće mnoge tehnološke proizvodne procese.

Električna energija je promijenila živote svih ljudi pojavom prvih termoelektrana. Budući da je najčišća i najfleksibilnija, potražnja za njom je uvijek u porastu što ju čini jednim od najvažnijih oblika energije.

Postrojenja u kojima se istovremeno proizvodi i troši električna i toplinska energija nazivaju se kogeneracijska postrojenja. Takva postrojenja nazivaju se energane, za razliku od elektrana koje proizvode samo električnu energiju, odnosno od toplana koje proizvode samo toplinsku energiju.

U samom početku rada opisana su kogeneracijska postrojenja i njihove izvedbe radi lakšeg razumijevanja proračuna. Nakon analitičkog proračuna slijedi simulacija postrojenja u računalnom programu te njihove usporedbe. Cilj diplomskog rada je izraditi termodinamičku analizu toplinskih tokova sustava te analizu proizvodnje električne i toplinske energije izračunom odgovarajućih tehničkih pokazatelja. Kogeneracijsko postrojenje razvija snagu od 20 MW<sub>el</sub> te opskrbljuje potrošače sa srednjetačnom i niskotlačnom parom. Analizirati će se i mogućnost ugradnje dodatnog turbo-generatorskog postrojenja u vidu protutlačne turbine ukupne snage do 8 MW<sub>el</sub>. Na kraju samog rada izvodit će se tehno-ekonomska analiza za četiri modela te će pružiti temelj za donošenje zaključka o dobivenim rezultatima.



## 2. KOGENERACIJSKA POSTROJENJA

Postrojenja koja istovremeno proizvode toplinsku i električnu energiju nazivaju se kogeneracijska postrojenja. Otpadna toplina koja nastaje uobičajenom proizvodnjom električne energije u termoenergetskim postrojenjima kogeneracija koristi najčešće za grijanje građevina ili čak cijelih naselja. Toplinska energija može se koristiti i za proizvodnju pare, zagrijavanje vode ili zraka. Prednost kogeneracije je povećana učinkovitost energenata u odnosu na konvencionalne elektrane koje proizvode samo električnu energiju ili industrijske sustave koji proizvode paru ili vruću vodu za tehničke procese. Kogeneracijska postrojenja mogu isporučiti i do 40% više električne i toplinske energije nego sustavi s odvojenom opskrbom za istu količinu goriva.

Kogeneracijsko postrojenje je efikasnije ako je mjesto potrošnje bliže mjestu proizvodnje, dok mu korisnost pada s udaljenošću potrošača. Udaljenost podrazumijeva potrebu za dobro izoliranim cijevima, što je skupo, dok se struja može transportirati na daleko veću udaljenost uz iste gubitke.

Kogeneracijska postrojenja za gorivo najčešće koriste loživo ulje, prirodni plin, biomasu ili vodik u gorivim ćelijama. Izbor goriva ovisi o tehnologiji za kogeneraciju, raspoloživosti te cijeni goriva. Njihova primjena smanjuje štetni utjecaj na okoliš, budući da iz manje potrošnje goriva i visoke energetske učinkovitosti proizlaze manje emisije štetnih tvari ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , i  $\text{NO}_x$ ), manje emisije buke te manje količine otpadne topline.

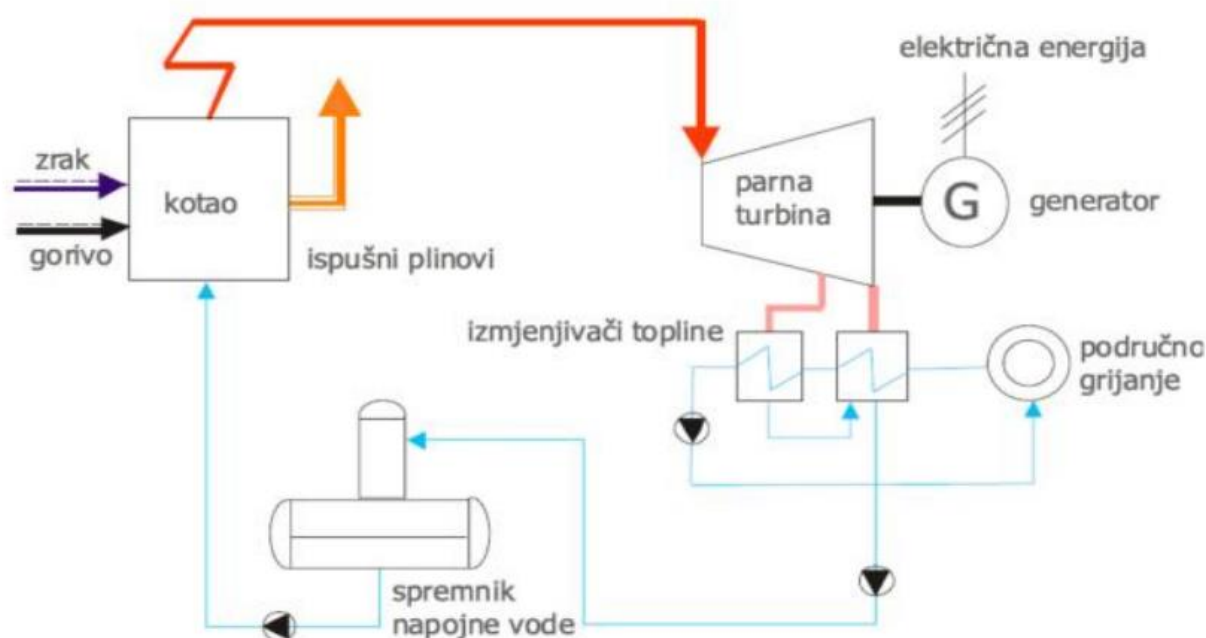
Veličine kogeneracijskih postrojenja mogu biti od nekoliko kW do više stotina MW. Male kogeneracije čine postrojenja čija snaga ne prelazi 1 MW dok su mikrokogeneracije postrojenja snage do 50 kW. Istovremena potreba za toplinskom i električnom energijom potencijalna su mjesta primjene kogeneracije.

### 2.1. Izvedbe kogeneracijskih postrojenja

#### 2.1.1. Parno kogeneracijsko postrojenje s protutlačnom parnom turbinom

Kod parnog kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom turbinom izgaranje goriva (npr. prirodni plin, ugljen, biomasa) se događa u kotlu gdje se proizvodi visokotlačna para. Zatim

proizvedena visokotlačna para ulazi u protutlačnu parnu turbinu gdje se dio energije koristi za proizvodnju električne energije pomoću električnog generatora. Na izlazu iz turbine, parametri pare su pri višem tlaku i temperaturi u odnosu na kondenzacijski sustav te se para iskorištava za grijanje i/ili industrijske procese. Para ako je potrebno može prolaziti kroz izmjenjivač topline, u tom slučaju para predaje dio topline na medij koji se koristi za grijanje. Nakon što se para iskoristi, kondenzat se odvodi u spremnik napojne vode gdje se zagrijava do temperature isparivanja te pomoću napojne pumpe vraća u kotao. Ovaj proces omogućava kontinuiranu proizvodnju pare i toplinske energije. Na slici 2.1. prikazana je shema kogeneracijskog postrojenja s protutlačnom parnom turbinom.



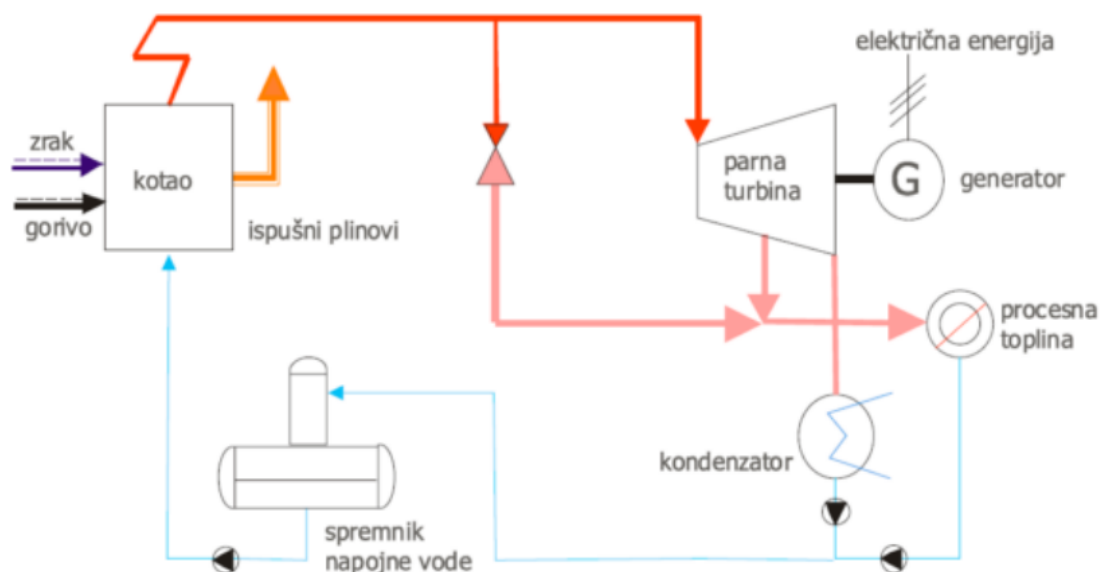
Slika 2.1 Kogeneracijsko postrojenje s protutlačnom parnom turbinom [1]

Prednosti ovakvog postrojenja su visoka učinkovitost (80 do 90%), sustav maksimalno iskorištava energiju goriva za proizvodnju električne energije i topline. Sljedeća prednost je jednostavnost postrojenja za pogon i održavanje te relativno mali investicijski troškovi. Protutlačne turbine upotrebljavaju paru pri višim temperaturama i tlakovima za različite funkcije, zbog toga su pogodne za razne industrijske procese.

Nemogućnost rada u otočnom pogonu, odnosno ovisnost o vanjskoj elektroenergetskoj mreži je nedostatak ovog postrojenja. Također nedostatak je i što proizvodnja električne energije ovisi o proizvodnji toplinske energije.

#### 2.1.2. Parno kogeneracijsko postrojenje s kondenzacijskom parnom turbinom uz oduzimanje pare

Princip rada parnog kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom uz oduzimanje pare sličan je kao i kod sustava s protutlačnom turbinom. Za stvaranje visokotlačne pare koristi se isto gorivo (prirodni plin, biomasa, ugljen) za zagrijavanje vode u kotlu. Nastala visokotlačna para ulazi u parnu turbinu gdje dio pare ekspandira i oslobađa se energija koja pokreće turbinu koja je povezana s generatorom i proizvodi električnu energiju. Na različitim razinama tlaka para se može oduzeti iz turbine i ta para se koristi za različite procese grijanja ili industrijske procese. Ovisno o specifičnim potrebama postrojenja regulira se količina i tlak pare koja će se oduzeti. Preostala para koja izlazi na zadnjem stupnju turbine je nižeg tlaka od atmosferskog te ona ulazi u kondenzator. U kondenzatoru para se hladi i kondenzira u vodu i odlazi u spremnik napojne vode gdje se kao i kod sustava s kondenzacijskom turbinom zagrijava to temperature isparivanja i napojnom pumpom vraća nazad u kotao. Na slici 2.2. prikazana je shema kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom uz oduzimanje pare.

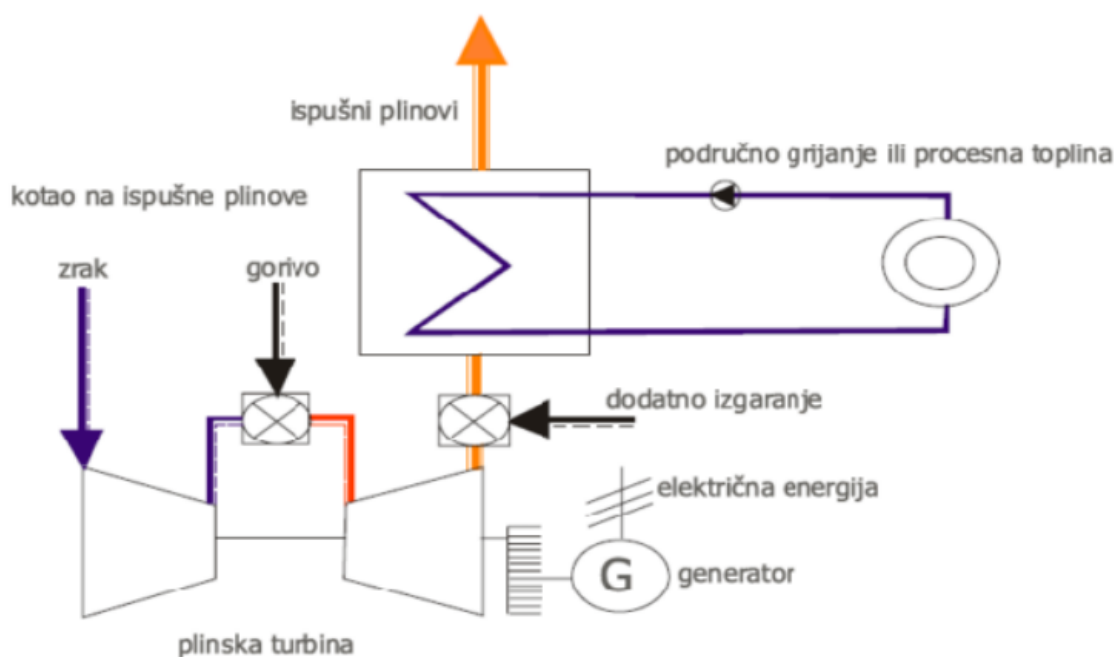


Slika 2.2 Parno kogeneracijsko postrojenje s kondenzacijskom parnom turbinom [1]

Kod parnog kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom uz oduzimanje pare moguća je regulirana proizvodnja električne i toplinske energije neovisno jedna o drugoj. Učinkovitost procesa se povećava jer se toplina, koja bi bila izgubljena u kondenzatoru, koristi za grijanje ili industrijske procese. Ovaj sustav može raditi u otočnome pogonu, odnosno odvojeno o vanjske elektroenergetske mreže. U odnosu na sustav s protutlačnom turbinom negativna strana ovog sustava je povećana složenost postrojenja i veći investicijski troškovi u samom početku izgradnje postrojenja.

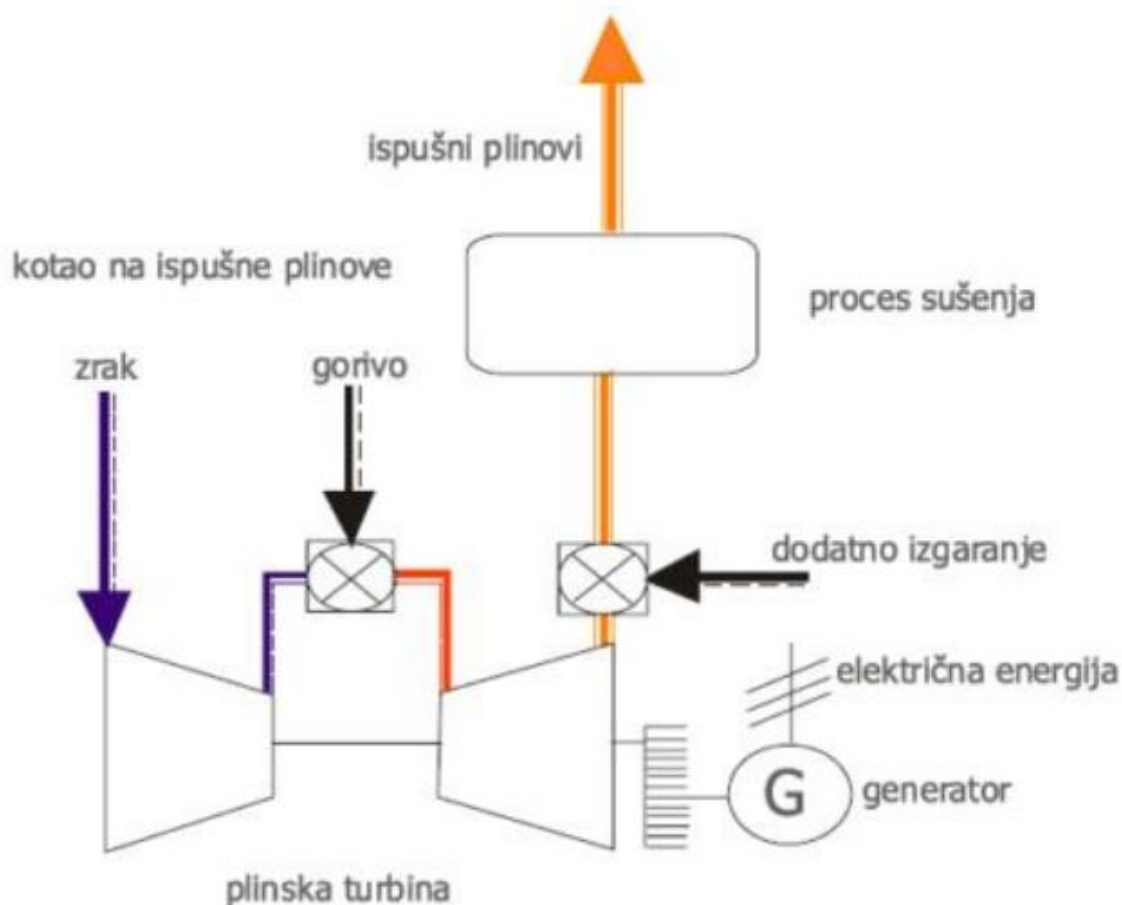
### 2.1.3. Kogeneracijsko postrojenje na bazi plinske turbine

Plinsko-turbinsko kogeneracijsko postrojenje sastoji se od generatora, plinsko-turbinskog djela i ostalih pomoćnih sustava. Plinsko-turbinski dio se sastoji od kompresora, komore izgaranja, plinske turbine i uređaja za puštanje u pogon. Kod takvih sustava koristi se visoka temperatura ispušnih dimnih plinova temperature u rasponu od 450 do 600 °C i velikog pretička zraka. Najčešće izvedbe plinske turbine u kogeneraciji su proces s kotlom ulizatorom i proces s direktnom uporabom ispušnih plinova. Na slici 2.3. prikazana je shema plinsko-turbinske kogeneracije s kotlom ulizatorom.



Slika 2.3 Shema plinsko-turbinske kogeneracije s kotlom ulizatorom [1]

Na slici 2.4. prikazana je shema plinsko-turbinske kogeneracije uz direktnu upotrebu ispušnih plinova.

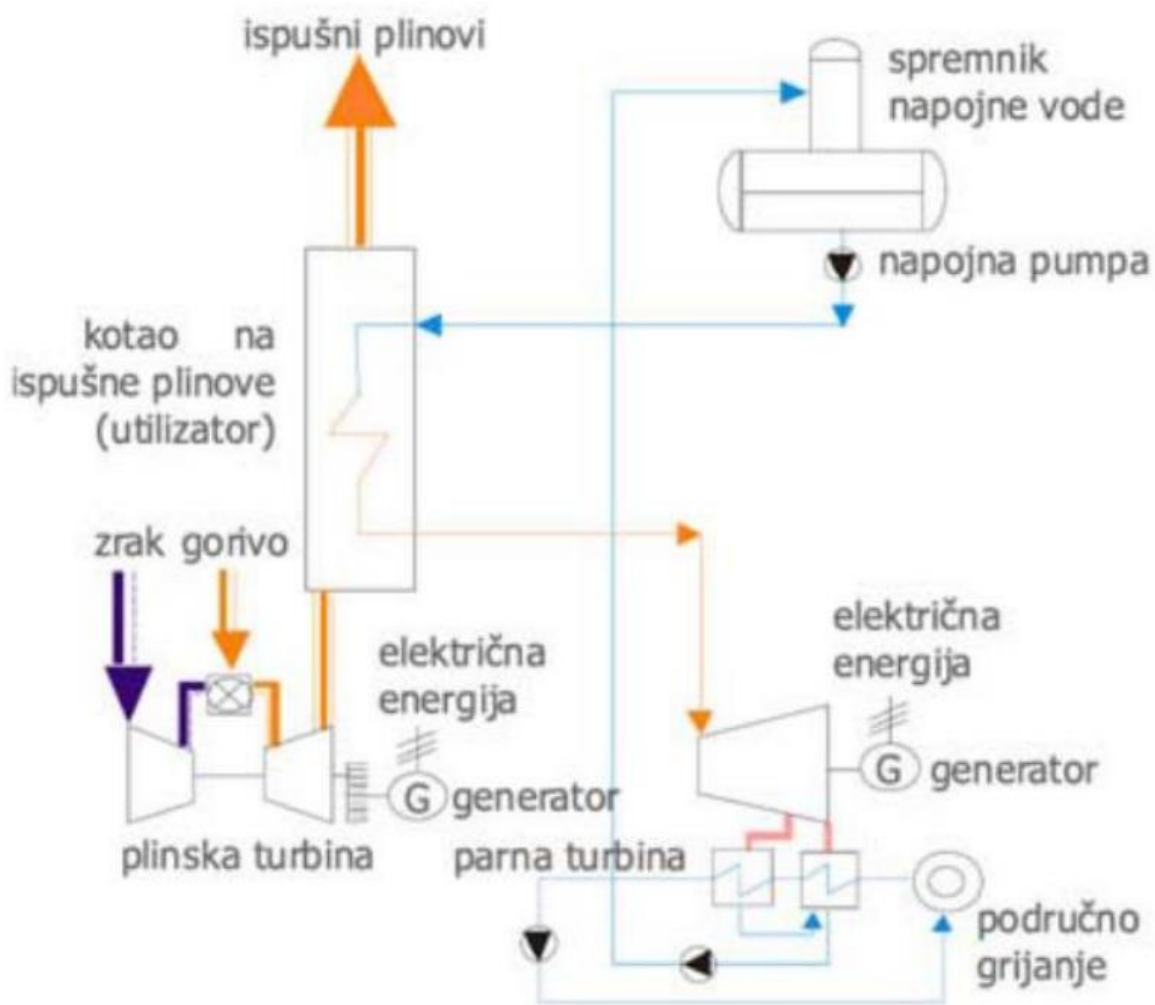


Slika 2.4 Shema plinsko-turbinske kogeneracije uz direktnu upotrebu ispušnih plinova [1]

Kompresor usisava zrak iz okoline i tlači ga na određeni tlak u komoru izgaranja, gdje se dovođenjem goriva zbiva izgaranje. Nastala smjesa zraka i plinova izgaranja u plinskoj turbini ekspanrira gdje se stvara mehanička energija od koje jedan dio služi za pokretanje kompresora, a drugi dio služi za pogon generatora električne energije. Dimni plinovi na izlazu iz turbine u postrojenju s utilizatorom vode se kroz ispušni kanal do parnog kotla gdje se zagrijava voda. Ispušni plinovi sadrže veliku količinu kisika pa je potrebno dodatno izgaranje s kojim se podiže razina proizvedene toplinske energije. Direktna primjena ispušnih plinova osigurava učinkovitiju predaju topline i nema potrebe za posrednim medijem. Iskoristivost ovakvih kogeneracijskih postrojenja iznosi od 60 do 80%.

## 2.1.4. Kogeneracija na bazi kombiniranog ciklusa

Istodobno korištenje parne i plinske turbine naziva se kogeneracijski proces s kombiniranim ciklusom. U plinskom dijelu postrojenja kompresor usisava zrak i komprimira ga. Komprimirani zrak ulazi u komoru izgaranja gdje se miješa sa dovedenim gorivom i nastaje izgaranje. Ispušni plinovi iz komore izgaranja visoke temperature pokreću plinsku turbinu koja proizvodi električnu energiju pomoću generatora električne energije. Ispušni plinovi nakon turbine koriste se u kotlu utilizatoru za proizvodnju pare, inače bi značajna količina toplinske energije bila ne iskorištena. Proizvedena para je medij koji se koristi u parnom dijelu procesa gdje ekspandira u protutlačnoj ili kondenzacijskoj turbini te se proizvodi električna energija i para za grijanje ili za potrebe industrije. Na slici je prikazana shema kogeneracije na bazi kombiniranog ciklusa.



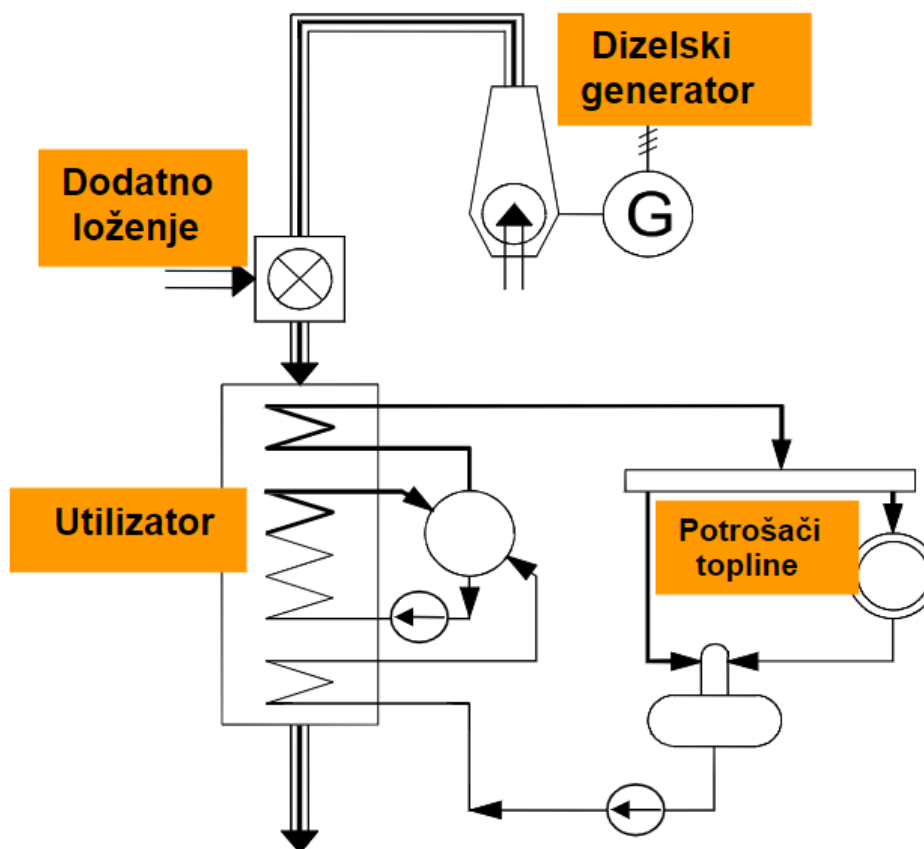
Slika 2.5 Shema kogeneracije na bazi kombiniranog ciklusa [1]

Ovakva postrojenja imaju mogućnost brzog reagiranja na promjene u potražnji za električnom energijom i toplinom što omogućuje stabilniju opskrbu i bolje upravljanje energetske resursima. Energetska učinkovitost može biti i do 80-90%, u usporedbi s klasičnim termoelektranama koje imaju učinkovitost između 30-40%.

#### 2.1.5. Kogeneracijski sustav s dizelskim motorom

Dizelski motor koristi dizelsko gorivo za proizvodnju mehaničke energije koja služi za pokretanje električnog generatora te nastaje električna energija. Nastali dimni plinovi iz dizelskog motora zbog previsokog stupnja pretvorbe toplinske u električnu energiju nisu uvijek dovoljne visoke temperature pa se koristi dodatno loženje prije utilizatora. Dodatno loženje je potrebno kako bi se povećala predaja toplinske energije pari u utilizatoru. Prolaskom dimnih plinova kroz utilizator nastaje para koja opskrbljuje potrošače toplinskom energijom. Na slici 2.6 prikazan je kogeneracijski sustav s dizelskim motorom uz dodatno loženje u struji dimnih plinova.





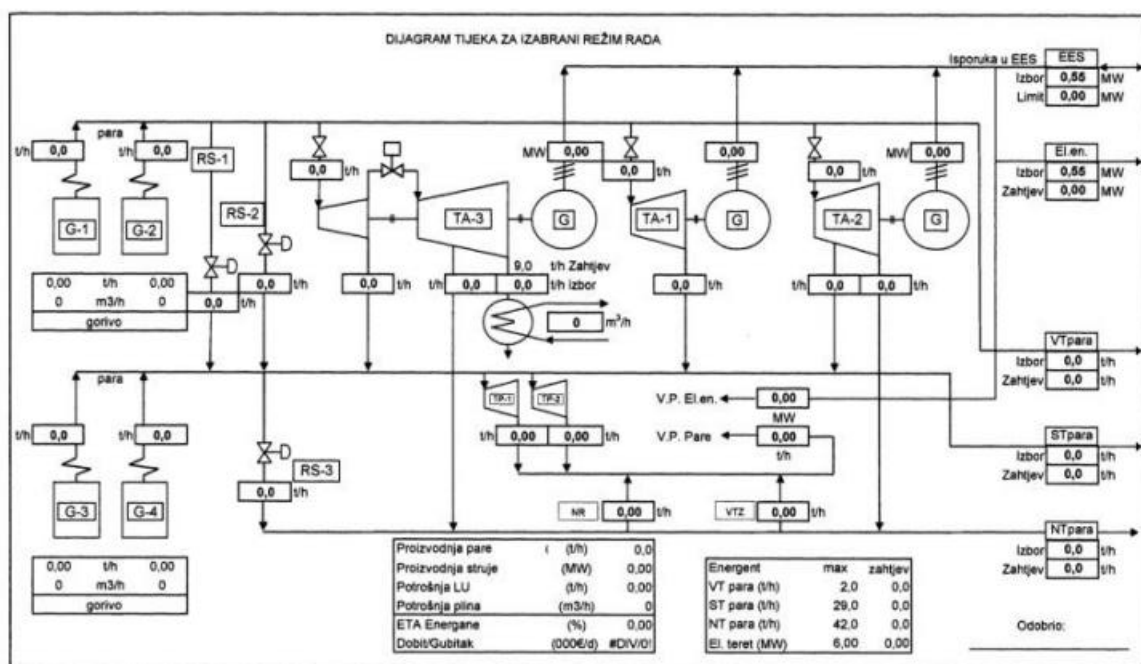
Slika 2.6 Kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom [2]

Niža cijena, kompaktnost i manje dimenzije neke su od prednosti korištenja dizelskih motora umjesto plinskog turbinskog dijela postrojenja. Najčešće se ovi sustavi koriste za brodski pogon.

#### 2.1.7. Kogeneracijski sustav rafinerije nafte Rijeka

Energana INA – Maziva Rijeka proizvodi, distribuira i opskrbljuje energentima sve tehnološke pogone u rafineriji. Termoenergetsko postrojenje izgrađuje se zbog potrebe za energentima. Postrojenje za kemijsku pripremu vode koristi se za demineralizaciju napojne vode koja služi za proizvodnju pregrijane pare. Kotlovsko postrojenje koristi četiri generatora pare od toga dva proizvode visokotlačnu paru koja pokreće parne turbine za proizvodnju električne energije koja se distribuira u električnu mrežu. Preostala dva generatora pare proizvode

srednjetačnu paru koja se koristi u sustavu. Osim proizvodnje električne energije, postrojenje proizvodi i toplinsku energiju u obliku pare. Para se unutar rafinerije koristi za različite procese npr. destilaciju nafte i druge termičke operacije. Proizvodnja vlastite energije omogućava veću fleksibilnost u radu rafinerije, te smanjuje izloženost rafinerije promjenama cijene goriva i omogućava bolje planiranje proizvodnje. Na slici 2.7. prikazana je shema Energane Rafinerije nafte Rijeka.



Slika 2.7 Shema energane Rafinerije nafte Rijeka [3]

### 3. TEHNIČKI OPIS POSTROJENJA

Kogeneracijsko postrojenje sastoji se od dva generatora pare koji proizvode pregrijanu paru temperature 450 °C i tlaka 37 bara. Pregrijana para odvodi se u kondenzacijsku parnu turbinu s oduzimanjem pare s ciljem proizvodnje 20 MW električne energije.

Na prvom oduzimanju srednjetačna para tlaka 12 bara i protoka 15 t/h služi za proizvodnju toplinske energije koju koriste srednjetačni potrošači topline. Dio srednjetačne pare koristi se za zagrijavanje napojne vode u predgrijaču. Na drugom oduzimanju para je tlaka 3 bara i protoka 28 t/h te nju koriste niskotlačni potrošači topline. Po potrebi proizvedena pregrijana para se može odvesti i na prigušni ventil u slučaju veće potražnje srednjetačne ili niskotlačne pare.

Nakon što je para prošla kroz turbinu odvodi se u kondenzator gdje kondenzira pomoću rashladne vode. Kondenzatnim pumpama se podiže tlak kondenzata na tlak niskotlačne pare, te zatim na tlak srednjetačne pare kako bi se sve odvelo u otplinjivač. Na izlazu iz otplinjivača napojnim pumpama se odvodi vrela kapljevina prema generatoru pare gdje se zatvara kružni proces.

Za opisano postrojenje potrebno je analizirati mogućnost ugradnje dodatnog turbo-generatorskog postrojenja u vidu protutlačne turbine ukupne snage do 8 MW električne energije. U tom slučaju dio proizvedene pregrijane pare će se odvoditi na kondenzacijsku turbinu, a dio na protutlačnu turbinu. Para na izlazu iz protutlačne turbine koristit će se za potrebe niskotlačnih potrošača topline.

#### 3.1. Glavni dijelovi kogeneracijskog postrojenja

##### 3.1.1. Generator pare

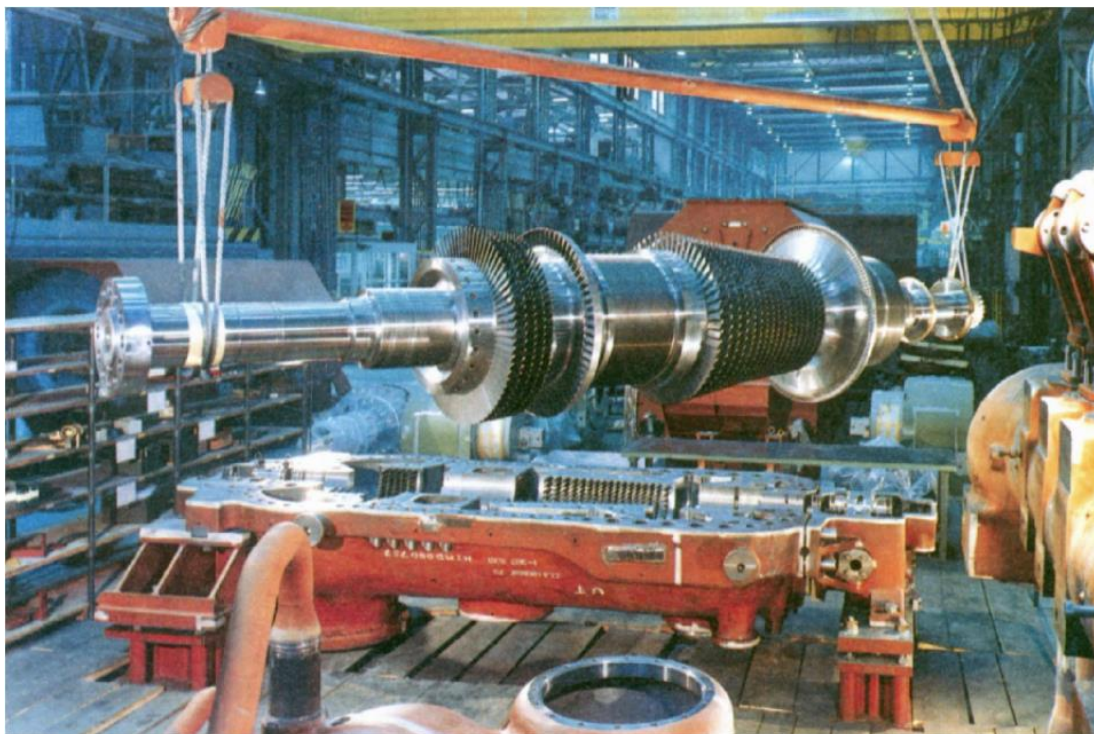
Generatori pare ili parni kotlovi energetska su uređaji za proizvodnju vodene pare određenog tlaka i temperature, koja služi kao radni fluid za pogon parnih strojeva ili za prijenos toplinske energije. To su toplinski uređaji u kojima se kemijska energija goriva pretvara u toplinsku energiju pare [4].

Generatore pare ovisno o konstrukciji možemo podijeliti na vodocijevne i vatrocijevne. Kod vodocijvnih generatora pare cijevi kroz koje prolazi voda su okružene vatrom, oni su pogodni za proizvodnju velike količine pare pod visokim tlakom i koriste se u velikim energetskim postrojenjima. Kroz cijevi vatrocijevnih generatora pare prolazi vatra koja zagrijava vodu koja se nalazi oko cijevi i time stvara paru. Jednostavni su za održavanje i koriste se u manjim postrojenjima.

Glavni sastavni dijelovi generatora pare su ložište, ogrjevne površine, tlačni dijelovi generatora pare, armatura, sustav za kontrolu i automatsku regulaciju, nosiva čelična konstrukcija, ozid i izolacija te pomoćni sustavi i uređaji.

### 3.1.2. Parna turbina

Parne turbine su toplinski strojevi u kojima se u statorskim i rotorskim lopaticama toplinska energija sadržana u pari pretvara u kinetičku energiju, a zatim i u mehanički rad vrtnjom rotora. Intenzivnim strujanjem pare kroz turbinu pretvara se toplinska energija u kinetičku, a posljedica toga je pad tlaka i temperature te povećanje volumena radnog fluida. Na slici 3.2. prikazana je parna turbina.



*Slika 3.1 Parna turbina [5]*

Osnovni dijelovi svake turbine su stator sa fiksnim statorskim lopaticama smještenim u kućištu i radno kolo s rotorskim lopaticama razmještenim po obodu diska. Statorske i rotorske lopatice čine kanale kroz koje struji radni fluid i u kojima se zbivaju termodinamičke promjene i pretvorba energije.

Toplinske turbine se mogu podijeliti prema vrsti radnog fluida, broju ekspanzija radnog fluida, načinu na koji se ostvaruje sila u rotorskim lopaticama, smjeru strujanja radnog fluida, tlaku i temperaturi pare.

Prema vrsti radnog fluida turbine mogu biti parne i plinske. U principu procesi koji se zbivaju u turbini su jednaki bilo da se radi o strujanju pare ili plina, međutim kada se promatra cijelo postrojenje radi se o dva različita termodinamička procesa. Parne turbine uglavnom rade s vodenom parom, a plinske sa zrakom odnosno mješavinom plinova izgaranja i zraka.

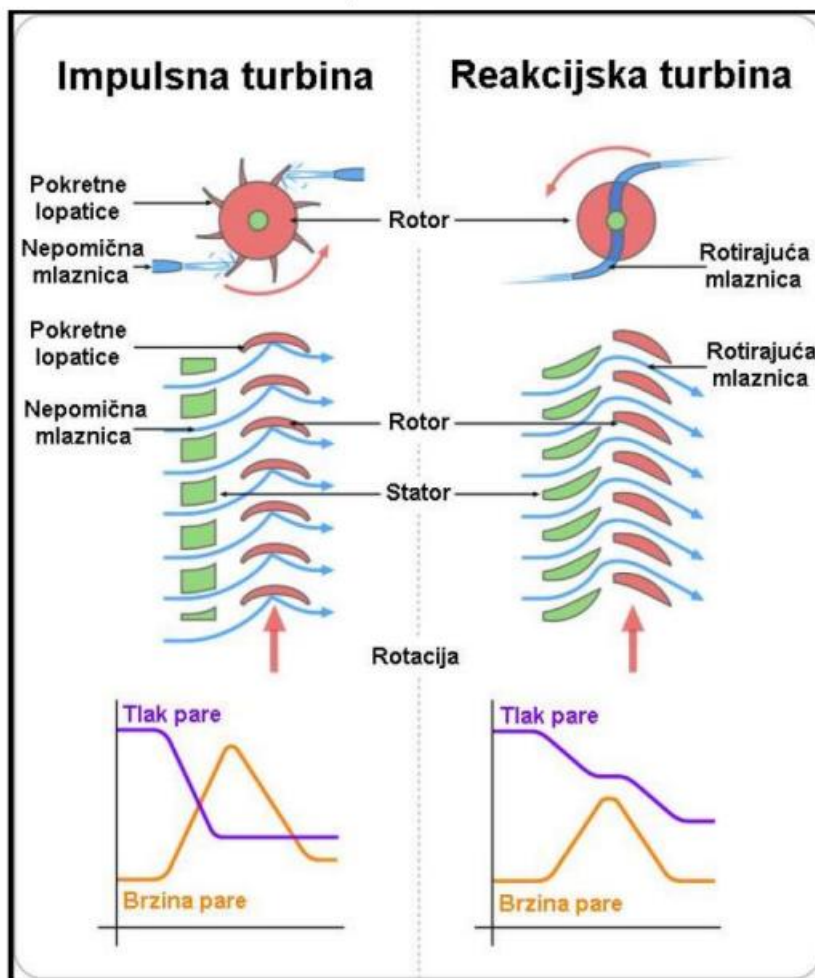
Parne turbine se prema tlaku mogu podijeliti na kondenzacijske i na protutlačne, i to bez oduzimanja ili s jednim ili više oduzimanja pare. U kondenzacijskoj parnoj turbini para koja izlazi iz turbine odvodi se u kondenzator gdje kondenzira zbog hlađenja rashladnim fluidom. Temperatura rashladne vode u kondenzatoru omogućuje da je tlak pare koja kondenzira niža od atmosferskog tlaka. Kondenzat se odvodi u generator pare kao napojna voda. Protutlačna parna

turbina koristi se tamo gdje uz mehanički rad potrebna i toplina za industrijske ili komunalne potrebe. Ekspanzija pare je samo do određenog tlaka i temperature, a potom se odvodi potrošačima topline. Tlak pare na izlazu iz turbine znatno je veći od atmosferskog pa je to razlog zašto se turbina naziva protutlačna.

Prema tlaku turbine se dijele na niskotlačne, srednjotlačne i visokotlačne, a prema temperaturi pare na ulazu u turbinu na turbine za srednje temperature i za visoke temperature. Ova podjela je u izravnoj vezi sa konstrukcijskim materijalima.

Turbine mogu biti jednostupanjske ili višestupanjske ovisno o broju ekspanzija radnog fluida. U jednostupanjskoj turbini se nalazi po jedan red statorskih i rotorskih lopatica pa para ekspandira odmah na konačni tlak. Višestupanjska turbina sastavljena je od više redova statorskih i rotorskih lopatica. U svakom stupnju turbine radnom fluidu se oduzima dio energije, pa fluid ekspandira postepeno do konačnog tlaka u više stupnjeva.

Razlikujemo akcijske i reakcijske turbine ovisno o tome gdje se ostvaruje ekspanzija. U akcijskoj turbini radni fluid ekspandira samo u statorskoj rešetki dok su kod reakcijskih turbina statorske i rotorske lopatice tako izvedene da radni fluid ekspandira i u statorskoj i u rotorskoj rešetki.



Slika 3.2 Usporedba akcijske (impulsne) i reakcijske turbine [5]

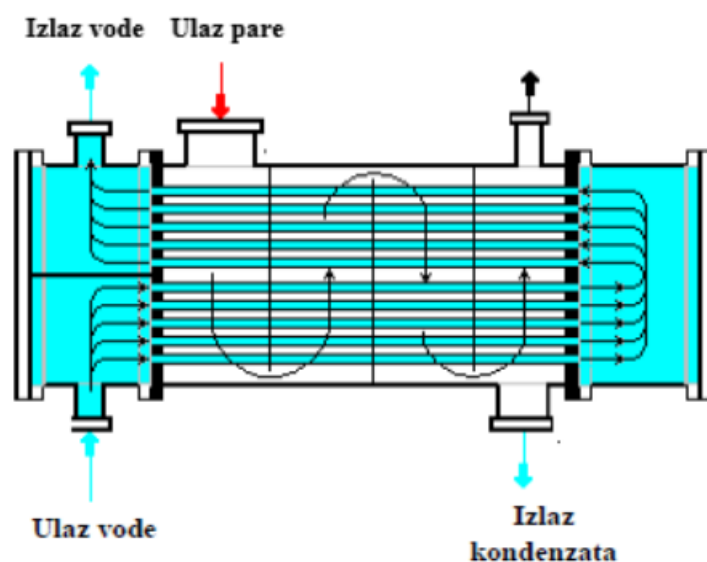
Također prema smjeru strujanja radnog fluida imamo aksijalne ili radijalne turbine. Osnovna razlika je u tome da kod aksijalnih turbina radni fluid struji približno paralelno s osi rotacije turbine, a u radijalnoj turbini radni fluid struji okomito na os rotacije.

### 3.1.3. Kondenzator

Osnovna funkcija kondenzatora pare je da kondenzira paru koja izlazi iz turbine i nastali kondenzat preda do pumpe koja ga prenosi dalje do ostalih dijelova postrojenja odnosno u našem slučaju do otplinjivača. Između mjesta gdje se toplina dovodi radnom mediju i mjesta gdje se toplina odvodi potrebno je postići što veću temperaturnu razliku. Tlak u kondenzatoru je od 0,02 do 0,08 bara. Da bi efikasnost parnog procesa bila što veća, kondenzacija se mora odvijati pri što nižem tlaku (temperaturi), a to prvenstveno ovisi o temperaturi rashladnog fluida (vode), odnosno o

temperaturi okoline. Efikasnost procesa će biti manja tamo gdje nema dovoljne količine vode za hlađenje jer se u tim slučajevima hlađenje vrši okolnim zrakom. Zbog lošijeg hlađenja zrakom tlak kondenzacije je veći pa je efikasnost procesa manja.

Na slici 3.3. prikazano je kako funkcionira kondenzator pare. Para koja izlazi iz turbine ulazi u kondenzator gdje struji preko cijevi u kojima se nalazi rashladna voda te izlazi iz kondenzatora u tekućem agregatnom stanju. Pregrade unutar kondenzatora služe kako bi se postigla bolja izmjena topline. Rashladna voda koja ulazi u kondenzator zagrijava se zbog pare koja struji preko cijevi i izlazi iz kondenzatora, ali ne mijenja svoje agregatno stanje. U kondenzatoru je potrebno koristiti parne ejektore ili rotacijske vakuumpumpe za odstranjivanje raznih nekondenzirajućih plinova i održavanja podtlaka.



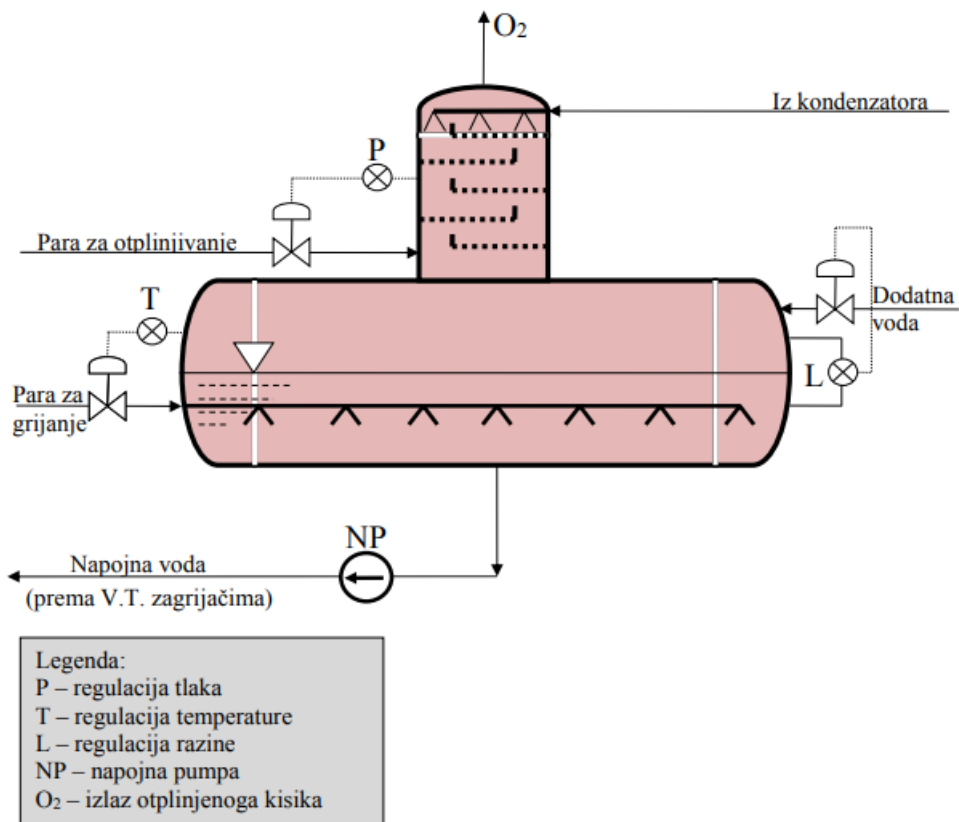
Slika 3.3 Kondenzator [4]

#### 3.1.4. Otplinjivač vode

Otplinjivač vode ili dearator je uređaj u kojem se vrši toplinsko otplinjivanje napojne vode, zagrijavanjem vode koja je u direktnom kontaktu s parom smanjuje se topivost kisika i na taj način se on otplinjava iz vode. Cilj toplinskog otplinjavanja je da se iz vode odstrani otopljeni kisik ( $O_2$ ) i ugljikov dioksid ( $CO_2$ ) zbog sprečavanja korozivnog djelovanja u sustavima proizvodnje pare u termoelektranama. Porastom temperature vode smanjuje se topivost plinova, a najmanja je kada



se postigne temperatura vrelišta. Zbog toga se u otplinjivaču, direktnim miješanjem s parom u protustrujnome strujanju, voda zagrijava do temperature isparivanja što odgovara tlaku koji vlada u njemu, kako je prikazano na slici 3.4.



Slika 3.4 Otplinjivač [4]



Količina niskotlačne pare:

$$G_2 = 28 \text{ t/h}$$

#### 4.1. Toplinski padovi po jedinici mase

Odabrana vrijednost unutarnje korisnosti turbine (Kraut, str. 231):

$$\eta_{i,t} = 0,78$$

Tlak kondenzatora (Kraut, str. 232):

$$p_k = 0,08 \text{ bar}$$

Entalpija pare na ulazu u turbinu

- U točki 1<sub>0</sub>:

$$h_0 = 3335,3 \text{ kJ/kg (očitano iz programa REFPROP pri } p_0 \text{ i } t_0)$$

Entalpija pare na izlazu iz turbine

- U točki 1<sub>t</sub>:

$$h_{1t} = 2970,9 \text{ kJ/kg (očitano iz programa REFPROP pri } s_0 = s_{1t} \text{ i } p_1)$$

$$t_{1t} = 285,85 \text{ °C (očitano iz programa REFPROP pri } h_{1t} \text{ i } p_1)$$

- U točki 1:

$$h_1 = h_0 - (h_0 - h_{1t}) \cdot \eta_{i,t}$$

$$h_1 = 3335,3 - (3335,3 - 2970,9) \cdot 0,78$$

$$h_1 = 3051,07 \text{ kJ/kg} \quad (4.1)$$

$t_1 = 302,18 \text{ °C} \rightarrow$  izlazna temperatura pare na prvom oduzimanju (očitano iz programa REFPROP pri  $h_1$  i  $p_1$ )

- U točki 2<sub>t</sub>:

$$h_{2t} = 2745,5 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{2t} = 142,8 \text{ °C}$$

- U točki 2:

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

$$h_2 = 3051,07 - (3051,07 - 2745,5) \cdot 0,78$$

$$h_2 = 2812,72 \text{ kJ/kg} \quad (4.2)$$

$t_2 = 174,31 \text{ }^\circ\text{C}$  → izlazna temperatura pare na drugom oduzimanju (očitano iz programa REFPROP pri  $h_2$  i  $p_2$ )

- u točki  $k_t$ :

$$h_{kt} = 2252,20 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{kt} = 41,51^\circ\text{C}$$

- u točki  $k$ :

$$h_k = h_2 - (h_2 - h_{kt}) \cdot \eta_{i,t}$$

$$h_k = 2812,72 - (2812,72 - 2252,20) \cdot 0,78$$

$$h_k = 2375,52 \text{ kJ/kg} \quad (4.3)$$

$t_k = 41,51 \text{ }^\circ\text{C}$  → očitano iz programa REFPROP za zasićenu paru pri  $p_k$

Stvarni (unutrašnji) jedinični rad u turbini

$$W_1 = h_0 - h_1 = 3335,30 - 3051,07 = 284,23 \text{ kJ/kg} \quad (4.4)$$

$$W_2 = h_1 - h_2 = 3051,07 - 2812,72 = 238,34 \text{ kJ/kg} \quad (4.5)$$

$$W_3 = h_2 - h_k = 2812,72 - 2375,52 = 437,21 \text{ kJ/kg} \quad (4.6)$$

- mehanička iskoristivost:  $\eta_m = 0,98$  (Kraut, str. 231)
- iskoristivost generatora:  $\eta_{EG} = 0,98$  (Kraut, str. 231)

Ukupna količina pare koju proizvodi generator pare

$$G = G_1 + G_2 + G_k \quad (4.7)$$

$$P_{el} = [G \cdot W_1 + (G - G_1) \cdot W_2 + (G - G_1 - G_2) \cdot W_3] \cdot \eta_m \cdot \eta_{EG} \quad (4.8)$$

$$30 \cdot 10^3 = 7500,51 + 284,23 \cdot G_k + 6290,32 + 238,34 \cdot G_k + 437,21 \cdot G_k \cdot 0,96$$

- količina pare na ulazu u kondenzator:

$$G_k = 55 \text{ t/h} \quad (4.9)$$

- ukupna količina pare koju proizvode generatori:

$$G = 15 + 28 + 55$$

$$G = 160 \text{ t/h}$$

#### 4.2. Toplinski proračun generatora pare

- količina proizvedene pare :  $G = 160 \text{ t/h} = 44,57 \text{ kg/s}$
- izlazni tlak pare:  $p_0 = 37 \text{ bar}$
- temperatura pregrijane pare:  $t_o = 450 \text{ °C}$
- temperatura napojne vode:  $t_{n.v.} = 120 \text{ °C}$

Pošto imamo dva ista generatora pare proračun će se izvoditi samo za jedan.

##### 4.2.1. Toplinska bilanca generatora pare

- temperatura zasićenja vode na tlaku  $p_0 = 37 \text{ bar}$  iznosi  $t_{zas} = 245,77 \text{ °C}$  (REFPROP)
- voda se u zagrijaču grije na 20-50 °C nižu temperaturu od temperature zasićenja odnosno  $t_{z.v.} = 215 \text{ °C}$
- za vodu na temperaturi  $t_{n.v.} = 140 \text{ °C}$  specifična toplina iznosi  $c_p = 4,283 \text{ kJ/kgK}$  (REFPROP)
- protočna količina napojne vode iznosi  $G = 80 \text{ t/h} = 22,24 \text{ kg/s}$

Toplina dovedena u zagrijaču vode:

$$Q_1 = G \cdot C_p \cdot (T_{z.v.} - T_{n.v.}) = 22,24 \cdot 4,283 \cdot (215 - 140) = 9066,77 \text{ kW} = 9,06 \text{ MW} \quad (4.10)$$

Toplina dovedena u isparivaču vode:

$$Q_2 = Q_{dogrijavanja} + Q_{isparivanja} \quad (4.11)$$

- vodu prvo treba ugrijati do temperature zasićenja odnosno isparivanja
- za vodu na temperaturi  $t_{z.v.} = 215 \text{ °C}$  specifični toplinski kapacitet iznosi  $c_p = 4,302 \text{ kJ/kgK}$

$$Q_{dog} = G \cdot C_p \cdot (T_{zas} - T_{z.v.}) = 22,24 \cdot 4,307 \cdot (245,77 - 215) = 2947,86 \text{ kW} \quad (4.15)$$

- voda se dalje zagrijava radi isparivanja
- $h_2', h_2'' \rightarrow$  iz programa REFPROP ( $p=37 \text{ bar}$ )

$$Q_{isp} = G \cdot (h_2 - h_2') = 22,24 \cdot (2767,36 - 1065,30) = 37859,06 \text{ kW} \quad (4.12)$$

- ukupna toplina dovedena u isparivaču je:

$$Q_2 = 2947,86 + 37859,06 = 40806,92 \text{ kW} = 40,80 \text{ MW} \quad (4.13)$$

Toplina dovedena u pregrijaču pare:

$$- h_3 = 3335,3 \text{ kJ/kg} \rightarrow \text{REFPROP (p = 37 bar, t = 450 } ^\circ\text{C)}$$

$$Q_3 = G \cdot (h_3 - h_2) = 22,24 \cdot (3335,3 - 2767,36) = 12632,62 \text{ kW} = 12,63 \text{ MW} \quad (4.14)$$

Ukupna toplina predana vodi u generatoru pare:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 9,06 + 40,80 + 12,63 = 62,49 \text{ MW} \quad (4.15)$$

### 4.3. Reduciranje temperature pare na prvom oduzimanju

Prvo oduzimanje pare iz turbine je pri tlaku  $p_I = 12$  bara, izlazna temperatura pare je  $t_I = 302,18$  °C. Postrojenju je potrebna temperatura srednjetačne pare od 210 °C, pa je potrebno smanjiti temperaturu izlazne pare miješanjem sa napojnom vodom.

- Tlak ulazne pare:  $p_I = 12$  bar
- Temperatura ulazne pare:  $t_I = 302,18$  °C
- Temperatura vode za miješanje:  $t_w = 110$  °C
- Entalpija vode na ulazu:  $h_w = 461,42$  kJ/kg
- Količina pare:  $G_I = 15$  t/h = 4,17 kg/s
- Temperatura izlazne pare:  $t_I' = 210$  °C
- Entalpija pare na ulazu:  $h_I = 3051,07$  kJ/kg
- Entalpija pare na izlazu:  $h_I' = 2841,3$  kJ/kg

Maseni udio pare u smjesi pri miješanju:

$$m_p = \frac{h_I' - h_w}{h_I - h_w} = \frac{2841,3 - 461,42}{3051,07 - 461,42} = 0,92 \quad (4.18)$$

Količina vode koju treba dodati:

$$m_p = \frac{G_1}{G_1 + G_{w1}} \rightarrow G_{w1} = \frac{G_1}{m_p} - G_1 = \frac{15}{0,92} - 15 = 1,32 \text{ t/h} \quad (4.19)$$

Toplina predana u niskotlačnom potrošaču topline

$$Q_{SP} = G_1 \cdot (h_1 - h_w) = 4,17 \cdot (3051,07 - 461,42) = 10798,83 \text{ kW} = 10,8 \text{ MW} \quad (4.18)$$

#### 4.4. Reduciranje temperature pare na drugom oduzimanju

Na drugom oduzimanju pare iz turbine pri tlaku  $p_2 = 4$  bara, izlazna temperatura pare je  $t_1 = 174,31$  °C. Postrojenju je potrebna temperatura srednjetačne pare od 150 °C, pa je potrebno smanjiti temperaturu izlazne pare miješanjem sa napojnom vodom.

- Tlak ulazne pare:  $p_2 = 4$  bar
- Temperatura ulazne pare:  $t_2 = 174,31$  °C
- Temperatura vode za miješanje:  $t_w = 110$  °C
- Entalpija vode na ulazu:  $h_w = 461,42$  kJ/kg
- Količina pare:  $G_2 = 28$  t/h = 7,77 kg/s
- Temperatura izlazne pare:  $t_2' = 150$  °C
- Entalpija pare na ulazu:  $h_2 = 2812,72$  kJ/kg
- Entalpija pare na izlazu:  $h_2' = 2761,2$  kJ/kg

Maseni udio pare u smjesi pri miješanju:

$$m_p = \frac{h_2' - h_w}{h_2 - h_w} = \frac{2761,2 - 461,42}{2812,72 - 461,42} = 0,98 \quad (4.19)$$

Količina vode koju treba dodati:

$$m_p = \frac{G_2}{G_2 + G_{w2}} \rightarrow G_{w2} = \frac{G_2}{m_p} - G_2 = \frac{28}{0,98} - 28 = 0,63 \text{ t/h} \quad (4.20)$$

Toplina predana u niskotlačnom potrošaču topline

$$Q_{NP} = G_2 \cdot (h_2 - h_w) = 7,77 \cdot (2812,72 - 461,42) = 18293,11 \text{ kW} = 18,3 \text{ MW} \quad (4.21)$$

#### 4.5. Toplinski proračun kondenzatora

- količina pare na ulazu u kondenzator:  $G_k = 55 \text{ t/h} = 15,19 \text{ kg/s}$
- tlak pare na ulazu u kondenzator:  $p_k = 0,08 \text{ bar}$
- entalpija pare na ulazu u kondenzator:  $h_k = 2375,52 \text{ kJ/kg}$
- temperatura rashladne vode na ulazu u kondenzator:  $t_{w1} = 25 \text{ °C}$
- temperatura kondenzata:  $t_k = 41,51 \text{ °C}$
- promjer rashladnih cijevi kondenzatora:  $d_v/d_u = 23/21 \text{ mm}$
- broj vodnih tokova u kondenzatoru:  $z = 2 \text{ (usvojeno)}$
- brzina strujanja rashladne vode:  $w = 2 \text{ m/s}$
- vanjski promjer rashladnih cijevi:  $d_v = 23 \text{ mm} = 0,023 \text{ m}$
- unutarnji promjer rashladnih cijevi:  $d_u = 21 \text{ mm} = 0,023 \text{ m}$

Toplinska bilanca kondenzatora

Toplina odvedena u kondenzatoru:

- Iz programa REFPROP za zasićenu vodenu paru pri  $p_k = 0,08$ :  
 $h'_k = 173,84 \text{ kJ/kg}$   
 $t_k = 41,51 \text{ °C}$

$$Q_k = G_k \cdot (h_k - h'_k) = 15,19 \cdot (2375,52 - 173,84) = 33451,85 \text{ kW} = 33,45 \text{ MW} \quad (4.22)$$

Porast temperature rashladne vode:

- Usvojeni porast temperature rashladne vode iznosi  $\Delta t_w = 10 \text{ °C}$

Temperatura rashladne vode na izlazu iz kondenzatora:

$$t_{w2} = \Delta t_w + t_{w1} = 10 + 25 = 35 \text{ °C} \quad (4.23)$$

Razlika temperature kondenzata (pare) i temperature rashladne vode:

- Na ulazu u kondenzator:  
 $\Delta t_1 = t_k - t_{w1} = 41,51 - 25 = 16,51 \text{ °C} \quad (4.24)$



- Na izlazu iz kondenzatora:

$$\Delta t_2 = t_k - t_{w2} = 41,51 - 35 = 6,51 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.25)$$

Maseni protok rashladne vode

Temperatura za koju se uzimaju svojstva vode

$$\Delta t_v = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} = \frac{25 + 35}{2} = 30 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.26)$$

- Svojstva vode na temperaturi 30 °C (Kraut, str. 214):

$$c_v = 4,12 \text{ kJ/kgK}$$

$$\rho = 995,61 \text{ kg/m}^3$$

Maseni protok vode

$$M_w = \frac{Q_k}{c_p \cdot \Delta t_w} = \frac{33451,85}{4,12 \cdot 10} = 812,43 \text{ kg/s} \quad (4.27)$$

Za količinu vode  $M_w$  koeficijent cirkulacije vode iznosi:

$$m = \frac{M_w}{G_k} = \frac{812,43}{15,19} = 53,47 \quad (4.28)$$

Volumni protok rashladne vode:

$$V_w = \frac{M_w}{\rho} = \frac{812,43}{995,61} = 0,81 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.29)$$

Razlika temperature pare i rashladne vode na izlazu:

$$\delta t = t_k - (\Delta t_w + t_{w1}) = 41,51 - (10 + 25) = 6,51 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.30)$$

Srednja razlika temperature pare i rashladne vode

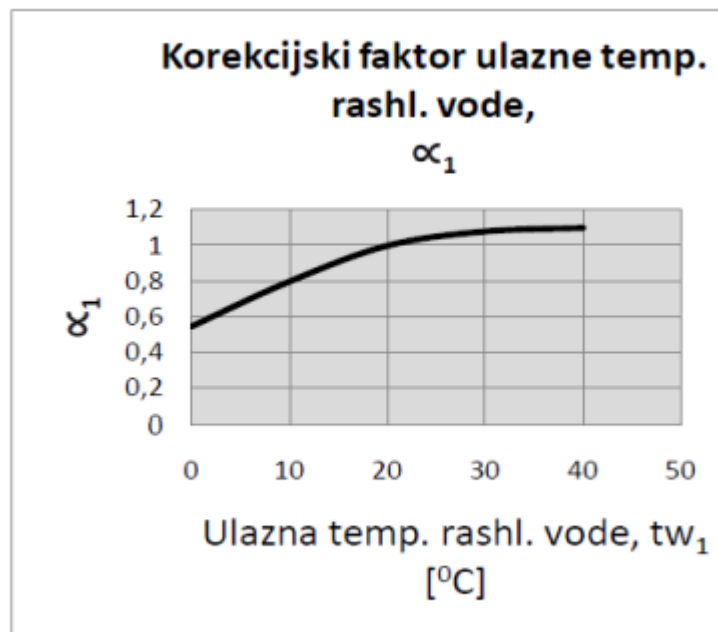
$$\delta t_s = \frac{\Delta t_w}{\ln \frac{\delta t + \Delta t_w}{\delta t}} = \frac{10}{\ln \frac{6,51 + 10}{6,51}} = 10,74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.31)$$

Koeficijent prolaza topline

$b$  – koeficijent onečišćenja (0,75-0,85)

$b = 0,85 \rightarrow$  odabrano

$\alpha_1 = 1,08$  ( za temperaturu  $t_{w1} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) – iz dijagrama

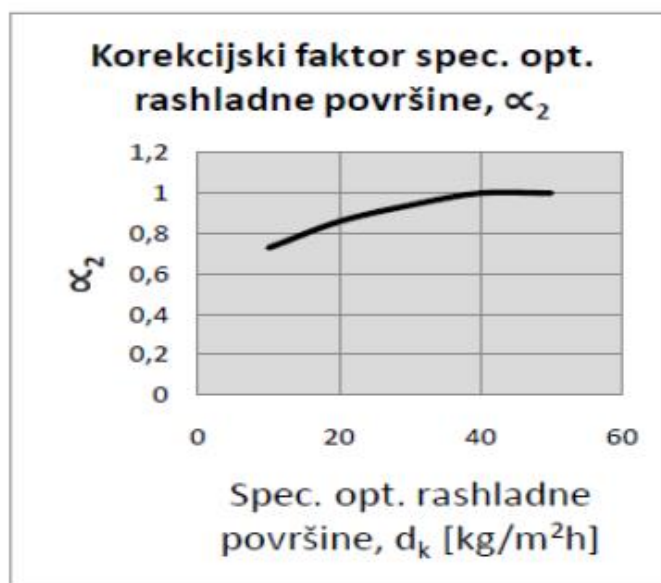


Slika 4.2 Dijagram za određivanje korekcijskog faktora  $\alpha_1$

$d_k$  – specifično opterećenje rashladne površine (0,01 – 0,02 kg/m<sup>2</sup>s)

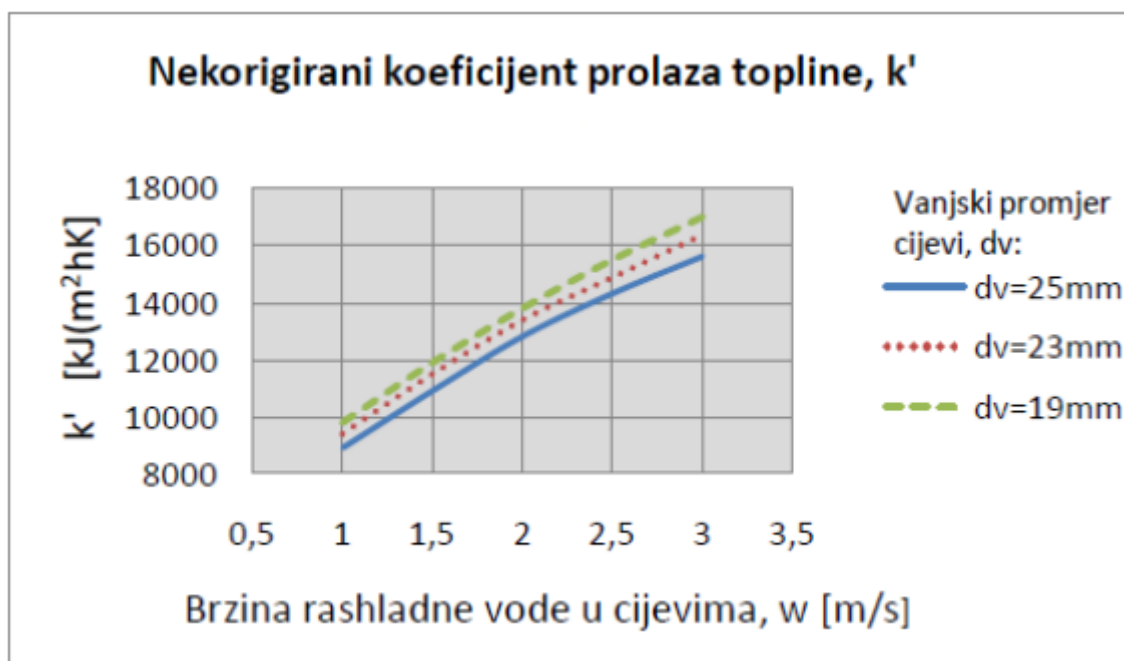
$d_k = 0,015 \text{ kg/m}^2\text{s} = 54 \text{ kg/ m}^2\text{h} \rightarrow$  odabrano

$\alpha_2 = 1$  (za  $d_k = 54 \text{ kg/ m}^2\text{h}$ ) – iz dijagrama



Slika 4.3 Dijagram za određivanje korekcijskog faktora  $\alpha_2$

$k' = 13500 \text{ kJ/m}^2\text{hK}$  (za  $d_v = 23 \text{ mm}$ ;  $w = 2 \text{ m/s}$ ) – iz dijagrama



Slika 4.4 Dijagram za određivanje nekorigiranog koeficijenta prolaza topline,  $k'$

$$k = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot b \cdot k' = 1,08 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot 13500 = 12393 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2\text{hK}} = 3442,5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.32)$$

Rashladna površina kondenzatora

$$A_k = \frac{Q_k}{k \cdot \delta t_s} = \frac{33451849}{3442,5 \cdot 10,74} = 904,41 \text{ m}^2 \rightarrow 905 \text{ m}^2 \quad (4.33)$$

Površina protočnog presjeka rashladnih cijevi

$$S_m = \frac{V_w}{w} = \frac{0,81}{2} = 0,41 \text{ m}^2 \quad (4.35)$$

Broj rashladnih cijevi u kondenzatoru

$$n = \frac{4 \cdot S_m \cdot z}{\pi \cdot d_u^2} = \frac{4 \cdot 0,41 \cdot 2}{\pi \cdot 0,021^2} = 2355,96 \text{ kom} - \text{odabran broj cijevi } 2356 \text{ komada} \quad (4.36)$$

Dužina rashladnih cijevi

$$L = \frac{A_k}{\pi \cdot d_v \cdot n} = \frac{905}{\pi \cdot 0,023 \cdot 2356} = 5,31 \text{ m} \quad (4.37)$$

Unutarnji promjer kondenzatora

$u_c$  – koeficijent iskorištenja cijevne ploče ( $u_c = 0,22 - 0,32$ )

$u_c = 0,29 \rightarrow$  usvojeno

$$D_k = d_v \cdot \sqrt{\frac{n}{u_c}} = 0,023 \cdot \sqrt{\frac{2356}{0,29}} = 2,07 \text{ m} \quad (4.38)$$

Hidraulički otpor kondenzatora

$\lambda$  – koeficijent trenja vode ( $\lambda = 0,025 - 0,037$ )

$\lambda = 0,03 \rightarrow$  usvojeno

$\zeta$  – koeficijent učvršćivanja cijevi na cijevnu ploču ( $\zeta = 1,0 - 1,5$ )

$\zeta = 1,2 \rightarrow$  odabrano

$w_{pc}$  – brzina vode na ulazu i izlazu cijevnih spojeva

$$w_{pc} = 0,3 \cdot w = 0,3 \cdot 2 = 0,6 \text{ m/s} \quad (4.39)$$

$$H_k = z \cdot \left( \lambda \cdot \frac{L}{d_u} + \zeta \right) \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} + \frac{\rho \cdot w_{pc}^2}{2} \quad (4.40)$$

$$H_k = 2 \cdot (0,03 \cdot \left(\frac{5,31}{0,021} + 1,2\right) \cdot \left(\frac{995,61 \cdot 2^2}{2} + \frac{995,61 \cdot 0,6^2}{2}\right)) = 35203,85 \text{ Pa} = 35,20 \text{ kPa}$$

Parni otpor kondenzatora

$\omega$  – koeficijent otpora pare ( $\omega = 1,2 \cdot 10^{-4} - 1,8 \cdot 10^{-4}$ )

$\omega = 1,8 \cdot 10^{-4} \rightarrow$  odabrano

$v = v'' = 23,73 \text{ m}^3/\text{kg} \rightarrow$  iz programa REFPROP za zasićenu paru ( $p_k = 0,06 \text{ bar}$ )

$$\Delta p = \omega \cdot \left(\frac{G_k \cdot \sqrt{v}}{L \cdot d_v \cdot \sqrt{n}}\right)^{2,5}$$

$$\Delta p = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{15,19 \cdot \sqrt{23,73}}{5,31 \cdot 0,023 \cdot \sqrt{2356}}\right) = 0,070 \text{ bar} = 7046,61 \text{ Pa} \quad (4.41)$$

#### 4.6. Proračun predgrijača vode

- ulazna temperatura napojne vode u predgrijač:  $t_{p1} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$
- izlazna temperatura napojne vode iz predgrijača:  $t_{p2} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$
- ulazna temperatura pare u predgrijač:  $t_2 = 174,31 \text{ }^\circ\text{C}$
- entalpija pare na ulazu u predgrijač:  $h_2 = 2812,72 \text{ kJ/kg}$
- izlazna temperatura kondenzata iz predgrijača:  $t_k = 133,52 \text{ }^\circ\text{C}$
- količina napojne vode:  $G_{nv} = 160 \text{ t/h} = 44,48 \text{ kg/s}$
- brzina strujanja napojne vode:  $w_{nw} = 1,6 \text{ m/s}$
- brzina strujanja pare:  $w_p = 40 \text{ m/s}$
- vanjski promjer cijevi predgrijača:  $d_v = 20 \text{ mm}$
- unutarnji promjer cijevi predgrijača:  $d_u = 18 \text{ mm}$

Toplinski proračun predgrijača

entalpija napojne vode na ulazu u predgrijač:

$$h_{p1} = 461,42 \text{ kJ/kg}$$

entalpija napojne vode na izlazu iz predgrijača:

$$h_{p2} = 632,18 \text{ kJ/kg}$$

Toplina potrebna za zagrijavanje napojne vode:

- za  $t_{p2} = 140 \text{ °C}$  specifični toplinski kapacitet iznosi  $c_p = 4,307 \text{ kJ/kg}$

$$Q_{nv} = G_{nv} \cdot c_p \cdot (t_{p2} - t_{p1}) = 44,56 \cdot 4,307 \cdot (120 - 110) = 1916,06 \text{ kW} \quad (4.42)$$

Toplina koju para predaje napojnoj vodi:

- pri tlaku od 4 bar temperatura zasićenja je  $t = 143,61 \text{ °C}$  entalpija kondenzirane pare za zagrijavanje iznosi  $h' = 604,65 \text{ kJ/kg}$

$$\Delta h = h_2 - h' = 2812,72 - 604,65 = 2208,07 \text{ kJ/kg} \quad (4.43)$$

Količina pare potrebne za zagrijavanje napojne vode:

$$G_{pp} = \frac{Q_{nv}}{\Delta h} = \frac{1916,06}{2208,07} = 0,87 \text{ kg/s} = 3,12 \text{ t/h} \quad (4.44)$$

Porast temperature rashladne vode:

$$\Delta t_p = t_{p2} - t_{p1} = 120 - 110 = 10 \text{ °C} \quad (4.45)$$

Razlika temperatura kondenzata (pare) i napojne vode na izlazu:

$$\delta t = t_k - t_{p2} = 133,52 - 120 = 13,52 \text{ °C} \quad (4.46)$$

Srednja razlika temperature pare i napojne vode:

$$\delta t_s = \frac{\Delta t_p}{\ln \frac{\delta t + \delta t_p}{\delta t}} = \frac{10}{\ln \frac{13,52 + 10}{13,52}} = 18,06 \text{ °C} \quad (4.47)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$k = 3500 \cdot b \cdot \left( \frac{1,1 \cdot w_{mw}}{\sqrt[4]{d_u}} \right)^x \cdot \left[ 1 - \frac{0,42 \cdot \sqrt{b}}{1000} \cdot (35 - t_{p1})^2 \right] \cdot \Phi_z \cdot \Phi_d \quad (4.48)$$

$b = 0,65 - 0,85 \rightarrow$  koeficijent onečišćenja

$b = 0,8 \rightarrow$  odabrano

$\Phi_z \rightarrow$  koeficijent koji uzima u obzir utjecaj broja prolaza vode

$\Phi_z = 1,214$

$\Phi_d \rightarrow$  koeficijent koji uzima u obzir utjecaj opterećenja pare

$\Phi_d = 1$  - za nominalno opterećenje

$$x = 0,12 \cdot b \cdot (1 + 0,15 \cdot t_{p1}) = 0,12 \cdot 0,8 \cdot (1 + 0,15 \cdot 110) = 1,68 \quad (4.49)$$

$k = 2905 \text{ W}$

Površina za izmjenu topline u predgrijaču:

$$A_p = \frac{Q_{nv}}{k \cdot \delta t_s} = \frac{1916059}{2905 \cdot 18,06} = 36,51 \text{ m}^2 \quad (4.50)$$

Proračun geometrije predgrijača

Volumni protok napojne vode:

$$V_{nw} = \frac{G_{nv}}{\rho} = \frac{44,57}{950,95} = 0,0468 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.51)$$

Površina protočnog presjeka cijevi

$$S_m = \frac{V_{nw}}{W_{nv}} = \frac{0,0468}{1,6} = 0,0292 \text{ m}^2 \quad (4.52)$$

Broj cijevi u predgrijaču:

$$n = \frac{4 \cdot S_m}{\pi \cdot d_u^2} = \frac{4 \cdot 0,0292}{\pi \cdot 0,018^2} = 114,89 \quad (4.53)$$

$n = 115$  – odabran broj cijevi

Aktivna dužina cijevi:

$$L = \frac{A_p}{\pi \cdot d_v \cdot n} = \frac{36,51}{\pi \cdot 0,02 \cdot 115} = 5,05 \text{ m} \quad (4.54)$$

Unutarnji promjer predgrijača:

$u_c$  - koeficijent iskorištenja cijevne ploče ( $u_c = 0,22 - 0,32$ )

$u_c = 0,29$  (usvojeno)

$$D_u = d_v \sqrt{\frac{n}{u_c}} = 0,02 \sqrt{\frac{115}{0,29}} = 0,40 \text{ m} \quad (4.55)$$

Razmak između cijevi:

$$t = (1,3 \dots 1,5) \cdot d_v = 1,3 \cdot 20 = 26 \text{ mm} \quad (4.56)$$

Volumni protok pare:

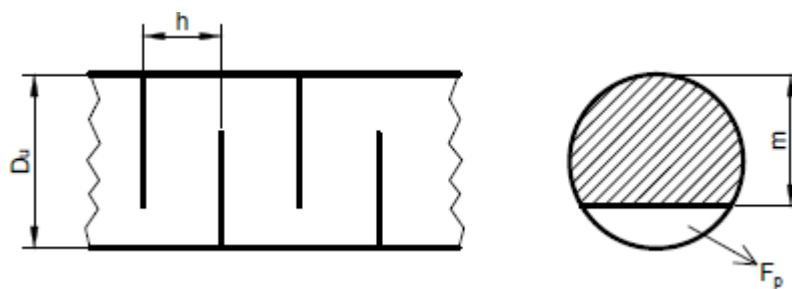
$v'' = 0,6058 \text{ m}^3$  (specifični volumen pare pri tlaku od 4 bar)

$$V_p = G_{pp} \cdot v'' = 0,42 \cdot 0,8677 = 0,53 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.57)$$

Površina poprečnog presjeka kroz koji struji para:

$$F_p = \frac{V_p}{w_p}$$

$$F_p = \frac{0,53}{40} = 0,0131 \text{ m}^2 \quad (4.58)$$



Slika 4.5 Shematski prikaz pregrada u predgrijaču

Proračun pregrada u predgrijaču:

- visina pregrade:

$$m = (0,6 \dots 0,8) \cdot D_u = 0,7 \cdot 0,4 = 0,28 \text{ m} \quad (4.59)$$



udaljenost između pregrada:

$$h = \frac{F_p \cdot t}{D_u \cdot (t - d_v)} = \frac{0,0131 \cdot 0,026}{0,40 \cdot (0,026 - 0,02)} = 0,14 \text{ m} \quad (4.60)$$

broj pregrada:

$$n_p = \frac{L}{h} + 1 = \frac{5,1}{0,14} + 1 = 36,66 \text{ kom} \quad (4.61)$$

$$n_p = 37 \text{ kom}$$

#### 4.7. Proračun otplinjača

- temperatura dodatne napojne vode:	$t_{nw} = 10 \text{ °C}$
- izlazna temperatura vode iz otplinjača:	$t_{o2} = 187 \text{ °C}$
- ulazna temperatura pare u otplinjač:	$t_p = 174,31 \text{ °C}$
- entalpija pare na ulazu u otplinjač:	$h_p = 2812,72 \text{ kJ/kg}$
- količina kondenzirane vode iz predgrijača:	$G_{wp} = 3,13 \text{ t/h}$
- temperatura kondenzata iz predgrijača:	$t_{wp} = 133,52 \text{ °C}$
- entalpija kondenzata iz predgrijača:	$h_{wp} = 563,69 \text{ kJ/kg}$

Pretpostavka da se iz izmjenjivača vraća 60% vode.

Entalpija vode na izlazu iz otplinjača:

$$h_{o2} = 794,07 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija ulazne vode u otplinjač:

$$h_k = 151,48 \text{ kJ/kg} - \text{entalpija kapljevine na izlazu iz kondenzatora za } p_k$$

$$h_{k1} = 762,52 \text{ kJ/kg} - \text{entalpija vrele vode na izlazu iz srednjotlačnog potrošača za } p_1$$

$h_{k2} = 604,65 \text{ kJ/kg}$  - entalpija vrele vode na izlazu iz niskotlačnog potrošača za  $p_2$

jednadžba miješanja kondenzata prije ulaska u otplinjač:

$$G_{k1} \cdot h_{k1} + G_{k2} \cdot h_{k2} + G_k \cdot h_k = (G_{k1} + G_{k2} + G_k) \cdot h_{o1} \quad (4.62)$$

$$G_{k1} = G_1 \cdot 0,6 = 15 \cdot 0,6 = 9 \text{ t/h} \quad (4.63)$$

$$G_{k2} = G_2 \cdot 0,6 = 28 \cdot 0,6 = 16,80 \text{ t/h} \quad (4.64)$$

$$h_{o1} = \frac{G_{k1} \cdot h_{k1} + G_{k2} \cdot h_{k2} + G_k \cdot h_k}{G_{k1} + G_{k2} + G_k}$$

$$h_{o1} = \frac{9 \cdot 762,52 + 16,80 \cdot 604,65 + 54,70 \cdot 151,48}{9 + 16,80 + 54,70}$$

$$h_{o1} = 314,37 \text{ kJ/kg} \quad (4.65)$$

Količina povratnog kondenzata iz procesa:

$$G_{o1} = G_{k1} + G_{k2} + G_k = 80,49 \text{ t/h} \quad (4.66)$$

Entalpija dodatne napojne vode:

$$h_{nw} = 42,02 \text{ kJ/kg}$$

Maseni protok dodatne vode (iz pripreme vode) i pare za zagrijavanje

Maseni protok napojne vode iz otplinjača jednak je zbroju protočnih količina dodatne vode potrebnih za reduciranje temperatura pare na prvom i drugom oduzimanju, te napojne vode naulazu u generator pare:

$$G_{o2} = G_{w1} + G_{w2} + G_{nv} = 1,32 + 0,63 + 160,15 = 161,10 \text{ t/h} \quad (4.67)$$

Da bi se dobila masa dodatne vode  $G_{nw}$  i pare za zagrijavanje  $G_p$  mora se postaviti sustav sa dvije jednadžbe sa dvije nepoznanice:

prva jednadžba, zakon očuvanja mase:

$$G_{o2} = G_{o1} + G_{nw} + G_p + G_{wp} \quad (4.68)$$

$$G_{nw} = G_{o2} - G_{o1} - G_p - G_{wp} \quad (4.69)$$

druga jednadžba, zakon očuvanja energije:

$$h_{o2} \cdot G_{o2} = h_{o1} \cdot G_{o1} + h_{nw} \cdot G_{nw} + h_p \cdot G_p + h_{wp} \cdot G_{wp} \quad (4.70)$$

uvrštanjem prve jednadžbe u drugu dobije se količina pare za zagrijavanje:

$$h_{o2} \cdot G_{o2} = h_{o1} \cdot G_{o1} + h_{nw} \cdot G_{nw} + h_p \cdot G_p + h_{wp} \cdot G_{wp}$$

$$G_p = \frac{G_{o2} \cdot h_{o2} - G_{o1} \cdot h_{o1} - G_{nw} \cdot h_{nw} + G_{o1} \cdot h_{nw} + G_{wp} \cdot h_{nw} - G_{wp} \cdot h_{wp}}{(h_p - h_{nw})}$$

$$= \frac{161,10 \cdot 461,42 - 80,49 \cdot 391,84 - 161,10 \cdot 42,02 + 80,49 \cdot 42,02 + 3,12 \cdot 42,02 - 3,12 \cdot 563,69}{(2812,72 - 42,02)}$$

$$G_p = 16,03 \text{ t/h} \quad (4.71)$$

- prema tome maseni protok dodatne vode iznosi:

$$G_{nw} = G_{o2} - G_{o1} - G_p - G_{wp} = 161,10 - 80,49 - 16,03 - 3,12 = 62,44 \text{ t/h}$$

#### 4.8. Proračun pumpi

Proračun kondenzatne pumpe

Kapacitet kondenzatne pumpe:

$$q = 1,25 \cdot G \rightarrow \text{ako je protok } G > 30 \text{ t/h (Kraut, str. 226)}$$

$G_{o1} \rightarrow$  količina povratnog kondenzata

$$q_{kp} = 1,25 \cdot G_{o1} = 1,25 \cdot 80,49 = 100,62 \text{ t/h} \quad (4.72)$$

Volumni protok kondenzata:

$$V_{o1} = \frac{G_{o1}}{\rho} = \frac{80,49}{950,95} = 0,084 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.73)$$

Ukupni protočni gubici:

$$\Delta p = p_{n.r.} + p_{cj} + p_h \quad (4.74)$$

$p_{n.r.}$  → gubici za regulator kondenzata

$$p_{n.r.} = 2,5 \text{ bar (Kraut, str. 226)}$$

$p_{cj}$  → gubici za otpore u cjevovodima (otpori trenja + lokalni otpori)

$$p_{cj} = 2 \text{ bar (Kraut, str. 226)}$$

$p_h$  → gubici s obzirom na visinu do koje pumpa tjera kondenzat u otplinjač

$$p_h = 1 \text{ bar (usvojeno s obzirom na visinu } h \leq 10\text{m)}$$

$$\Delta p = (2,5 + 2 + 1) \cdot 10^5$$

$$\Delta p = 550000 \text{ Pa}$$

Efektivna snaga kondenzatne pumpe:

$\eta_p = 0,8$  - usvojena korisnost pumpe (Kraut, str. 226)

$$P = \frac{V_{o1} \cdot \Delta p}{0,8} = \frac{0,084 \cdot 550000}{0,8} = 58196,74 \text{ W} = 58,19 \text{ kW} \quad (4.75)$$

Proračun napojne pumpe

Kapacitet kondenzatne pumpe:

$$q = 1,25 \cdot G \rightarrow \text{ako je protok } G > 30 \text{ t/h (Kraut, str. 226)}$$

$G_{o2}$  → količina povratnog kondenzata

$$q_{np} = 1,25 \cdot G_{o2} = 1,25 \cdot 162,10 = 202,62 \text{ t/h} \quad (4.76)$$

Volumni protok kondenzata:

$$V_{o2} = \frac{G_{o2}}{\rho} = \frac{202,62}{999,73} = 0,16 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.77)$$

Ukupni protočni gubici:

$$\Delta p = p_{n.r.} + p_{c_j} + p_h \quad (4.78)$$

$p_{n.r.}$  → gubici za regulator kondenzata

$$p_{n.r.} = 2,5 \text{ bar (Kraut, str. 226)}$$

$p_{c_j}$  → gubici za otpore u cjevovodima (otpori trenja + lokalni otpori)

$$p_{c_j} = 2 \text{ bar (Kraut, str. 226)}$$

$p_h$  → gubici s obzirom na visinu do koje pumpa tjera kondenzat u otplinjač

$$p_h = 1 \text{ bar (usvojeno s obzirom na visinu } h \approx 10 \text{ m)}$$

$$\Delta p = (0,5 + 2,5 + 2 + 1) \cdot 10^5 \quad (4.79)$$

$$\Delta p = 650000 \text{ Pa}$$

Efektivna snaga napojne pumpe:

$\eta_p = 0,8$  - usvojena korisnost pumpe (Kraut, str. 226)

$$P = \frac{V_{o2} \cdot \Delta p}{0,8} = \frac{0,16 \cdot 650000}{0,8} = 131741,25 \text{ W} = 131,74 \text{ kW} \quad (4.80)$$

#### 4.9. Proračun redukcijske stanice

Reduciranje tlaka i temperature pare na  $p_1 = 4 \text{ bar}$  i  $t_1' = 210 \text{ °C}$

- tlak ulazne pare:	$p_1 = 12 \text{ bar}$
- temperatura ulazne pare:	$t_0 = 450 \text{ °C}$
- temperatura vode za miješanje:	$t_w = 110 \text{ °C}$
- entalpija vode na ulazu:	$h_w = 461,42 \text{ kJ/kg}$
- količina pare:	$G_1 = 15 \text{ t/h}$
- entalpija pare na ulazu:	$h_0 = 3335,3 \text{ kJ/kg}$
- entalpija pare na izlazu:	$h_1 = 2841,3 \text{ kJ/kg}$

- maseni udio pare u smjesi pri miješanju:

$$m_p = \frac{h_1 - h_w}{h_0 - h_w} = \frac{2841,3 - 461,42}{3335,3 - 461,42} = 0,83 \quad (4.81)$$

- količina vode koju treba dodati:

$$m_p = \frac{G_1}{G_1 - G_w}$$

$$G_w = \frac{G_1}{m_p} - G_1$$

$$G_w = \frac{15}{0,83} - 15$$

$$G_w = 3,11 \text{ t/h} \quad (4.82)$$

Reduciranje tlaka i temperature pare na  $p_2 = 3 \text{ bar}$  i  $t_2' = 150 \text{ °C}$

- tlak ulazne pare:	$p_2 = 3 \text{ bar}$
- temperatura ulazne pare:	$t_0 = 450 \text{ °C}$
- temperatura vode za miješanje:	$t_w = 110 \text{ °C}$
- entalpija vode na ulazu:	$h_w = 461,42 \text{ kJ/kg}$
- količina pare:	$G_2 = 28 \text{ t/h}$
- entalpija pare na ulazu:	$h_0 = 3335,3 \text{ kJ/kg}$
- entalpija pare na izlazu:	$h_2 = 2761,2 \text{ kJ/kg}$

- maseni udio pare u smjesi pri miješanju:

$$m_p = \frac{h_2 - h_w}{h_0 - h_w}$$

$$m_p = \frac{2761,2 - 461,42}{3335,3 - 461,42}$$

$$m_p = 0,80 \quad (4.83)$$

- količina vode koju treba dodati:

$$m_p = \frac{G_2}{G_2 - G_w}$$

$$G_w = \frac{G_2}{m_p} - G_2$$

$$G_w = \frac{28}{0,80} - 28$$

$$G_w = 6,99 \text{ t/h} \quad (4.84)$$

Ukoliko turbina prestane sa radom, dodatna količina vode koju treba uštrcati za redukcijske stanice iznosi 6,99 t/h.

#### 4.10. Proračun izgaranja goriva

##### 4.10.1. Proračun potrošnje goriva

- Sadržaj metana:  $m_{CH_4(\%)} = 94 \%$
- Sadržaj etana:  $m_{C_2H_4(\%)} = 5 \%$
- Sadržaj propana:  $m_{C_3H_8(\%)} = 1 \%$

Udjeli goriva uzeti su sa Inine stranice na kojima piše da je postotak:

- Metana > 85%
- Etana < 7 %
- Propana < 6 %

Donja ogrijevna moć plinovitog goriva:

$$H_d = 108 \cdot \varphi_{H_2(\%)} + 126 \cdot \varphi_{CO(\%)} + 358 \cdot \varphi_{CH_4(\%)} + 643 \cdot \varphi_{C_2H_6(\%)} + 936 \cdot \varphi_{C_3H_8(\%)} + \\ 1216 \cdot \varphi_{C_4H_{10}(\%)} + 1460 \cdot \varphi_{C_5H_{12}(\%)} + 600 \cdot \varphi_{C_2H_4(\%)} + 882 \cdot \varphi_{C_3H_6(\%)} + 1140 \cdot \\ \varphi_{C_4H_8(\%)} + 1403 \cdot \varphi_{C_6H_6(\%)} \text{ kJ/m}_{nG}^3$$

- Gdje su  $\varphi_{H_2(\%)}$ ,  $\varphi_{CO(\%)}$ ,  $\varphi_{CH_4(\%)}$ ,... itd. – volumni udjeli pojedinih sudionika u smjesi

$$H_d = 108 \cdot 0 + 126 \cdot 0 + 358 \cdot 94 + 643 \cdot 5 + 936 \cdot 1 + 1216 \cdot 0 + 1460 \cdot 0 + 600 \cdot 0 + 882 \cdot 0 + 1140 \cdot 0 + 1403 \cdot 0 = 37803 \text{ kJ/m}_{\text{NG}}^3$$

$$H_d = 37803 \frac{\text{kJ}}{\text{m}_{\text{NG}}^3} \div \frac{1}{22,4} \text{ kmol} = 846787,2 \text{ kJ/kmol} \quad (4.85)$$

- Molni udio metana:  $r_{\text{CH}_4} = 0,94$
- Molni udio etana:  $r_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0,05$
- Molni udio propana:  $r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0,01$
- Molni udio:  $\sum_{i=1}^n r_i = r_{\text{CH}_4} + r_{\text{C}_2\text{H}_6} + r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0,94 + 0,05 + 0,01 = 1$  (4.86)

- Molna masa metana:  $M_{\text{CH}_4} = 16,031 \text{ kg/kmol}$
- Molna masa etana:  $M_{\text{C}_2\text{H}_6} = 30,07 \text{ kg/kmol}$
- Molna masa propana:  $M_{\text{C}_3\text{H}_8} = 44,06 \text{ kg/kmol}$
- Prosječna molekularna masa:

$$M_M = 0,94 \cdot 16,031 + 0,05 \cdot 30,07 + 0,01 \cdot 44,06 = 17,01 \text{ kg/kmol} \quad (4.87)$$

$$H_d = \frac{H_d \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]}{M_M \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]} = \frac{846787,2 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]}{17,01 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]} = 49772,25 \text{ kJ/kg} \quad (4.88)$$

#### Potrošnja goriva

- Stupanj iskoristivosti generatora pare:  $\eta_{\text{GP}} = 0,9$  (Kraut, str. 225)

$$B = \frac{Q}{\eta_{\text{GP}} \cdot H_d} = \frac{20480}{0,9 \cdot 49772,25} = 0,45 \text{ kg/s} \quad (4.89)$$

#### 4.10.2. Proračun izgaranja

##### Stvarna količina zraka za izgaranje

$\lambda$  – koeficijent viška zraka koji ovisi o vrsti goriva, načinu izgaranja i konstrukciji ložišta.

Za plinovito gorivo vrijedi  $\lambda = 1,1$



$$V_z = \lambda \cdot V_{z,min} \quad (4.90)$$

- Za plinovita goriva, stvarna količina zraka računa se prema izrazu:

$$V_z = \lambda \cdot \frac{1}{21} [0,5 \cdot (\varphi_{CO(\%)} + \varphi_{H_2(\%)} + 1,5 \cdot \varphi_{H_2S(\%)}) + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot \varphi_{C_mH_n(\%)} - \varphi_{O_2(\%)}] \frac{m_n^3}{m_{nG}^3}$$

$$\begin{aligned} V_z &= 5 \cdot \frac{1}{21} \left[ 0,5 \cdot (0 + 0) + 1,5 \cdot 0 + \left(1 + \frac{4}{4}\right) \cdot 94 + \left(2 + \frac{6}{4}\right) \cdot 5 + \left(3 + \frac{8}{4}\right) \cdot 1 - 0 \right] \\ &= 11,02 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \end{aligned} \quad (4.91)$$

$$V_{z,min} = \frac{V_z}{\lambda} = \frac{11,02}{1,1} = 10,02 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.92)$$

Minimalna količina suhih dimnih plinova

$$V_{pl,s min} = \frac{1}{100} [(\varphi_{CO_2(\%)} + \varphi_{HCO(\%)} + \varphi_{H_2S(\%)} + \sum (m \cdot \varphi_{C_mH_n(\%)}) + \varphi_{N_2(\%)} + 79 \cdot V_{z,min}] \frac{m_n^3}{m_{nG}^3}$$

$$V_{pl,s min} = \frac{1}{100} [0 + 0 + 0 + (1 \cdot 94 + 2 \cdot 5 + 3 \cdot 1) + 0 + 79 \cdot 10,02] = 8,99 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.93)$$

Stvarna količina suhih dimnih plinova

$$V_{pl,s} = V_{pl,s min} + (\lambda - 1) \cdot V_{z,min} \frac{m_n^3}{m_{nG}^3}$$

$$V_{pl,s} = 8,99 + (1,1 - 1) \cdot 10,02 = 9,99 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.94)$$

Količina H<sub>2</sub>O u dimnim plinovima izgaranja

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} (\varphi_{H_2(\%)} + \varphi_{H_2S(\%)} + \sum \frac{n}{2} \cdot \varphi_{C_mH_n(\%)} + \varphi_{W(\%)}) \frac{m_n^3}{m_{nG}^3}$$

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} \left[ 0 + 0 + \left(\frac{4}{2} \cdot 94 + \frac{6}{2} \cdot 5 + \frac{8}{2} \cdot 1\right) + 0 \right] = 2,07 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.95)$$

Količina vlažnih dimnih plinova

$$V_{pl} = V_{pl,s} + V_{H_2O} = 9,99 + 2,07 = 12,06 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.96)$$

Količina dimnih plinova

- Količina ugljičnog dioksida

$$V_{CO_2} = \frac{1}{100} \left( \varphi_{CO(\%)} + \varphi_{HCO_2(\%)} + \sum m \cdot \varphi_{C_mH_n} \right) \frac{m_n^3}{m_{nG}^3}$$

$$V_{CO_2} = \frac{1}{100} [0 + 0 + (1 \cdot 94 + 2 \cdot 5 + 3 \cdot 1)] = 1,07 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.97)$$

- Količina vodene pare

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} \left( \varphi_{H_2(\%)} + \varphi_{H_2S(\%)} + \sum \frac{n}{2} \cdot \varphi_{C_mH_n} \right) \frac{m_n^3}{m_{nG}^3}$$

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} \left[ 0 + 0 + \left( \frac{4}{2} \cdot 94 + \frac{6}{2} \cdot 5 + \frac{8}{2} \cdot 1 \right) \right] = 2,07 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.98)$$

- Količina sumpornog dioksida

$$V_{SO_2} = \frac{1}{100} \cdot \varphi_{H_2S(\%)} = \frac{1}{100} \cdot 0 = 0 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.99)$$

- Količina dušika

$$V_{N_2} = \frac{1}{100} \left( \varphi_{N_2(\%)} + 79 \cdot \lambda \cdot V_{z,min} \right) = \frac{1}{100} (0 + 79 \cdot 1,1 \cdot 10,02) = 8,71 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.100)$$

- Količina kisika

$$V_{O_2} = \frac{21}{100} \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{z,min} = \frac{21}{100} \cdot (1,1 - 1) \cdot 10,02 = 0,21 \frac{m_n^3}{m_{nG}^3} \quad (4.101)$$

#### Sastav dimnih plinova izgaranja

- Udio ugljičnog dioksida u vlažnim dimnim plinovima

$$\varphi_{CO_2(\%)} = \frac{V_{CO_2}}{V_{pl}} \cdot 100\% = \frac{1,07}{12,06} = 8,87\% \quad (4.102)$$

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{pl}} = \frac{1,07}{12,06} = 0,0887 \quad (4.103)$$

- Udio vodene pare u vlažnim dimnim plinovima

$$\varphi_{H_2O(\%)} = \frac{V_{H_2O}}{V_{pl}} \cdot 100\% = \frac{2,07}{12,06} = 17,16\% \quad (4.104)$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{pl}} = \frac{2,07}{12,06} = 0,1716 \quad (4.105)$$

- Udio sumpornog dioksida u vlažnim dimnim plinovima

$$\varphi_{SO_2(\%)} = \frac{V_{SO_2}}{V_{pl}} \cdot 100\% = \frac{0}{12,06} = 0\% \quad (4.106)$$

$$r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{pl}} = \frac{0}{12,06} = 0 \quad (4.107)$$

- Udio dušika u vlažnim dimnim plinovima

$$\varphi_{N_2(\%)} = \frac{V_{N_2}}{V_{pl}} \cdot 100\% = \frac{8,71}{12,06} = 72,22\% \quad (4.108)$$

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{pl}} = \frac{8,71}{12,06} = 0,7222 \quad (4.109)$$

- Udio kisika u vlažnim dimnim plinovima

$$\varphi_{O_2(\%)} = \frac{V_{O_2}}{V_{pl}} \cdot 100\% = \frac{0,21}{12,06} = 1,74\% \quad (4.110)$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{pl}} = \frac{0,21}{12,06} = 0,0174 \quad (4.111)$$

- Suma udjela

$$\sum_i \varphi_{i(\%)} = \varphi_{CO_2} + \varphi_{H_2O} + \varphi_{SO_2} + \varphi_{N_2} + \varphi_{O_2} = 100\%$$

$$\sum_i \varphi_{i(\%)} = 8,87 + 17,16 + 72,22 + 1,74 = 100\% \quad (4.112)$$

$$\sum_i r_i = r_{CO_2} + r_{H_2O} + r_{SO_2} + r_{N_2} + r_{O_2} = 1$$

$$\sum_i r_i = 0,0887 + 0,1716 + 0,7222 + 0,0174 = 1 \quad (4.113)$$

Na osnovu provedenog analitičkog proračuna dobiveni su parametri koji će se u nastavku uspoređivati sa podacima koji će se dobiti u simulaciji postrojenja u računalnom programu. Neki od parametra koji će se uspoređivati su količina pare koja je potrebna za pogon postrojenja, količina pare koja će se oduzimati, količina pare prilikom kondenzacije te količine topline u srednjetačnom i niskotlačnom potrošaču.

## 5. SIMULACIJA POSTROJENJA U RAČUNALNOM PROGRAMU

Za izradu simulacije kogeneracijskog postrojenja koristi se računalni program EBSILON Professional, razvijen od strane njemačke tvrtke STEAG Energy Services. Stručni kadar u današnjim postrojenjima želi postići što veću učinkovitost, smanjiti troškove te minimizirati ekološke utjecaje u čemu im ovaj računalni program predstavlja jedno od rješenja. Program ima mogućnost preciznog modeliranja i simulacije različitih vrsta postrojenja npr. konvencionalnih termoelektrana, kogeneracijskih postrojenja, nuklearnih postrojenja. Detaljna analiza koju program omogućuje može pomoći energetskim tvrtkama da povećaju pouzdanost i dugovječnost svojih postrojenja te smanje troškove održavanje i operativne troškove.

Sljedeći model izrađen u računalnom programu EBSILON Professional, slika 5.1., tema je ovog diplomskog rada te predstavlja kogeneracijsko postrojenje koje proizvodi 20 MW električne energije. Za tehnološki proces predviđena je potrošnja visokotlačne, srednjetačne i niskotlačne pare (37, 12 i 3 bara). U postrojenju je jedna kondenzacijska parna turbina koja opskrbljuje toplinske potrošače sa srednjetačnom i niskotlačnom parom.



### 5.1. Analiza rezultata provedene simulacije

Usporedba rezultata dobivenih analitičkim proračunom i rezultata dobivenih u računalnom programu prikazana je u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Usporedba rezultata dobivenih analitičkim proračunom i računalnim modelom

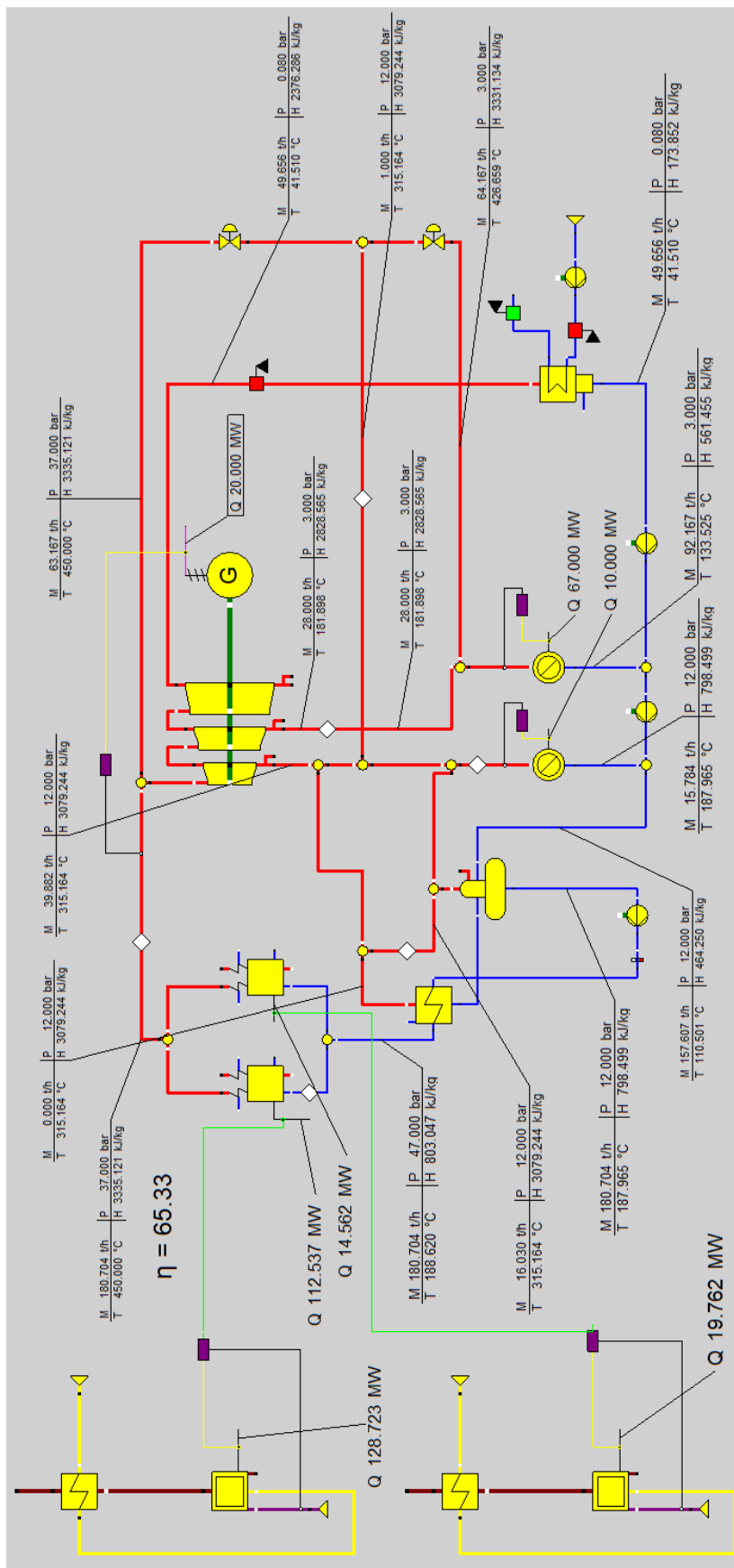
	Analitički proračun	Računalni model
Nazivna električna snaga postrojenja [MWel]	20	
Iskoristivost generatora električne energije [/]	0,98	
Iskoristivost protutlačne turbine [/]	0,9	
Iskoristivost pumpe [/]	0,9	
Mehanička iskoristivost [/]	0,98	
Iskoristivost generatora pare [/]	0,92	
Količina pare za pogon postrojenja [t/h]	160	111,93
Količina pare prilikom prvog oduzimanja [t/h]	15	15,15
Količina pare prilikom drugog oduzimanja [t/h]	28	28,11
Količina pare prilikom kondenzacije [t/h]	55	51,67
Količina topline u srednjetačnom potrošaču [MW]	10,8	9,6
Količina topline u niskotlačnome potrošaču [MW]	18,3	17,70

Usporedbom rezultata dobivenih analitičkim proračunom i rezultata dobivenih u računalnom modelu iz tablice se vidi da postoji odstupanje svakog uspoređivanog parametra. Analitičkim proračunom dobiven je osnovni uvid u ključne parametre, dok je proračunom u računalnom programu dobivena detaljna simulacija rada sistema pod različitim uvjetima.

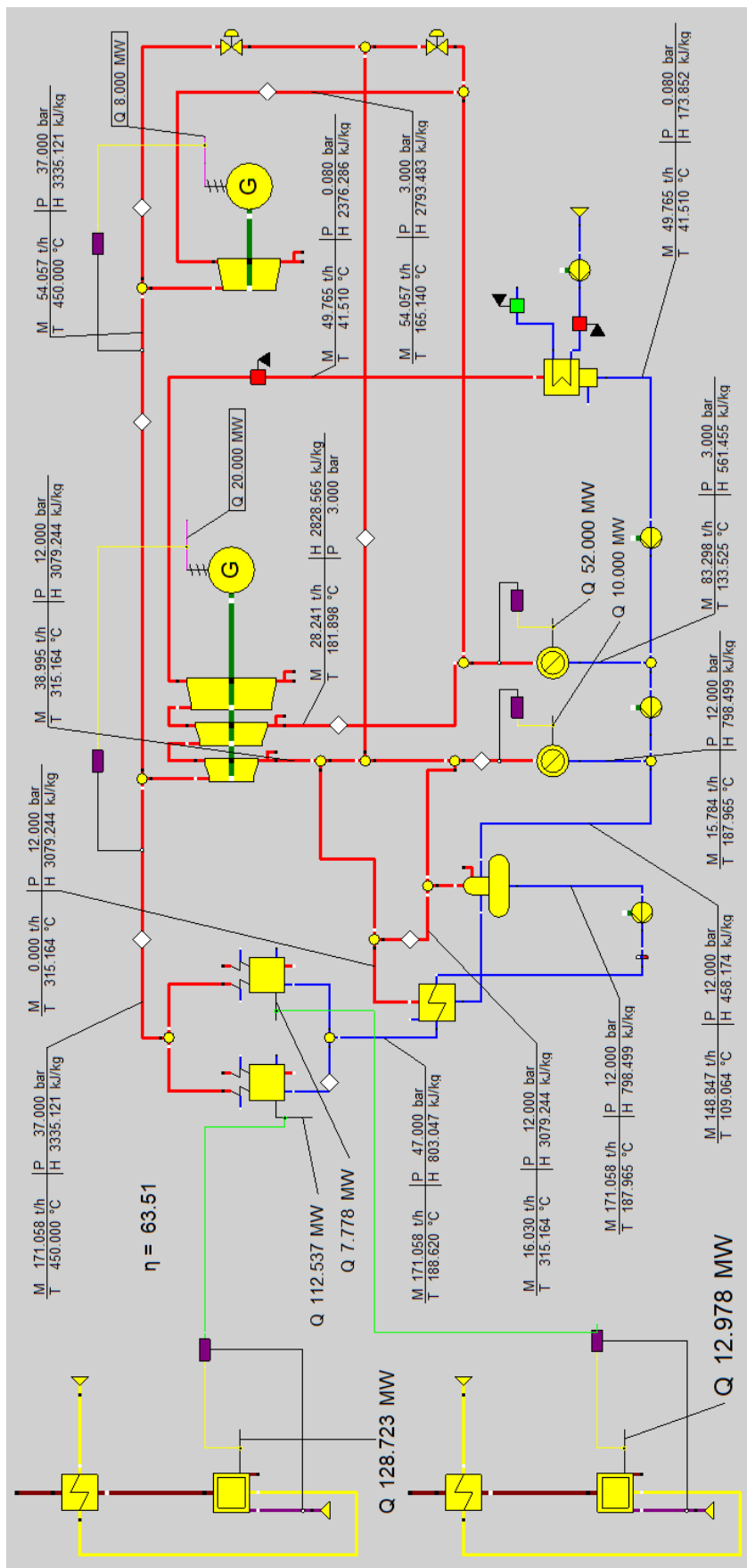
## **5.2. Analiza ugradnje dodatnog turbogeneratorskog postrojenja u postojeće kogeneracijsko postrojenje**

Predviđeno je da se u postojeće kogeneracijsko postrojenje (slika 5.2) ugradi dodatna protutlačna turbina ukupne snage do 8 MW što je prikazano na slici 5.3. Ugradnjom dodatne turbine količina proizvedene pregrijane se smanji. Kondenzacijska parna turbina proizvodit će 20 MW električne energije i opskrbljivati toplinske potrošače sa srednjetačnom i niskotlačnom parom, dok će protutlačna parna turbina proizvoditi do 8 MW električne energije te opskrbljivati toplinske potrošače samo sa niskotlačnom parom.





Slika 5.2 Kogeneracijsko postrojenje bez dodatne turbine



Slika 5.3 Kogeneracijsko postrojenje sa dodatnom protulačnom turbinom

Tablica 5.2 Usporedbe rezultata kogeneracijskog postrojenja bez i sa dodatnom turbinom

	Kogeneracijsko postrojenje bez dodatne turbine	Kogeneracijsko postrojenje sa dodatnom turbinom
Količina pare za pogon postrojenja [t/h]	180,70	171,06
Količina pare prilikom prvog oduzimanja [t/h]	15,78	15,78
Količina pare prilikom drugog oduzimanja [t/h]	92,17	83,30
Količina pare prilikom kondenzacije [t/h]	49,66	49,77
Količina topline u srednjetačnom potrošaču [MW]	10	10
Količina topline u niskotlačnome potrošaču [MW]	67	52
Količina topline predana generatoru pare 1 [MW]	112,54	112,53
Količina topline predana generatoru pare 2 [MW]	14,56	7,78
Iskoristivost postrojenja [%]	65,33	63,51

U tablici 5.2 prikazane su usporedbe rezultata kogeneracijskog postrojenja sa kondenzacijskom parnom turbinom i rezultata sa istim postrojenjem u kojem je dodana jedna protutlačna turbina. Proizvedena pregrijana para će biti nešto niža kod postrojenja sa dodatnom turbinom. Postrojenje sa dodatnom turbinom snabdijevat će toplinske potrošače sa manjom količinom niskotlačne pare dok je količina srednjetačne pare jednaka. Vidi se kako je iskoristivost nešto niža kod postrojenja s dodatnom turbinom, što odgovara tome da je i količina topline u niskotlačnome potrošaču niža, a s time je onda potrebno manje pare prilikom drugog oduzimanja.

## 6. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA I USPOREDBA

Kogeneracijski sustavi proizvode istovremeno električnu i toplinsku energiju u različitim omjerima te ih se stoga ne može jednoznačno usporediti. Kvaliteta električne i toplinske energije bitno se razlikuje, odnosno:

$$\text{Eksergija}_{\text{el.en}} \neq \text{Eksergija}_{\text{topl.en.}}$$

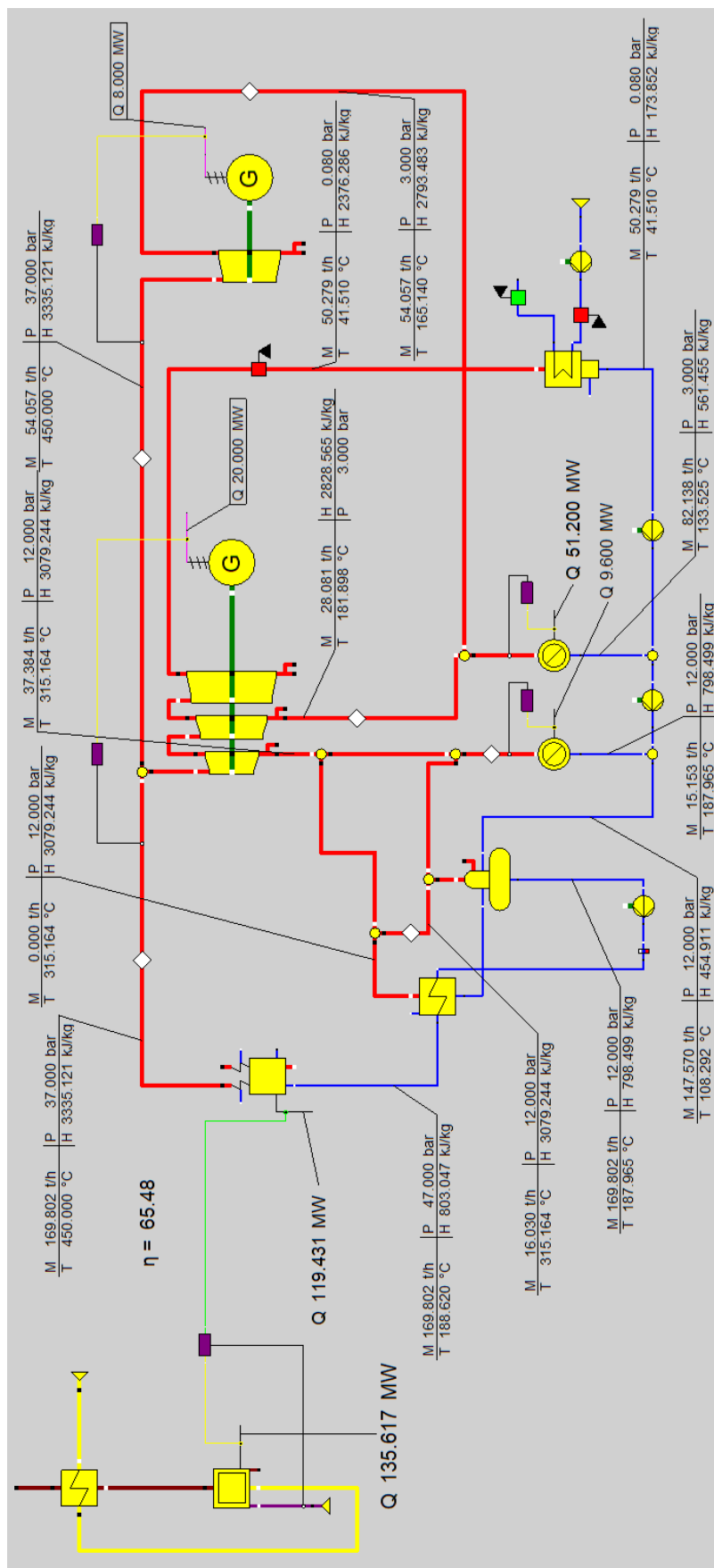
Tehnički pokazatelji, odnosno karakteristične veličine za analizu i usporedbu različitih kogeneracijskih postrojenja jesu:

1. Iskoristivost proizvodnje električne energije
2. Ukupna energetska iskoristivost
3. Ukupna eksergetska iskoristivost
4. Udjel pretvorbe toplinske energije
5. Faktor pretvorbe toplinske energije
6. Faktor vrijednosti proizvedene energije

U nastavku će biti prikazan proračun za jedno kogeneracijsko postrojenje, te pomoću grafova usporedba svih postrojenja. Usporedit će se četiri postrojenja, dva postrojenja sa dva generatora pare i redukcijskim stanicama kako to funkcionira u stvarnosti, potom dva postrojenja sa jednim generatorom pare, gdje smo smanjili proizvedenu paru i bez redukcijskih stanica. Navedena postrojenja prikazana su u radu prije, a za postrojenje na slici 6.1. koje nije prikazano do sada će se izvoditi proračun.

Modeli koji će se uspoređivati:

- Model 1 – kogeneracijsko postrojenje sa dva generatora pare i redukcijskim stanicama
- Model 2 – kogeneracijsko postrojenje sa dodatnom protutlačnom turbinom
- Model 3 – kogeneracijsko postrojenje sa jednim generatorom pare i bez redukcijskih stanica
- Model 4 – kogeneracijsko postrojenje sa dodatnom protutlačnom turbinom i jednim generatorom pare



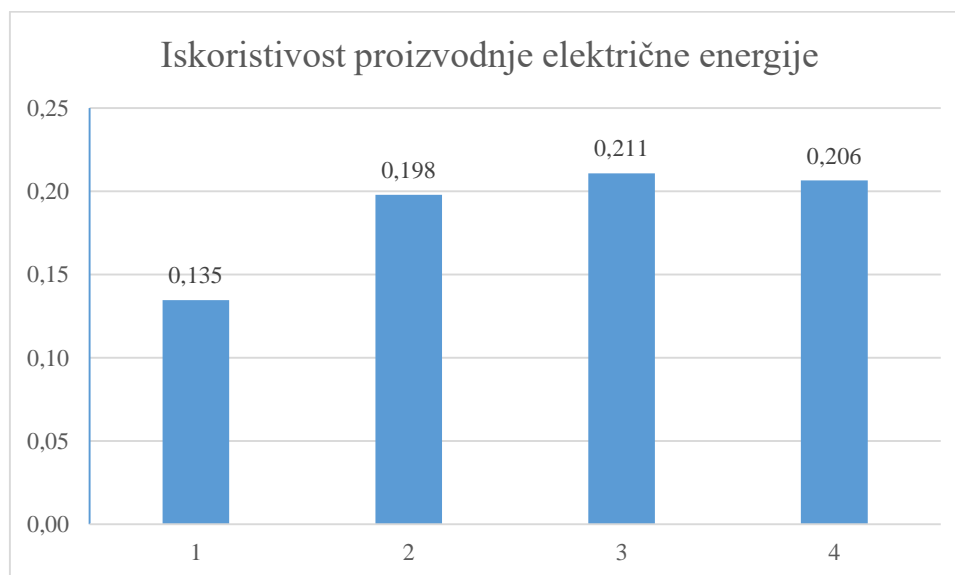
Slika 6.1 Kogeneracijsko postrojenje sa jednim generatorom pare i dvije turbine

### 6.1. Iskoristivost proizvodnje električne energije

Iskoristivost proizvodnje električne energije je omjer proizvedene električne energije i utrošene energije goriva.

$$\eta_T = \frac{E_E}{E_G} = \frac{28}{135,62} = 0,206 \quad (4.114)$$

Uzima se u obzir samo proizvedena električna energija odnosno ne vrjednuje se toplinska energija koja se istovremeno proizvodi.



Slika 6.2 Iskoristivost proizvodnje električne energije

Na slici 6.2 prikazana je usporedba iskoristivosti proizvodnje električne energije sva četiri modela. Vidi se da je najbolja iskoristivost kod Modela 3 koji ima jedan generator pare što i ima smisla jer je iskoristivost proizvodnje električne energije omjer proizvedene električne energije i utrošene energije goriva, a u ovom slučaju je potrebna najmanja količina goriva. Najmanja iskoristivost je kod Modela 1 zbog toga jer je proizvedeno 20 MW električne energije, a utrošena je velika količina goriva da bi postrojenje funkcioniralo.

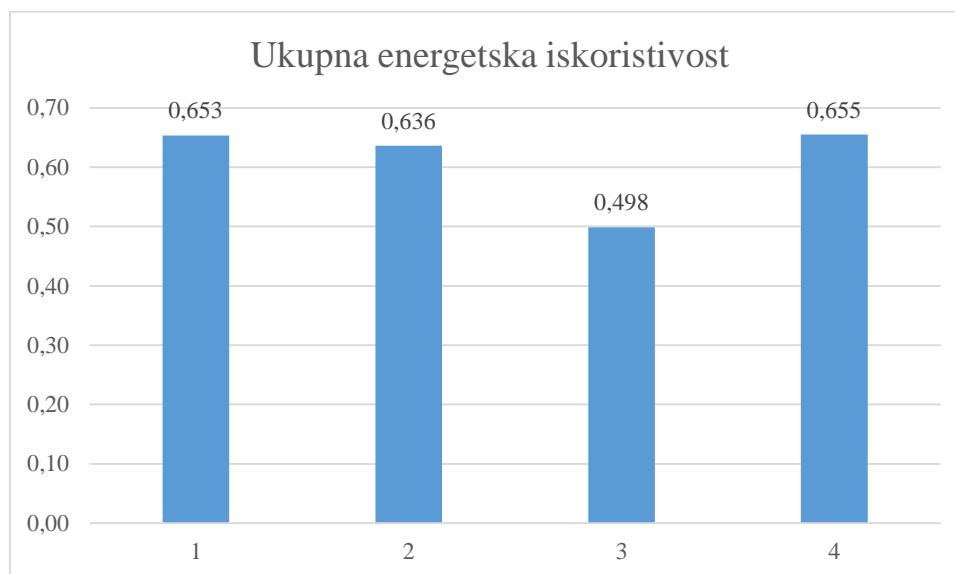
## 6.2. Ukupna energetska iskoristivost

Omjer zbroja proizvedene (iskorištene) toplinske energije i proizvedene električne energije i utrošene energije goriva je ukupna energetska iskoristivost.

$$\psi = \frac{E_E}{E_T} = \frac{28}{60,8} = 0,46 \quad (4.115)$$

$$\eta_E = \frac{E_E + E_T}{E_G} = \frac{E_E(1 + \frac{1}{\psi})}{E_G} = \frac{28(1 + \frac{1}{0,46})}{135,62} = 0,65 \quad (4.116)$$

Ovdje se izjednačuje vrijednost (kvaliteta) dviju različitih oblika energije (toplinske i električne).



Slika 6.3 Ukupna energetska iskoristivost

Na slici 6.3 je usporedba ukupne energetske iskoristivosti, najbolja je za Model 4 gdje jedan generator pare proizvodi pregrijanu paru i kondenzacijska parna turbina zajedno sa protutlačnom parnom turbinom proizvode električnu energiju. Za Model 3 najmanja je energetska iskoristivost jer se kod ovog modela proizvodi najmanje toplinske energije.

### 6.3. Ukupna eksergetska iskoristivost

Ukupna eksergetska iskoristivost omjer je zbroja eksergija električne i toplinske i eksergije goriva.

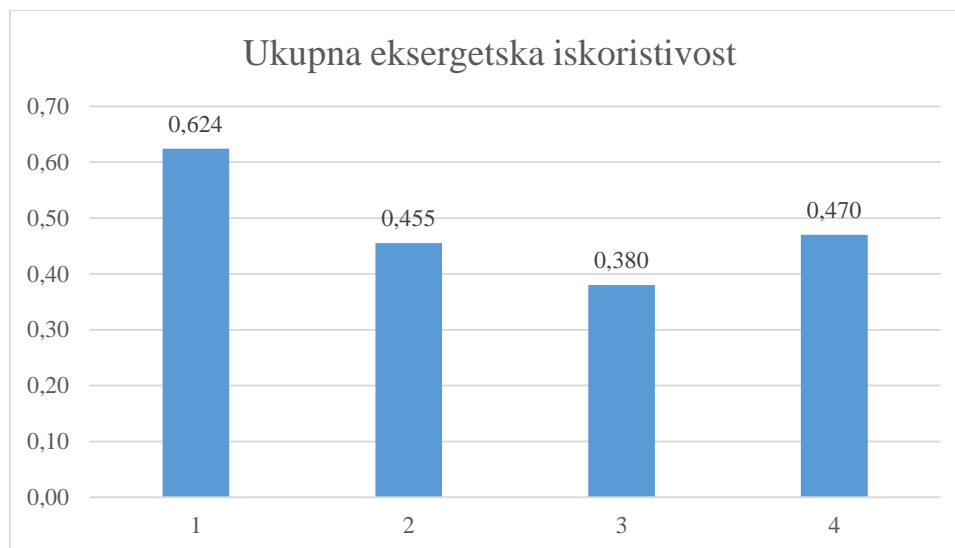
$$\eta_{eks} = \frac{e_E + e_T}{e_G} \quad (4.118)$$

$$e_T = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)E_T \quad (4.119)$$

$$\eta_{eks} = \frac{E_E + \frac{T - T_0}{T} \cdot E_T}{E_G} = \frac{E_E \cdot \left(1 + \frac{T - T_0}{T} \cdot \frac{1}{\Psi}\right)}{E_G} = \eta_T \left(1 + \frac{T - T_0}{T} \cdot \frac{1}{\Psi}\right) \quad (4.120)$$

$$\eta_{eks} = 0,206 \left(1 + \frac{450 - 25}{450} \cdot \frac{1}{0,46}\right) = 0,470$$

Usporedbom prema ovom pokazatelju uzima se u obzir i vrjednuje kvaliteta (eksergija) oba oblika proizvedene energije (električne i toplinske) kao i omjer njihove proizvodnje ( $\Psi$ ).



Slika 6.4 Ukupna eksergetska iskoristivost

Usporedba ukupne eksergetske iskoristivosti prikazana je na slici 6.4 gdje se vidi da je najveća za Model 1. Eksergija je dio energije koji se može potpuno pretvoriti iz jednog oblika u



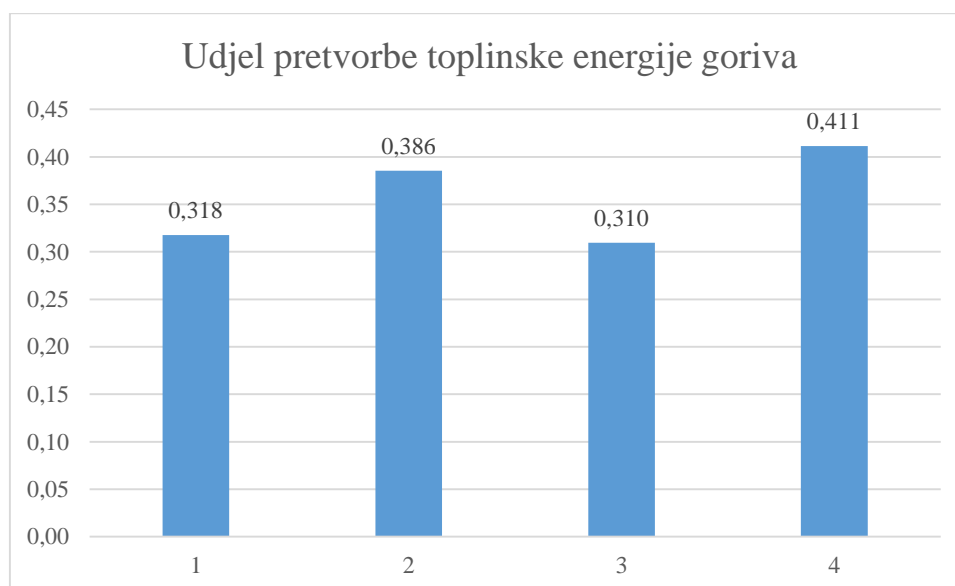
drugi. Najmanja ukupna eksergetska iskoristivost je za Model 3 zbog toga kao što je već navedeno ovaj model proizvodi najmanje toplinske energije.

#### 6.4. Udjel pretvorbe toplinske energije goriva

Omjer proizvedene električne energije i utrošene energije goriva te ekvivalentnog smanjenja potrošnje goriva u kogeneracijskom sustavu u usporedbi sa sustavom za odvojenu proizvodnju toplinske i električne energije je udjel pretvorbe toplinske energije goriva.

$$\varepsilon_T = \frac{E_E}{E_G - \frac{E_T}{\eta_{GP}}} = \frac{28}{135,62 - \frac{60,8}{0,9}} = 0,41 \quad (4.121)$$

Uzima se u obzir ušteda goriva za proizvodnju električne energije u kogeneracijskom sustavu u odnosu na odvojenu proizvodnju električne energije (u termoelektrani).



Slika 6.5 Udjel pretvorbe toplinske energije goriva

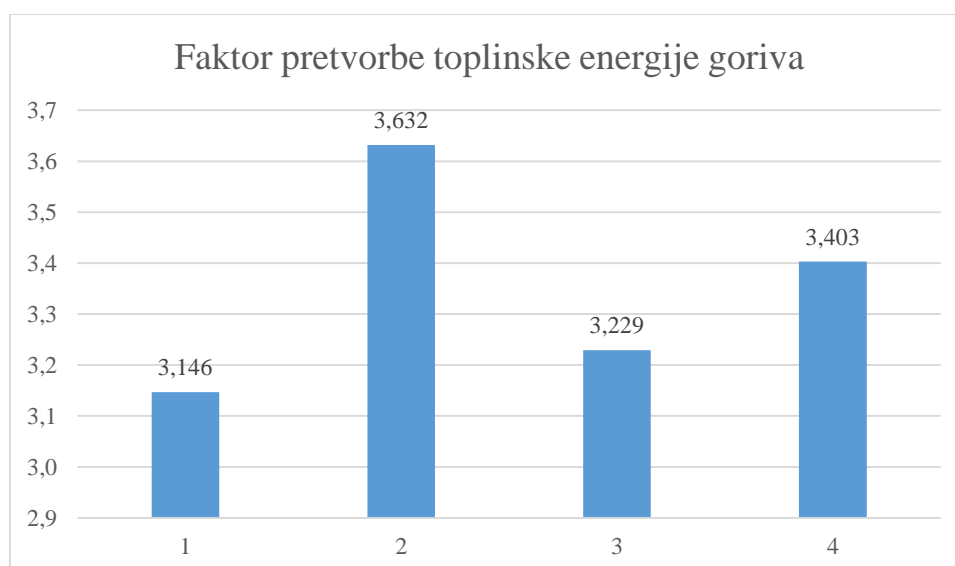
Na slici 6.5 usporedba je udjela pretvorbe toplinske energije goriva odnosno učinkovitosti kojom se toplinska energija, oslobođena izgaranjem goriva, pretvara u korisni rad ili električnu energiju. Stoga Model 4 je najpovoljniji dok je Model 3 najlošiji u usporedbi ova 4 modela.

### 6.5. Faktor pretvorbe toplinske energije goriva

Faktor pretvorbe toplinske energije goriva je recipročna vrijednost udjela pretvorbe toplinske energije goriva.

$$F_T = \frac{E_G - \frac{E_T}{\eta_{GP}}}{E_E} = \frac{135,62 - \frac{60,8}{0,9}}{28} = 3,403 \quad (4.122)$$

Ovaj faktor predstavlja udjel utroška energije goriva po jedinici proizvedene električne energije u kogeneracijskom sustavu.



Slika 6.6 Faktor pretvorbe toplinske energije goriva

Faktor pretvorbe toplinske energije goriva recipročna je vrijednost udjela pretvorbe toplinske energije. Usporedba faktora prikazana je na slici 6.6. Najbolji faktor pretvorbe ima Model 2 zbog najboljeg omjera korisne energije koja se dobiva iz goriva i ukupne toplinske energije koja se oslobađa izgaranjem prirodnog plina. Najmanji faktor ima Model 1 zbog najmanjeg omjera ukupne toplinske energije koja se oslobađa izgaranjem plina i korisne energije koja se dobiva iz goriva.

## 6.6. Faktor vrijednosti proizvedene energije

Za izračun faktora vrijednosti potrebne su jedinične cijene električne i toplinske energije te jedinične cijene energije goriva. Na slici 6.7. prikazana je cijena električne energije na kojoj je odabran bijeli tarifni model sa cijenom po višoj tarifi. Tarifne stavke za opskrbu kupaca u sustavu javne usluge u primjeni su od 01. travnja 2023. godine.

Kategorija		Tarifni model	Tarifni element			
			Radna energija			Naknada za opskrbu
			JT	VT	NT	
			Tarifne stavke			
		[EUR/kWh]	[EUR/kWh]	[EUR/kWh]	[EUR/mjeseč]	
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,070276	-	-	0,982
			(0,079412)	-	-	(1,110)
		Bijeli	-	0,074789	0,036697	0,982
			-	(0,084512)	(0,041468)	(1,110)
Crveni	-	0,074789	0,036697	0,982		
	-	(0,084512)	(0,041468)	(1,110)		
Crni	0,029000	-	-	0,053		
	(0,032770)	-	-	(0,060)		

Slika 6.7 Cijene električne energije [8]

Na slici 6.8. odabrana je cijena toplinske energije za industrijske i poslovne potrošače po cijeni od 0,004645 EUR/kWh. Navedene cijene su u primjeni od 1. listopada 2022. godine.

HEP-TOPLINARSTVO d.o.o. CJENIK - CENTRALNI TOPLINSKI SUSTAV (CTS) - ZAGREB										
Naziv djelatnosti	Naziv tarifne stavke i naknade	Iznosi naknada i tarifnih stavki (TS) po tarifnim grupama (Tg) i tarifnim modelima (TM)								
		KUĆANSTVA (Tg1) / vrela/topla voda (TM1)			INDUSTRIJA I POSLOVNI POTROŠAČI (Tg2) / vrela/topla voda (TM2)			INDUSTRIJA I POSLOVNI POTROŠAČI (Tg2) / para (TM3)		
		Cijena	Iznos razlike*	Valuta/mj.jed.	Cijena	Iznos razlike*	Valuta/mj.jed.	Cijena	Iznos razlike*	Valuta/mj.jed.
PROIZVODNJA TOPLINSKE ENERGIJE	Tarifna stavka Energija	0,021500	0,0000	EUR/kWh	0,043100	0,0000	EUR/kWh	32,829100	0,0000	EUR/t
		0,1622	0,0000	kn/kWh	0,3244	0,0000	kn/kWh	247,3508	0,0000	kn/t
DISTRIBUCIJA TOPLINSKE ENERGIJE	Tarifna stavka Energija	0,002323	-	EUR/kWh	0,004645	-	EUR/kWh	7,393709	-	EUR/t
		0,0175	-	kn/kWh	0,0350	-	kn/kWh	55,7079	-	kn/t
PROIZVODNJA TOPLINSKE ENERGIJE	Tarifna stavka Snaga	0,305262	-	EUR/kW/mj.	0,777756	-	EUR/kW	528,312429	-	EUR/t/h
		2,30	-	kn/kW/mj.	5,86	-	kn/kW/mj.	3.980,57	-	kn/t/h/mj.
DISTRIBUCIJA TOPLINSKE ENERGIJE	Tarifna stavka Snaga	0,457894	-	EUR/kW/mj.	0,818900	-	EUR/kW/mj.	556,724401	-	EUR/t/h/mj.
		3,45	-	kn/kW/mj.	6,17	-	kn/kW/mj.	4.194,64	-	kn/t/h/mj.
OPSKRBA TOPLINSKOM ENERGIJOM	Naknada za djelatnost opskrbe toplinskom energijom	0,9317	-	EUR/mj.	0,9317	-	EUR/mj.	0,9317	-	EUR/mj.
		7,02	-	kn/mj.	7,02	-	kn/mj.	7,02	-	kn/mj.
KUPAC TOPLINSKE ENERGIJE	Naknada za djelatnost kupca** za krajnje kupce s pripremom PTV*** u toplinskoj podstanci	0,091579	-	EUR/m <sup>2</sup> /mj.	0,091579	-	EUR/m <sup>2</sup> /mj.	-	-	-
		0,69	-	kn/m <sup>2</sup> /mj.	0,69	-	kn/m <sup>2</sup> /mj.	-	-	-
	Naknada za djelatnost kupca** za krajnje kupce bez pripreme PTV*** u toplinskoj podstanci	0,066361	-	EUR/m <sup>2</sup> /mj.	0,066361	-	EUR/m <sup>2</sup> /mj.	-	-	-
		0,50	-	kn/m <sup>2</sup> /mj.	0,50	-	kn/m <sup>2</sup> /mj.	-	-	-

Navedene cijene/tarife/naknade su u primjeni od 1.10.2023.  
Na navedene cijene /tarife/naknade obračunava se PDV.  
\*Iznos razlike sukladno Uredbi Vlade Republike Hrvatske (NN 31/23., 74/23., 107/23. i 122/23.)  
\*\* Naknada za djelatnost kupca toplinske energije naplaćuje se krajnjim kupcima spojenim na zajedničko mjerilo toplinske energije  
\*\*\*PTV - potrošna topla voda  
Cijene su preračunate uz korištenje fiksnog tečaja konverzije 7,53450 EUR.

Slika 6.8 Cijene toplinske energije [9]

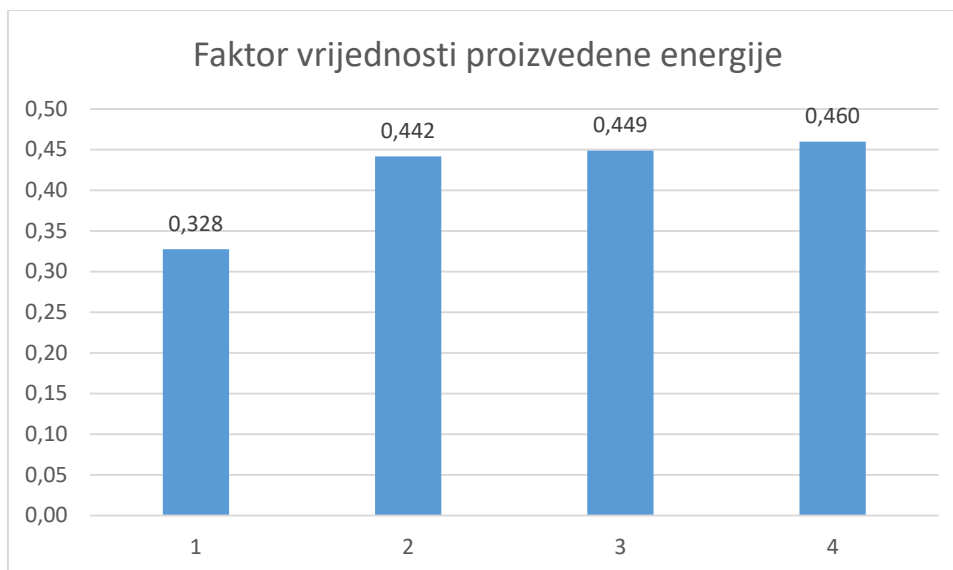
Na slici 6.9. prikazana je odabrana cijena goriva odnosno prirodnog plina po cijeni od 0,0381 EUR/kWh. Tarifna stavka za isporučenu količinu plina vrijedi za razdoblje od 1. travnja 2024. do 30. rujna 2024. godine.

Vrsta tarifne stavke	Oznaka tarifne stavke	Tarifni model	TROŠAK NABAVE PLINA	TROŠAK DISTRIBUCIJE PLINA	TROŠAK OPSKRBE PLINOM	KRAJNJA CIJENA OPSKRBE PLINOM – bez PDV-a	Mjerna jedinica
Tarifna stavka za isporučenu količinu plina – za razdoblje od 1. travnja 2024. do 30. rujna 2024.	Ts1	TM1	0,0264	0,0042	0,0084	0,0390	EUR/kWh
		TM2		0,0042		0,0390	EUR/kWh
		TM3		0,0042		0,0390	EUR/kWh
		TM4		0,0037		0,0385	EUR/kWh
		TM5		0,0037		0,0385	EUR/kWh
		TM6		0,0035		0,0383	EUR/kWh
		TM7		0,0033		0,0381	EUR/kWh
		TM8		0,0031		0,0379	EUR/kWh
		TM9		0,0029		0,0377	EUR/kWh
		TM10		0,0025		0,0373	EUR/kWh
		TM11		0,0021		0,0369	EUR/kWh
		TM12		0,0017		0,0365	EUR/kWh

Slika 6.9 Cijene prirodnog plina [10]

$$F_{CE} = \frac{C_E \cdot E_E + C_T \cdot E_T}{C_G \cdot E_G} = \frac{0,074789 \cdot 28 + 0,004645 \cdot 60,8}{0,0381 \cdot 135,62} = 0,460 \quad (4.123)$$

U razmatranje se uvode ekonomske veličine, odnosno tržišne vrijednosti utrošene i proizvedene energije.



*Slika 6.10 Faktor vrijednosti proizvedene energije*

Najbolji faktor vrijednosti proizvedene energije kao što je vidljivo sa slike 6.10 ima Model 4 zbog toga što ima najbolji omjer zbroja proizvedene električne i toplinske energije i ukupne utrošene energije goriva te njihovih cijena. Najviše utrošene energije za proizvodnju električne i toplinske energije je za Model 1 i zbog toga je omjer najmanji što daje najlošiji faktor vrijednosti proizvedene energije. Za izračun ovog faktora koriste se proizvedene električne i toplinske energije, utrošena energija goriva te njihove jedinične cijene.

## 7. ZAKLJUČAK

Za kogeneracijsko postrojenje koje istovremeno proizvodi električnu i toplinsku energiju napravljen je analitički proračun te prateća simulacija u računalnom programu EBSILON Professional. Usporedbom rezultata analitičkog proračuna i računalnog programa vidljivo je da dolazi do malih oscilacija zbog toga jer se u analitičkom proračunu neki parametri zanemaruju zbog pojednostavljenja. Pomoću računalnog programa EBSILON Professional dolazi se do točnijih rezultata na puno brži način.

Analizira se mogućnost ugradnje dodatnog turbo-generatorskog postrojenja u vidu protutlačne turbine ukupne snage do 8 MW električne energije u postojeće postrojenje. Dobiveni rezultati u računalnom programu prikazuju da je potrebno nešto manje pregrijane pare za pogon postrojenja sa dodatnom turbinom, a s time je i manja količina pare prilikom drugog oduzimanja. Postrojenje sa dodatnom turbinom predaje manje topline niskotlačnim potrošačima te iz toga proizlazi da je iskoristivost postrojenja nešto manja za razliku od postrojenja bez dodatne turbine.

Za tehno-ekonomsku analizu i usporedbu kogeneracijskih postrojenja uzeta su prethodno dva navedena sustava. Za modele sa dva generatora pare u želji da se smanji proizvedena pregrijana para, a time i proizvedena toplinska energija simulacije su izvedene sa jednim generatorom pare i bez redukcijskih stanica. S time su se dobila još dva postrojenja za usporedbu. Ovisno o tehničkim pokazateljima, odnosno karakterističnim veličinama za analizu dolazi se do zaključka da svaki od četiri uspoređena modela ima svoje prednosti i nedostatke. Tako Model 1 ima najbolju eksergetsku iskoristivost dok mu je iskoristivost proizvodnje električne energije najlošija u odnosu na druge modele. Model 2 u kojem je dodana protutlačna turbina ima najbolji faktor pretvorbe toplinske energije goriva. Najbolju iskoristivost proizvodnje električne energije ima Model 3, dok su mu ostali tehnički pokazatelji najlošiji u usporedbi sa ostalim modelima. Prednost Modela 4 je taj da ima najbolji udjel pretvorbe toplinske energije goriva i najveći faktor vrijednosti proizvedene energije.

## LITERATURA

- [1] Prelec, Z.: „Energetika u procesnoj industriji“, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [2] Glažar, V.: „Energetski sustavi“, predavanja, Tehnički fakultet, Rijeka, 2019. godina
- [3] Jakovljević, I.; Prelec, Z.; Staniša, B.: Prikaz i analiza učinkovitosti kogeneracijskog parnoturbinskog postrojenja snage 5,7 MW INA-Maziva Rijeka, Engineering Review, 30-1, 1-131, Rijeka, 2010.
- [4] Glažar, V.: „Termoenergetska postrojenja“, predavanja, Tehnički fakultet, Rijeka, 2023. godina
- [5] Mrzljak, V.: „Toplinske turbine“, predavanja, Tehnički fakultet, Rijeka, 2021. godina
- [6] Kraut, B.: „Strojarski priručnik“, deveto prerađeno izdanje, Zagreb, 1987. godina
- [7] <https://www.ina.hr/kupci/proizvodi-i-usluge/prirodni-plin/>, s Interneta, 29.05.2024.
- [8] <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>, s Interneta, 22.7.2024.
- [9] <https://www.hep.hr/toplinarstvo/krajnji-kupci/cijene-30/30>, s Interneta, 22.07.2024.
- [10] <https://www.hep.hr/plin/cijene-plina-i-usluga/cijene-plina/cijene-plina-za-kucanstva/1620>, s Interneta, 22.07.2024.



## POPIS OZNAKA

Simbol	Naziv	Mjerna jedinica
$p$	Tlak	bar
$t$	Temperatura	°C
$G$	Maseni protok	kg/s
$\eta_{i,t}$	Unutarnja korisnost turbine	/
$h$	Entalpija	kJ/kg
$W$	Stvarni (unutrašnji) jedinični rad	kJ/kg
$\eta_m$	Mehanička iskoristivost	/
$\eta_{EG}$	Iskoristivost generatora električne energije	/
$P$	Snaga	W
$c_p$	Specifični toplinski kapacitet	kJ/kgK
$Q$	Toplina	W
$d_v$	Vanjski promjer cijevi	mm
$d_u$	Unutarnji promjer cijevi	mm
$z$	Broj vodnih tokova	/
$\rho$	gustoća	kg/m <sup>3</sup>
$V$	Volumni protok	m <sup>3</sup> /s
$\delta t$	Razlika temperature	°C
$b$	Koeficijent onečišćenja	/
$\alpha$	Korekcijski faktor	/
$d_k$	Specifično opterećenje rashladne površine	kg/m <sup>2</sup> s
$k'$	Nekorigirani koeficijent prolaza topline	W/m <sup>2</sup> K
$A$	Površina	m <sup>2</sup>
$S$	Površina protočnog presjeka	m <sup>2</sup>
$n$	Broj cijevi	/
$L$	Dužina cijevi	m
$u_c$	Koeficijent iskorištenja cijevne ploče	/
$\lambda$	Koeficijent trenja vode	/
$\zeta$	Koeficijent učvršćivanja cijevi na cijevnu ploču	/

$H_k$	Hidraulički otpor kondenzatora	Pa
$\omega$	Koeficijent otpora pare	/
$v$	Specifični volumen	$\text{m}^3/\text{kg}$
$\Delta p$	Parni otpor kondenzatora	Pa
$H_d$	Donja ogrjevna moć	$\text{kJ}/\text{m}^3_{\text{nG}}$
$r$	Molni udio	/
$M$	Molna masa	$\text{kg}/\text{kmol}$
$B$	Potrošnja goriva	$\text{kg}/\text{s}$
$V_z$	Stvarna količina zraka	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$V_{pl,s min}$	Minimalna količina suhih dimnih plinova	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$V_{pl,s}$	Stvarna količina suhih dimnih plinova	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$V_{H_2O}$	Količina $\text{H}_2\text{O}$ u dimnim plinovima izgaranja	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$V_{pl}$	Količina vlažnih dimnih plinova	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$V_{CO_2}$	Količina ugljičnog dioksida	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$V_{SO_2}$	Količina sumpornog dioksida	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$V_{N_2}$	Količina dušika	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$V_{O_2}$	Količina kisika	$\text{m}^3_{\text{n}} / \text{m}^3_{\text{n}}$
$\varphi_{CO_2}$	Udio ugljičnog dioksida	%
$\varphi_{H_2O}$	Udio vodene pare	%
$\varphi_{SO_2}$	Udio sumpornog dioksida	%
$\varphi_{N_2}$	Udio dušika	%
$\varphi_O$	Udio kisika	%

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Kogeneracijsko postrojenje s protutlačnom parnom turbinom [1] .....	3
Slika 2.2 Parno kogeneracijsko postrojenje s kondenzacijskom parnom turbinom [1] .....	5
Slika 2.3 Shema plinsko-turbinske kogeneracije s kotlom utilizatorom [1] .....	6
Slika 2.4 Shema plinsko-turbinske kogeneracije uz direktnu upotrebu ispušnih plinova [1] .....	7
Slika 2.5 Shema kogeneracije na bazi kombiniranog ciklusa [1] .....	8
Slika 2.6 Kogeneracijsko postrojenje s dizelskim motorom [2] .....	10
Slika 2.7 Shema energane Rafinerije nafte Rijeka [3] .....	11
Slika 3.1 Parna turbina [5].....	14
Slika 3.2 Usporedba akcijske (impulsne) i reakcijske turbine [5].....	16
Slika 3.3 Kondenzator [4] .....	17
Slika 3.4 Otplinjivač [4] .....	18
Slika 4.1 Shematski prikaz procesa u h-s dijagramu.....	19
Slika 4.2 Dijagram za određivanje korekcijskog faktora $\alpha_1$ .....	27
Slika 4.3 Dijagram za određivanje korekcijskog faktora $\alpha_2$ .....	28
Slika 4.4 Dijagram za određivanje nekorigitiranog koeficijenta prolaza topline, $k'$ .....	28
Slika 4.5 Shematski prikaz pregrada u predgrijaču.....	33
Slika 5.1 Shema kogeneracijskog postrojenja.....	47
Slika 6.1 Kogeneracijsko postrojenje sa jednim generatorom pare i dvije turbine.....	54
Slika 6.2 Iskoristivost proizvodnje električne energije .....	55
Slika 6.3 Ukupna energetska iskoristivost .....	56
Slika 6.4 Ukupna eksergetska iskoristivost.....	57
Slika 6.5 Udjel pretvorbe toplinske energije goriva.....	58
Slika 6.6 Faktor pretvorbe toplinske energije goriva .....	59
Slika 6.7 Cijene električne energije [8] .....	60
Slika 6.8 Cijene toplinske energije [9] .....	61
Slika 6.9 Cijene prirodnog plina [10].....	62
Slika 6.10 Faktor vrijednosti proizvedene energije.....	63

**POPIS TABLICA**

Tablica 5.1 Usporedba rezultata dobivenih analitičkim proračunom i računalnim modelom .....	48
Tablica 5.2 Usporedbe rezultata kogeneracijskog postrojenja bez i sa dodatnom turbinom .....	52

## **POPIS PRILOGA**

Prilog 1: Toplinska shema kogeneracijskog postrojenja

Prilog 2: Toplinska shema kogeneracijskog postrojenja izrađena pomoću programa EBSILON

Prilog 3: h-s dijagram u kogeneracijskom postrojenju

Prilog 4: T-s dijagram u kogeneracijskom postrojenju

## SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je analizirati ugradnju dodatnog turbogeneratorskog postrojenja u postojeće kogeneracijsko postrojenje. Prije razrade same teme objašnjeno je šta su kogeneracijska postrojenja i njihove izvedbe. Nakon toga u tehničkom opisu postrojenja navedeni su glavni dijelovi kogeneracijskih postrojenja i njihov opis.

Kogeneracijsko postrojenje sastoji se od dva generatora pare i jednog turbo-generatorskog postrojenja (kondenzacijska parna turbina) koje proizvodi 20 MW električne energije. Rad sadrži analitički proračun postrojenja čiji su rezultati uspoređeni sa rezultatima dobivenim u računalnom programu EBSILON Professional. Analizirala se mogućnost ugradnje dodatne protutlačne turbine ukupne snage do 8 MWel čiji su rezultati uspoređeni sa postojećim postrojenjem.

Napravljena je tehno-ekonomska analiza i usporedba kogeneracijska postrojenja. Gore navedenim postrojenjima smanjila se proizvedena pregrijana para, ugradnjom jednog generatora pare, a time i proizvodnja toplinske energije i tako dobila 4 modela za usporedbu.

Ključne riječi: kogeneracijsko postrojenje, kondenzacijska turbina, protutlačna turbina

## SUMMARY

The topic of this thesis is to analyze the installation of an additional turbo generator in an existing cogeneration plant. Before elaboration, it is explained what cogeneration plants are and their performance. The technical description of the plant provides the main parts of the cogeneration plants and their description.

The cogeneration plant consists of two steam generators and one turbo-generator unit (a condensing steam turbine) that produces 20 MW of electrical power. The thesis includes an analytical calculation of the plant, with the results compared to those obtained using the EBSILON Professional software. The possibility of installing an additional back-pressure turbine with a total capacity of up to 8 MW<sub>el</sub> was also analyzed, the results were compared with the existing plant.

A techno-economic analysis and comparison of the cogeneration plants was also performed. The systems reduced the production of superheated steam by installing one steam generator, which in turn reduced heat energy production, resulting in four models for comparison.

**Keywords:** cogeneration plant, condensing turbine, backpressure turbine