

Matematički model postrojenja s kombiniranim ciklusom i integriranim rasplinjavanjem ugljena

Baborsky, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:724142>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Baborsky

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Matija Baborsky

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danielu Rolph Schneideru na odvojenom vremenu i pruženoj pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se asistentici Ivi Slatini na velikoj pristupačnosti, volji i trudu bez kojih ovaj rad ne bih bio u mogućnosti završiti.

Posebno bih se htio zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima koji su mi jako uljepšali i olakšali studentske dane, a najviše Kristini koja me nasmijavala i sve mi omogućila.

Matija Baborsky



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matija Baborsky** JMBAG: 0035204324

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Matematički model postrojenja s kombiniranim ciklusom i integriranim rasplinjavanjem ugljena**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of integrated gasification combined cycle**

Opis zadatka:

Prelazak na održivu proizvodnju energije zahtijeva određeno vrijeme. S obzirom da se ugljen kao energent još uvijek koristi u značajnoj mjeri u svijetu, traže se načini kako bi se umanjile štetne posljedice njegove uporabe. Jedan od načina za povećanje učinkovitosti postrojenja i smanjenja emisija stakleničkih plinova je i prethodno rasplinjavanje ugljena u cilju dobivanja gorivog plina koji se koristi u procesu.

U okviru diplomskog rada potrebno je napraviti termodinamički proračun kombiniranog postrojenja s rasplinjavanjem ugljena.

Pri tome treba:

1. Napraviti matematički model kombiniranog poligeneracijskog postrojenja s rasplinjavanjem ugljena u jednom od dostupnih programskih alata. Model treba uključiti: plinsku turbinu s generatorom i kompresorom, kotao na ispušne plinove iz plinske turbine, paru turbinu, rasplinjač ugljena, moguće sustave oporabe otpadne topline, kondenzator, sve potrebne izmjenjivače topline, pumpe, kao i druge neophodne dijelove postrojenja. Nacrtati shemu.
2. Provesti simulaciju rada postrojenja pri nekoliko različitih opterećenja, s ciljem određivanja optimalnog, počevši od tehničkog minimuma (odrediti u radu) do tehničkog maksimuma (100%) i za različite kvalitete ugljena (kalorijska vrijednost, sastav, vlažnost).
3. Optimirati proces (varirati tlak i temperaturu, razmotriti eventualno potrebnu dodatnu opremu, i dr.) na takav način da postrojenje postigne što višu učinkovitost (i što niže emisije) pri različitim opterećenjima pogona.
4. Analizirati rad postrojenja u različitim okolišnim uvjetima. Izračunati stupanj iskoristivosti postrojenja, stupanj konverzije goriva, kao i emisije po MWh proizvedene energije odnosno toni izgoranog goriva, za različita opterećenja.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

11. studenoga 2021.

13. siječnja 2022.

17. – 21. siječnja 2022.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Daniel Rolph Schneider

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Čulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
1.1. Kombinirani ciklus s integriranim rasplinjavanjem	2
2. TEORETSKA PODLOGA	5
2.1. Rasplinjavanje	5
2.1.1. GE Power rasplinjač	14
2.2. Uklanjanje kiselih plinova	16
2.3. Kombinirani ciklus	18
2.3.1. Plinsko – turbinski ciklus	19
2.3.2. Parno – turbinski ciklus	20
2.3.3. Generator pare na otpadnu toplinu - HRSG	22
2.4. Kogeneracija	23
2.5. Apsorpcijsko hlađenje	24
3. MATEMATIČKI MODEL	27
3.1. Opis postrojenja	27
3.1.1. Tip ugljena i miješanje	29
3.1.2. Rasplinjavanje	31
3.1.3. Hlađenje sintetskog plina i uklanjanje kiselih plinova	32
3.1.4. Izgaranje sintetskog plina i plinska turbina	34
3.1.5. HRSG i parna turbina	35
3.1.6. Dodatno iskorištenje osjetne topline dimnih plinova	38
3.2. Pretpostavke modela	40
3.3. Ulazne vrijednosti modela	40
4. REZULTATI I ANALIZA	42
4.1. Optimizacija	47
4.1.1. Implementacija dodatnog izmjenjivača topline za međuhlađenje komprimiranog zraka	51
4.2. Promjena opterećenja	53
4.3. Promjena faktora pretička zraka	56
4.4. Promjena parametara rasplinjavanja	57
4.5. Promjena ulaznog goriva	59
4.6. Moguća poboljšanja postrojenja	61
5. ZAKLJUČAK	62
LITERATURA	64

PRILOZI	65
PRILOG I.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	Instalirana snaga termoelektrana na ugljen [2]	1
Slika 2.	Proizvodnja električne energije po energentu (%) [3].....	2
Slika 3.	Sastav sintetskog plina pri konstantnom tlaku [7]	7
Slika 4.	Ravnateža osnovnih reakcija rasplinjavanja pri konstantnom tlaku [6].....	8
Slika 5.	Sastav sintetskog plina pri konstantnoj temperaturi [7]	8
Slika 6.	Ravnateža osnovnih reakcija rasplinjavanja pri konstantnoj temperaturi [6]	9
Slika 7.	Sasol - Lurgi rasplinjač [9]	10
Slika 8.	Rasplinjač s fluidiziranim slojem [6]	11
Slika 9.	Rasplinjač s uronjenim slojem [6].....	12
Slika 10.	GE rasplinjač s hlađenjem pomoću vode [10].....	15
Slika 11.	Rasplinjač s visokotemperaturnim hlađenjem [10].....	16
Slika 12.	Shema uobičajenog Selexol postrojenja [11].....	18
Slika 13.	Jednostavna shema dvostupanjskog kombiniranog ciklusa [12]	19
Slika 14.	Jednostavna shema plinsko – turbinskog ciklusa.....	19
Slika 15.	T,s dijagram plinsko – turbinskog ciklusa.....	20
Slika 16.	Jednostavna shema parno – turbinskog ciklusa [13].....	21
Slika 17.	T,s dijagram parno – turbinskog ciklusa s pregrijavanjem.....	21
Slika 18.	Konfiguracija HRSG-a [14].....	22
Slika 19.	„Klasični“ (lijevo) i protočni (desno) generator pare [12]	23
Slika 20.	Usporedba učinkovitosti odvojene (konvencionalne) generacije i kogeneracije [15]	24
Slika 21.	Shema apsorpcijskog hlađenja [17].....	26
Slika 22.	p,T dijagram apsorpcijskog hlađenja [17]	26
Slika 23.	Jednostavna shema modela.....	28
Slika 24.	Prikaz miješanja ugljene prašine i vode	30
Slika 25.	Jednostavna shema rasplinjavanja i visokotemperaturnog hlađenja	32
Slika 26.	Prikaz rasplinjavanja	32
Slika 27.	Jednostavna shema hlađenja sintetskog plina i uklanjanja kiselih plinova	34
Slika 28.	Prikaz hlađenja sintetskih plinova.....	34
Slika 29.	Prikaz izgaranja i plinske turbine	35
Slika 30.	Shema parnog ciklusa.....	37
Slika 31.	Prikaz HRSG-a i parno – turbinskog ciklusa.....	37
Slika 32.	Prikaz dodatne uporabe dimnih plinova	39
Slika 33.	Prikaz apsorpcijskog ciklusa.....	39
Slika 34.	T,s dijagram Rankine-ovog ciklusa.....	44
Slika 35.	q,T dijagram hlađenja sintetskog plina.....	44
Slika 36.	q,T dijagram HRSG-a.....	45
Slika 37.	Model 2-stupanjske kompresije	47
Slika 38.	Brayton-ov ciklus s 1-stupanjskom kompresijom.....	48
Slika 39.	Brayton-ov ciklus s 2-stupanjskom kompresijom.....	48
Slika 40.	Optimizator u programskom paketu Epsilon Professional	49
Slika 41.	T,s dijagram parno – turbinskog ciklusa s optimalnim tlakom niskotlačne pare...50	50
Slika 42.	Model 2-stupanjske kompresije s dodatnim izmjenjivačem topline	51
Slika 43.	Brayton-ov ciklus 2-stupanjske kompresije s dodatnim izmjenjivačem topline ...52	52
Slika 44.	Ovisnost neto električne učinkovitosti o opterećenju	55

Slika 45.	Ovisnost temperature dimnih plinova i neto električne učinkovitost o faktoru pretička zraka	56
Slika 46.	Ovisnost CGE i neto električne učinkovitosti o temperaturi rasplinjavanja.....	57
Slika 47.	Ovisnost CGE i neto električ...pne učinkovitosti o tlaku rasplinjavanja.....	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Neka IGCC postrojenja u svijetu [5]	3
Tablica 2. Planirani IGCC projekti.....	4
Tablica 3. Kratki pregled tipova rasplinjača	13
Tablica 4. Usporedba Selexol, Purisol i Rectisol procesa [11]	17
Tablica 5. Sastav ugljena	29
Tablica 6. Pregled ulaznih vrijednosti u model.....	40
Tablica 7. Rezultati baznog modela IGCC postrojenja	42
Tablica 8. Sastav sintetskog plina nakon rasplinjavanja.....	43
Tablica 9. Usporedba rezultata 2-stupanjske kompresije s jednim međuhladnjakom i dva međuhladnjaka	52
Tablica 10. Rezultati promjene opterećenja postrojenja.....	54
Tablica 11. Sastav i donja ogrjevna vrijednost različitih lignita	59
Tablica 12. Sastav suhih sintetskih plinova nakon rasplinjavanja	60
Tablica 13. Rezultati promjene goriva postrojenja	60

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
AGR	-	Acid gas removal – uklanjanje kiselih plinova
ASU	-	Air separation unit – sustav za separaciju zraka
CGE	-	Cold gas efficiency – učinkovitost hladnog plina
COP	-	Coefficient of performance – koeficijent učinkovitosti
HRSG	-	Heat recovery steam generator – generator pare na otpadnu toplinu
IGCC	-	Integrated gasification combined cycle – kombinirani ciklus s integriranim rasplinjavanjem
PTV	-	Potrošna topla voda
E_{CO_2}	kgCO ₂ /kWh	Emisija CO ₂ po jedinici proizvedene električne energije
E_{el}	GWh	Proizvedena električna energija u godini
HHV	kJ/kg	Higher heating value – gornja ogrjevna vrijednost
LHV/Hd	kJ/kg	Lower heating value – donja ogrjevna vrijednost
m_{CO_2}	kT/god	Emisije CO ₂ u godini
\dot{m}_{CO_2}	kg/s	Maseni protok CO ₂
\dot{m}_G	kg/s	Maseni protok ugljenog mulja
\dot{m}_U	kg/s	Maseni protok ugljena
\dot{m}_{Sys}	kg/s	Maseni protok sintetskog plina
$P_{generator}$	MW	Snaga na svih generatorima električne energije
P_{GT}	MW	Snaga na generatoru električne energije plinske turbine
P_k	MW	Snaga kompresora plinske turbine
$P_{k, u}$	MW	Snaga svih kompresora
$P_{potrošač}$	MW	Snaga svih potrošača električne energije u postrojenju
$P_{p, u}$	MW	Snaga svih pumpi
P_{ST}	MW	Snaga na generatoru električne energije parne turbine
P_{uk}	MW	Ukupna snaga na generatorima električne energije
\dot{Q}_G	MW	Toplinska tok vode za grijanje/PTV
\dot{Q}_H	MW	Rashladni učin apsorpcijskog ciklusa
T_{dp}	°C	Izlazna temperatura dimnih plinova
x	-	Stupanj zasićenosti
$\eta_{net, el}$	%	Neto električna učinkovitost
$\eta_{net, uk}$	%	Neto učinkovitost postrojenja
η_s	%	Izentropska učinkovitost
λ	-	Faktor pretička zraka

SAŽETAK

S obzirom na sve veće zahtjeve minimalnih emisija prilikom proizvodnje električne energije veliki se naponi i investicije ulažu na prelazak proizvodnje pomoću obnovljivih izvora energije. Taj prelazak na održivu proizvodnju će trajati određeno vrijeme. Ugljen, koji se još uvijek koristi u velikim količinama pri proizvodnji električne energije, se može iskoristiti tijekom proizvodnje na drugačiji način osim konvencionalnim izgaranjem. Jedan od načina je kombinirani ciklus s rasplinjavanjem ugljena. Rasplinjavanjem ugljena se proizvodi sintetski plin visokog tlaka i temperature. Iskorištavanjem visoke osjetne topline sintetskog plina može se proizvesti para visokog tlaka te obradom izdvojiti određena količina kiselih plinova (primarno H₂S) s ciljem smanjenja emisija štetnih plinova. Sintetski plin nakon obrade izgara u dimne plinove, koji prolaze kroz kombinirani ciklus (plinsko – turbinski i parno turbinski ciklus). Ovakva vrsta postrojenja se naziva kombinirani ciklus s integriranim rasplinjavanjem – IGCC (eng. Integrated Gasification Combined Cycle). IGCC postrojenje ima smanjene emisije štetnih plinova po jedinici proizvedene električne energije u usporedbi s konvencionalnim termoelektranama na ugljen što je pogodno za prijelazno razdoblje. U ovom diplomskom radu je napravljen matematički model IGCC postrojenja, optimirani su određeni parametri, provedena je simulacija rada pri različitim opterećenjima i vrstama ugljena te analizirana promjena određenih parametara koji utječu na učinkovitost postrojenja. Kao alat za modeliranje je korišten programski paket Epsilon Professional 15.01.

Ključne riječi: ugljen, rasplinjavanje, kombinirani ciklus, IGCC, sintetski plin, Epsilon Professional.

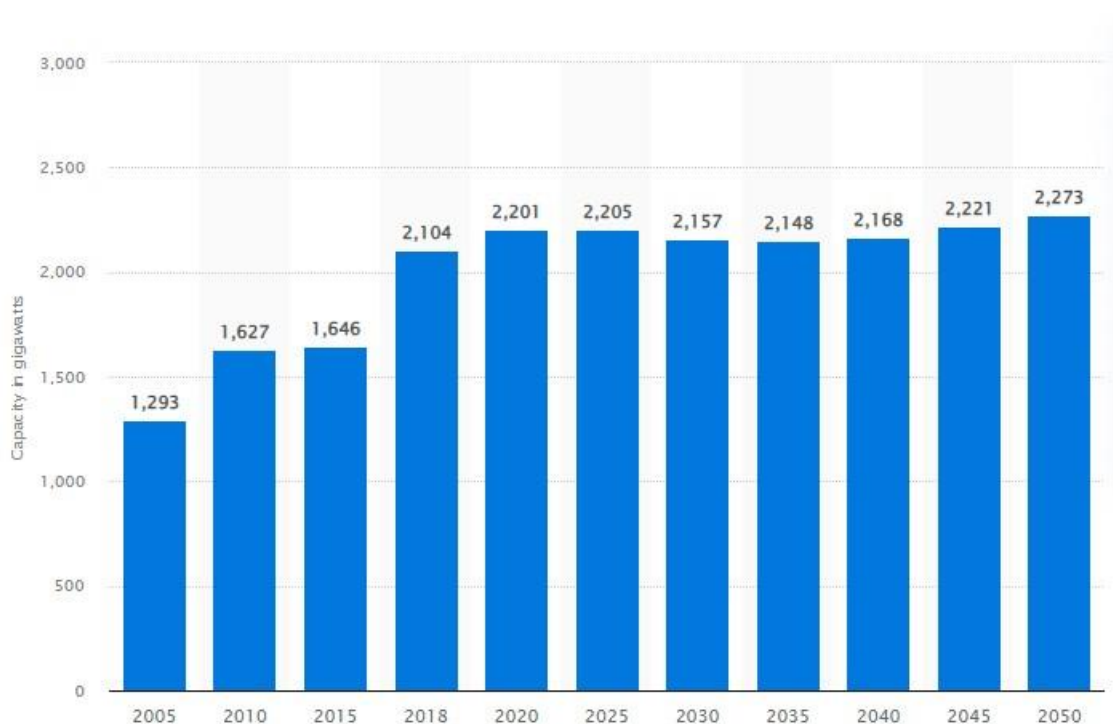
SUMMARY

Due to growing demands for minimum emissions during electricity production, great efforts and investments are being made in the transition to production using renewable energy sources. Sustainable electricity production will take some time. Coal, which is still used in large quantities in electricity production, can be used in other ways than by conventional combustion. One way is a combined cycle with coal gasification. Coal gasification produces high pressure and temperature synthetic gas. Utilization of high sensible heat of synthetic gas can produce high pressure steam and its processing can be used to extract a certain amount of acid gases (primarily H₂S) to reduce emissions. After processing, synthetic gas combusts into flue gases, which pass through a combined cycle (gas and steam cycle). This kind of power plant is called Integrated Gasification Combined Cycle – IGCC. IGCC plant has reduced harmful gas emissions per unit of produced electric energy compared to conventional coal-fired power plants, which is suitable during the transition period. In this master thesis, a mathematical model of an IGCC plant is made, certain parameters are optimized, part load work is simulated, different kind of coals are used and the change of certain parameters that affect the efficiency of the plant is analyzed. Ebsilon Professional 15.01 was used as a tool for model making.

Key words: coal, gasification, combined cycle, IGCC, synthesis gas, Ebsilon Professional.

1. UVOD

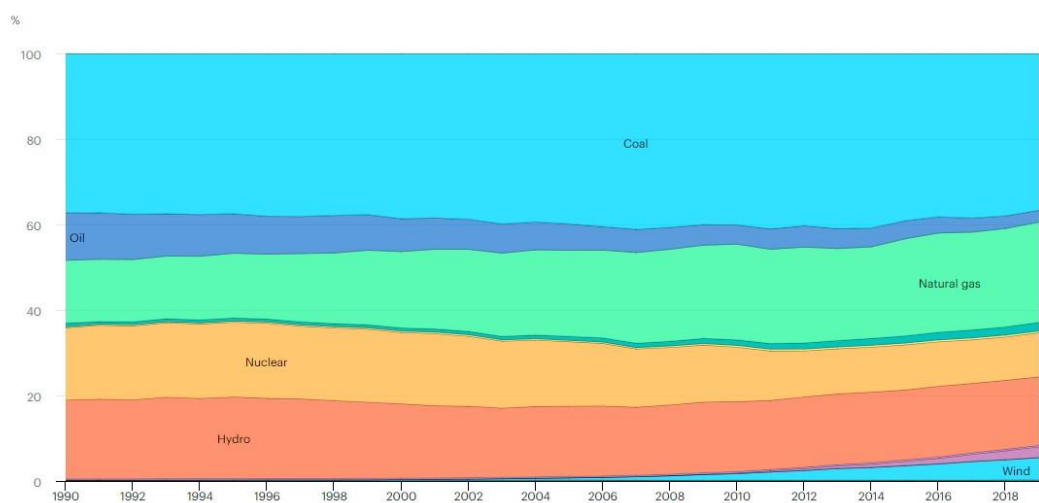
Ugljen se kao energent pri proizvodnji električne energije koristi još od 1880-ih godina – Thomas Edison je izgradio prvu centralnu elektranu 1882. godine u New Yorku [1]. Iako obnovljivi izvori energije u proizvodnji električne energije zadnjih nekoliko desetljeća dobivaju sve više na značaju, ugljen je još uvijek jedno od najdominantnijih goriva za proizvodnju. Instalirana snaga termoelektrana na ugljen 2020. godine iznosila je preko 2200 GW [2]. Slika 1. prikazuje instaliranu snagu termoelektrana na ugljen od 2005. godine te predviđanja do 2050. godine. Prema predviđanjima, potrošnja ugljena se u sljedećih 30 godina neće drastično smanjiti kao što pretpostavljaju razne energetske agencije kao sredstvo borbe protiv klimatskih promjena, povećanja temperature atmosfere i smanjenja stakleničkih plinova, nego će ostati pri razinama iz 2020. godine.



Slika 1. Instalirana snaga termoelektrana na ugljen [2]

Ugljen je 2019. godine činio otprilike 38% udjela u ukupnoj proizvodnji električne energije. Slika 2. prikazuje proizvodnju električne energije u postocima prema energentu te se vidi da je ugljen proteklih 30 godina ostao na istim razinama. Iako se velik broj termoelektrana na

ugljen u Europi i Sjedinjenim Američkim Državama u proteklom desetljeću ugasio, u zemljama u razvoju se taj broj povećao višestruko.



Slika 2. Proizvodnja električne energije po energentu (%) [3]

U zadnja dva desetljeća najveći je udio novoinstalirane snage je instalirano u Kini i Indiji u kojima energetska politika još uvijek kasni za razvijenim zemljama.

Prijelaz na proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije bit će proces koji će trajati određeno vrijeme. Termoelektrane na ugljen se neće moći samo ugasiti, nego će to biti tranzicijsko razdoblje. U tom tranzicijskom razdoblju, takve termoelektrane će trebati proći određene modifikacije kako bi se štetne posljedice uporabe ugljena smanjile. Jedan od načina za smanjenje štetnih posljedica poput smanjenja emisija stakleničkih plinova je korištenje procesa rasplinjavanja ugljena koji vrši pretvorbu ugljena u sintetski plin koji se onda koristi kao pogonsko gorivo kombiniranog ciklusa.

1.1. Kombinirani ciklus s integriranim rasplinjavanjem

Kombinirani ciklus s integriranim rasplinjavanjem (eng. Integrated gasification combined cycle – IGCC) je tehnologija koja koristi rasplinjač koji radi pri tlaku većem od atmosferskog kako bi pretvorio ugljen, biomasu, komunalni otpad i ostale vrste goriva bogatih ugljikom u sintetski plin. Nakon pretvorbe, sintetski plin prolazi proces izgaranja i proizvodnje električne energije u postrojenju s kombiniranim ciklusom.

Prednost ovakvog procesa je smanjenje emisija i veća termodinamička učinkovitost u usporedbi s konvencionalnim termoelektranama na ugljen. Osim proizvodnje električne energije, u sklopu IGCC elektrane moguće je proizvoditi i razne kemijske spojeve poput metanola, amonijaka, sumpora, vodika, dizela/benzina (Fischer – Tropsch proces) i dr. Negativna strana tehnologije su puno veći kapitalni troškovi vezani za izgradnju i implementaciju tehnologije. U današnje vrijeme, kada se utjecaju na okoliš pri proizvodnji električne energije pridaje veliki značaj, veći troškovi IGCC postrojenja ne bi trebali predstavljati problem s obzirom na smanjenje emisija. Postojeće termoelektrane je moguće modificirati te tako implementirati IGCC tehnologiju.

IGCC nije nova tehnologija. Prva IGCC elektrana je izgrađena 1970. godine u Lünenu u Njemačkoj, a puštena je u pogon 1972. godine [4]. Neke od IGCC elektrana u svijetu su prikazane u Tablica 1. Oznake u zagradi – HHV pokazuje da je učinkovitost određena na osnovu gornje ogrjevne vrijednosti ugljena, a oznaka LHV da je učinkovitost određena na osnovu donje ogrjevne vrijednosti ugljena.

Tablica 1. Neka IGCC postrojenja u svijetu [5]

Naziv i zemlja	Pušteno u pogon	Gorivo	Neto snaga [MWe]	Učinkovitost [%]
Wabash River, SAD	1995.	kameni ugljen i koks	250	37,8 (HHV)
Vřesová, Češka	1996. (modificirana 2005.)	lignit	350	50,5 (LHV)
Nakoso, Japan	2003.	kameni ugljen	250	42,9 (LHV)
Polk County, SAD	1996.	kameni ugljen, koks, biomasa	252	35,4 (HHV)
Edwardsport, SAD	2013.	kameni ugljen	618	38,5 (HHV)

Mnogim zemljama, a posebno Kini i Indiji, je u cilju napraviti rekonstrukciju postojećih termoelektrana i izgradnju novih IGCC postrojenja. U Tablica 2. su popisani samo neki od budućih planiranih IGCC postrojenja.

Tablica 2. Planirani IGCC projekti

IGCC postrojenje i lokacija	Status	Gorivo	Tehnologija	Neto snaga [MW _e]
Dongguan Taiyangzhou IGCC (Kina)	2019. (odgođeno)	Ugljen	TRIG (KBR)	800
Kochi Kerala IGCC (Indija)	2019. (odgođeno)	Petrol - koks	-	500
Dadri IGCC (Indija)	2019. (odgođeno)	Ugljen	BHEL	100
Lianyungang IGCC (Kina)	Odgođeno	Ugljen	-	2 x 400
Hirono/Nakoso IGCC, Fukushima (Japan)	2020.	Kameni ugljen	Mitsubishi	2 x 480
Don Valley IGCC, Hatfield (UK)	Na čekanju	Ugljen	Shell	650
Teesside IGCC (UK)	Rezervni projekt	Ugljen	GE Power	850

S obzirom na to da je u IGCC elektranama kao gorivo moguće koristiti bilo koju materiju koja u sebi sadrži dovoljno ugljika, budućnost takvih elektrana je u rasplinjavanju plastike i komunalnog otpada gdje se paralelno otpad zbrinjava te se proizvodi korisna energija u obliku električne i toplinske energije.

2. TEORETSKA PODLOGA

U ovom poglavlju bit će opisane komponente i tehnologije koje su se koristile pri izradi matematičkog modela kombiniranog poligeneracijskog postrojenja s rasplinjavanjem ugljena. Glavne tehnologije i komponente koje su korištene u radu su: rasplinjavanje (GE Power, prije zvan Chevron Texaco), uklanjanje kiselih plinova (Selexol), plinsko – turbinski ciklus, parno – turbinski ciklus, generator pare na otpadnu toplinu, kogeneracija (grijanje) i apsorpcijsko hlađenje.

2.1. Rasplinjavanje

Rasplinjavanje je kemijski proces vođen pri povišenoj temperaturi i tlaku u kojem se gorivo nepotpunim izgaranjem pretvara u sintetski plin. Nastali sintetski plin se sastoji od ugljikovog monoksida (CO), ugljikovog dioksida (CO₂), vodika (H₂), dušika (N₂), raznih ugljikovodika (CH₄, C₂H₆, C₆H₆...), sumporovodika (H₂S) i dr. Sastav plina jako ovisi o vrsti rasplinjača koji se koristi te tlaku i temperaturi pri kojem se odvija rasplinjavanje. Sintetski plin se kasnije može koristiti za izgaranje i generaciju električne energije, sintezu mnogih kemijskih spojeva (metanol, sumpor, amonijak...), goriva (dizel, benzin), proizvodnju vodika i dr.

Rasplinjavanje ugljena je započeto još u 14. stoljeću u visokim pećima za proizvodnju željeza, iako tada nije bilo poznato što se točno događa. Taj je plin dugo bio ispuštan u okoliš bez da se dodatno iskorištavao. Prvo rasplinjavanje ugljena s ciljem proizvodnje sintetskog plina ostvareno je 1783. godine u Francuskoj pomoću vodene pare [6]. Početkom 19. stoljeća ugljen se rasplinjavao s ciljem dobivanja „gradskog plina“ koji je služio za javnu rasvjetu i kuhanje. Prva takva mreža postavljena je u Londonu 1807. godine.

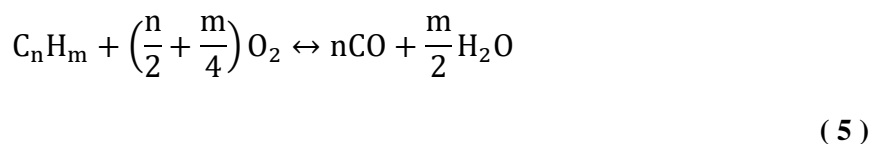
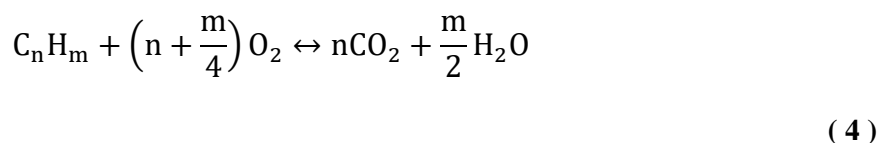
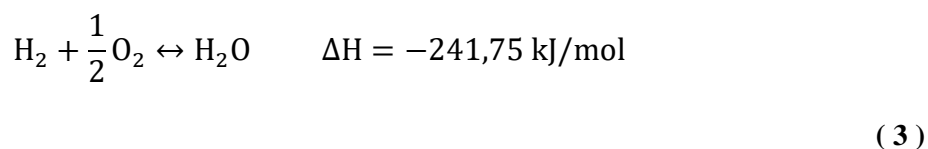
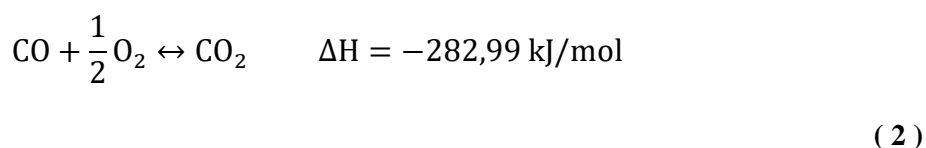
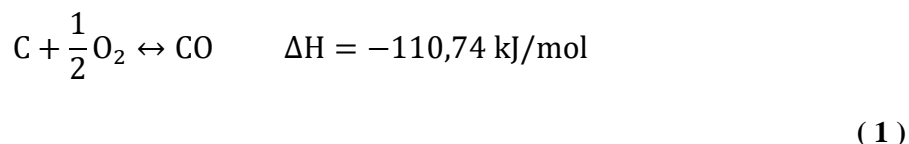
U procesu rasplinjavanja se događaju reakcije između goriva (ugljen, biomasa, otpad, nafta...), oksidansa (kisika ili zraka) i vodene pare. Te reakcije se mogu podijeliti u četiri glavne kategorije [6]:

- a) reakcije sa slobodnim kisikom,
- b) reakcije s vodenom parom,
- c) reakcije s ugljikovim dioksidom,

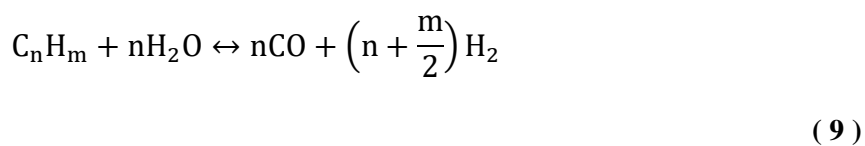
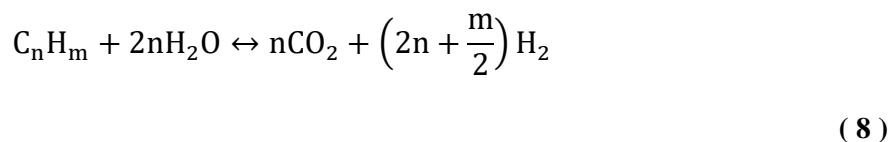
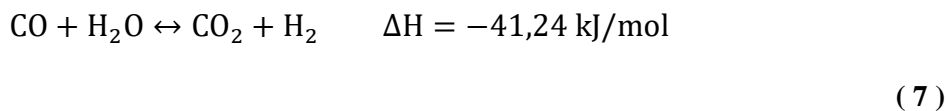
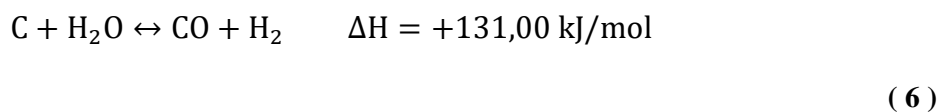
d) reakcije razgradnje ugljika.

Reakcije koje se odvijaju su napisane jednadžbama (1) - (12) te uz sebe imaju i napisanu pripadajuću reakcijsku entalpiju. Znak - uz entalpiju označava da je reakcija egzotermna (oslobađanje energije), a znak + označava da je reakcija endotermna (dovođenje energije).

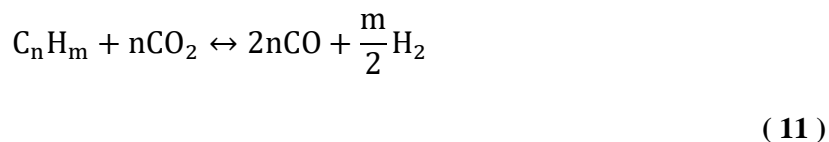
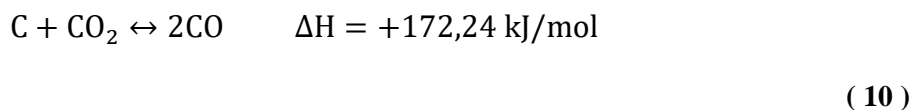
a) reakcije sa slobodnim kisikom



b) reakcije s vodenom parom



c) reakcije s ugljikovim dioksidom

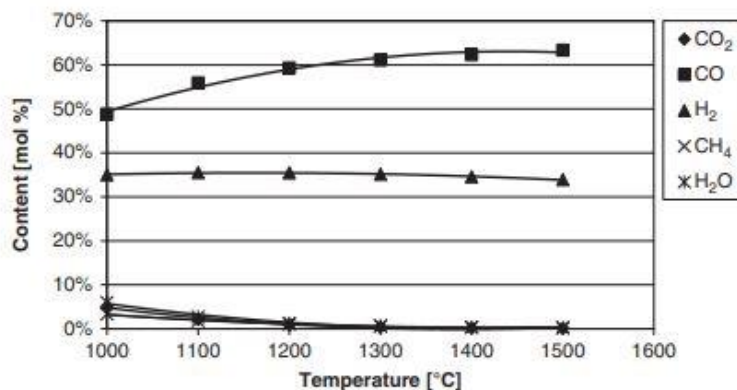


d) reakcije razgradnje ugljika

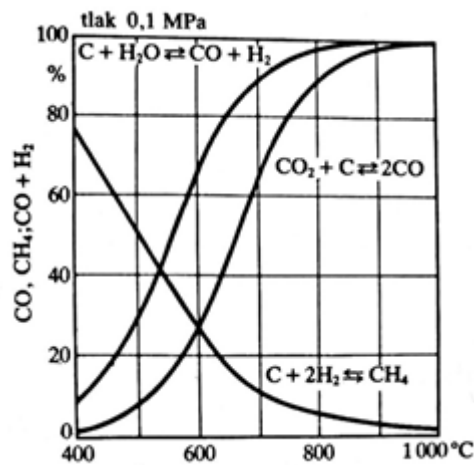


Znak \leftrightarrow označava da su reakcije povratne, tj. da se mogu odvijati u oba smjera – s lijeve na desnu stranu i obratno.

Sve se navedene reakcije odvijaju istovremeno u rasplinjaču, ali svaka svojom brzinom reakcije. Brzina kemijskih reakcija je ovisna o temperaturi i tlaku pri kojima se proces vodi. Na Slika 3. je prikazan potencijalni sastav nastalog sintetskog plina pri konstantnom tlaku od 31,02 bar u ovisnosti o temperaturi. Povećanje temperature negativno utječe na formaciju metana (CH_4), a pozitivno na formaciju ugljikovog monoksida (CO). Formacija vodika (H_2) blago pada s povećanjem temperature. Ravnoteža osnovnih reakcija rasplinjavanju u ovisnosti o temperaturi prikazana je na Slika 4.

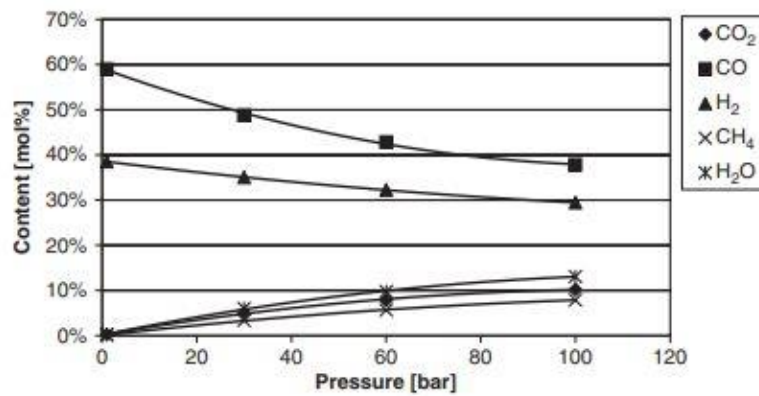


Slika 3. Sastav sintetskog plina pri konstantnom tlaku [7]

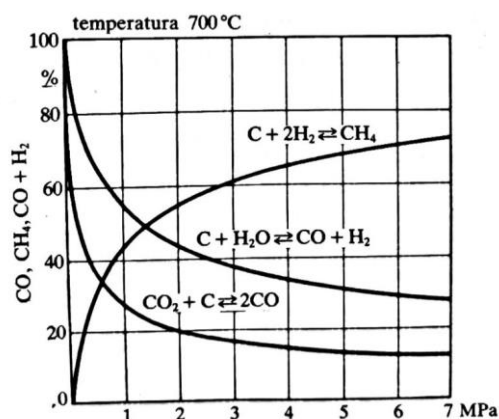


Slika 4. Ravnoteža osnovnih reakcija rasplinjavanja pri konstantnom tlaku [6]

S povećanjem tlaka tijekom rasplinjavanja, a pri konstantnoj temperaturi od 1000 °C, povećava se formacija CH_4 , CO_2 , dok se formacija CO i H_2 smanjuje. Formacija produkata pri konstantnoj temperaturi je prikazana na Slika 5., a ravnoteža osnovnih reakcija rasplinjavanja na Slika 6.



Slika 5. Sastav sintetskog plina pri konstantnoj temperaturi [7]



Slika 6. Ravnoteža osnovnih reakcija rasplinjavanja pri konstantnoj temperaturi [6]

Prednost vođenja procesa pri višem tlaku je manji volumen plina što dovodi do manjih dimenzija postrojenja, ali povećava troškove pošto materijal trpi veća opterećenja. Brzina kemijskih reakcija se može povećati uz korištenje katalizatora i povećanjem površine ugljena koja je u direktnom dodiru sa sredstvom za rasplinjavanje – ugljen je potrebno samljeti sve do ugljene prašine.

Temperatura rasplinjavanja se regulira podešavanjem toka vodene pare i oksidansa. Temperatura rasplinjavanja raste s povećanjem protoka kisika jer se pospešuju egzotermičke reakcije (jednadžbe (1), (2), (3), (7)), ali sintetski plin tada sadrži manje vodika. Povećanjem protoka vodene pare temperatura rasplinjavanja pada jer se pospešuju endotermičke reakcije (jednadžbe (6), (10)), ali se sadržaj vodika u sintetskom plinu tada povećava.

Dva najčešće korištena pokazatelja učinkovitosti rasplinjavanja su pretvorba ugljika i učinkovitost hladnog plina, eng. Cold gas efficiency – CGE. Pretvorba ugljika predstavlja postotak ugljika iz ugljena koji se rasplini u sintetski plin, tj. koliko je ugljika ostalo u pepelu. Ugljen koji se rasplinjuje pri višim temperaturama i duže ostaje u reaktoru ima veći postotak pretvorbe ugljika. CGE je omjer ogrjevne vrijednosti nastalog „hladnog“ sintetskog plina i ogrjevne vrijednosti goriva koje je korišteno za rasplinjavanje (jednadžba (13)):

$$CGE = \frac{m_{syn} * LHV_{syng}}{m_G * LHV_G} [\%]$$

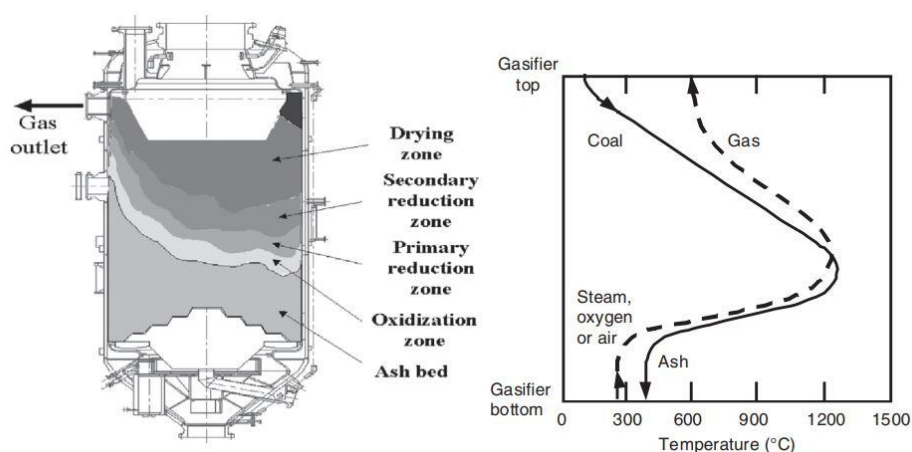
(13)

CGE ne uzima u obzir rekuperaciju osjetne topline sintetskog plina. Visoke temperature rasplinjavanja i korištenje kisika kao oksidansa smanjuju CGE vrijednost [8].

Danas se u komercijalnoj upotrebi koristi tri vrste rasplinjača. To su: rasplinjači s fiksnim slojem (eng. fixed bed gasifier), rasplinjači s fluidiziranim slojem (eng. fluidized bed gasifier) i rasplinjači s uronjenim slojem (eng. entrained flow gasifier) [6].

a) Rasplinjač s fiksnim slojem [9]

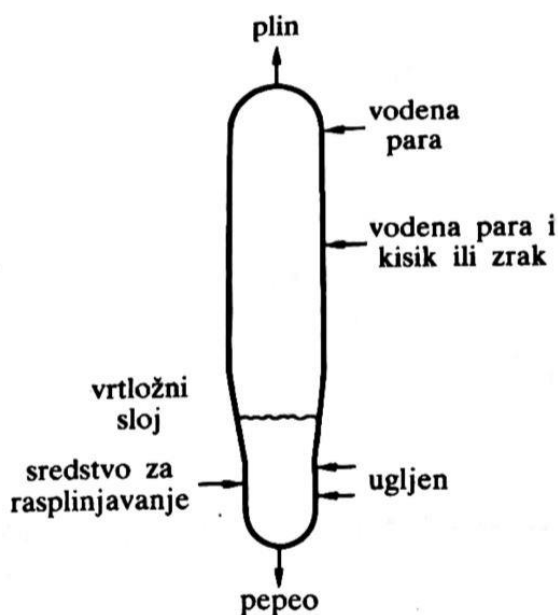
Rasplinjač s fiksnim slojem je tip rasplinjača u kojem se ugljen polako kreće prema dolje pod utjecajem gravitacije, dok se vodena para i oksidans (kisik ili zrak) u rasplinjač najčešće dovode sa suprotne strane pa se postiže protusmjerno strujanje. Ovakva vrsta reaktora može raditi s grubljom granulacijom ugljena pa nije potrebno prethodno mljevenje ugljena. Vrijeme boravka ugljena u reaktoru može biti i do 60 minuta kako bi se osiguralo što veće rasplinjavanje većih čestica ugljena u sintetske plinove. Produkti rasplinjavanja iz rasplinjača izlaze s relativno niskom temperaturom zbog visokog CGE, uzrokovanom protusmjernom izmjenom topline. Visok CGE zahtjeva niske potrebe za oksidansom. Osim sintetskih plinova, produkti rasplinjavanja u ovakvom reaktoru su također katran i razna ulja koji se moraju odvojiti od sintetskih plinova kako ne bi oštetili opremu nakon rasplinjača. U komercijalnoj upotrebi su najčešće dvije vrste rasplinjača s pokretnim slojem, oba razvijena od tvrtke Lurgi: Sasol - Lurgi suhi rasplinjač s fiksnim slojem (Slika 7.) i British Gas Lurgi rasplinjač (BGL) s izlazom troske.



Slika 7. Sasol - Lurgi rasplinjač [9]

b) Rasplinjač s fluidiziranim slojem [9]

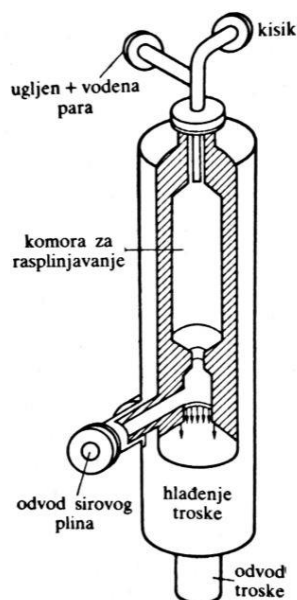
Ovakav tip rasplinjača se sastoji od vertikalne cilindrične posude s posebnim premazom. Ugljen sitnije granulacije (<6 mm) ulazi u rasplinjač s donje strane te je fluidiziran oksidansom (kisikom ili zrakom) i vodenom parom. Fluidizirani sloj omogućuje vrlo dobro miješanje ugljena, oksidansa i vodene pare što pospješuje prijenos topline i tvari. Vrijeme boravka mješavine u reaktoru je najčešće od 10 do 100 sekundi. Zbog ravnomjerne raspodjele mješavine u sloju, dio goriva samo djelomično reagira te se neizbježno uklanja s pepelom pa je pretvorba ugljika ograničena. Zbog djelomične reakcije, postoji recirkulacija mješavine koja pospješuje konverziju ugljena u plin. Temperature u reaktoru su ograničene točkom taljenja pepela jer bi nastala troska smanjila stupanj fluidizacije i miješanja. Rasplinjačima s fluidiziranim slojem je potrebna umjerena količina kisika i vodene pare za rad. Rade pri nižim tlakovima pa su zbog toga prikladni za niže kapacitete. U komercijalnoj upotrebi su najčešće dvije vrste rasplinjača s fluidiziranim slojem: Winkler i Kellogg Rust Westinghouse. Na Slika 8. je prikazana shema rasplinjača s fluidiziranim slojem.



Slika 8. Rasplinjač s fluidiziranim slojem [6]

c) Rasplinjač s uronjenim slojem [9]

Rasplinjač s protočnim slojem je tip reaktora s istim smjerom kretanja ugljena, oksidansa (kisika ili zraka) i vodene pare. Ugljen mora biti samljeven u ugljenu prašinu ($<200\ \mu\text{m}$) kako bi se osigurao vrlo visok prijenos topline i tvari te se najčešće miješa s vodom. Stupanj pretvorbe ugljika u sintetski plin je vrlo visok ($>95\%$). U slučaju miješanja ugljene prašine s vodom nije potreban dodatan tok pare pošto nastala mješavina u sebi sadrži dovoljnu količinu vode (tj. vodene pare) za vođenje procesa. Mješavina ugljene prašine i vode te kisik se dovode u reaktor visokom brzinom te je vrijeme boravka vrlo kratko – nekoliko sekundi. Zbog kratkog vremena boravka, u reaktoru se moraju osigurati visoke temperature ($1300 - 1600\ \text{°C}$) kako bi se postigla dobra pretvorba ugljena u sintetski plin. Visoka temperatura zahtjeva velik protok oksidansa, uzrokuje nastanak troske te je zbog toga potreban poseban premaz unutarnjih stijenka reaktora kako bi se produžio životni vijek materijala. Prednost ovakvog tipa rasplinjača je što može koristiti različit tip ugljena kao gorivo, iako su za ugljene s visokim udjelom vlage i pepela pogodniji drugi rasplinjači. U komercijalnoj upotrebi su najčešće dvije vrste rasplinjača s uronjenim slojem: GE Power, prije zvan Chevron Texaco, i Shell. Na Slika 9. je shematski prikaz rasplinjača s uronjenim slojem.



Slika 9. Rasplinjač s uronjenim slojem [6]

U Tablica 3. dan je kratki pregled navedenih vrsta rasplinjača.

Tablica 3. Kratki pregled tipova rasplinjača

Vrsta rasplinjača	Fiksni sloj		Fluidizirani sloj		Uronjeni sloj
Pepeo	Suho	Troska	Suho		Troska
Tip	Lurgi	BGL	Winkler	KRW	Shell, GE Power
Tip goriva					
Veličina [mm]	<50		<6		<0.2
Poželjna vrsta	bilo koja	Stariji	Mlađi	Bilo koji	Bilo koji
Procesne karakteristike					
Temperatura [°C]	<1000		<1000		>1300
Potreba za kisikom (zrakom)	niska		Umjerena		visoka
Potreba za vodenom parom	Visoka	Niska	Umjerena		niska
Ostalo	Ugljikovodici u plinu		Niska pretvorba ugljika		Čisti plin, visoka pretvorba ugljika

Osim vrste sloja u kojem se događa rasplinjavanje, rasplinjači se mogu razlikovati i po [7]:

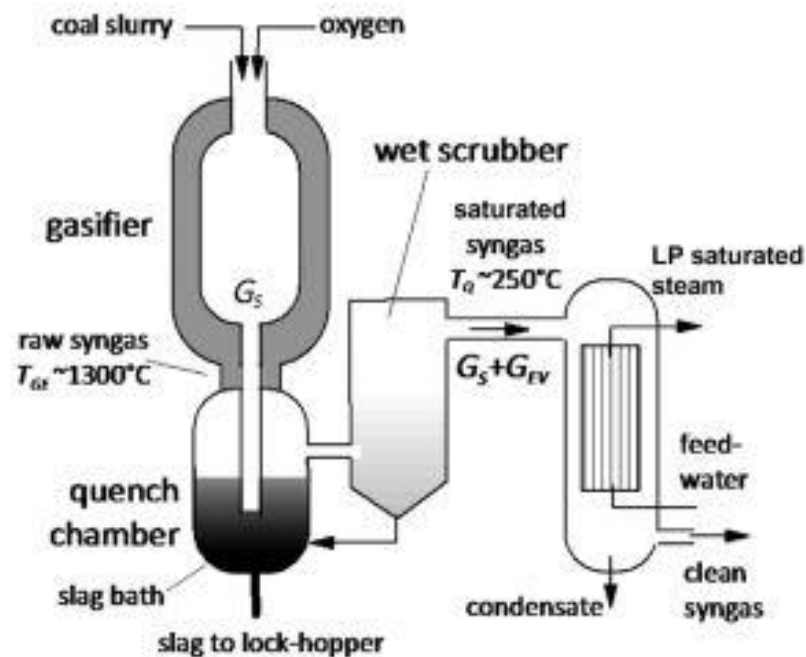
- smjeru strujanja: istosmjerni, protusmjerni ili križni tok goriva, oksidansa i vodene pare,
- smjer rasplinjavanja: silazno ili uzlazno rasplinjavanje,
- pripremi goriva: miješanje goriva (ugljene prašine) s vodom ili suho gorivo
- dobavi goriva: ; pomoću N₂ ili CO₂,
- vrsti oksidansa: kisik ili zrak; rasplinjavanje kisikom ostvaruje veći CGE,
- hlađenju sintetskih plinova: gašenje vodom, gašenje plinom, hlađenje pomoću izmjenjivača topline.

2.1.1. GE Power rasplinjač

GE Power je rasplinjač s uronjenim slojem, prije zvan Chevron Texaco. Za rasplinjavanje se koristi ugljena prašina pod tlakom većim od 30 bar. Povećanjem tlaka povećava se i moguća količina ugljena koja se rasplinjava bez povećanja dijelova rasplinjača. Ova vrsta rasplinjača čini preko 50% rasplinjača s uronjenim slojem u svijetu [9]. Prvo eksperimentalno postrojenje izgrađeno je 1948. godine, a koristilo se za rasplinjavanje ugljene prašine pod tlakom od 30 bar.

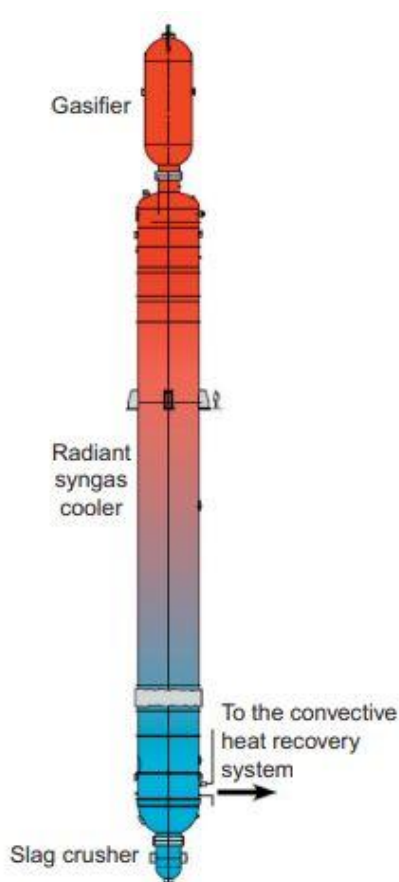
Ugljena prašina se prije rasplinjavanja miješa s vodom. Na taj se način izbjegava potreba za dodatnom strujom vodene pare za rasplinjavanje. Mješavina se prije ulaska u reaktor može zagrijavati na višu temperaturu čime se postiže veći CGE. Ulaz mješavine i 95%-tnog kisika je na vrhu rasplinjača. Pošto se postižu temperature koje su veće od temperature taljenja pepela formira se troska koja izlazi na dnu rasplinjača. Nastali sintetski plin se može hladiti na dva načina: gašenje vodom ili visokotemperaturno hlađenje.

Hlađenje vodom pojednostavljuje proces hlađenja, znatno smanjuje troškove ulaganja i povećava pouzdanost i održivost procesa [10]. U vrući tok sintetskih plinova se ubacuje velika količina vode koja isparava i hladi sintetski plin. Troska, koja je nastala tijekom rasplinjavanja, se skrućuje i izlazi na dnu rasplinjača. Zasićeni sintetski plin izlazi iz rasplinjača pri temperaturi 200-250 °C. Shema GE rasplinjača s hlađenjem pomoću vode prikazana je na Slika 10. Velika količina vodene pare sadržana u sintetskom plinu se može kasnijim procesima iskoristiti za proizvodnju niskotlačne pare. Toplina potrebna za isparavanje i pregrijanje te niskotlačne pare najvećim dijelom je sadržana u latentnoj toplini.



Slika 10. GE rasplinjač s hlađenjem pomoću vode [10]

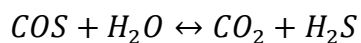
Visokotemperaturno hlađenje se postiže implementacijom visokotemperaturnog izmjenjivača topline unutar rasplinjača. Visokotemperaturni izmjenjivač topline mora biti obložen premazom koji ga štiti od negativnih posljedica visoke temperature na materijal. Unutar visokotemperaturnog izmjenjivača topline se nalazi voda pod visokim tlakom (100 - 140 bar), koja se zagrijava, isparava i pregrijava. Uz hlađenje sintetskih plinova, hladi se i troska koja se skrućuje i izlazi na dnu rasplinjača. Sintetski plinovi izlaze s 800-900 °C te dolaze do izmjenjivača topline u kojem se proizvodi para srednjeg ili niskog tlaka. Temperatura sintetskog plina nakon tog izmjenjivača je 250-380 °C. Ovakav način hlađenja je mnogo efikasniji jer se uz hlađenje sintetskih plinova proizvodi i para visokog, srednjeg ili niskog tlaka koja se koristi u parno-turbinskom ciklusu. S druge strane, ovakav sustav je višestruko skuplji od gašenja pomoću vode zbog korištenog materijala koji je otporan na visoke temperature. Osim toga, samo vođenje procesa je puno kompleksnije te zahtjeva puno više održavanja od gašenja pomoću vode. Slika 11. prikazuje rasplinjač s visokotemperaturnim hlađenjem.



Slika 11. Rasplinjač s visokotemperaturnim hlađenjem [10]

2.2. Uklanjanje kiselih plinova

Jedinica za uklanjanje kiselih plinova (eng. acid gas removal – AGR) iz sintetskih plinova čini jednu od bitnijih komponenti IGCC postrojenja. Glavna uloga ovog procesa je zbrinuti kemijske spojeve koji sadrže sumpor kako bi se postigle tražene razine emisija. Dva najčešća spoja koji nastaju rasplinjavanjem, a sadrže sumpor, su sumporovodik (H_2S) i karbonil sulfid (COS). H_2S je prisutan u puno većim koncentracijama nego COS . Uz H_2S i COS , može se zbrinjavati i CO_2 u AGR-u, ali u puno manjoj količini nego H_2S . Osim u AGR-u, CO_2 se može zbrinjavati i u procesu sour water-gas shift, ali se taj proces ne koristi u radu pa se neće opisivati. Zbrinjavanje COS se temelji na hidrolizi kako bi nastao H_2S :



(14)

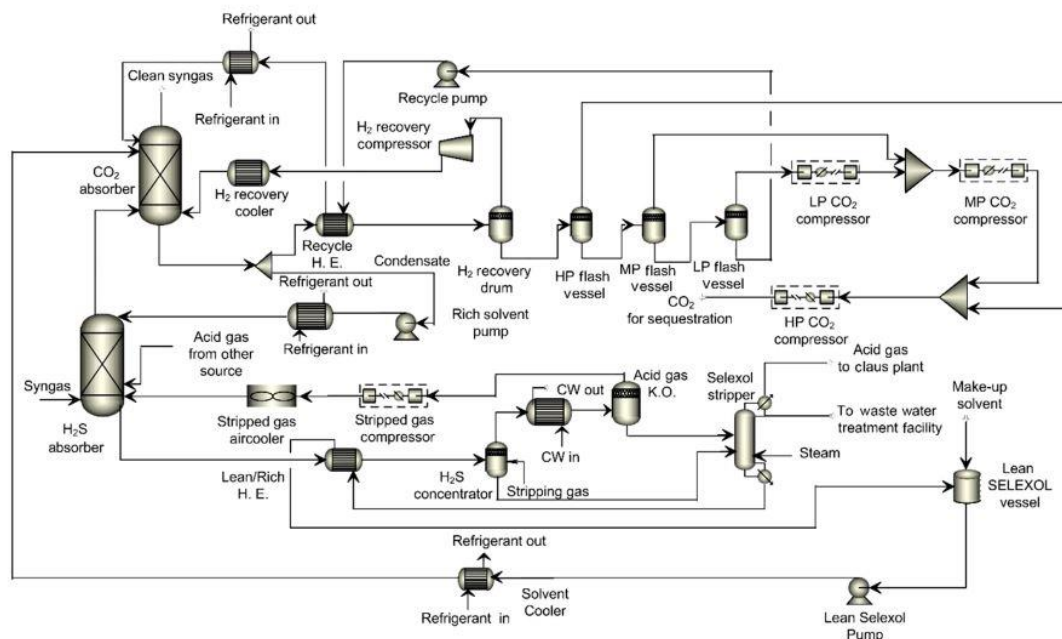
Jedinica za hidrolizu se postavlja prije jedinice za uklanjanje kiselih plinova. Tako glavna komponenta koja sadrži sumpor koja se uklanja u AGR-u je H₂S.

Uklanjanje kiselih plinova u praksi se najčešće vrši pomoću otapala. U upotrebi su kemijska, fizička i hibridna otapala. Kemijska otapala su bazirana na vodenim otopinama alkanolamida: MEA, DEA, MDEA, TEA itd. Ona su prigodna kada se u sintetskim plinovima nalazi relativno puno ugljikovodika (metan, etan, butan ...) jer je apsorpcija ugljikovodika puno manja nego kod fizičkih otapala. Fizička otapala su primjenjiva ako su parcijalni tlakovi kiselih plinova relativno veliki. Osim zbrinjavanja H₂S, s njima se također može zbrinuti i manja količina CO₂. Tri najčešće korištena fizička otapala u komercijalnoj upotrebi su: Selexol, Rectisol i Purisol. Tablica 4. prikazuje usporedbu parametara navedena tri otapala.

Tablica 4. Usporedba Selexol, Purisol i Rectisol procesa [11]

	Selexol	Purisol	Rectisol
Tlak pare (pri 25 °C) [mmHg]	0,0007	0,40	125
Maksimalna radna temperatura [°C]	175	-	-
H ₂ S/CO ₂ topivost (pri 25 °C)	8,9	10,2	7,06 (pri -25 °C)

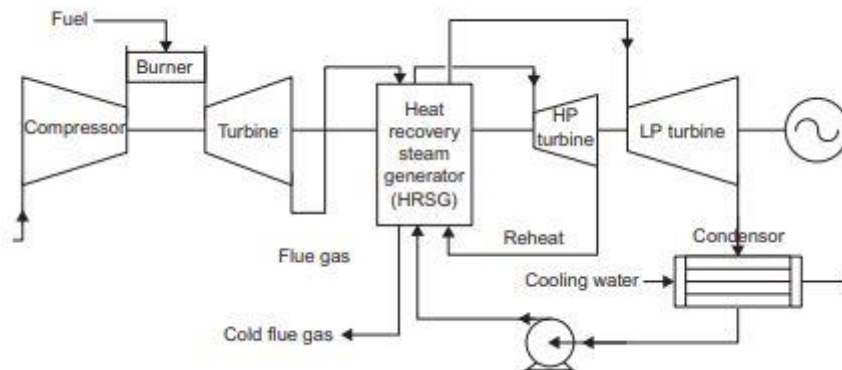
Veći radni tlakovi u procesu pridonose većim gubicima otopine koja se koristi. Niža radna temperatura minimizira gubitke te pospješuje uklanjanje kiselih plinova, ali zahtjeva dodatno hlađenje plinova koji povećavaju troškove postrojenja. Slika 12. prikazuje shemu uobičajenog Selexol postrojenja. Samo postrojenje je kompleksno te postavljanje konfiguracije i vođenje istog zahtjeva puno iskustva.



Slika 12. Shema uobičajenog Selexol postrojenja [11]

2.3. Kombinirani ciklus

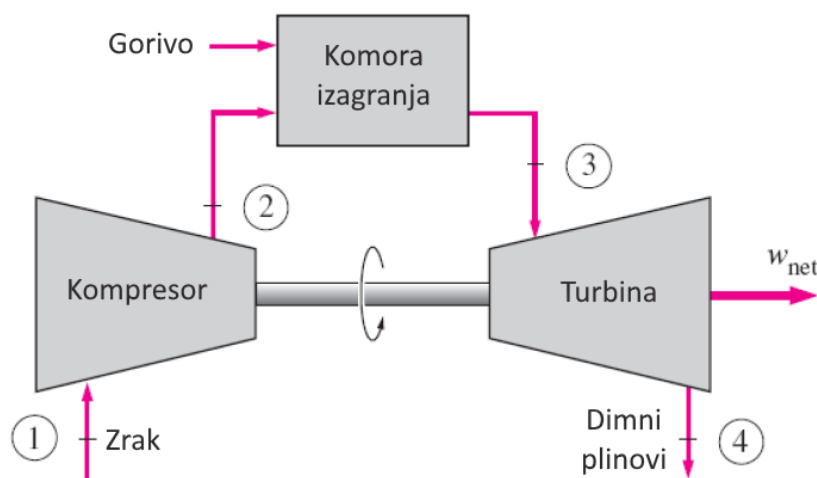
Kombinirani ciklus je naziv za vrstu ciklusa koja kombinira rad plinsko – turbinskog dijela (Brayton-ov ciklus) i parno – turbinskog dijela (Rankine-ov ciklus) postrojenja u jednu povezanu cjelinu. Gorivo i zrak pod tlakom se dovode u komoru izgaranja gdje se odvija potpuno izgaranje. Dimni plinovi, koji su produkt izgaranja, ekspandiraju u plinskoj turbini koja je povezana vratilom s generatorom električne energije (pretvorba: kemijska energija → toplinska energija → mehanička energija → električna energija). Nakon plinske turbine, dimni plinovi ulaze u generator pare na otpadnu toplinu (eng. Heat recovery steam generator – HRSG) u kojem se osjetna toplina dimnih plinova koristi za zagrijavanje, isparavanje i pregrijavanje vode. Pregrijana para ekspandira u parnoj turbini koja je povezana vratilom s generatorom električne energije. Prednost kombiniranog ciklusa je povećanje iskoristivosti procesa jer se osjetna toplina dimnih plinova, koja bi se inače bacila u okoliš, iskorištava za proizvodnju pare i posljedično električne energije. Najmodernija postrojenja uspijevaju premašiti čak i 60% učinkovitosti [12]. Veća učinkovitost rezultira manjim emisijama CO₂ po jedinici generirane električne energije (kgCO₂/kWh). Jednostavna shema kombiniranog ciklusa s visokotlačnom i niskotlačnom turbinom prikazana je na Slika 13.



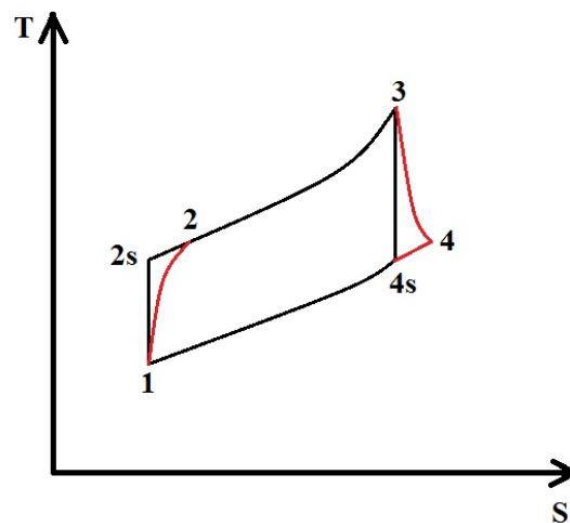
Slika 13. Jednostavna shema dvostupanjskog kombiniranog ciklusa [12]

2.3.1. Plinsko – turbinski ciklus

Plinsko – turbinski ciklus je desnokretni ciklus koji radi na principu Brayton-ovog procesa. Osnovne komponente za rad ovakvog ciklusa su kompresorska jedinica, komora izgaranja i plinska turbina. Zrak, najčešće okolišnih uvjeta, ulazi u kompresor gdje mu se povećava tlak, a posljedično i temperatura (promjena 1 → 2). U komoru za izgaranje se paralelno dovode komprimirani zrak i gorivo gdje se događa proces potpunog izgaranja. Produkti izgaranja su dimni plinovi visoke temperature (promjena 2 → 3). Takvi dimni plinovi ulaze u plinsku turbinu gdje ekspanziraju. Tijekom ekspanzije tlak i temperatura dimnih plinova padaju (promjena 3 → 4). Ove tri promjene prikazane su na jednostavnoj shemi plinsko – turbinskog ciklusa (Slika 14.) i u T,s dijagramu (Slika 15.).



Slika 14. Jednostavna shema plinsko – turbinskog ciklusa



Slika 15. T,s dijagram plinsko – turbinskog ciklusa

Treba naglasiti da se u dijagramu mogu vidjeti dva tipa promjena. Promjena $1 \rightarrow 2s$ (označeno crnom bojom) je „idealna“ promjena, tj. izentropska učinkovitost ove promjene je 1 ($\eta_s = 1$). Promjena $1 \rightarrow 2$ (označeno crvenom bojom) je „realna“ promjena, tj. izentropska učinkovitost je manja od 1 ($\eta_s < 1$). Navedeno vrijedi i za promjene $3 \rightarrow 4s$ i $3 \rightarrow 4$.

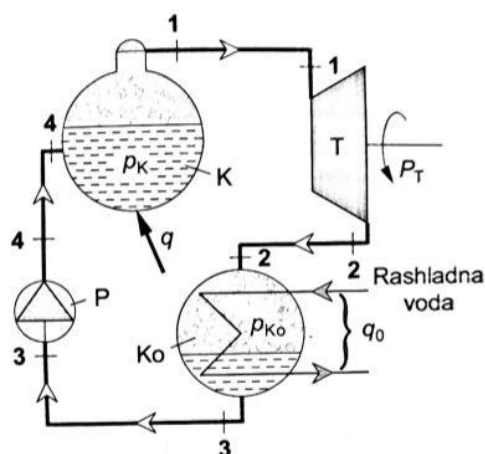
Plinska turbina i kompresor su spojeni istim vratilom tako da turbina daje kompresoru potrebnu snagu za rad. Snaga potrebna za pokretanje kompresora može nekada činiti i do $2/3$ snage ostvarene na vratilu turbine. Potrebna snaga za pokretanje kompresora najviše ovisi o zahtijevanom kompresijskom omjeru. Preostali tok snage se vodi prema generatoru električne energije koji je također spojen vratilom s plinskom turbinom.

Današnje konstrukcije plinskih turbina i korišteni materijali za konstrukciju dopuštaju ulazne temperature u turbinu i do $1600\text{ }^\circ\text{C}$, s time da se radi na tome da te temperature dosegnu čak i $1700\text{ }^\circ\text{C}$ [12]. Kroz godine razvoja je, također, kompresijski omjer sve veći i veći. Tako je on narastao s 15:1 (klasa F) na 23:1 (klasa H). Klasično plinsko – turbinsko postrojenje postiže neto učinkovitosti od 30-35%.

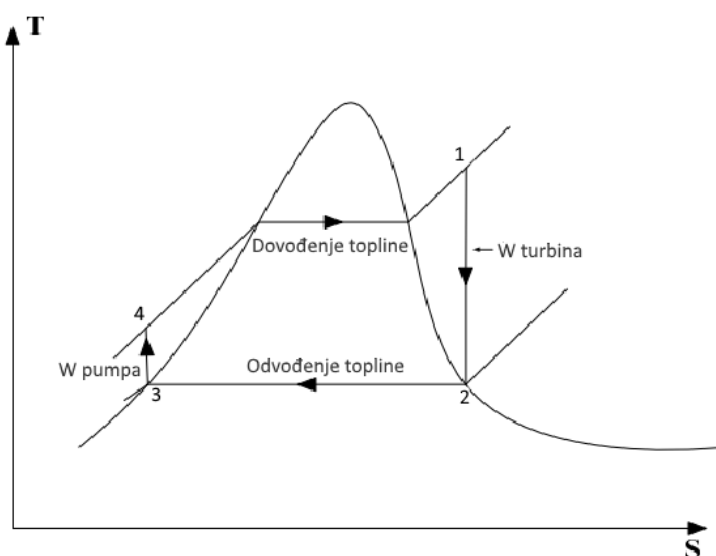
2.3.2. Parno – turbinski ciklus

Parno – turbinski ciklus je vrsta desnokretnog ciklusa (Rankine-ov proces) u kojem se proizvedena para koristi za pogon parne turbine koja je spojena na generator električne energije. Osnovne komponente ovog postrojenja su: generator pare (parni kotao), parna turbina, kondenzator, pumpa i izmjenjivači topline za zagrijavanje vode i pregrijanje pare.

Generatoru pare se dovodi toplina potrebna za isparavanje vode do minimalno suhozasićenog stanja (promjena $4 \rightarrow 1$). Suhozasićena para (ili pregrijana ako postoji pregrijač pare) visoke temperature i tlaka se dovodi do parne turbine u kojoj ekspandira. Tijekom ekspanzije temperatura i tlak pare padaju, ona djelomično kondenzira te para ulazi u zasićeno područje (promjena $1 \rightarrow 2$). Para u parnoj turbini ne smije previše kondenzirati kako ne bi došlo do erozije lopatica turbine. Tako zasićena para ulazi u kondenzator hlađen vodom i potpuno kondenzira do stanja vrele kapljevine (promjena $2 \rightarrow 3$). Nakon kondenzacije, vodi se pomoću napojne pumpe podiže tlak (promjena $3 \rightarrow 4$). Takva voda visokog tlaka se vraća u generator pare gdje ponovno isparava te se ciklus ponavlja. Navedene promjene su prikazane na jednostavnoj shemi procesa (Slika 16.) i T,s dijagramu (Slika 17.).



Slika 16. Jednostavna shema parno – turbinskog ciklusa [13]



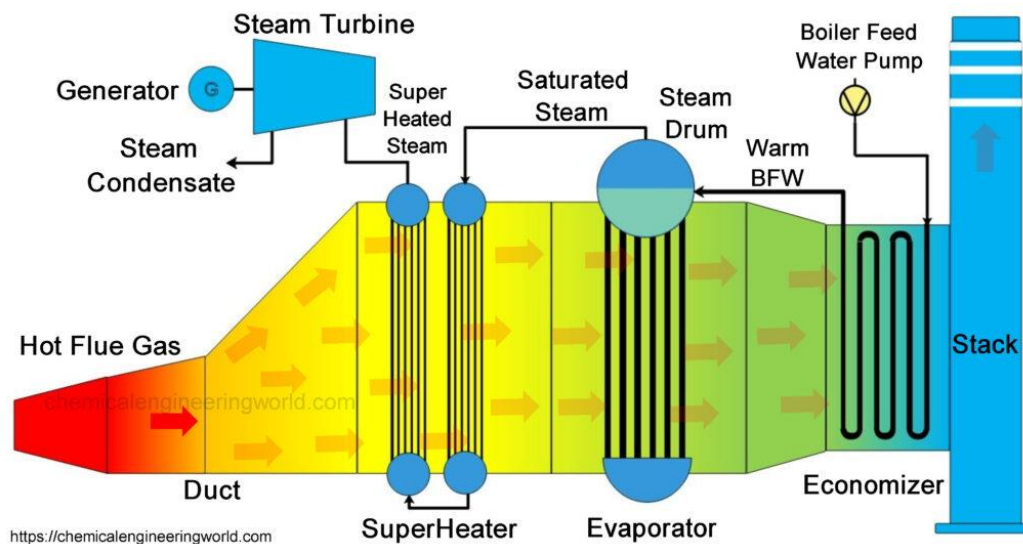
Slika 17. T,s dijagram parno – turbinskog ciklusa s pregrijavanjem

Najzanimljiviji tip generatora pare za kombinirani ciklus je generator pare na otpadnu toplinu (eng. Heat recovery steam generator – HRSG). Takav tip generatora pare nema vlastito ložište, nego koristi osjetnu toplinu dimnih plinova za proizvodnju pare i proizvodnju električne energije.

2.3.3. Generator pare na otpadnu toplinu - HRSG

HRSG je tip generatora pare koji koristi visoku temperaturu i velik protok dimnih plinova za proizvodnju pare. Dimni plinovi nakon ekspanzije u plinskoj turbini su još uvijek visoke temperature ($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$) te umjesto da se njihova osjetna toplina odvede u okoliš, ona se koristi za proizvodnju pare. Na taj se način osjetna toplina dodatno oporabljuje te se povećava učinkovitost postrojenja.

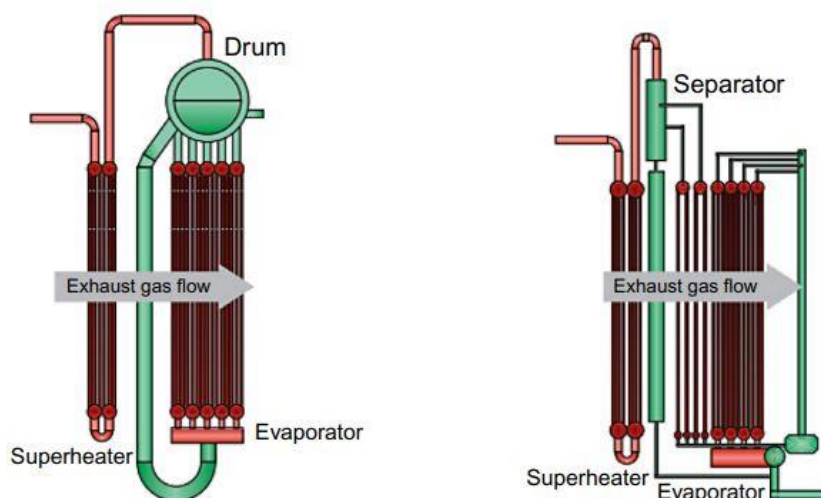
HRSG čini niz izmjenjivača topline različite namjene: ekonomajzer napojne vode, isparivač, pregrijač pare, međupregrijač, zagrijač zraka itd. Raspored izmjenjivačkih površina je iznimno bitan kako bi se proizvela para što viših parametara (visoka temperatura i tlak). Jedna od konfiguracija HRSG-a je prikazana na Slika 18.



Slika 18. Konfiguracija HRSG-a [14]

HRSG-u se može pridružiti i dodatna komora izgaranja kako bi se povećala dovedena toplina generatoru pare. Sam parni kotao može imati prisilnu cirkulaciju (voda struji pomoću pumpe) ili prirodnu cirkulaciju (voda struji zbog razlika gustoće).

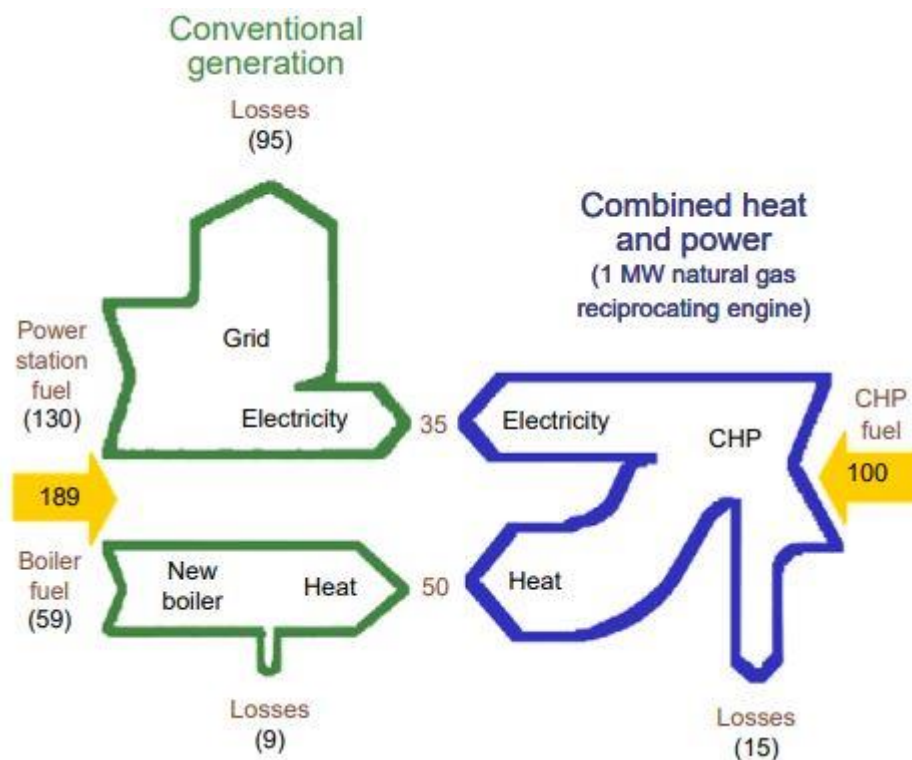
Posebna vrsta HRSG-a je protočni generator pare. Takva vrsta generatora nema podijeljene izmjenjivačke površine (ekonomajzer, isparivač, pregrijač), nego su one povezane u jednom nizu. Prednosti takve vrste generatora je fleksibilnost rada pri promjeni opterećenja. Kada se smanjuje opterećenje generatora pare, ne može doći do isparavanja u ekonomajzeru kao što može doći u klasičnom generatoru pare (površina za izmjenu topline je fiksna). Takav način rada omogućava brze promjene masenog toka proizvede pare. Slika 19. prikazuje izgled „klasičnog“ i protočnog generatora pare u HRSG-u.



Slika 19. „Klasični“ (lijevo) i protočni (desno) generator pare [12]

2.4. Kogeneracija

Kogeneracija je istovremena proizvodnja električne i korisne toplinske energije u jednom postrojenju od istog goriva. Kogeneracija povećava učinkovitost postrojenja i smanjuje emisije CO₂ za iste izlazne tokove električne energije i topline. Učinkovitost takvih postrojenja može iznositi čak i do 90% [15]. Kada se toplina i električna energija generiraju posebno, za 35 jedinica električne energije i 50 jedinica toplinskog toka potrebno je 189 jedinica goriva. U slučaju da se električna energija i toplina generiraju u istome postrojenju, za 35 jedinica električne energije i 50 jedinica toplinskog toka potrebno je 100 jedinica goriva (Slika 20.). Takva vrsta postrojenja čini kogeneraciju skoro dva puta učinkovitijom.



Slika 20. Usporedba učinkovitosti odvojene (konvencionalne) generacije i kogeneracije [15]

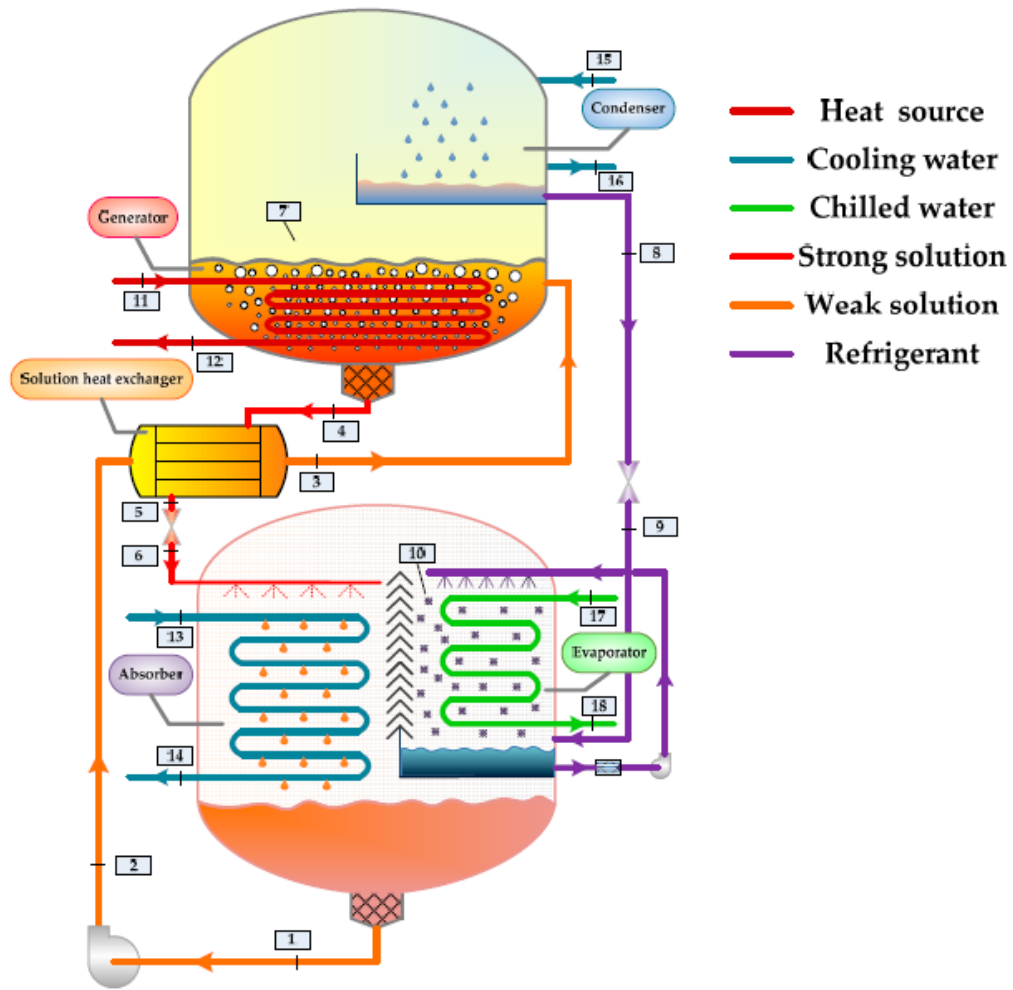
2.5. Apsorpcijsko hlađenje

Kao dodatno iskorištenje niskotemperaturne energije, poput otpadne topline, u novije vrijeme se koristi apsorpcijsko hlađenje. Ovakvi sustavi su alternativa klasičnim kompresijskim sustavima za hlađenje. Ovakvi sustavi rade na principu apsorpcije: fizikalno-kemijski proces otapanja plinova u kapljevinama (rjeđe u čvrstim tvarima) čitavom masom materije koja upija [16]. Pošto ovakvi sustavi ne koriste kompresore, vibracije i povezana buka su smanjenje, Također su sustavi dugotrajniji jer nema mehaničkog trošenja komponenata. Također su i ekološki prihvatljivi. Koriste radne tvari kojima su GWP (eng. global warming potential) i ODP (eng. ozone depletion potential) 0, za razliku od konvencionalnih radnih tvari korištenih u hlađenju [17].

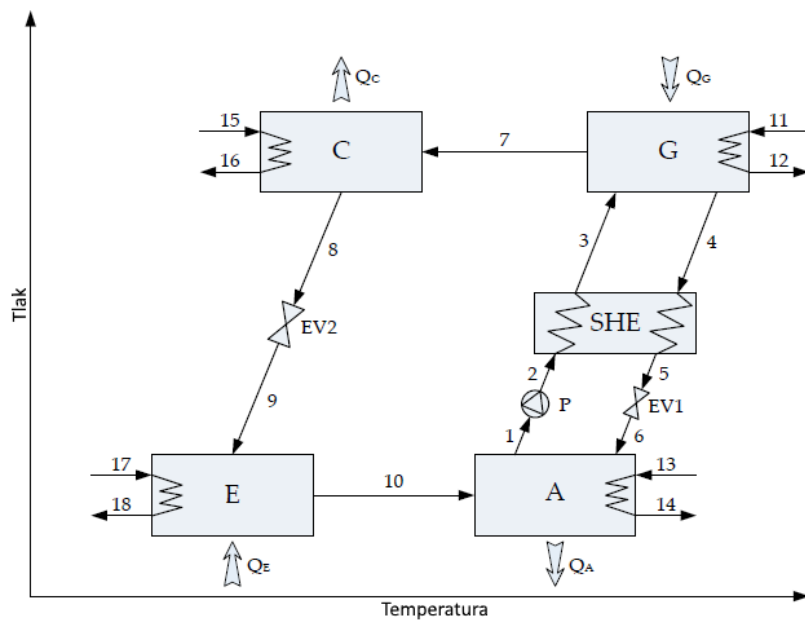
Apsorpcijsko hlađenje za svoj rad koristi otopinu dviju tvari gdje se jedna ponaša kao rashladno sredstvo, a druga kao apsorvent. Dva najčešće korištena para su LiBr - H₂O (LiBr kao apsorvent, H₂O kao rashladno sredstvo) i H₂O - NH₃ (H₂O kao apsorvent, NH₃ kao rashladno sredstvo). LiBr - H₂O sustavi hlade do 0 °C te rade s višim COP-om (eng.

coefficient of performance), dok su $H_2O - NH_3$ sustavi primjenjivi kada su potrebne niže temperature.

Komponente apsorpcijskog sustava ($LiBr - H_2O$) su: generator, kondenzator, isparivač i apsorber (može se koristiti i međuzmjenjivač za povećanje učinkovitosti procesa). Sustav radi na dva tlaka: visokom (generator i kondenzator) i niskom (isparivač i apsorber). Generatoru se dovodi toplina (promjena 11 \rightarrow 12), npr. niskotemperaturna otpadna toplina iz HRSG-a, kako bi voda (rashladno sredstvo) isparila iz niskozašićene otopine $LiBr - H_2O$ (promjena 3 \rightarrow 7). Tok čiste vodene pare putuje prema kondenzatoru gdje kondenzira (promjena 7 \rightarrow 8) pomoću rashladne vode (promjena 15 \rightarrow 16). Kondenzirana vodena para zatim prolazi kroz ekspanzijski ventil (promjena 8 \rightarrow 9) gdje joj pada tlak. Voda niskoga tlaka prolazi kroz isparivač i isparava na temperaturi zasićenja (promjena 9 \rightarrow 10). Toplinski tok potreban za isparavanje dovodi voda koju je potrebno ohladiti (promjena 17 \rightarrow 18). Vodena para iz izmjenjivača se dovodi do apsorbera gdje se apsorbira u visokozašićenu otopinu $LiBr - H_2O$ (promjena 10 \rightarrow 1). Pošto je proces apsorpcije vode u otopinu $LiBr - H_2O$ egzoterman, potrebno je odvoditi nastalu toplinu pomoću rashladne vode (promjena 13 \rightarrow 14). Niskozašićena otopina izlazi iz apsorbera te joj se diže tlak pomoću pumpe (promjena 1 \rightarrow 2). Niskozašićena otopina visokog tlaka prolazi kroz međuzmjenjivač i diže joj se temperatura (promjena 2 \rightarrow 3) izmjenom topline s visokozašićenom otopinom koja je na temperaturi zasićenja vode visokog tlaka (promjena 4 \rightarrow 5). Pri isparavanju vode u generatoru dio vode ispari, a dio ostane sadržan u otopini te ona postaje visokozašićena pošto je koncentracija $LiBr$ veća (promjena 3 \rightarrow 4). Visokozašićena otopina visokog tlaka prolazi kroz ekspanzijski ventil te joj tlak pada na niski tlak zasićenja vodene pare (promjena 5 \rightarrow 6). Shema procesa i p,T dijagram su prikazani na Slika 21. i Slika 22. U procesu su prisutne četiri glavne izmjene topline: 1. dovođenje topline (npr. HRSG) u generatoru za isparavanje vode iz otopine (Q_G); 2. odvođenje topline (rashladna voda) u kondenzatoru za kondenzaciju vodene pare (Q_C); 3. dovođenje topline (hlađena voda) u isparivaču za isparavanje vodene pare (Q_E); 4. odvođenje topline (rashladna voda) u apsorberu (Q_A).



Slika 21. Shema apsorpcijskog hlađenja [17]



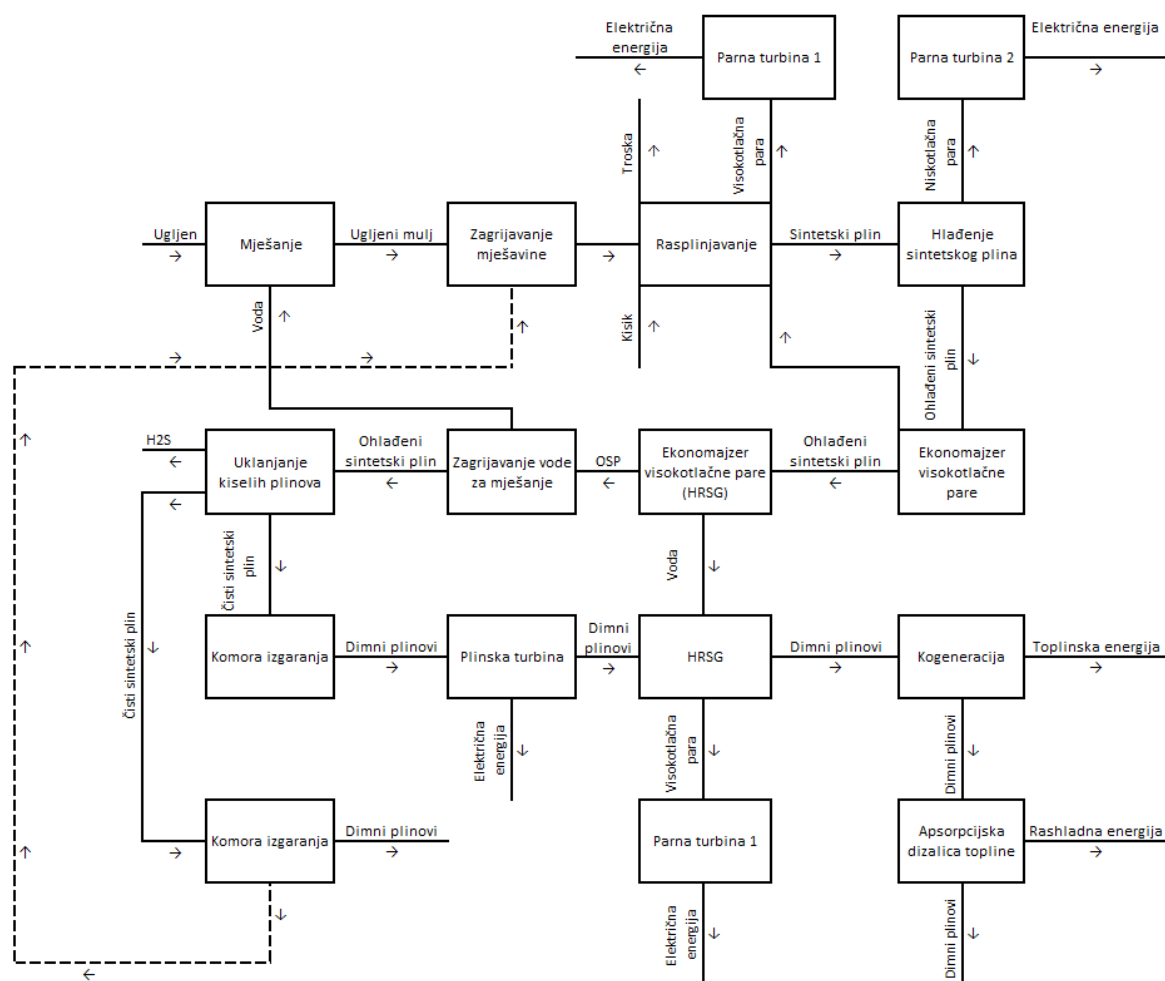
Slika 22. p,T dijagram apsorpcijskog hlađenja [17]

3. MATEMATIČKI MODEL

Model postrojenja je napravljen kao IGCC postrojenje u kojem se generira električna energija, toplinska energija za grijanje/PTV i rashladna energija. Rasplinjavanje je modelirano kao GE Power rasplinjač, a uklanjanje kiselih plinova je modelirano kao Selexol proces. Ostali procesi se temelje na uobičajenim termodinamičkim procesima i ciklusima. Program korišten za simulaciju je Epsilon Professional 15.01. S obzirom na to da je Epsilon Professional program prvenstveno namijenjen za simulaciju termodinamičkih procesa u kojima je ravnoteža masenih i toplinskih tokova očuvana, modeliranje složenih kemijskih procesa poput rasplinjavanja i uklanjanja kiselih plinova nisu razvijeni na istu razinu. Iz tog razloga su takvi procesi pojednostavljeni te modelirani metodom „crne kutije“. Zbog navedenih razloga, pojedini rezultati simulacije se ne mogu uzeti sa 100%-tnom sigurnošću. Potrebna znanja, iskustva i podaci za simuliranje su preuzeti iz literature.

3.1. Opis postrojenja

Model je napravljen kao IGCC postrojenje koje rasplinjava gorivo te se generira električna energija, toplinska energija za grijanje/PTV i rashladna energija. Ugljen definiranog kemijskog sastava se zagrijava i miješa zajedno s vodom u ugljeni mulj. Rasplinjač je modeliran kao GE Power rasplinjač. Ulazni tokovi u rasplinjač su ugljeni mulj i kisik. Nastali sintetski plin prolazi kroz niz izmjenjivača pomoću kojih se isti hladi vodom te se proizvodi visokotlačna i niskotlačna para. Nakon svih izmjenjivača, sintetski plin prolazi kroz proces uklanjanja kiselih plinova. Čisti sintetski plin se odvaja na dvije struje. Glavna struja se koristi za izgaranje te nastali dimni plinovi ekspandiraju u plinskoj turbini koja je povezana s generatorom električne energije, a sporedna struja izgara te se osjetna toplina dimnih plinova koristi za zagrijavanje ugljenog mulja. Ekspandirani dimni plin je visoke temperature te se njegova osjetna toplina koristi za proizvodnju pare u HRSG-u. Nakon predaje topline vodi/pari, dimni plinovi se dodatno oporabljaju za zagrijavanje vode za grijanje/PTV i na kraju za pogon apsorpcijskog ciklusa. Na kraju svega, dimni plin dolazi do dimnjaka gdje odlazi u okoliš. Jednostavni prikaz sheme modela se može vidjeti na Slika 23.



Slika 23. Jednostavna shema modela

U sljedećim poglavljima objasniti će se način modeliranja cijelog postrojenja po cjelinama.

3.1.1. Tip ugljena i miješanje

Programski paket Epsilon Professional u svojoj bazi već ima definirane mnoge vrste goriva poput različitih vrsta ugljena (lignit, smeđi ugljen, kameni ugljen, koks...), biomase, nafte, zemnog plina itd. Za potrebe ovog modela, odabran je tuzlanski lignit. Sastav i donja ogrjevna vrijednost prikazani su u Tablica 5.

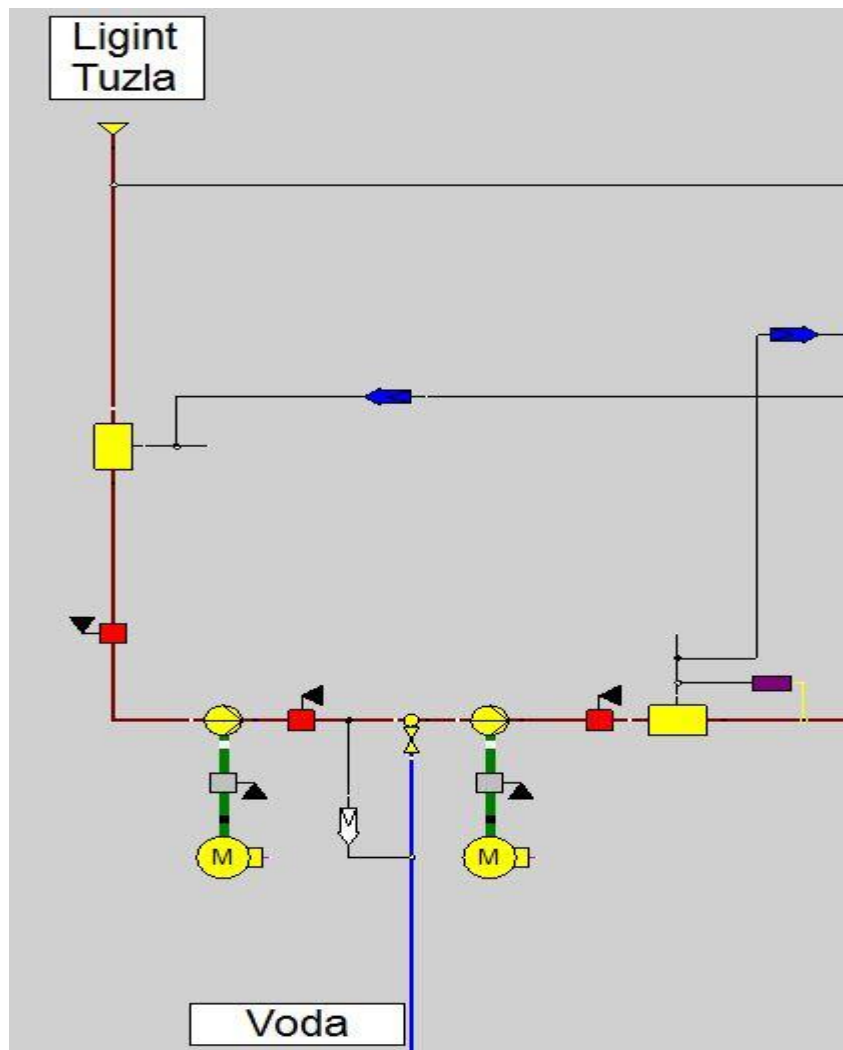
Tablica 5. Sastav ugljena

Vrsta ugljena	Lignit
Sastav	[%]
Ugljik	37,96
Vodik	3,07
Kisik	10,82
Dušik	1,07
Sumpor	1,13
Pepeo	22,07
Vlaga	23,88
Donja ogrjevna vrijednost [kJ/kg]	14480,85

Tok goriva je dodan pomoću bloka „Boundary input value“ te mu je definiran tlak, temperatura i početni protok (protok se kasnije u modelu mijenja pomoću bloka „Controller with external target value“). Ugljen se prije miješanja s vodom zagrijava pomoću sintetskih plinova (detaljnije objašnjeno u poglavlju 3.1.4. Izgaranje sintetskog plina i plinska turbina), blok „Heat injection“.

Zagrijanom ugljenu se diže tlak, blok „Pump“, te se miješa s vodom, blok „Water injection“, u ugljeni mulj. Tlak se prije miješanja ugljena s vodom povećava kako voda pri miješanju ne bi isparila zbog svog parcijalnog tlaka (Dalton-ov zakon). Voda se dodaje ugljenu jer je to način prijenosa i dovođenja ugljena u rasplinjač (GE Power rasplinjač). Pomoću bloka „Value transmitter“ definiran je maseni protok vode koji čini 42,9% masenog protoka ugljena (voda/ugljeni mulj 30%). Ugljenom mulju se ponovno povećava tlak na radni tlak rasplinjača.

Mješavina se zagrijava na zadanu temperaturu, blok „Heat injection“. Pošto je ugljeni mulj mješavina ugljena i vode, ona nije pogodna za korištenje s blokovima koji predstavljaju izmjenjivače topline (ograničenje programskog paketa). Zbog toga je korišten blok „Heat injection“. Potreban toplinski tok za zagrijavanje mješavine se dovodi pomoću dimnih plinova (sporedna struja iz 3.1. Opis postrojenja). Temperatura nakon zagrijavanja je određena pomoću bloka „Controller with internal target value“. Slika 24. prikazuje ulaznu struju ugljena i njegovo miješanje s vodom.

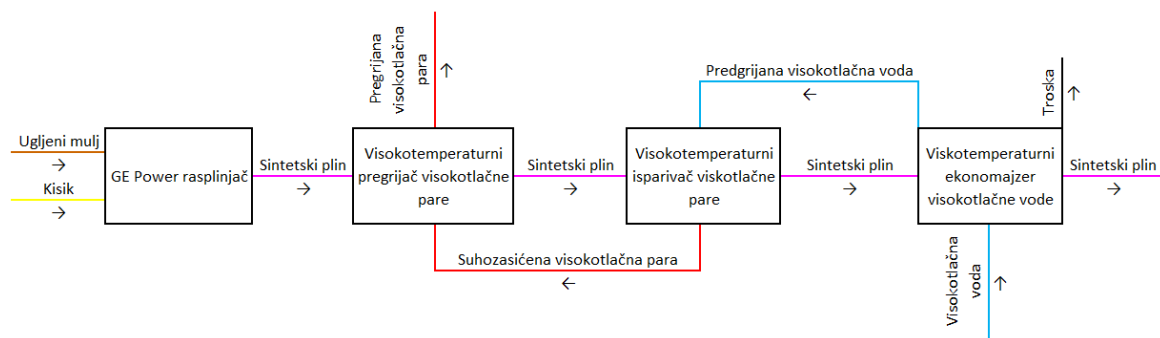


Slika 24. Prikaz miješanja ugljene prašine i vode

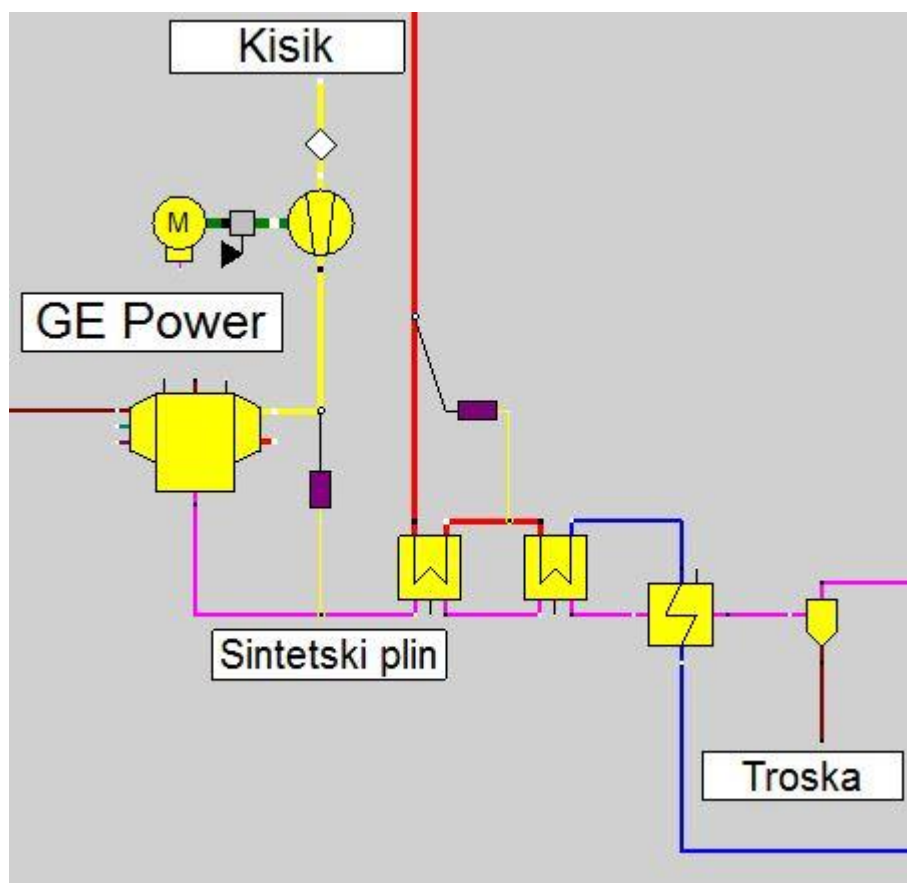
3.1.2. Rasplinjavanje

Zagrijavanjem mješavine, voda u njoj isparava te se tako povećava CGE. Kao što je već napisano, modelirani GE Power rasplinjač koristi vodu kao medij kojim se ugljen dovodi u sam rasplinjač. Druge vrste rasplinjača kao medij za dovodjenje koriste inertne plinove, npr. dušik. Osim što se voda koristi za dovodjenje, ona služi i kao izvor vodene pare koja je potrebna za rasplinjavanje. Ovakvim načinom eliminira se potreba za dodatnom strujom vodene pare i svom opremom koja bi trebala ići uz nju kako bi se postigli parametri dostatni za rasplinjavanje. Rasplinjavanje je modelirano kao GE Power rasplinjač s visokotemperaturnim hlađenjem, blok „Extended coal gasifier“. Treba naglasiti da je za definiranje rasplinjavanja potrebno poznavati parametre koji su poznati mjerenjima ili su iskustvene vrijednosti: učinkovitost rasplinjavanja (pretvorba ugljika), izlazna koncentracija CH_4 , pretvorba sumpora u H_2S , pretvorba pepela u trosku, koncentracija ugljika u pepelu i dr. **S obzirom na manjak iskustva i dostupnih podataka mjerenjem, dobivene rezultate ne treba smatrati 100%-tno pouzdanim za zadane uvjete.**

Potrebni maseni tokovi za rasplinjač su: ugljen (s njime ulazi i vodena para) i oksidans (kisik). Oksidans se dovodi u rasplinjač kao mješavina kisika i dušika (95% kisik, 5% dušik; na bazi mase). Oksidans je potrebno dignuti na radni tlak u rasplinjaču te se kompresija odvija pomoću bloka „Compressor“. Potrebna količina oksidansa za rasplinjavanje regulira se pomoću bloka „Controller with internal target value“ tako da se postiže definirana temperatura sintetskog plina na izlazu iz rasplinjača (1400 – 1600 °C). S obzirom da Ebsilon Professional ne sadrži bazu rasplinjača, na kraju rasplinjača je dodano visokotemperaturno hlađenje. Ono je odrađeno pomoću tri bloka „High temperature heat exchanger“ od kojih prvi predstavlja pregrijač pare, drugi isparivač, a treći ekonomajzer. Sintetski plin je hlađen vodom visokog tlaka koja isparava i pregrijava se. Dobivena para se miješa s visokotlačnom parom proizvedenom u HRSG-u te ekspandira u turbini. Sintetski plin nakon hlađenja izlazi s temperaturom 800 - 830 °C. S obzirom da je razvijena temperatura u rasplinjaču veća od temperature taljenja pepela, formira se troska. Ona se odvaja nakon visokotemperaturnog hlađenja. Odvajanje troske je modelirano blokom „Selective splitter (filter)“. Na Slika 25. je prikazana jednostavna shema rasplinjavanja. Smeđom bojom je označena struja ugljenog mulja, žutom kisik, ružičastom sintetski plin, crvenom proizvedena para, plavom voda koja isparava, a crnom troska. Slika 26. prikazuje rasplinjavanje i visokotemperaturno hlađenje iz programskog paketa Ebsilon Professional.



Slika 25. Jednostavna shema rasplinjavanja i visokotemperaturnog hlađenja



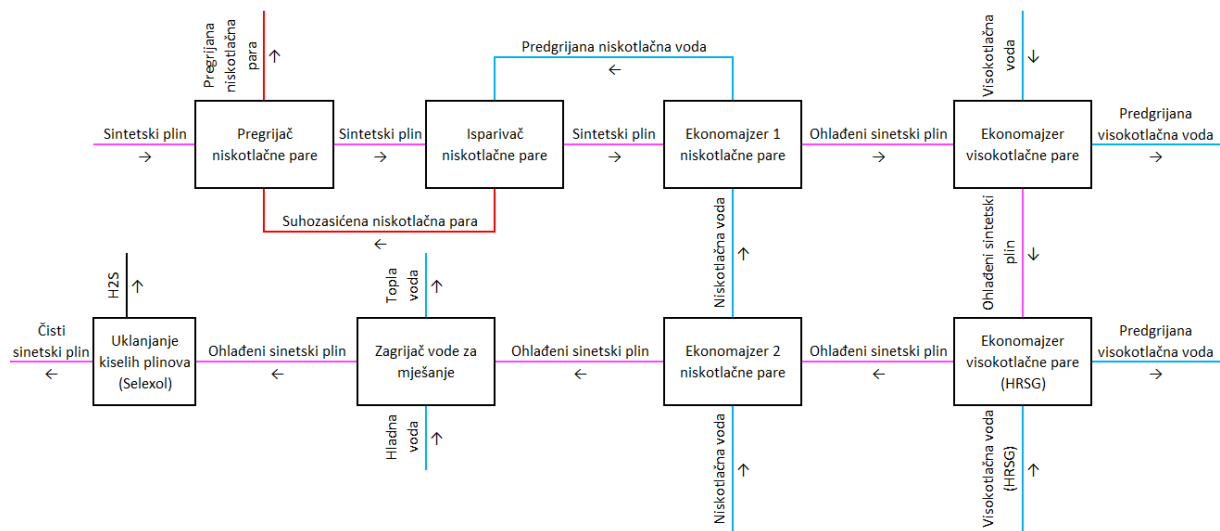
Slika 26. Prikaz rasplinjavanja

3.1.3. Hlađenje sintetskog plina i uklanjanje kiselih plinova

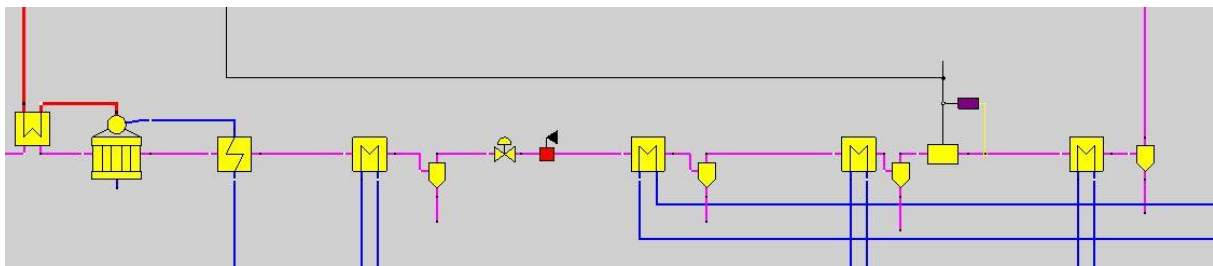
Sintetski plin je prije izgaranja u komori izgaranja moguće dodatno ohladiti te tako iskoristiti njegovu osjetnu toplinu. Dodatnim iskorištenjem povećava se stupanj učinkovitosti cijelog postrojenja te se u konačnici smanjuju emisije CO_2 (kgCO_2/kWh).

Ohlađeni sintetski plin, odvojen od troske, ulazi u hladnjak koji je modeliran pomoću tri izmjenjivača topline, blokovima „ECO/Evaporator/Superheater (with exponents)“ (pregrijač pare i ekonomajzer) i „Evaporator with steam drum“ (isparivač). Sintetski plin se hladi pomoću niskotlačne vode koja isparava i pregrijava se. Proizvedena para se miješa s parom koja je ekspandirala u prvom stupnju parno – turbinskog ciklusa te ekspandira u drugom stupnju. Nakon hladnjaka, sintetski plin prolazi kroz ekonomajzer, modeliran blokom „ECO/Evaporator/Superheater (with exponents)“, koji predgrijava vodu visokog tlaka koja isparava u visokotemperaturnom izmjenjivaču topline. Sljedeći izmjenjivač je modeliran kao ekonomajzer, modeliran blokom „ECO/Evaporator/Superheater (with exponents)“, koji predgrijava vodu prije ekonomajzera u HRSG-u. Idući izmjenjivač simulira ekonomajzer niskotlačne vode. On je modeliran blokom „ECO/Evaporator/Superheater (with exponents)“. Pretposljednje hlađenje sintetskog plina je napravljeno sa svrhom zagrijavanja ugljena prije njegovog miješanja s vodom, blokovi „Heat extraction“, „Value transmitter“ i „Heat injection“. Posljednji izmjenjivač predgrijava vodu koja se miješa s ugljenom, blok „ECO/Evaporator/Superheater (with exponents)“. S obzirom da sintetski plin sadrži vodenu paru koja nije sudjelovala u reakcijama, dio nje kondenzira prilikom hlađenja sintetskog plina (Dalton-ov zakon). Nastali kondenzat se odvaja iz struje sintetskog plina blokom „Selective splitter (filter)“.

Nakon posljednjeg hlađenja sintetskog plina, on je na temperaturi nižoj od 100 °C te je povoljan za uklanjanje kiselih plinova iz njega (H₂S). Sumporovodik je otrovan, korozivan i izrazito zapaljiv plin. H₂S se uklanja iz dva razloga: smanjenje emisija SO₂ koji nastaje izgaranjem H₂S i smanjenje korozije lopatica plinske turbine ako se previše SO₂ nađe u dimnim plinovima. Odvojeni H₂S se kasnije može Claus procesom pretvoriti u elementarni sumpor (nije modelirano u ovom radu). Uklanjanje je zamišljeno kao Selexol proces te je modelirano metodom „crne kutije“ zbog ograničenosti programskog paketa po pitanju složenih kemijskih procesa (Selexol proces koristi fizičku otopinu koja apsorbira plinove). Uklanjanje je modelirano pomoću bloka „Selective splitter (filter)“ te je pretpostavljeno da se uspije ukloniti 97,5% H₂S iz sintetskog plina. Slika 27. prikazuje jednostavnu shemu hlađenja sintetskog plina i uklanjanje kiselih plinova s prikazanim strujama. Ružičastom bojom je označena struja sintetskog plina, crvenom proizvedena para, plavom voda koja isparava ili se predgrijava, a crnom odvojeni H₂S iz sintetskog plina. Na Slika 28. je prikaz hlađenja iz programskog paketa Epsilon Professional.



Slika 27. Jednostavna shema hlađenja sintetskog plina i uklanjanja kiselih plinova



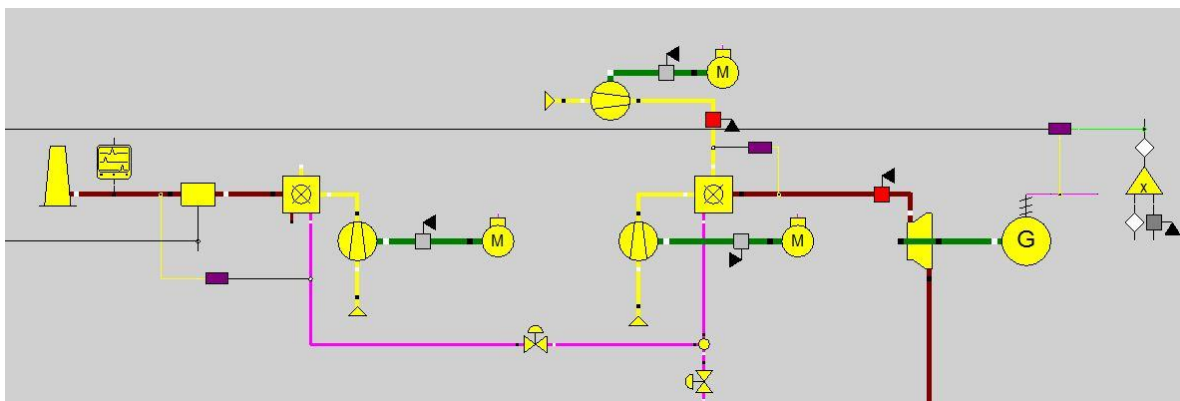
Slika 28. Prikaz hlađenja sintetskih plinova

3.1.4. Izgaranje sintetskog plina i plinska turbina

Čisti sintetski plin iz kojeg je uklonjen H_2S se grana na dvije struje: glavna struja koja ide u komoru izgaranja i plinsku turbinu te sporedna struja koja ide u drugu komoru izgaranja za zagrijavanje ugljenog mulja. Prije ulaska sintetskog plina u komoru izgaranja, koja je modelirana blokom „Combustion chamber of a gas turbine“, tlak plina se smanjuje na radni tlak plinske turbine, modelirano blokom „Control valve“. Za izgaranje se koristi zrak okolišnih uvjeta, modelirano blokom „Boundary input value“, koji se komprimira na radni tlak ,blok „Compressor/fan“. Potrebna količina zraka za izgaranje određena je zadanim faktorom pretička zraka. Dimni plinovi visoke temperature ekspaniraju u plinskoj turbini, blok „Gas turbine (turbine only)“, te se njihova toplinska energije pretvara u mehaničku energiju vratila plinske turbine. Plinska turbine je spojena vratilom s generatorom električne energije, blok „Generator“, gdje se događa pretvorba mehaničke energije vratila u električnu

energiju. Osim na generator, plinska turbina je vratilom također spojena s kompresorom kojem daje potrebnu snagu za rad. Proces je vođen tako da se za zadanu snagu na generatoru regulira maseni protok ugljena na početku postrojenja, modelirano blokom „Controller with external target value“. Dimni plinovi na kraju procesa su visoke temperature te umjesto da se bace u okoliš, prolaze kroz HRSG gdje se iskorištava njihova osjetna toplina.

Sporedna struja sintetskog plina se odvaja od glavne struje te se pomoću ventila tlak smanjuje. Za izgaranje se koristi zrak okolišnih uvjeta koji se prvo komprimira na radni tlak u komori izgaranja. Nastalim dimnim plinovima se toplina odvodi pomoću bloka „Heat extraction“ te se dovodi ugljenom mulju koji se zagrijava. Razlog odvajanja sintetskog plina za dodatno izgaranje leži u tome što je temperatura sintetskog plina nakon visokotemperaturnog hlađenja i drugog procesa hlađenja preniska pa preostala osjetna toplina nije dostatna kako bi se mješavina ugljena i vode dovoljno zagrijala. Proces se vodi tako da temperatura dimnih plinova nakon odvođenja topline ne padne ispod temperature kondenzacije H_2SO_4 kako ne bi došlo do korozije, modelirano blokovima „Emission display“ i „Controller with internal target value“. Slika 29. prikazuje izgaranje sintetskog plina i ekspanziju u plinskoj turbini.



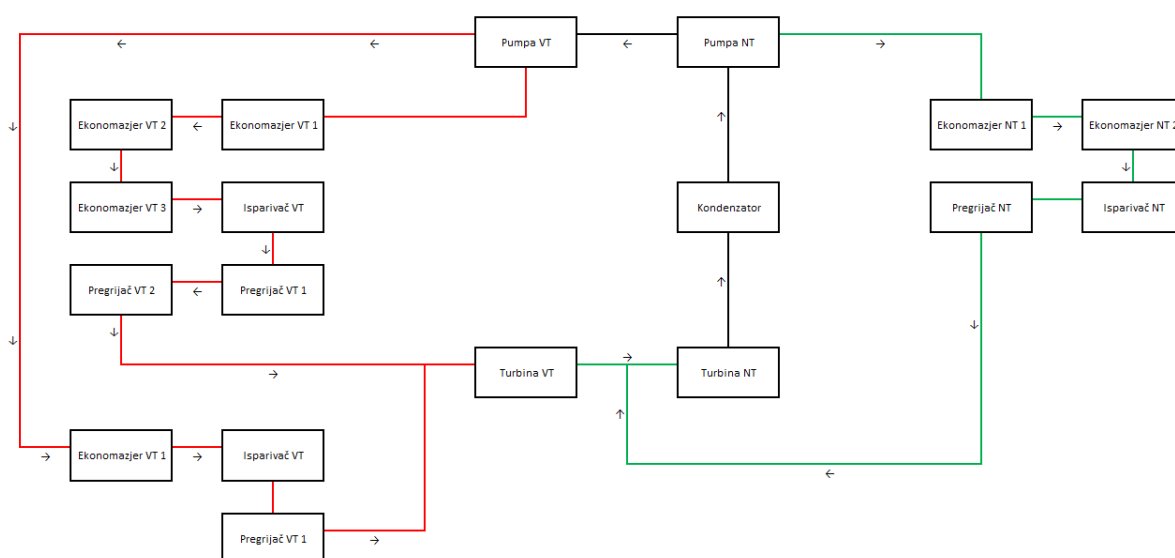
Slika 29. Prikaz izgaranja i plinske turbine

3.1.5. HRSG i parna turbina

Generator pare na otpadnu toplinu modeliran je kao niz izmjenjivača topline koji zagrijavaju vodu, isparavaju ju te pregrijavaju paru. Dimni plinovi nakon plinske turbine prvo prolaze kroz dva pregrijača pare modelirana blokovima „Eco/Evaporator/Superheater (with exponents)“. Između dva pregrijača pare se nalazi miješajući ventil koji u struju pare ubacuje vodu u slučaju da pregrišana para pređe zadanu temperaturu, modelirano blokovima „Water injection“ i „Controller with internal target value“. Ovim načinom se osigurava da para ne

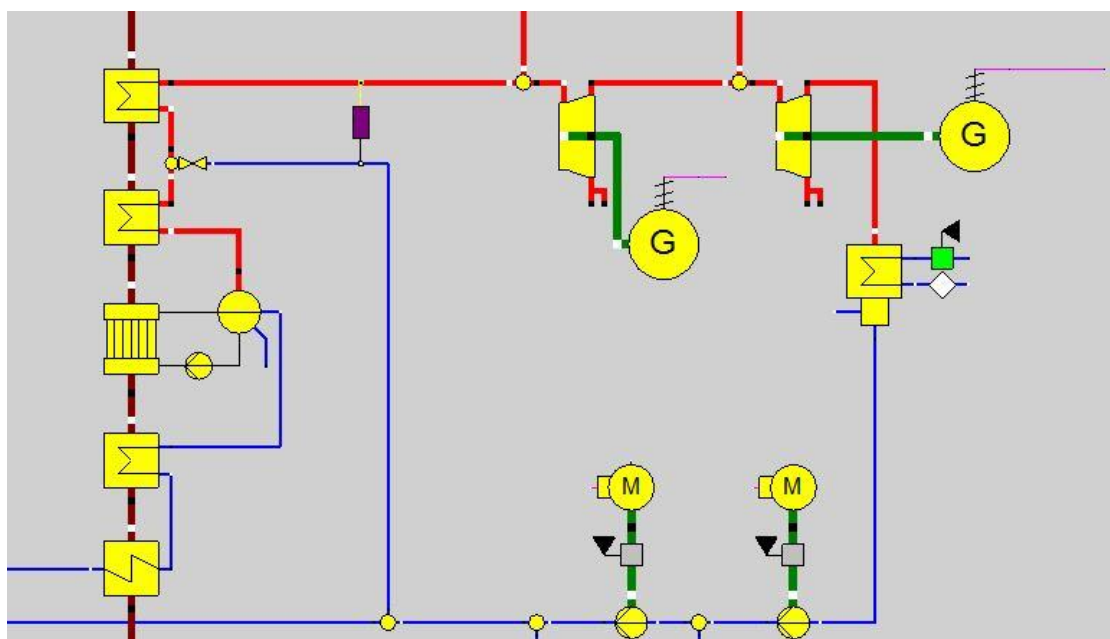
prijeđe temperaturu koja bi mogla oštetiti cijevi i lopatice parne turbine zbog prevelikih toplinskih opterećenja. Nakon pregrijača pare, dimni plinovi prolaze kroz isparivač, modeliran blokom „Evaporator with steam drum“. Isparivač je zamišljen kao parni kotao s bubnjem u koji ulazi zagrijana voda, isparava te kruži prirodnom cirkulacijom na osnovi razlike u gustoći (para je manje gustoće pa se prirodnim načinom kreće). Para se vraća u bubanj gdje se dvije različite faze odvajaju te para nastavlja svoj put prema pregrijačima pare. Zadnji izmjenjivač u HRSG-u je ekonomajzer koji predgrijava vodu prije ulaska u isparivač. Ekonomajzer je odvojen u dva izmjenjivača radi lakšeg praćenja i kontrole procesa, blokovima „Eco/Evaporator/Superheater (with exponents)“.

Pregrijana para se prije ulaska u prvu parnu turbinu miješa s parom koja je proizvedena visokotemperaturnim hlađenjem sintetskog plina, blok „Simple mixer“,. Nakon miješanja, para ekspandira u turbini, modelirano blokom „Steam turbine/general expander“, do tlaka pare koja je proizvedena hlađenjem sintetskog plina. Ekspandirana para se miješa zajedno s niskotlačnom parom te ekspandira u drugoj turbini. Nakon druge ekspanzije, para se nalazi u zasićenom području ($0 < x < 1$). Kako ne bi došlo do erozije lopatica zbog kondenzacije vodene pare (kapljice vode erodiraju lopatice turbine), stupanj zasićenosti (x) ne smije biti manji od 0,85. Zasićena para prolazi kroz kondenzator, modeliran blokom „Steam turbine condenser“. Kondenzator je hlađen vodom. Vrela kapljevina ($x=0$) prolazi kroz prvu pumpu, diže joj se tlak do tlaka niskotlačne pare te se dio odvaja, modelirano blokom „Simple splitter“ i ide prema hladnjaku sintetskog plina. Preostali dio vrele kapljevine prolazi kroz drugu pumpu gdje joj se tlak diže na radni tlak pare u HRSG-u. Dio visokotlačne vrele kapljevine se odvaja za generiranje pare u visokotemperaturnim izmjenjivačima topline. Shematski prikaz parnog ciklusa prikazan je na Slika 30. Crvenom linijom je označen visok tlak u sustavu, a zelenom linijom niski tlak u sustavu.



Slika 30. Shema parnog ciklusa

Slika 31. prikazuje HRSG i parno – turbinski ciklus iz programskog paketa Epsilon Professional.



Slika 31. Prikaz HRSG-a i parno – turbinskog ciklusa

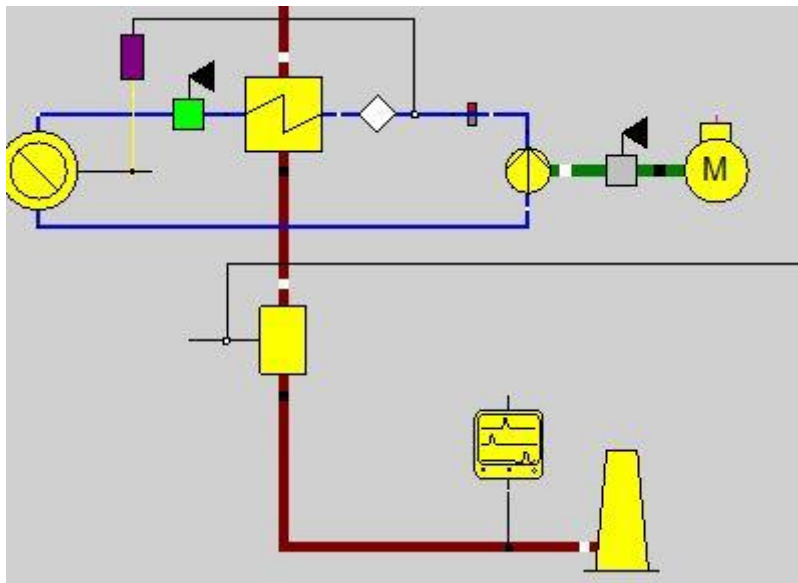
3.1.6. *Dodatno iskorištenje osjetne topline dimnih plinova*

Na izlazu iz HRSG-a temperatura dimnih plinova je $\sim 200^{\circ}\text{C}$. S obzirom na velik protok dimnih plinova, osjetna toplina se može dodatno iskoristiti. Pretpostavljeno je da se toplina dimnih plinova prvo iskoristi za zagrijavanje sistemske vode koja može služiti za daljinsko grijanje/PTV u toplinskim stanicama. Dimni plinovi prolaze kroz izmjenjivač topline, blok „Universal heat exchanger“, gdje zagrijavaju sistemsku vodu. Sistemska voda se zagrijava na zadanu temperaturu te predaje zadanu količinu topline potrošaču, blok „Heat Consumer“. Nakon potrošača, voda se vraća nazad u izmjenjivač te se ponovno zagrijava. Proces je vođen tako da se za zadanu snagu potrošača mijenja maseni tok vode kroz izmjenjivač.

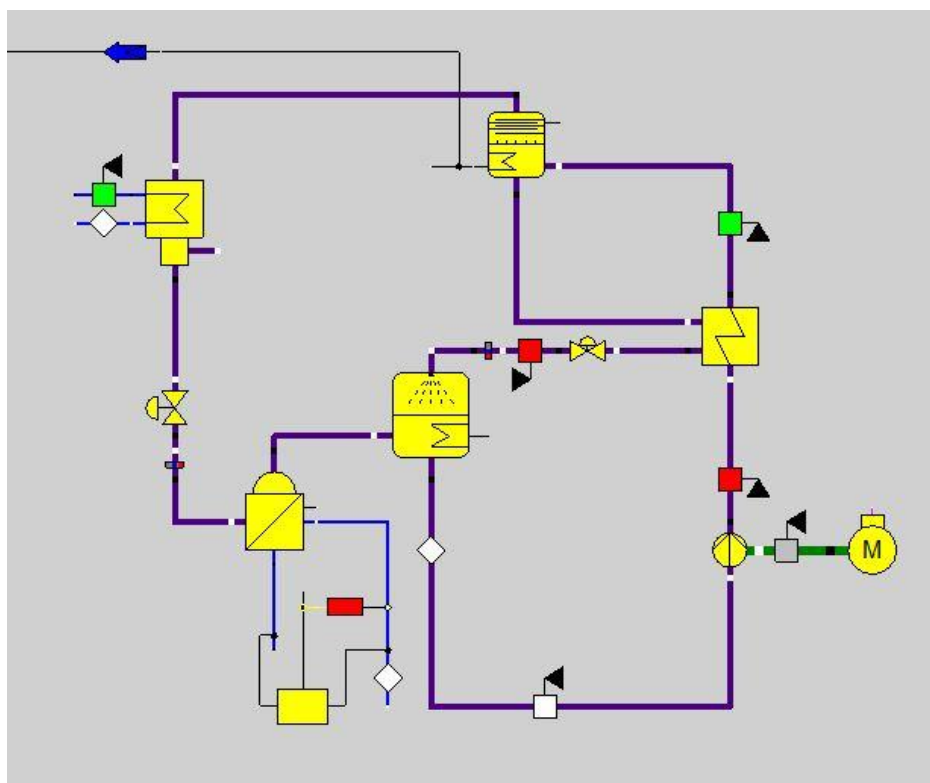
Nakon zagrijavanja sistemske vode, toplinu dimnih plinova je moguće iskoristiti za generiranje rashladne energije u apsorpcijskom ciklusu. Potrebna toplina u generatoru apsorpcijskog ciklusa, blok „Coupled rectifier column“, se dovodi pomoću bloka „Heat extraction“. Nakon odvajanja pare iz mješavine LiBr – H₂O u generatoru, para prolazi kroz kondenzator, blok „Steam turbine condenser“ i ekspanzijski ventil, blok „Control valve“. Rashladni tok se generira u isparivaču, blok „Evaporator for binary mixtures“, gdje se hladena voda hladi, a kondenzat vodene pare isparava. Vodena para se miješa zajedno sa visokozasićenom otopinom u apsorberu, blok „Absorber“. Niskozasićenoj otopini se diže tlak pomoću pumpe te se predgrijava prije ponovnog ulaska u generator.

Nakon apsorpcijskog ciklusa, dimnim plinovima se pomoću bloka „Emission display“ provjerava temperatura kondenzacije H₂SO₄ kako oni ne bi ušli u temperaturno područje kondenzacije zbog korozivnog djelovanja.

Treba naglasiti da se sustavom za zagrijavanje sistemske vode i apsorpcijskim ciklusom htjelo pokazati da se toplina dimnih plinovi može dodatno oporabiti. Dodatna uporaba ne smanjuje direktno emisije CO₂ (kgCO₂/kWh), ali generira nove oblike energije čiji su tokovi dostatni za grijanje i hlađenje određene površine. Tako se ne stvaraju nove emisije CO₂. S obzirom da je navedena uporaba topline dimnih plinova nije tema diplomskog rada, kogeneracija i apsorpcijski ciklus nisu detaljno modelirani i optimirani. Prikaz grijanja sistemske vode i apsorpcijskog ciklusa iz programskog paketa Epsilon Professional vidljivi su na Slika 32. i Slika 33.



Slika 32. Prikaz dodatne uporabe dimnih plinova



Slika 33. Prikaz apsorpcijskog ciklusa

3.2. Pretpostavke modela

Radi lakšeg modeliranja i konzistentnosti, uvedena su određena pojednostavljena i pretpostavke:

- kroz cijevi i komponente zanemaren je pad tlaka (osim u slučajevima gdje ih je model tražio – tada je on minimalan),
- zanemareni su toplinski gubici,
- nije modelirano drobljenje ugljena u ugljenu prašinu,
- zbog nemogućnosti modeliranja Selexol procesa, pretpostavljeno je odvajanje 97,5% H₂S,
- nije modeliran sustav za separaciju zraka, eng. Air separation unit - ASU (kisik za rasplinjavanje),
- nije modeliran sustav za odvođenje topline nastale u apsorberu (rashladni tornjevi),
- zbog nepoznavanja potrošnje električne energije određenih komponenti, ona je zanemarena (rasplinjač, Selexol proces),
- izmjenjivači topline su protusmjerni.

Svi izmjenjivači topline su modelirani tako da im je površina zadana, a izlazne temperature su posljedica proračuna.

Dobiveni rezultati modela su posljedica uvedenih pretpostavki i pojednostavljenja. Točnost rezultata ovisi o točnosti pretpostavki i pojednostavljenja.

3.3. Ulazne vrijednosti modela

U Tablica 6. dan je pregled radnih parametara baznog modela IGCC postrojenja.

Tablica 6. Pregled ulaznih vrijednosti u model

Parametar	-
Vrsta ugljena	Tuzlanski lignit
Vrsta rasplinjača	GE Power
Vrsta oksidansa	Kisik

Nastavak tablice 6.

Voda/ugljen	0,475
Tlak rasplinjavanja	35 bar
Temperatura rasplinjavanja	1520 °C
Pretvorba ugljika	99%
Tlak uklanjanja kiselih plinova	21,5 bar
Tlak u komori izgaranja	15 bar
Faktor pretička zraka	2,75
Snaga na generatoru plinske turbine	250 MW
Visoki tlak pare	120 bar
Niski tlak pare	12 bar
Izotropska učinkovitost kompresora	0,86
Izotropska učinkovitost plinske turbine	0,9
Izotropska učinkovitost parne turbine	0,88
Temperatura kondenzacije pare	41,51 °C
Tlak kondenzacije pare	0,08
Maksimalna temperatura pregrijane pare	540 °C
Toplinski tok vode za grijanje/PTV	16,5 MW _t
Temperatura kondenzacije apsorpcijskog ciklusa	45 °C
Temperatura isparavanja apsorpcijskog ciklusa	5 °C
Rashladni učin apsorpcijskog ciklusa	2 MW _t

4. REZULTATI I ANALIZA

Rezultati baznog modela (100% opterećenja) IGCC postrojenja prikazani su u Tablica 7.

Tablica 7. Rezultati baznog modela IGCC postrojenja

Veličina	Oznaka	-
Maseni protok ugljena	\dot{m}_U	45,27 kg/s
Maseni protok ugljenog mulja	\dot{m}_G	64,68 kg/s
Maseni protok nastalog sintetskog plina	\dot{m}_{Sys}	88,34 kg/s
CGE	CGE	79,6%
Snaga na generatoru plinske turbine	P_{GT}	250 MW _e
Snaga na generatoru parne turbine	P_{ST}	145,94 MW _e
Ukupna snaga na generatorima	P_{uk}	395,94 MW
Snaga kompresora plinske turbine	P_k	113,89 MW
Snaga svih kompresora	$P_{k, u}$	125,71 MW
Snaga svih pumpi	$P_{p, u}$	2,06 MW
Toplinski tok vode za grijanje/PTV	\dot{Q}_G	16,5 MW
Rashladni učin apsorpcijskog ciklusa	\dot{Q}_H	2 MW
COP apsorpcijskog ciklusa	COP	0,683
Neto električna učinkovitost	$\eta_{net, el}$	40,90 %
Neto učinkovitost postrojenja	$\eta_{net, uk}$	43,73 %
Izlazna temperatura dimnih plinova	T_{dp}	149,52 °C

Sastav proizvedenog sintetskog plina je dan u Tablica 8. (suha osnova).

Tablica 8. Sastav sintetskog plina nakon rasplinjavanja

Element	% [mol]
N ₂	1,3
CO ₂	17,5
CO	41,7
H ₂	38,2
H ₂ S	0,7
CH ₄	0,6
Donja ogrjevna vrijednost [kJ/kg]	6923,57
Volumni protok [Nm ³ /s]	85,14
Volumni protok – suhi sintetski plin [Nm ³ /s]	53,53

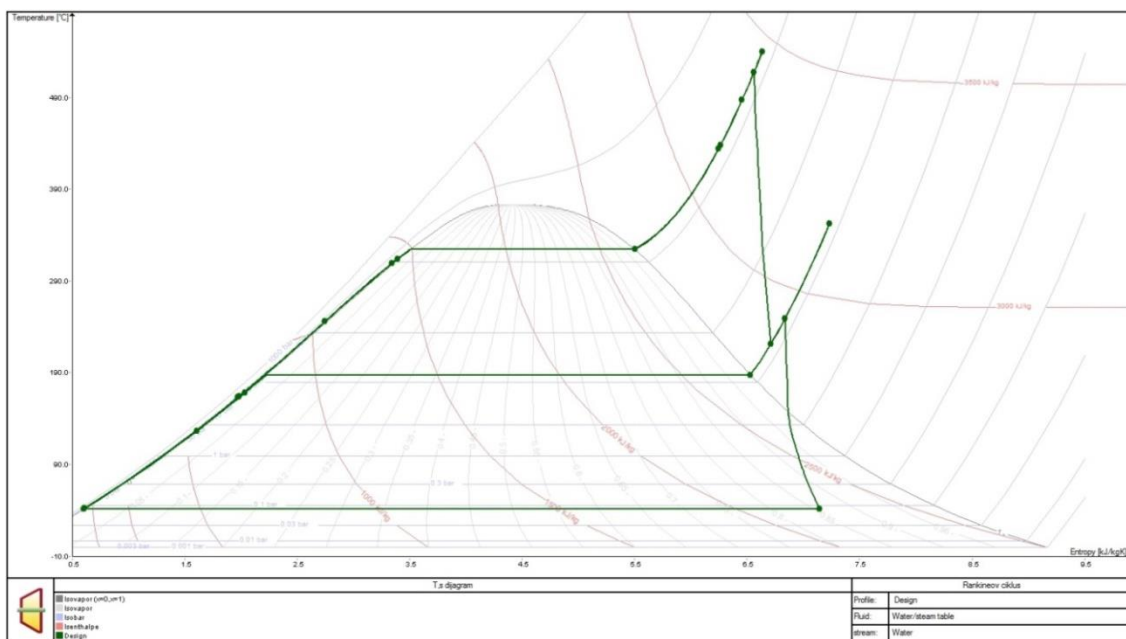
Postrojenje pri 100% opterećenju ostvaruje neto električnu učinkovitost $\eta_{net, el}$ 40,90%, dok je ukupna neto učinkovitost postrojenja $\eta_{net, uk}$ 43,74%. Način izračuna učinkovitosti je prikazan sljedećim jednadžbama:

$$\eta_{net,el} = \frac{\sum P_{generator} - \sum P_{potrošač}}{\dot{m}_U * H_d} \quad (15)$$

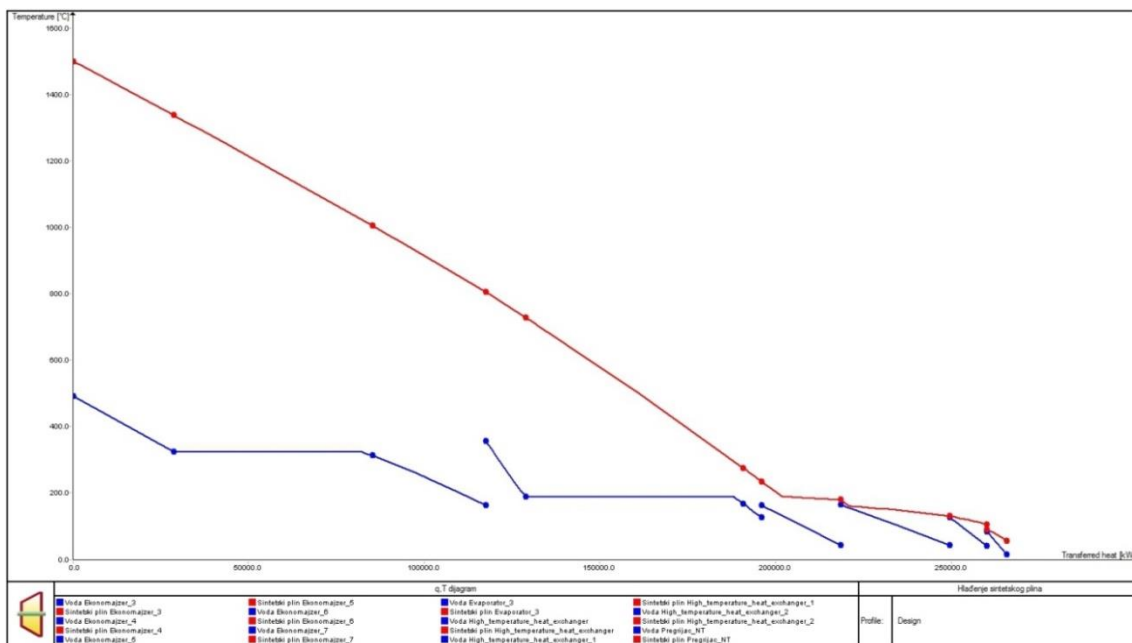
$$\eta_{net,uk} = \frac{(\sum P_{generator} - \sum P_{potrošač}) + \dot{Q}_G + \dot{Q}_H}{\dot{m}_U * H_d} \quad (16)$$

U jednadžbama (15) i (16). $\sum P_{generator}$ označava sumu električnih snaga generiranih na generatoru parne i plinske turbine, $\sum P_{potrošač}$ označava sumu snaga svih komponenti koje troše energiju u postrojenju (kompresori, pumpe...), H_d donju ogrjevnu vrijednost ugljena, a \dot{m}_u maseni protok ugljena. U jednadžbi (16). \dot{Q}_G označava toplinski tok vode za grijanje/PTV, a \dot{Q}_H rashladni učin apsorpcijskog ciklusa. Na generatoru plinske turbine se generira 250 MW električne energije, dok se na generatoru parnih turbina generira 145,94 MW električne

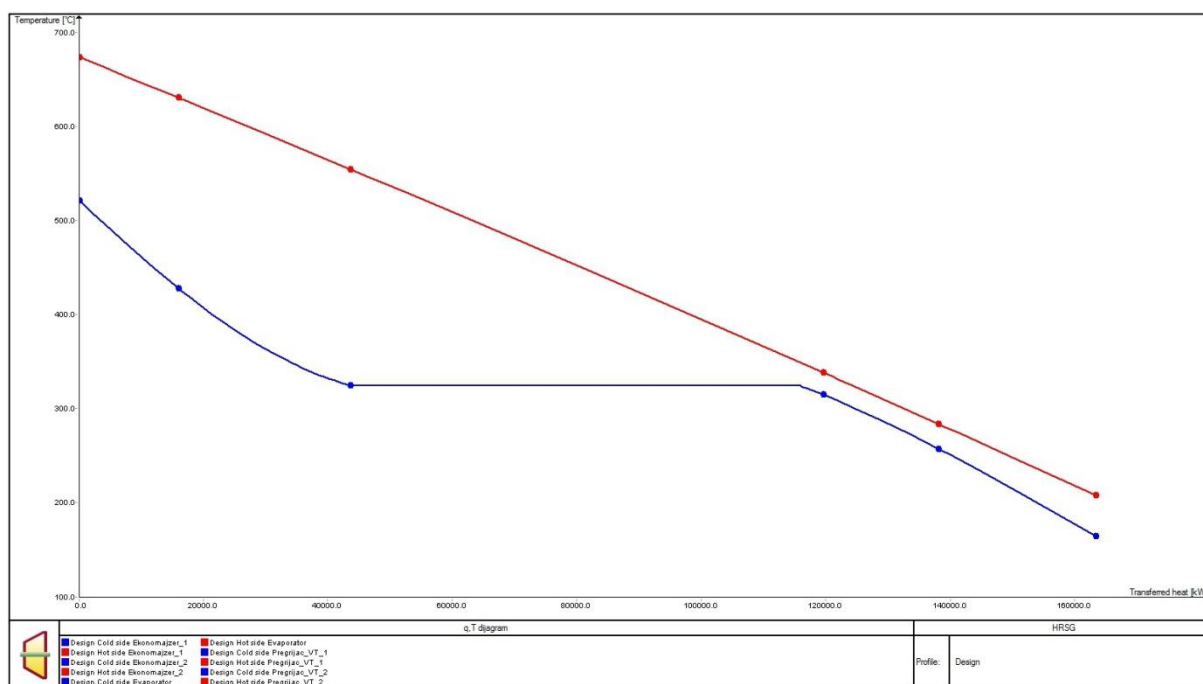
energije, sveukupno 395,94 MW. Kompresoru plinske turbine je za rad potrebno 113,89 MW, što je 45,55% snage plinske turbine. CGE rasplinjača iznosi 79,6%. Smanjivanjem temperature rasplinjavanja, CGE bi bio veći. T,s dijagram Rankine-ovog ciklusa prikazan je na Slika 34., q,T dijagram hlađenja sintetskog plina na Slika 35., a q,T dijagram HRSG-a na Slika 36.



Slika 34. T,s dijagram Rankine-ovog ciklusa



Slika 35. q,T dijagram hlađenja sintetskog plina



Slika 36. q,T dijagram HRSG-a

Iz dijagrama na Slika 34. je vidljivo da je temperatura niskotlačne pregrijane pare ($356,46\text{ }^{\circ}\text{C}$) viša od temperature pare nakon prve parne turbine ($214,28\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zbog visoke temperature niskotlačne pare, temperatura nastale mješavine je viša, što utječe na veću učinkovitost ciklusa. Druga ekspanzija u parnoj turbini zasićuje paru te je ona na kraju ekspanzije u stanju zasićenosti $x=0,853$. Stanje zasićenosti je bitan kontrolni parametar jer utječe na koroziju lopatica parne turbine (nastale kapljice uništavaju lopatice turbine).

Q,T dijagram prikazuje izmijenjenu toplinu i pripadajuće temperature pri toj izmjeni u izmjenjivaču topline ili u nizu izmjenjivača topline. Iz njega se može vidjeti koliko je izmjena topline učinkovita promatrajući „pinch“ točku. „Pinch“ točka je točka najbližeg pristupa između tople i hladne struje u izmjenjivaču topline, koja ovisi o uvjetima strujanja, izmjeni topline i površini izmjenjivača. Iskazuje se u razlici temperature. Što je „pinch“ točka manja, to je izmjena topline učinkovitija. Slika 35. prikazuje q,T dijagram hlađenja sintetskog plina, topli medij (crveno), i zagrijavanja vode, isparavanja i pregrijavanja pare, hladni medij (plavo), kroz jedanaest izmjenjivača topline. Prvih šest izmjenjivača služi za proizvodnju visokotlačne i niskotlačne pare. U isparivaču niskotlačne pare „pinch“ točka iznosi $87,58\text{ }^{\circ}\text{C}$. Velik iznos ove „pinch“ točke ukazuje da proces isparavanja nije učinkovit te se može poboljšati. Tijekom izmjene topline u prvom ekonomajzeru visokotlačne pare vidljiv je nagli

lom krivulje tople struje. Razlog tomu je kondenzacija neizreagirane vodene pare u rasplinjaču i njena latentna toplina (1752,97 kJ/kg za tlak 35 bar). Prilikom svake sljedeće izmjene topline, vodena para kondenzira pa je promjena temperature sintetskog plina po izmijenjenom kW manja nego u prvom dijelu hlađenja. Kroz cijeli postupak hlađenjem sintetskog plina izmijenjeno je više od 265 MW topline.

Q,T dijagram sa Slika 36. prikazuje izmjenu topline u HRSG-u – dimni plinovi su topli medij (crveno), a voda/vodena para hladni medij (plavo), kroz pet izmjenjivača topline. U isparivaču visokotlačne pare „pinch“ točka iznosi 13,55 °C što upućuje na puno bolje vođenje izmjene topline nego u isparivaču niskotlačne pare pri hlađenju sintetskih plinova.

U slučaju da ovako modelirano postrojenje godišnje radi 8000 sati pod 100%-tnim opterećenjem, generiralo bi se 3167,55 GWh električne energije (jednadžba (17)) što je označeno s E_{el} . Maseni udio dimnih plinova je $x_{CO_2}=0,145$, što rezultira $\dot{m}_{CO_2}=46,4$ kg/s. U godinu dana ukupna emisija CO₂ je 1328,7 kT (jednadžba (18)) što je označeno s m_{CO_2} . Emisija CO₂ iznosi 0,419 kgCO₂/kWh (jednadžba (19)) što je označeno s E_{CO_2} .

$$E_{el} = \frac{P_{uk}[MW] * 8000}{1000} [GWh] \quad (17)$$

$$m_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}[\frac{kg}{s}] * 3600 * 8000}{1000 * 1000} [kT/god] \quad (18)$$

$$E_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{E_{el}} [\frac{kgCO_2}{kWh}] \quad (19)$$

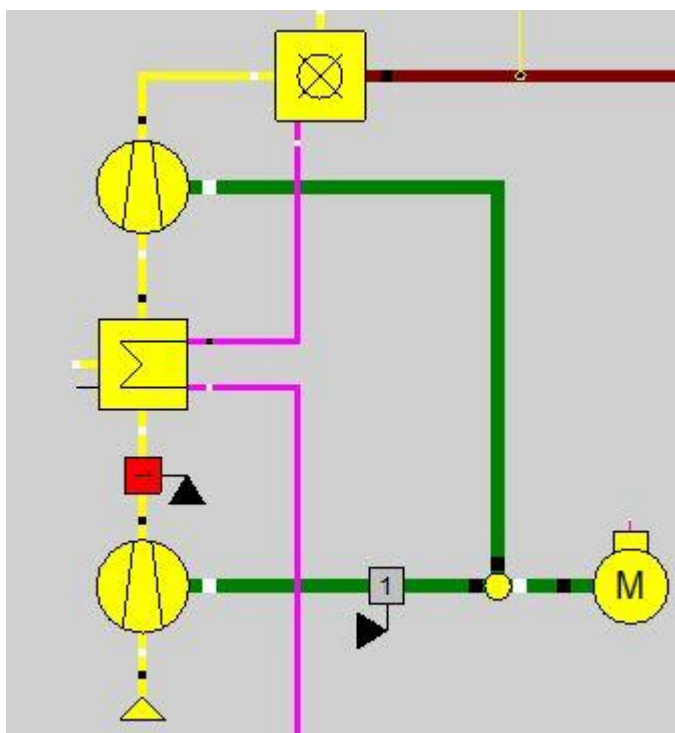
Emisije CO₂ su manje po jedinici generirane električne energije jer je električna učinkovitost veća nego kod konvencionalnih elektrana s kombiniranim ciklusom (~35%).

Izlazna temperatura dimnih plinova iznosi 149,52 °C. Povećanjem toplinskog toka vode za grijanje ili rashladnog učina apsorpcijskog ciklusa ona se može dodatno sniziti prema temperaturi kondenzacije H₂SO₄ (116,61 °C), ali u slučaju promjene opterećenja izlazna temperatura dimnih plinova se smanjuje pa se ovim načinom osigurava dovoljna temperaturna razlika kako ne bi došlo do kondenzacije.

4.1. Optimizacija

Kako bi se stupanj učinkovitosti postrojenja povećao, bazni model se je optimiran. Optimizacija cijelog postrojenja se može napraviti na mnogo načina, a u ovom radu se razmatrala optimizacija kompresije zraka za izgaranje (prelazak na 2-stupanjsku kompresiju s međuhlađenjem i traženje optimalnog međutlaka) i optimizacija tlaka niskotlačne pare parno – turbinskog ciklusa.

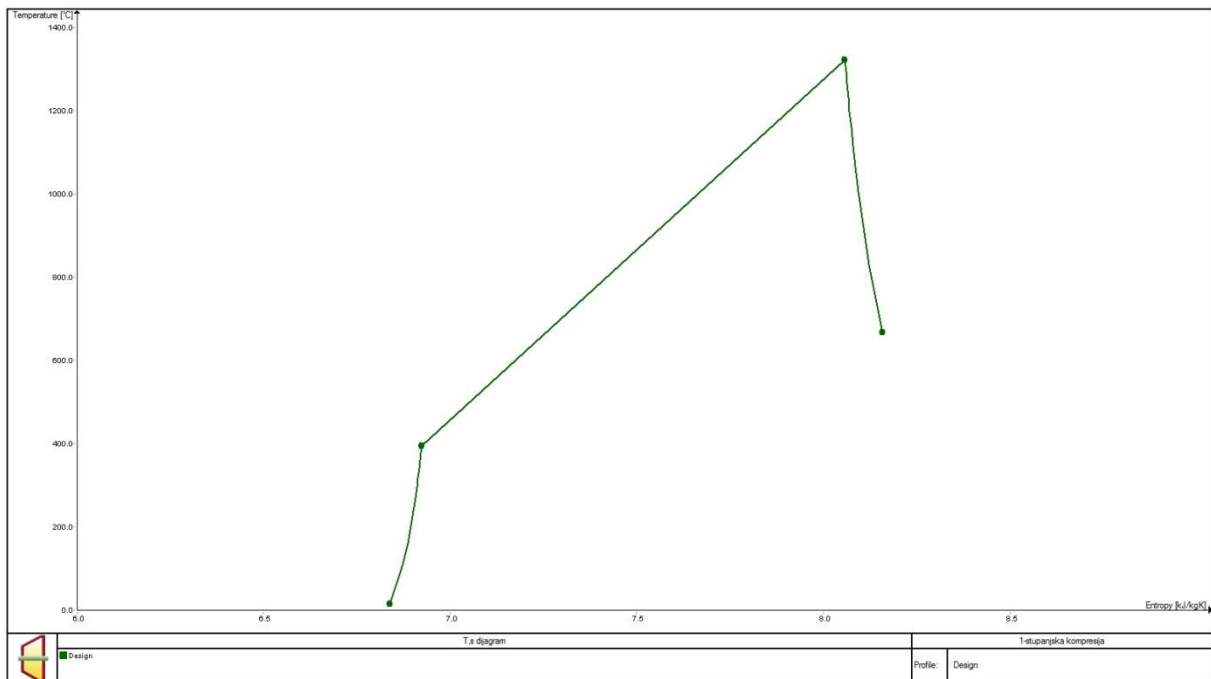
Cilj 2-stupanjske kompresije s međuhlađenjem je smanjiti potrebnu snagu kompresora. Najbitnija komponenta ovakvog sustava je međuhladnjak koji snižava temperaturu zraka nakon prvog stupnja kompresije. Niža temperatura ulaza zraka u drugi stupanj kompresije rezultira smanjenjem potrebne energije za kompresiju na zadani tlak. Model 2-stupanjske kompresije u Epsilonu je prikazan na Slika 37.



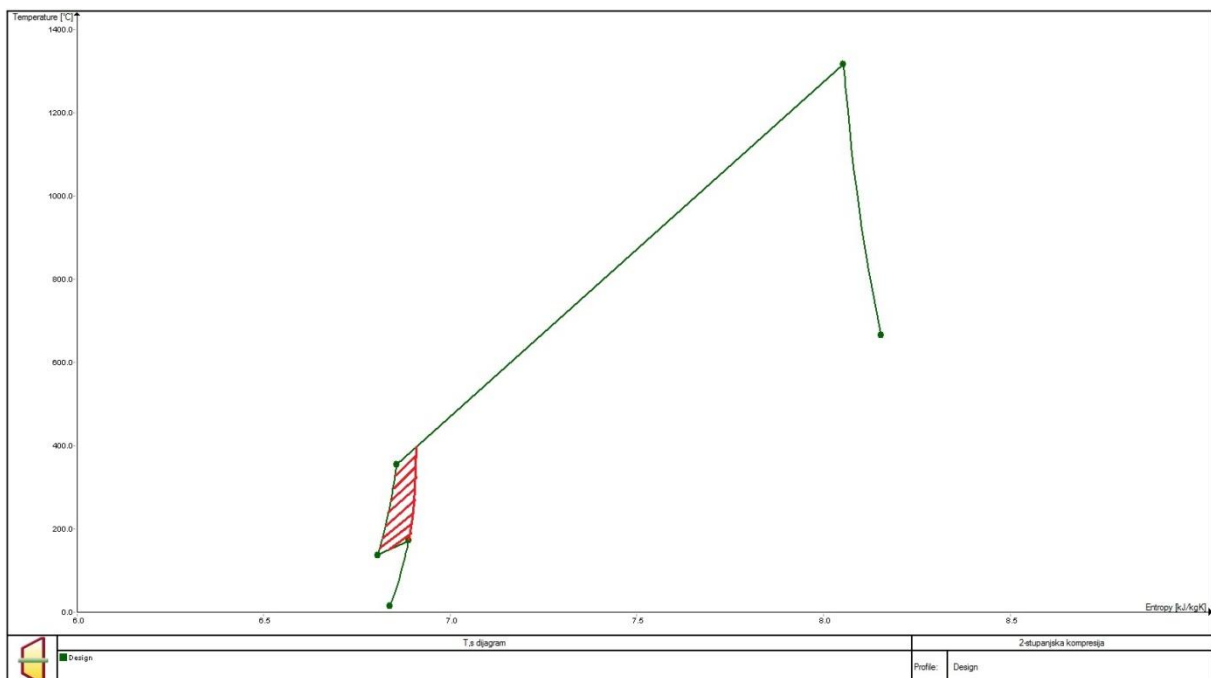
Slika 37. Model 2-stupanjske kompresije

Krajnji tlak nakon kompresije je ostao isti kao i u baznome modelu (15 bar). Optimalni međutlak nakon prve kompresije je izračunat pomoću alata „Optimization“ unutar programskog paketa u Epsilon Professionalu. Optimalni međutlak je nađen tako da je snaga za pokretanje i rad kompresora najmanja. Zrak se između dva stupnja hladi u hladnjaku,

fiksne površine, pomoću sintetskog plina kojem temperatura raste. Na Slika 38. i Slika 39. je prikazan T,s dijagram Brayton-ovog ciklusa s 1-stupanjskom i 2-stupanjskom kompresijom.



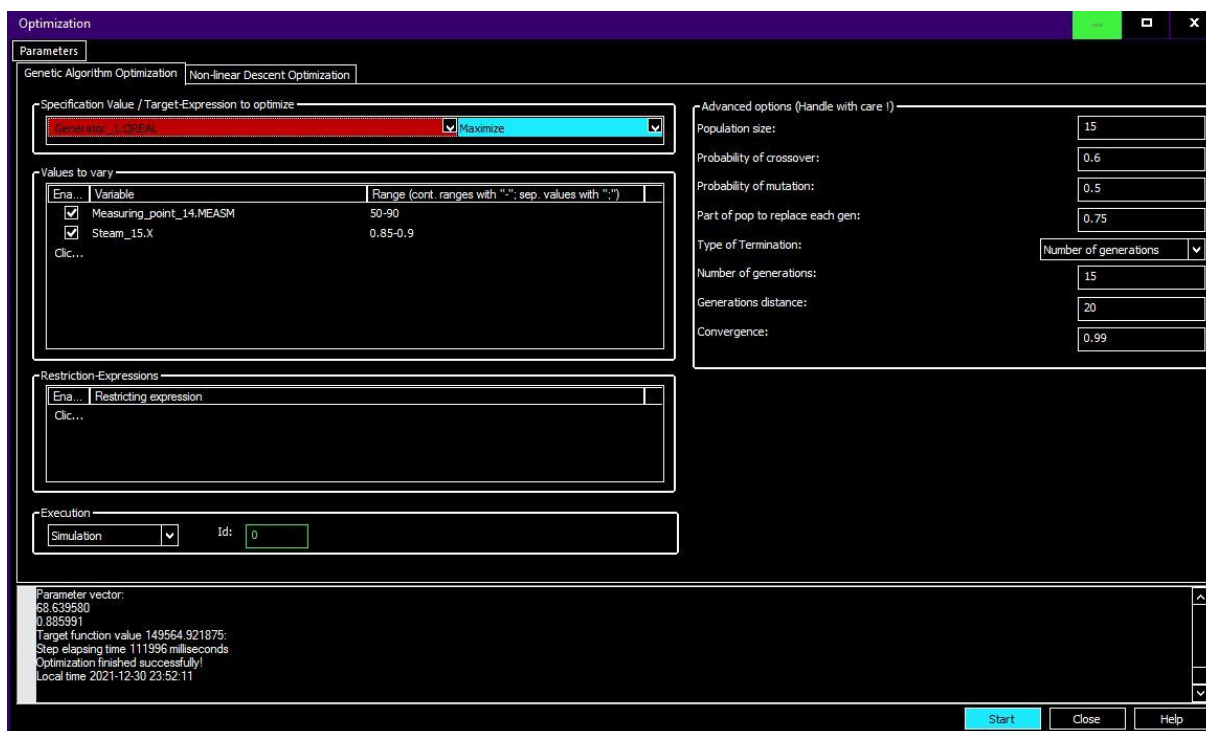
Slika 38. Brayton-ov ciklus s 1-stupanjskom kompresijom



Slika 39. Brayton-ov ciklus s 2-stupanjskom kompresijom

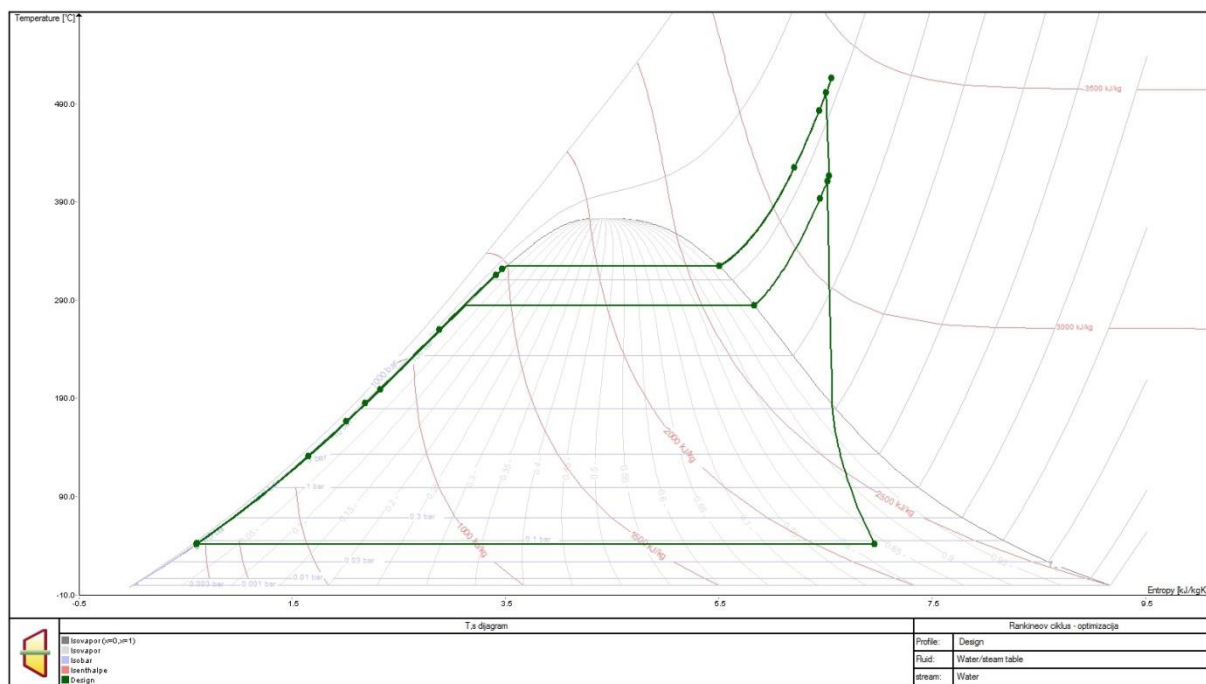
Uspoređujući oba T,s dijagrama, vidljivo je da pri 2-stupanjskoj kompresiji dolazi do smanjenja rada kompresora, koja je osjenčana crvenom bojom na Slika 39. Optimizacijom je izračunato da je pri tlaku od 3,87 bar snaga za pokretanje kompresora najmanja. Snaga kompresora 1-stupanjske kompresije iznosi 113,89 MW, a 2-stupanjske kompresije 112,32 MW što je smanjenje snage za 1,38%. Prilikom 1-stupanjske kompresije neto električna učinkovitost je $\eta_{\text{net, el}}=40,90\%$, a prilikom 2-stupanjske kompresije $\eta_{\text{net, el}}=40,99\%$ što je povećanje od 0,09%. Razlog relativno malog smanjenja snage kompresora leži u tome što se zrak nedovoljno hladi prilikom međuhlađenja. Da se zrak uspije ohladiti na početnu temperaturu ulaska u prvi stupanj (15 °C) smanjenje snage bi bilo puno veće te bi neto električna učinkovitost porasla.

Druga optimizacija koja je provedena je izračunavanje optimalnog tlaka niskotlačne pare. Iz Slika 34. je vidljivo da su temperature pare nakon prve ekspanzije (214,28 °C) i niskotlačne pare (356,46 °C) veoma različite. Velika razlika tih temperatura dovodi do neoptimalne temperature pare nakon miješanja, a prije druge ekspanzije. Optimizacijom tlaka niskotlačne pare, temperature para prije miješanja će biti relativno slične te će se proces druge ekspanzije bolje voditi. Primjer optimizacije tlaka niskotlačne pare je prikazan na Slika 40. Tlak je optimiran tako da se na generatoru električne energije parnih turbina generira što više električne energije, a da pritom ekspandirana para ne prijeđe zadanu granicu zasićenosti ($x>0,85$) kako ne bi došlo do oštećenja lopatica parne turbine.



Slika 40. Optimizator u programskom paketu Epsilon Professional

Optimizacijom se izračunao optimalni tlak niskotlačne pare od 68,64 bar. Pri tom tlaku na generatoru električne energije parno – turbinskog ciklusa se generira 149,56 MW_e. U usporedbi baznog modela kada tlak niskotlačne pare nije optimiran (12 bar) se generira 145,94 MW_e što je povećanje od 2,42%. Na Slika 41. je prikazan T,s dijagram parno – turbinskog ciklusa s optimalnim tlakom niskotlačne pare.



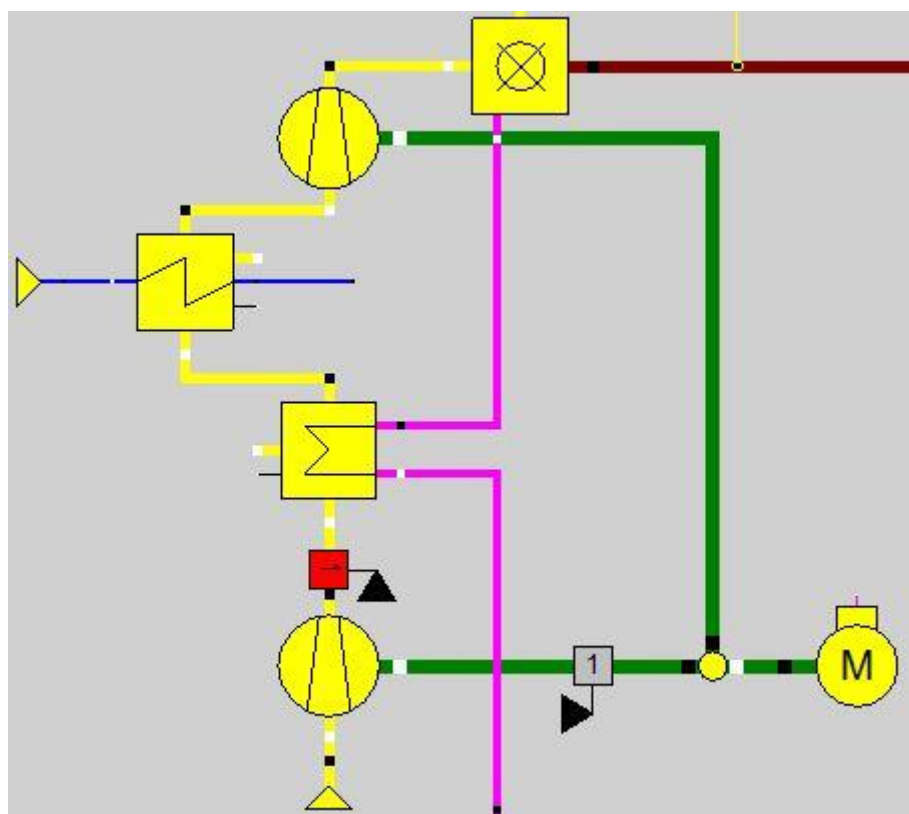
Slika 41. T,s dijagram parno – turbinskog ciklusa s optimalnim tlakom niskotlačne pare

Iz dijagrama na Slika 41. je vidljivo da su temperature pare nakon prve ekspanzije (416,61 °C) i niskotlačne pare (393,54 °C) bliže pa je temperatura mješavine tih dviju para prije druge ekspanzije 411,81 °C. Stupanj zasićenja nakon druge ekspanzije je $x=0,886$.

Implementirajući 2-stupanjsku kompresiju s međuhlađenjem i optimalni tlak niskotlačne pare ukupna generirana električna energija je porasla s 395,94 MWe na 399,56 MWe, a snaga potrošača električne energije se smanjila s 127,77 MWe na 126,40 MWe. Ukupna neto električna učinkovitost je porasla s $\eta_{net, el}=40,90\%$ na $\eta_{net, el}=41,76\%$ što je povećanje od 0,86%. U slučaju da postrojenje godišnje radi 8000 sati pod 100%-tnim opterećenjem, generiralo bi se 3196,52 GWh električne energije što je povećanje od 0,91%. Pritom se u okoliš ispusti 1334,4 kT CO₂ što je povećanje od 0,43%, ali ukupna emisija CO₂ po kWh generirane električne energije iznosi 0,417 kgCO₂/kWh što je smanjenje od 0,48%.

4.1.1. Implementacija dodatnog izmjenjivača topline za međuhlađenje komprimiranog zraka

Kako bi se komprimirani zrak dodatno ohladio, nakon hlađenja sintetskim plinom, a prije drugog stupnja kompresije, dodan je još jedan izmjenjivač topline koji hladi zrak vodom. Cilj dodatnog hlađenja je smanjiti još više potrebnu snagu za rad kompresora. Kao medij koji hladi zrak nakon prvog stupnja je voda u protusmjernom izmjenjivaču topline. Prikaz s dodatnim izmjenjivačem topline za hlađenje komprimiranog zraka je na Slika 42.



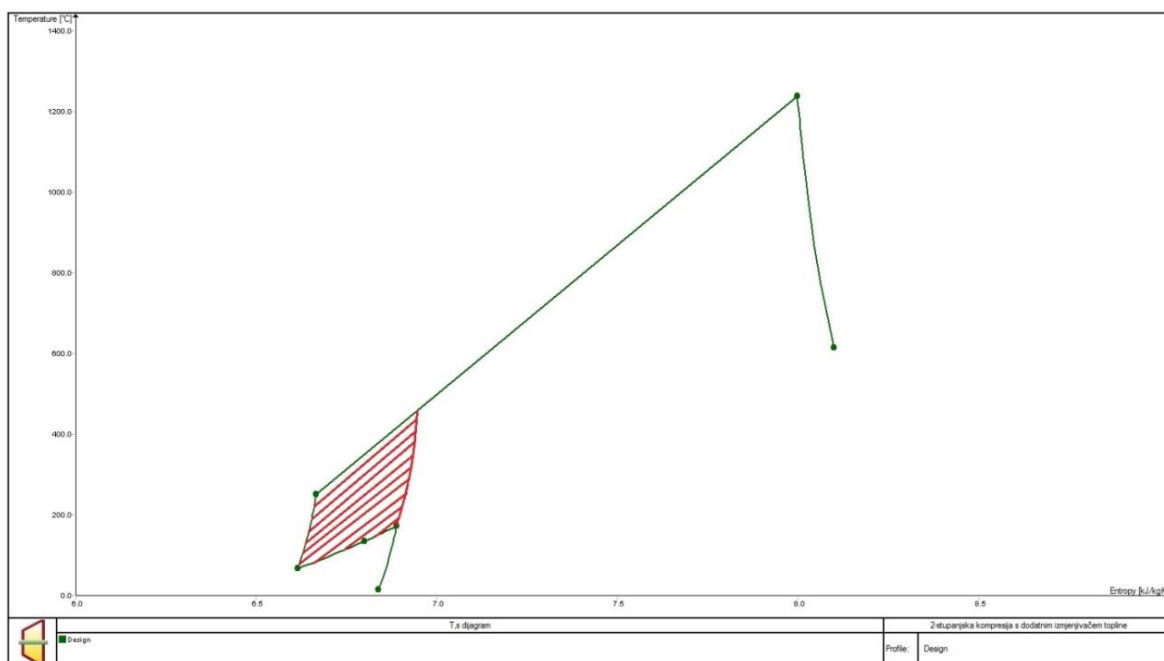
Slika 42. Model 2-stupanjske kompresije s dodatnim izmjenjivačem topline

U Tablica 9. su uspoređeni rezultati 2-stupanjske kompresije s jednim međuhladnjakom i s dva međuhladnjaka.

Tablica 9. Usporedba rezultata 2-stupanjske kompresije s jednim međuhladnjakom i dva međuhladnjaka

Parametar	Međuhlađenje s jednim izmjenjivačem topline	Međuhlađenje s dva izmjenjivača topline
Snaga kompresora [MW]	112,32	106,27
Temperatura zraka nakon prvog stupnja [°C]	172,06	172,06
Temperatura zraka nakon međuhlađenja [°C]	137,27	66,69
Temperatura sintetskog plina na ulazu u komoru izgaranja [°C]	158,17	151,08
Temperatura dimnih plinova na izlazu iz komore izgaranja [°C]	1316,56	1238,55
Maseni protok sintetskog plina [kg/s]	38,12	40,59
Maseni protok zraka [kg/s]	274,19	288,17
Neto električna učinkovitost [%]	41,76	40,32

Na Sliku 43. je prikazan T,s dijagram Brayton-ovog ciklusa 2-stupanjske kompresije s dodatnim izmjenjivačem topline za međuhlađenje.



Slika 43. Brayton-ov ciklus 2-stupanjske kompresije s dodatnim izmjenjivačem topline

Na Sliku 43. crvenom bojom je osjenčana razlika u potrebnom radu kompresora između 2-stupanjske kompresije s dodatnim izmjenjivačem topline i 1-stupanjske kompresije. Implementacijom 2-stupanjske kompresije s dodatnim izmjenjivačem potrebna snaga za rad kompresora iznosi 106,27 MW što je smanjenje za 7,62 MW u usporedbi s 1-stupanjskom kompresijom. To je smanjenje za 6,69%. Kada se uspoređuju 2-stupanjska kompresija s jednim međuhladnjakom i dva međuhladnjaka, potrebna snaga za rad kompresora se smanjila s 112,32 MW na 106,27 MW, što je smanjenje za 6,05 MW ili 5,39%. Iako se potrebna snaga za rad kompresora smanjila kada se uspoređuje kompresija s jednim i dva međuhladnjaka, neto električna učinkovitost se nije povećala, nego se smanjila za 1,44%. Razlog tomu je što je temperatura dimnih plinova nakon izgaranja manja za 78,01 °C. Zbog smanjenja temperature dimnih plinova na ulazu u plinsku turbinu, a kako bi se zadržala zadana snaga na generatoru električne energije plinske turbine, maseni tok sintetskog plina koji ulazi u komoru izgaranja se povećao s 38,12 kg/s na 40,59 kg/s, što je povećanje za 6,48%. Kako bi se održao faktor pretička zraka ($\lambda=2,75$), morao se povećati i maseni protok zraka s 274,19 kg/s na 288,17 kg/s. Smanjenje temperature dimnih plinova na izlazu iz komore izgaranja i posljedično povećanje masenog toka sintetskog plina, a i samog ugljena na ulazu u postrojenje, imaju puno veći utjecaj na učinkovitost postrojenja od smanjenja snage potrebne za rad kompresora.

4.2. Promjena opterećenja

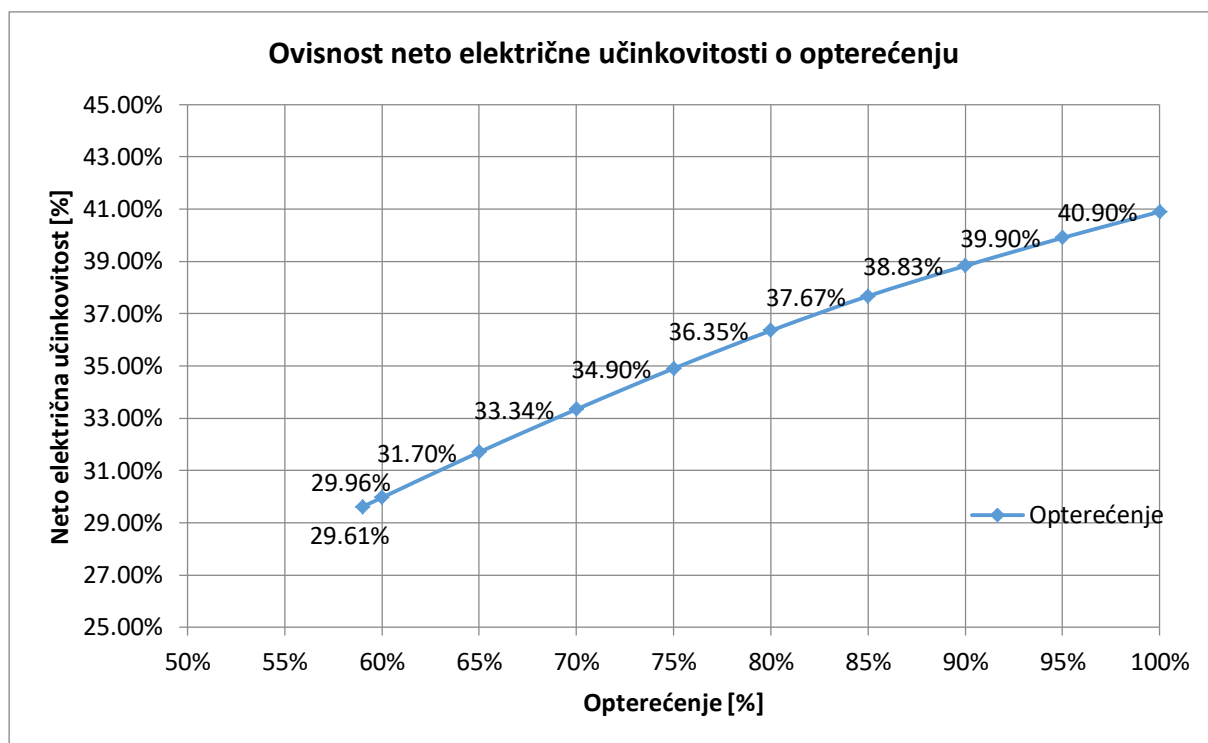
Bitno je vidjeti što se događa s učinkovitošću postrojenja pri promjeni opterećenja. Mijenjajući opterećenje od 100% (bazni model), doći će i do promjene učinkovitost postrojenja. Opterećenje je mijenjano tako da se mijenja opterećenje na plinskoj turbini. Smanjujući opterećenje na plinskoj turbini, smanjuje se i ulazni maseni tok ugljena koji se rasplinjava pa samim time i proizvedena količina sintetskog plina. **Bitno je naglasiti da je u analizi opterećenja izostavljen zadnji dio postrojenja, kogeneracija i apsorpcijski ciklus, jer su oni modelirani s fiksnim parametrima i nisu detaljno razrađeni u diplomskom radu, nego sudjeluju samo kao dodatna uporaba osjetne topline dimnih plinova.** Slučajevi smanjenog opterećenja su napravljeni u Off-design načinu rada. Bazni model je modeliran kao glavni profil, a slučajevi smanjenog opterećenja su modelirani kao potprofili baznog modela u kojima se parametri (tlakovi, temperature, snage, maseni tokovi i dr.) mogu mijenjati.

Opterećenje je mijenjano od tehničkog maksimuma koji je modeliran kao bazni model sve do tehničkog minimuma (sve dok matematički model konvergira i ne događaju se greške) smanjujući opterećenje na plinskoj turbini. Opterećenje se smanjuje po 5%. Temperatura i tlak u rasplinjaču su u svim potprofilima opterećenja konstantni. U Tablica 10. su prikazani rezultati promjene opterećenja postrojenja.

Tablica 10. Rezultati promjene opterećenja postrojenja

Opterećenje	100%	95%	90%	85%	80%
Snaga generatora plinske turbine [MW _e]	250,0	237,5	225,0	212,5	200,0
Snaga generatora parnih turbina [MW _e]	145,94	142,11	137,92	133,52	128,6
Ukupna snaga generatora [MW _e]	395,94	379,61	362,92	346,02	328,6
Maseni tok ugljena	45,27	43,59	41,82	40	381
Neto električna učinkovitost postrojenja	40,90%	39,90%	38,83%	37,67%	36,35%
Opterećenje	75%	70%	65%	60%	59%
Snaga generatora plinske turbine [MW _e]	187,5	175,0	162,5	150,0	147,5
Snaga generatora parnih turbina [MW _e]	122,9	119,28	117,5	115,92	115,84
Ukupna snaga generatora [MW _e]	310,4	294,28	280	265,92	263,34
Maseni tok ugljena [kg/s]	36,14	34,49	33,09	31,84	31,62
Neto električna učinkovitost postrojenja	34,90%	33,34%	31,70%	29,96%	29,61%

Model je moguće voditi sve do 58% opterećenja kada model krene divergirati jer više nisu ispoštovane energetske i masene jednadžbe većine komponenti (komora izgaranja, plinska turbina, isparivači, pregrijači, ekonomajzeri...). Neto električna učinkovitost pada od 40,90% (pri 100% opterećenja) sve do 29,61% (pri 59% opterećenja) te je prikazana na Slika 44.

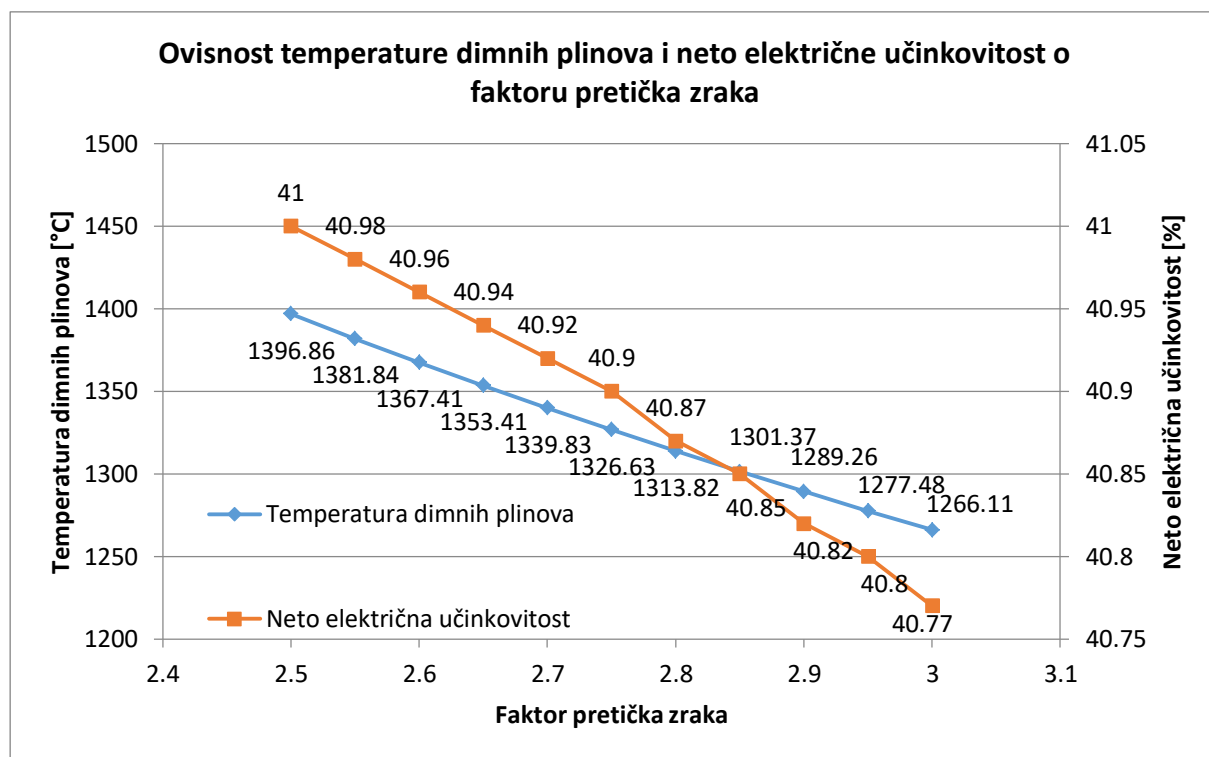


Slika 44. Ovisnost neto električne učinkovitosti o opterećenju

4.3. Promjena faktora pretička zraka

Faktor pretička zraka ima veliku ulogu u vođenju Brayton-ovog ciklusa. S manjim faktorom temperatura dimnih plinova je na izlazu iz komore izgaranja veća, a s većim je manja. Bitno je kontrolirati temperaturu dimnih plinova kako se početni stupnjevi plinske turbine ne bi oštetili usred prevelikog toplinskog opterećenja. Također manji faktor pretička zraka zahtjeva manji maseni tok pa je onda i potrebna snaga za rad kompresora manja.

Faktor pretička zraka je mijenjan od 2,5 do 3 uz zadržavanje konstantnog opterećenja na plinskoj turbini. Slika 45. prikazuje ovisnost temperature dimnih plinova na izlasku iz komore izgaranja i promjenu neto električne učinkovitosti postrojenja.



Slika 45. Ovisnost temperature dimnih plinova i neto električne učinkovitost o faktoru pretička zraka

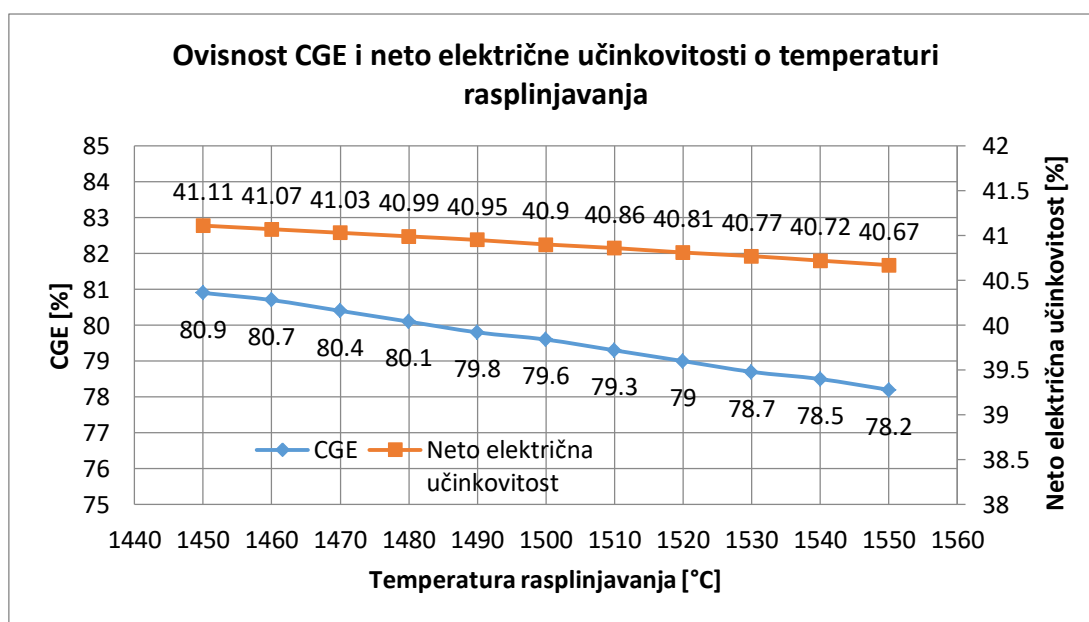
Prilikom smanjena pretička zraka temperatura dimnih plinova raste s obzirom da se manje zraka koji nije sudjelovao u izgaranju nalazi u dimnim plinovima te se oni ne ohlade toliko. U tom slučaju također se povećava neto električna učinkovitost zbog manje potrebne snage za rad kompresora. Kada se faktor pretička zraka povećava, temperatura dimnih plinova na izlasku iz komore izgaranja pada jer veći maseni tok bolje hladi dimne plinove. Također neto

električna učinkovitost pada jer je potrebna veća snaga za rad kompresora. Temperatura pri najmanjem pretičku zraka ($\lambda=2,5$) iznosi 1396,86 °C, a pri najvećem pretičku zraka ($\lambda=3$) 1266,11. Neto električna učinkovitost pri najmanjem pretičku zraka iznosi 41,00%, a pri najvećem 40,77%.

Cilj dobrog vođenja procesa izgaranja je približiti se s temperaturom dimnih plinova što bliže najvećoj mogućoj temperaturi rada plinske turbine (danas 1600 °C; poboljšanjem tehnologije se teži 1700 °C) jer se na taj način ostvaruje najveća učinkovitost.

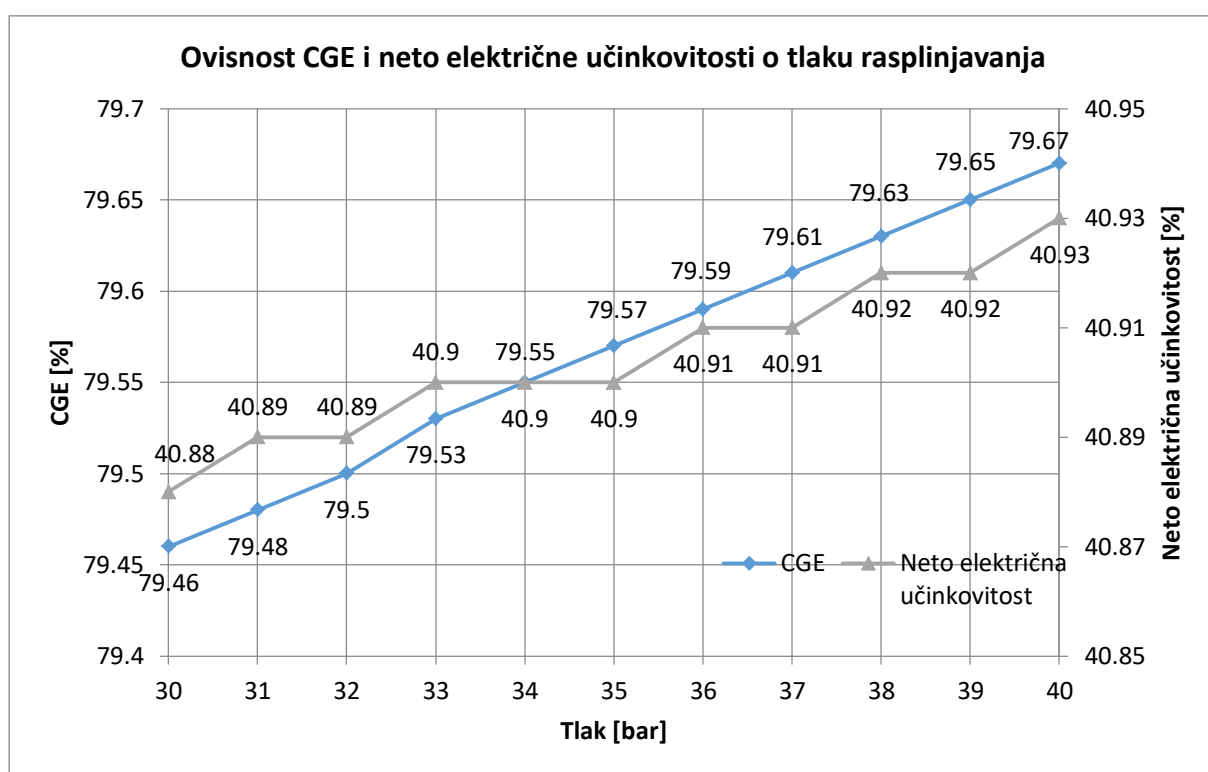
4.4. Promjena parametara rasplinjavanja

Promjenom temperature i tlaka rasplinjavanja, mijenjaju se i njena CGE učinkovitost i neto električna učinkovitost. S porastom temperature rasplinjavanja potrebne su veće količine kisika za rasplinjavanje, što u konačnici smanjuje CGE i donju ogrjevnu vrijednost sintetskog plina na izlazu iz rasplinjača. Zbog manje donje ogrjevne vrijednosti sintetskog plina, potrebna je veća količina ugljena na ulazu u sustav kako bi se ostvarila zadana snaga na plinskoj turbini. Temperatura rasplinjavanja je mijenjana od 1450 °C do 1550 °C, dok je tlak bio konstantan (35 bar). CGE se mijenja od 80,9% (pri 1450 °C) do 78,2% (pri 1550 °C). Neto električna učinkovitost se mijenja od 41,11% (pri 1450 °C) do 40,67% (pri 1550 °C). Ovisnost CGE i neto električne učinkovitosti postrojenja o temperaturi rasplinjavanja pri konstantnom tlaku od 35 bar je prikazana na Slika 46.



Slika 46. Ovisnost CGE i neto električne učinkovitosti o temperaturi rasplinjavanja

Prilikom povećanja tlaka u rasplinjaču stvaranje CH_4 se povećava koji je glavni uzrok blagom povećanju donje ogrjevne vrijednosti sintetskog plina. Povećanje ogrjevne vrijednosti sintetskog plina uzrokuje povećanje CGE. Tako CGE raste od 79,46% (pri 30 bar) do 79,67% (pri 40 bar). Povećanjem donje ogrjevne vrijednosti sintetskog plina i CGE uzrokuje i povećanje neto električne učinkovitosti postrojenja s 40,88% (pri 30 bar) do 40,93% (pri 40 bar). Glavna prednost povećanja tlaka u rasplinjaču leži u tome što je tada volumen nastalog plina manji pa se dimenzije postrojenja za isti kapacitet smanjuju. To čini cijeli proces ekonomičnijim. Ovisnost CGE i neto električne učinkovitosti postrojenja o tlaku rasplinjavanja pri konstantnoj temperaturi od 1500 °C je prikazana na Slika 47.



Slika 47. Ovisnost CGE i neto električne učinkovitosti o tlaku rasplinjavanja

Zavisno o sastavu ugljena koji se rasplinjava te željenom izlaznom sastavu sintetskog plina, proces rasplinjava zahtjeva optimizaciju temperature i plina. Ako se želi postići veći udio CO i H_2 u proizvedenom sintetskom plinu proces će se voditi na povišenim temperaturama i nižim tlakovima. Ako je cilj dobiti veći udio CH_4 , proces će se voditi na nižim temperaturama i višim tlakovima.

4.5. Promjena ulaznog goriva

Velika prednost rasplinjača s uronjenim slojem je što su pogodni za rad s različitim vrstama ugljena i sastavima, no za ugljene s visokim udjelom vlage i pepela su druge vrste rasplinjača bolje. U analizi je razmatran rad postrojenja s četiri vrste različitog lignita: Tuzla (Bosna i Hercegovina), Arino (Španjolska), Rosebud (Montana, SAD) i Porajnje (Njemačka). U Tablica 11. su dani sastav lignita i donja ogrjevna vrijednost za navedene ugljene.

Tablica 11. Sastav i donja ogrjevna vrijednost različitih lignita

Lokacija	Tuzla, BiH	Arino, Španjolska	Rosebud, Montana, SAD	Porajnje, Njemačka
Maseni udio				
C	37,96%	44,42%	50,08%	58,03%
H ₂	3,07%	3,32%	3,38%	4,29%
O ₂	10,82%	6,67%	11,14%	23,28%
S	1,13%	5,63%	0,73%	0,31%
N ₂	1,07%	0,38%	0,71%	0,67%
Pepeo	22,07%	20,42%	8,19%	3,29%
H ₂ O	23,88%	19,16%	25,77%	10,13%
H _d [kJ/kg]	14480,85	18194,26	18826,68	21135,68

Sastav lignita se značajno razlikuje na sve četiri lokacije. Veći udio ugljika i manji udio vlage u ugljenu rezultira većom donjom ogrjevnom vrijednosti. Svi parametri postrojenja su zadržani kao što su postavljeni u baznom modelu (tlak i temperatura rasplinjavanja, tlakovi pare, faktor pretička zraka, površine izmjenjivača itd.) kako bi se sva četiri ugljena mogla uspoređivati u radu. Sastav suhih sintetskih plinova i rezultati promjene goriva su prikazani u Tablica 12. Sastav ugljena je preuzet iz „knjižnice“ programskog paketa Epsilon Professional.

Tablica 12. Sastav suhих sintetskih plinova nakon rasplinjavanja

Lokacija	Tuzla	Arino	Rosebud	Porajnje
Sastav suhog sintetskog plina [% mol]				
N ₂	1,3	0,8	0,9	0,9
CO ₂	17,5	12,4	13,8	11,6
CO	41,7	45,3	46,6	51,2
H ₂	38,2	38,2	37,8	35,6
H ₂ S	0,7	2,7	0,3	0,1
CH ₄	0,6	0,6	0,6	0,6

Tablica 13. Rezultati promjene goriva postrojenja

Lokacija	Tuzla	Arino	Rosebud	Porajnje
Maseni protok lignita [kg/s]	45,27	33,72	30,58	25,67
CGE [%]	79,6	83,5	83,5	85,2
Ogrjevna vrijednost sintetskog plina sintetskog plina [kJ/kg]	6923,57	8854,84	8292,08	9129,71
Volumni protok sintetskog plina [Nm ³ /s]	85,14	66,17	66,01	56,75
Maseni protok oksidansa [kg/s]	20,66	16,57	16,77	14,80
Neto električna učinkovitost postrojenja [%]	40,90	41,79	44,32	45,92

Iz Tablica 11. i Tablica 12. je vidljivo da ugljeni s većim udjelom ugljika postižu veće udjele CO, a manje CO₂. CH₄ je u sva četiri slučaja jednak jer je njegova formacija zadani parametar. Iz Tablica 13. se da zaključiti da su učinkovitost postrojenja i CGE usko vezani za udjele ugljika i vlage sadržanih u gorivu. Veći udio ugljika i manji udio vlage rezultira većom ogrjevnom vrijednosti proizvedenog sintetskog plina. Zbog veće ogrjevne vrijednosti smanjuje se ulazni maseni tok ugljena za zadanu snagu na plinskoj turbini. Najveću neto električnu učinkovitost ostvaruje ugljen iz Porajnja (45,92%) s obzirom na to da je udio ugljika najveći, a vlage najmanji. Prilikom promjene vrste ugljena treba pripaziti na udio

sumpora jer što je on veći, udio SO_2 će biti veći u sintetskim plinovima pa posljedično i njen parcijalni tlak (Dalton-ov zakon). S obzirom na veći parcijalni tlak veća je i temperatura kondenzacije H_2SO_4 te zbog toga treba paziti da do iste ne dođe.

4.6. Moguća poboljšanja postrojenja

S ciljem poboljšanja vođenja procesa i povećanja učinkovitosti postrojenja moguće je napraviti mnoga poboljšanja. Neka od poboljšanja koja nisu razmatrana u radu su:

- Smanjiti „pinch“ točke pri isparavanju. Smanjenjem „pinch“ točki izmjena topline u isparivaču je učinkovitija te je moguće izmijeniti više kW po m^2 ,
- Implementirati izdvajanje i spremanje CO_2 . S obzirom na strogu energetska politiku i smanjenje emisija stakleničkih plinova, izdvajanje i spremanje CO_2 je danas praktički neizbježno. Smanjenjem emisija CO_2 (kgCO_2/kWh), tehnologija je „čišća“ i ekološki prihvatljiva,
- Uvođenje novih komponenti, procesa i izmjena u parno – turbinski ciklus s ciljem povećanja učinkovitosti poput: međupregrijač pare, odvajanje pare u turbini s ciljem zagrijanja pothlađene kapljevine prije ekonomajzera, bolji raspored izmjenjivačkih površina i dr.,
- Optimirati tlak i temperaturu rasplinjavanja s ciljem povećanja CGE i ogrjevne vrijednosti sintetskog plina,
- Optimirati proces hlađenja sintetskog plina s ciljem maksimalnog iskorištenja osjetne topline.

5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu napravljen je matematički model postrojenja s kombiniranim ciklusom i integriranim rasplinjavanjem ugljena, kao jedno od mogućih rješenja u prijelazom razdoblju proizvodnje električne energije čiji je krajnji cilj potpuni prijelaz na obnovljive izvore energije. Postrojenje je modelirano s GE Power rasplinjačem, hlađenjem sintetskog plina, uklanjanjem kiselih plinova iz sintetskog plina, kombiniranim ciklusom i dodatnom oporabom osjetne topline dimnih plinova u programskom paketu Epsilon Professional 15.01.

Postrojenje pri punom opterećenju ostvaruje snagu od 395,94 MW_e, 16,5 MW za grijanje/PTV i 2 MW za hlađenje. Ostvaruje se neto električna učinkovitost 40,90%, a neto učinkovitost 43,73%. Ukupne emisije CO₂ iznose 0,419 kgCO₂/kWh.

Kako bi postrojenje postiglo što veću učinkovitost, optimiran je niži tlak parno – turbinskog ciklusa i uvedena je 2-stupanjska kompresija. Optimalni tlak iznosi 68,64 bar. 2-stupanjska kompresija s jednim međuhladnjakom (hlađenje zraka sintetskim plinom) se pokazala boljom od 2-stupanjske kompresije s dva međuhladnjaka (hlađenje zraka sintetskim plinom i vodom) kada se promatra neto električna učinkovitost. S ove dvije jednostavne mjere, neto električna učinkovitost je porasla na 41,76%. Također su se emisije CO₂ smanjile na 0,417 kgCO₂/kWh.

Pri smanjenju opterećenja postrojenja od 100% do 59% (na nižim opterećenjima model je krenuo divergirati), neto električna učinkovitost se mijenjala od 40,90% do 29,61%.

Prilikom promjene faktora pretička zraka najveća neto električna učinkovitost se ostvari pri nižim faktorima od faktora baznog modela (41,00%) , a najmanja pri faktorima višim od faktora baznog modela (40,77%).

Također je provedena analiza neto električne učinkovitosti kada se mijenja ulazno gorivo. Ugljeni s većim udjelom ugljika i manjim udjelom vlage su ostvarili veće neto električne učinkovitosti.

Zadnja analiza koja je provedena je bila promatranje promjene temperature rasplinjavanja pri konstantnom tlaku na neto električnu učinkovitost postrojenja i promatranje promjene tlaka rasplinjavanja pri konstantnoj temperaturi na neto električnu učinkovitost postrojenja. Niže temperature rasplinjavanja povećavaju učinkovitost postrojenja zbog većeg CGE-a, dok ju više temperature smanjuju. Pri višim tlakovima se povećava CGE pa raste i učinkovitost postrojenja, dok ona pri nižim tlakovima pada. Tlak i temperatura rasplinjavanja su iznimno

bitni parametri u ovakvoj vrsti postrojenja jer se prilikom promjene kemijskog sastava goriva oni moraju vrlo dobro prilagoditi kako bi se proizveo sintetski plin povoljnih karakteristika.

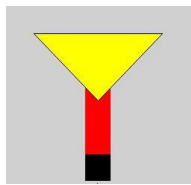
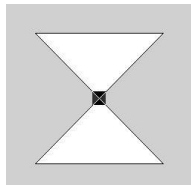
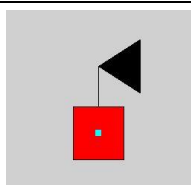
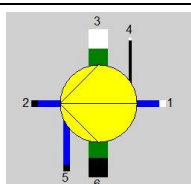
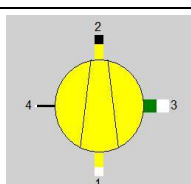
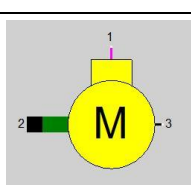
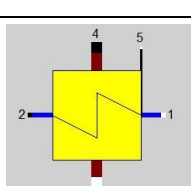
LITERATURA

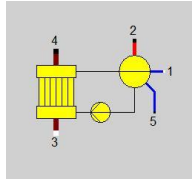
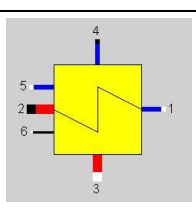
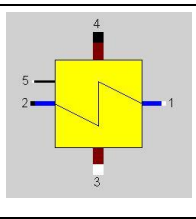
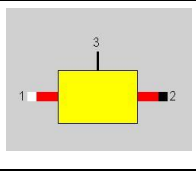
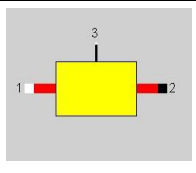
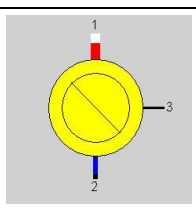
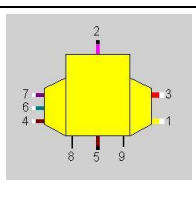
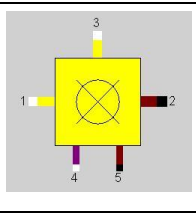
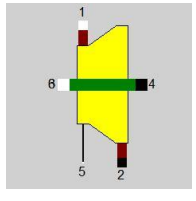
- [1] Termauehlen, H., Emsperger, W.: Evolutionary Development of Coal-Fired Power plants, 2003.
- [2] <https://www.statista.com/statistics/217256/global-installed-coal-power-generation-capacity/> (pristupljeno 15.11.2021.)
- [3] <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity> (pristupljeno (15.11.2021.)
- [4] Phillips, J., Booras, G., Marasigan, J.: The History of Integrated Gasification Combined-Cycle Power Plants, 2017.
- [5] Wolfersdorf, C., Meyer, B.: The current status and future prospects for IGCC systems, 2017.
- [6] Požar, H.: Osnove energetike 1, Školska knjiga, 1992.
- [7] Higman, C.: Gasification, 2008.
- [8] Waldheim, L.: Gasification of waste for energy carriers, 2018.
- [9] Wagner, N. J., Coertzen, M., Matjie, R. H., van Dyk, J. C.: Coal Gasification, 2008.
- [10] Lozza, G.: Syngas cooling in IGCC systems, 2017.
- [11] Bhattacharyya, D., Turton, R., Zitney, S. E.: Acid gas removal form syngas in IGCC plants, 2017.
- [12] Breeze, P.: Combined Cycle Power Plants, 2016.
- [13] Galović, A.: Termodinamika 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [14] <https://chemicalengineeringworld.com/heat-recovery-steam-generator-hrsg/> (pristupljeno 10.12.2021.)
- [15] Hinrichs, D.: Cogeneration, 2004.
- [16] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=3445> (pristupljeno 13.12.2021.)
- [17] Ren, J., Qian, Z., Yao, Z., Gan, N, Zhang, Y.: Thermodynamic Evaluation of LiCl-H₂O and LiBr-H₂O Absorption Refrigeration Systems Based on a Novel Model and Algorithm, 2019.

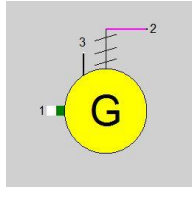
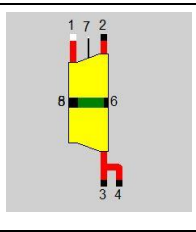
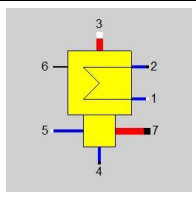
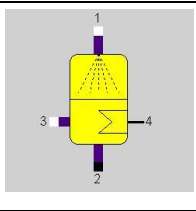
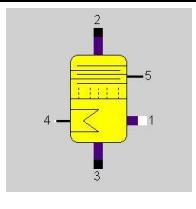
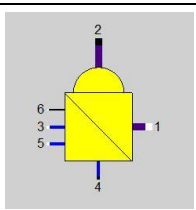
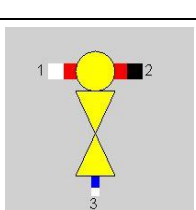
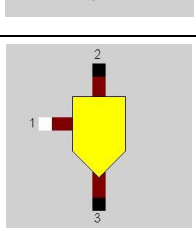
PRILOZI

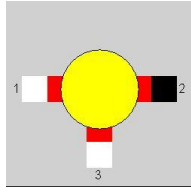
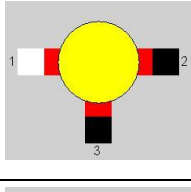
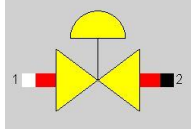
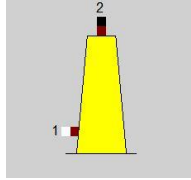
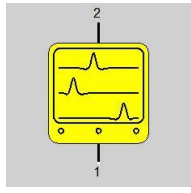
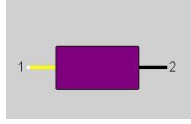
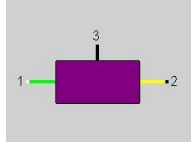
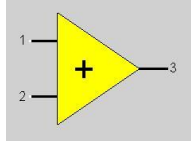
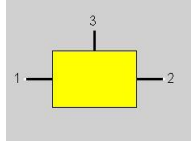
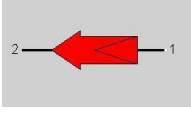
I. Popis korištenih blokova iz programskog paketa Epsilon Professional

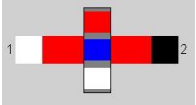
PRILOG I.

Blok	Naziv bloka	Opis
	Boundary input value	Blok za zadavanje početnih parametara (samo na granicama sustava)
	General input value/start value	Blok za zadavanje početnih parametara (bilo gdje u sustavu)
	Value input (Measuring point)	Blok za zadavanje određenog početnog parametra (bilo gdje u sustavu)
	Pump	Blok za definiranje pumpe
	Compressor/Fan	Blok za definiranje kompresora ili ventilatora
	Motor	Blok za definiranje motora koji pokreće strojeve (pumpe, kompresore)
	Eco/Evaporator/Superheater (with exponents)	Blok za definiranje izmjenjivača topline (moguće zadavanje površine)

	Evaporator with steam drum	Blok za definiranje isparivača s bubnjem (prirodna ili prisilna cirkulacija)
	Universal heat exchanger	Blok za definiranje univerzalnog izmjenjivača topline (generalna izmjena topline)
	High temperature heat exchanger	Blok za definiranje visokotemperaturnog izmjenjivača topline
	Heat extraction	Blok za definiranje toplinskog ponora
	Heat injection	Blok za definiranje toplinskog izvora
	Heat consumer	Blok za definiranje potrošača topline
	Extended coal gasifier	Blok za definiranje rasplinjača
	Combustion chamber of a gas turbine	Blok za definiranje komore izgaranja plinske turbine
	Gas turbine (turbine only)	Blok za definiranje plinske turbine

	Generator	Blok za definiranje generatora električne energije
	Steam turbine/general expander	Blok za definiranje parne turbine
	Steam turbine condenser	Blok za definiranje kondenzatora parne turbine
	Absorber	Blok za definiranje apsorbira apsorpcijskog ciklusa
	Coupled rectifier column	Blok za definiranje generatora apsorpcijskog ciklusa
	Evaporator for binary mixtures	Blok za definiranje isparivača apsorpcijskog ciklusa
	Water injection	Blok za definiranje ubacivanja vode u neku struju
	Selective splitter (filter)	Blok za definiranje odvajanja određenih elemenata struje

	Simple mixer	Blok za definiranje miješanja
	Simple splitter	Blok za definiranje odvajanja struje
	Control valve	Blok za definiranje tlačnog ventila
	Stack	Blok za definiranje dimnjaka
	Emission display	Blok za definiranje kontrole emisija H_2SO_4
	Controller with internal target value	Blok za definiranje kontrolera s internom zadanom vrijednosti
	Controller with external target value	Blok za definiranje kontrolera s eksternom zadanom vrijednosti
	Calculator	Blok za definiranje kalkulatora
	Difference meter	Blok za definiranje razlike određenih veličina
	Value transmitter	Blok za definiranje prijenosa određene veličine

	Separator (logical)	Blok za modeliranje složenijih sustava (sprječava komunikaciju u oba smjera)
---	---------------------	---