

# Kogeneracijsko postrojenje s rasplinjavanjem drvene biomase

---

**Kudeljan, Valentino**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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:235:179763>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Valentino Kudeljan**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Student:

Valentino Kudeljjan

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se prof. Draženu Lončaru na mentorstvu, svim znanjima tijekom studija i izrade ovog diplomskog rada. Najveće zahvale iskazujem mojoj majci Ljiljani koja je kao samohrani roditelj uložila svoj život u moju braću i mene, djevojci Magdaleni Jurić koja mi je bila ogromna podrška u najgorim trenucima, i braći Nikoli i Renatu bez kojih zasigurno danas ne bio tu gdje jesam.

Valentino Kudeljhan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Valentino Kudelj** Mat. br.: 0035188195

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kogeneracijsko postrojenje s rasplinjavanjem drvene biomase**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wood biomass gasification cogeneration plant**

Opis zadatka:

Rasplinjavanje biomase alternativa je klasičnim procesima izgaranja i proširuje mogućnosti korištenja biomase. Rasplinjavanjem se kruta biomasa transformira u gorivi ili reaktorski plin koji se može koristiti za pogon plinske turbine, plinskog motora ili gorivnih članaka u proizvodnji električne energije, ali i u procesima kemijske sinteze za proizvodnju etanola ili drugih organskih proizvoda. Premda rasplinjavanje biomase još nema status potpuno komercijalne tehnologije poticajni regulatorni okvir je u nekoliko europskih zemlja omogućio izgradnju većeg broja postrojenja.

U okviru rada potrebno je:

1. Opisati i usporediti karakteristična tehnološka rješenja koja se primjenjuju u kogeneracijskim postrojenjima za rasplinjavanje drvene biomase;
2. Konfigurirati kogeneracijsko postrojenje električne snage 1 MW s reaktorima za rasplinjavanje biomase u nepomičnom sloju;
3. Provesti tehnološko-ekonomsku analizu cjelogodišnjeg pogona uzimajući u obzir sezonski promjenjive toplinske potrebe lokacije;
4. Izvesti pojednostavljeni matematički model procesa u reaktoru i sustavu čišćenja reaktorskog plina;
5. Opisati i simulirati proces puštanja postrojenja u pogon do postizanja nazivnih parametara;

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

Zadatak zadan:

3. svibnja 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Datum predaje rada:

5. srpnja 2018.

Predvideni datum obrane:

11., 12. i 13. srpnja 2018.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. TEHNOLOGIJA RASPLINJAVANJA .....	2
2.1. Kratak povijesni pregled .....	3
2.2. Razvijene tehnologije rasplinjavanja .....	5
2.2.1. Opis tehnologija reaktora .....	6
2.2.2. Tehnološki procesi .....	17
2.2.3. Regulacija kvalitete plina.....	19
3. Konfiguracija postrojenja .....	21
3.1. Opis sušenja i dobave goriva .....	22
3.2. Opis sustava plinifikacije .....	23
3.3. Opis filtracije i hlađenja plina .....	25
3.4. Opis sustava za kondenzaciju plina .....	26
3.5. Opis kogeneracijske motorne jedinice .....	27
3.6. Opis toplovodnog sustava .....	28
3.7. Opis ventilacije prostora kogeneracijske jedinice.....	31
3.8. Opis plinske baklje.....	31
4. Tehnički proračuni.....	33
4.1. Proračun sintetskog plina .....	33
4.2. Energija kogeneracijske jedinice.....	47
4.3. Snaga izmjenjivača topline za hlađenje sintetskog plina .....	48
4.4. Toplinska potreba sušare.....	48
4.5. Energetska bilanca .....	51
5. Simulacija i model upuštanja postrojenja u pogon .....	52
6. Tehno-ekonomska analiza cjelogodišnjeg pogona .....	55
6.1. Povlaštena cijena prodaje električne energije .....	56
6.2. Procjena investicije .....	57

---

6.3. Pogonski troškovi.....	58
6.4. Specifični trošak proizvodnje električne energije.....	58
6.5. Izvor financiranja projekta .....	63
6.6. Amortizacija.....	63
6.7. Analiza .....	64
7. ZAKLJUČAK.....	67
LITERATURA.....	68
PRILOZI.....	70

---

**POPIS SLIKA**

Slika 2-1 Ilustracija reaktora [11].....	2
Slika 2-2 Plinifikacijska postrojenja u europskim članicama „Task 33“ [12] .....	4
Slika 2-3 Vrste tehnologija za rasplinjavanje [5].....	5
Slika 2-4 Tipovi reaktora prema opsegu snage [5] .....	6
Slika 2-5 Ilustracija reaktora sa silaznom ozrakom .....	7
Slika 2-6 a.) Reaktor sa „Imbertovim“ srcem, b.) reaktor sa redukcijom V oblika, c.) reaktor sa redukcijom na ravnoj ploči. [3].....	8
Slika 2-7 Ilustracija reaktora sa uzlaznom ozrakom [10] .....	10
Slika 2-8 Shema Harboore postrojenja [10].....	11
Slika 2-9 Ilustracija BFB reaktora [7].....	12
Slika 2-10 Shema „Skive“ postrojenja u Danskoj [17].....	13
Slika 2-11 CFB reaktor [18] .....	14
Slika 2-12 Shema Vaskiluodon postrojenja [19] .....	15
Slika 2-13 Reaktor sa fluidizirajućim slojem i dvostrukim ložištem [20].....	15
Slika 2-14 Reaktori u raspršujućem sloju [22] .....	17
Slika 2-15 Shema kogeneracijskog postrojenja s rasplinjačem biomase i plinskim motorom[8] .....	18
Slika 2-16 Predviđanje emisija NO <sub>x</sub> neuronskim mrežama [23] .....	20
Slika 3-1 Modul plinifikacije i modul kogeneracijskog motora [9] .....	21
Slika 3-2 Prikaz sušare sa ventilatorima predušenja i sušenja. ....	22
Slika 3-3 Model plinskog reaktora [9] .....	24
Slika 3-4 Model čišćenja i hlađenja plina [9] .....	25
Slika 3-5 Plinski motor sa generatorom [9] .....	27
Slika 4-1 $\xi$ - $\psi$ dijagram [6] .....	39
Slika 4-2 odabir srednje entalpije mješanja [6].....	40
Slika 4-3 Volumni udjeli sudionika u sintetskom plinu svedeni na vlažni plin.....	44
Slika 4-4 Grafički prikaz donje ogrjevne vrijednosti sintetskog plina i snage plina .....	46
Slika 4-5 Grafički prikaz prosječne snage sušare kroz godinu .....	50
Slika 5-1 Snaga (apcisa) u vremenu (oordinata) tijekom upuštanja u pogon postrojenja s istom tehnologijom.....	52
Slika 5-2 Pojednostavljeni model postrojenja u simulinku.....	53



---

Slika 5-3	Temperatura pliništa u ovisnosti o vremenu .....	54
Slika 5-4	Izlazna snaga kogeneracijske jedinice u ovisnosti o vremenu .....	54
Slika 6-1	Specifični trošak proizvodnje električne energije pojedinih tehnologija[8] .....	59
Slika 6-2	Usporedba specifičnog troška proizvodnje el. Energije (plavo) i povlaštene cijene prodaje električne energije prema tarifnom sustavu (narančasto).....	61
Slika 6-3	Usporedba specifičnog troška proizvodnje el. Energije (narančasto) i povlaštene cijene prodaje električne energije prema tarifnom sustavu (sivo) u slučaju prodaje topline .....	62
Slika 6-4	Analiza promijene IRR-a u ovisnosti o cijeni sječke .....	64
Slika 6-5	Analiza IRR-a prema satima nominalnog rada .....	66

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Karakteristike reaktora sa fiksnim i fluidiziranim slojem .....	16
Tablica 2	Maseni protoci goriva i vlage .....	34
Tablica 3	Ulazni podaci goriva za jedan reaktor .....	35
Tablica 4	Rezultati optimalnog omjera vlažnosti i pretička zraka .....	41
Tablica 5	Prikaz parametara plina iz reaktora .....	43
Tablica 6	Rezultati donje ogrjevne vrijednosti, snage i količine plina .....	47
Tablica 7	Potreba topline za sušaru prema mjesecima .....	50
Tablica 8	Procjena investicije (€) .....	57
Tablica 9	Godišnji O&M troškovi (€) .....	60
Tablica 10	Amortizacija ubrzanim otpisom .....	63
Tablica 11	Izračun amortizacije (€) .....	63
Tablica 12	Izračun IRR-a i NPV-a bez prodaje topline i sa cijenom sječke 50 €/t .....	65

---

**SAŽETAK**

U radu je prikazan pregled tržišno zrelih tehnoloških rješenja za rasplinjavanje biomase i korištenje nastalog sintetskog plina u svrhu kombinirane proizvodnje električne i toplinske energije. Nakon toga se konfiguriralo kogeneracijsko postrojenje sa reaktorima za rasplinjavanje biomase u nepomičnom sloju. Postrojenje je snage do 1MWe (netto) i iskoristive toplinske snage do 1780 kW. Detaljno je opisan rad postrojenja i proračun dobivenih udjela sudionika u plinu u ovisnosti o vlažnosti ubacivanog zraka u zonu oksidacije i ulaznog protoka biomase zadanih značajki. Simuliralo se njegovo upuštanje u pogon jednostavnim modelom u računalnom programu Matlab/Simulink. Analitirana je isplativost ulaganja u ovu vrstu tehnologije u tehno-ekonomskoj analizi koja uključuje detaljan opis načina kreditiranja i podjele investicijskih i operativnih troškova postrojenja.

Ključne riječi: Kogeneracija, biomasa, rasplinjavanje

**SUMMARY**

The paper presents the review of characteristic technological solutions offered in the biomass gasification market and the technology for syngas usage in order to produce combined heat and power with a view to the development of gasification technology and a brief historical review. A cogeneration power plant at the plant power level up to 1 Mwe (net) and utilized heat power up to 1780 kW with the biomass gasification reactors in the stationary layer. The work contains a detailed description of the operation of the plant and the calculation of the participants' share of the gas in dependence of the humidity of the incoming air in the oxidation zone and the input flow of the predetermined biomass. The launching was simulated with a simple model of the power plant in the Matlab / Simulink computer program. The cost-effectiveness of investments in this type of technology was demonstrated in a techno-economic analysis with a detailed description of the lending method and the breakdown of the investment and operating costs of a particular plant.

Key words: Biomass, gasification, Combined heat and power

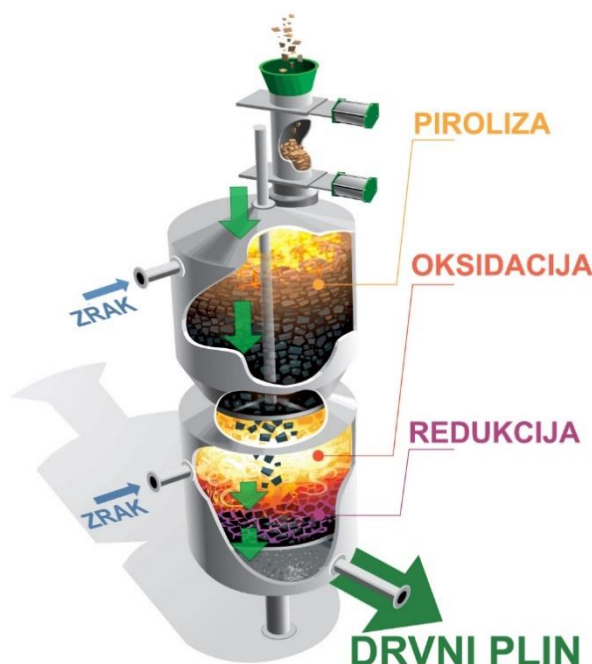
---

## 1. UVOD

Proizvodnja energije u budućnosti karakterizirana je njenom povećanom potražnjom zbog rastuće populacije, limitacijom fosilnih goriva i utjecajem proizvodnje energije na okoliš. Jedno od mogućih rješenja ovih problema jest implementacija obnovljivih izvora energije u proizvodne sustave. Sukladno cilju smanjenja stakleničkih plinova i potrošnje fosilnih goriva Europska komisija za cilj ima povećati udio neposredne potrošnje energije iz obnovljivih izvora energije poput vjetra, sunca, biomase, bioplina i geotermalne energije na 20% do 2020. godine. Na to je Europska komisija obvezala sve članice EU-a, pa tako i Hrvatsku. S obzirom da je tehnologija proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije još uvijek skuplja od tradicionalne proizvodnje iz fosilnih goriva, Europski Parlament kroz Direktivu o promociji i upotrebi takvih oblika energije podupire njihovo korištenje na način da svaka članica EU-a mora osigurati financijsku potporu, bilo putem izdavanja zelenih certifikata, zajamčene cijene električne energije, premija, poreznih olakšica i slično. U srpnju 2007. godine Vlada Republike Hrvatske po prvi put usvaja Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneraciju. Prema zadnjem Tarifnom sustavu NN 133/13 je HROTE (Hrvatski operator tržišta električne energije) dužan kupovati električnu energiju od povlaštenog proizvođača po zajamčenoj cijeni na fiksno razdoblje od 14 godina. Nakon tog razdoblja povlaštenu proizvođač gubi to pravo i nastavlja prodavati električnu energiju na slobodnom tržištu električne energije. Kada je u pitanju biomasa, tada, osim električne energije, povlaštenu proizvođač proizvodi i toplinsku energiju u zajedničkom procesu koji se naziva kogeneracija. Ta se toplinska energija mora potrošiti na što korisniji način, odnosno plasirati je potrošačima, po mogućnosti da ta potrošnja bude kontinuirana. Cijena po kojoj se prodaje toplinska energija trebala bi biti u okviru tržišne vrijednosti. No, ukoliko proizvođač osim proizvodnje električne i toplinske energije ima svoje sušare za sušenje drvne građe tada toplinsku energiju može iskoristiti za vlastite potrebe. Biomasa se kao energent gleda kao obnovljivi izvor energije s obzirom na dostupne količine u odnosu na trenutnu potrošnju. Također, izvor energije iz biomase smatra se izvorom sumarno nulte emisije CO<sub>2</sub> kada se uzme u obzir da količina emisije ugljičnog dioksida tijekom spaljivanja ne premašuje vrijednost koju je to isto drvo u protekle dvije godine iskoristilo u procesu fotosinteze.

## 2. TEHNOLOGIJA RASPLINJAVANJA

Rasplinjavanje je tehnološki proces koji može izvršiti pretvorbu bilo koje sirovine na bazi ugljika u sintetski plin. Taj se proces odvija u reaktoru, unutar kojeg se pod određenim nametnutim visoko-temperaturnim uvjetima odvijaju faze rasplinjavanja. Reakcije rasplinjavanja mogu se odvijati indirektnim rasplinjavanjem, gdje se toplina razvija izvan rasplinjača i prenosi na njega, ili direktnim rasplinjavanjem, gdje se toplina stvara egzotermnim izgaranjem i djelomičnim izgaranjem unutar rasplinjača.[5] Postoje četiri glavne faze rasplinjavanja:



Slika 2-1 Ilustracija reaktora [11]

- Sušenje
- Piroliza
- Oksidacija
- Redukcija

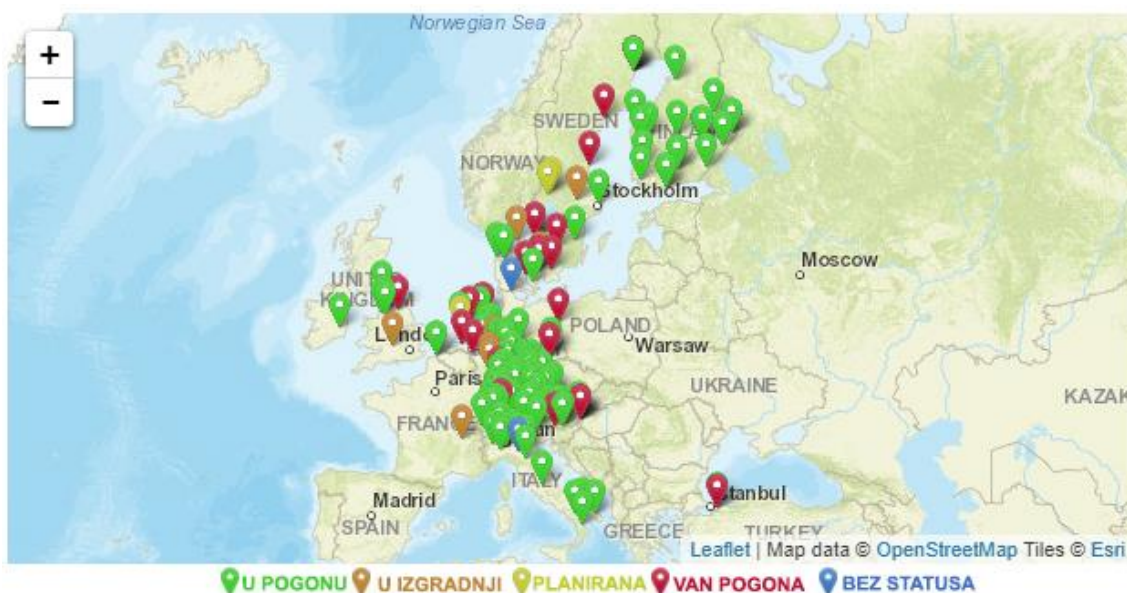
Faze su ilustrirane slikom 2-1, a detaljnije će biti razrađene u slijedećim poglavljima. Rasplinjavanje biomase predstavlja alternativu klasičnim procesima izgaranja. Na ovaj se način dobiveni sintetski plin može se koristiti za pogon plinske turbine, motora s unutrašnjim izgaranjem ili gorivih članaka u proizvodnji električne energije. Također, može se i koristiti u procesima kemijske sinteze za proizvodnju etanola ili drugih organskih proizvoda. Te su mogućnosti otvorene zbog sastava sintetskog plina koji je uglavnom sačinjen od  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  i  $H_2$ . Plin je povoljniji od direktnog izgaranja biomase jer pruža lakšu i učinkovitu regulaciju snage u termoenergetskim postrojenjima i povećava učinkovitost energetskih postrojenja zbog potpunijeg sagorijevanja. [5]

## 2.1. Kratak povijesni pregled

Upotreba drveta u svrhu generiranja topline postoji još od početka čovječanstva. Tradicionalan način dobivanja topline iz drveta je spaljivanjem istog, no na taj način dvije trećine energije odlazi u okoliš s dimnim plinovima. Razvojem znanosti otkriveni su novi načini iskorištavanja ovog vrijednog resursa, a jedan od njih je rasplinjavanje drveta. Mogućnost rasplinjavanja drveta i ugljena potječe iz 1609. godine kada je Belgijski kemičar i fizičar Jan Baptista Van Helmont otkrio da se na povišenim temperaturama može proizvoditi sintetski plin iz ugljena i drvene biomase. [1] Nakon tog otkrića započelo je istraživanje tog kemijskog procesa. Nakon toga neki od bitnijih eksperimenata i otkrića su slijedeći: 1669. godine Thomas Shirley izvodi razne eksperimente sa hidrogenkarbonatima. U kasnim 1600tima John Clayton eksperimentira sa hvatanjem plina proizvedenog iz ugljena. 1788. Robert Gardner registrira prvi patent na polju rasplinjavanja, a prvi patent za korištenje sintetskog plina u motorima s unutrašnjim izgaranjem drži John Barber od 1791. godine. Najznačajnija na ovom području je 1798. godina kada je Phillipe Lepon vodio tim koji je prvi isveo rasplinjavanje drveta[2]. Do 1850. godine tehnologija se razvila do točke kada se plin iz rasplinjavanja mogao koristiti za osvjetljavanje čitavog Londona. Takav se plin tamo nazivao „Town gas“, odnosno „gradski plin“, a dobiven je bio rasplinjavanjem ugljena. Ubrzo se taj plin distribuirao preko Atlantskog oceana do Sjedinjenih američkih država, gdje je do 1920. većina američkih gradova distribuirala takav plin građanima za kuhanje i rasvjetu. 1930. godine izgrađen je prvi plinovod prirodnog plina od naftnih polja do Denvera, čime je jeftini prirodni plin počeo supstituirati skuplji sintetski plin nastao rasplinjavanjem. Gradski plin se nastavljao u Engleskoj koristiti do 1970ih, kako u već navedene svrhe, tako i za pogon parnih kotlova, a manji generatori su čak bili ugrađivani i u vozila. U Prvom svjetskom ratu dolazi do povećanog razvoja generatora plina zbog nestašice nafte. U Drugom svjetskom ratu je došlo do još intenzivnijeg korištenja sintetskog plina. U okupiranoj Danskoj je za vrijeme Drugog svjetskog rata 95% svih mobilnih poljoprivrednih strojeva, traktora, kamiona, motornih brodova i trajekata bilo pogonjeno plinom dobivenim iz drveta ili ugljena. Čak i u neutralnoj Švedskoj, 40% svih prometnih motornih vozila radilo je na sintetski ili ugljeni plin. Diljem Europe, Azije i Australije, milijuni plinskih generatora bili su u radu između 1940. i 1946. godine. Zbog relativno niske učinkovitosti, neugodnosti rada generatora, i potencijalnih zdravstvenih rizika od otrovnih

proizvedenih plinova, većina tih jedinica je napuštena kada je nafta ponovno postala dostupna 1945. godine. Osim tehnologije za proizvodnju alternativnih goriva, kao što su metan ili alkohol, jedino rješenje za rad postojećih motora s unutarnjim izgaranjem, u vrijeme kada nafta i naftni derivati nisu dostupni, bio je jednostavan i jeftin rasplinjač [3] [4]

Danas postoji povećan interes korištenja biomase kao obnovljivog izvora energije zbog raznih poticajnih političkih odluka, s obzirom da se biomasa kao energent promatra kao energent sa sumarno nultim emisijama ugljičnog dioksida. Osnovana je grupa međunarodnih stručnjaka pod nazivom „Task 33“ kojoj je u cilju promovirati komercijalizaciju učinkovite, ekonomične i ekološki prihvatljive projekte koji razvijaju plinifikaciju biomase. Svoje ciljeve ispunjavaju kroz praćenje, razmatranje i razmjenjivanje informacija o istraživanju i razvoju rasplinjavanja biomase te potiču povezivanje zemalja koje su sudionici ove grupe. Svoj su prvi sastanak imali još 2001. godine, a trenutno su zemlje sudionice Austrija, Danska, Njemačka, Italija, Nizozemska, Norveška, Švedska, Švicarska i SAD. [12] Prema njihovim podacima sa posljednjeg sastanka 2016. godine postoji 86 komercijalnih, demonstracijskih i pilot postrojenja u zemljama članicama od čega ih je trenutno 62 u pogonu, 5 u izgradnji, 2 planirana 16 na čekanju, a za jedno status nije poznat. Od tih svih postrojenja čak 53 su kogeneracijska, 18 ih je u pogonu u svrhu sinteze plina, dok je ostatak ostala tehnologija plinifikacije (recimo isključiva proizvodnja topline).[10] Na slici 2-2 prikazana su plinifikacijska postrojenja u Europi prema statusu.



Slika 2-2 Plinifikacijska postrojenja u europskim članicama „Task 33“ [12]



## 2.2. Razvijene tehnologije rasplinjavanja

Proizvodnja sintetskog plina iz biomase može biti podijeljena prema tehnologiji utilizacije sintetskog plina, stupnju razvijenosti tehnologije postrojenja i operativnom statusu. Postoje četiri glavne tehnologije utilizacije sintetskog plina, a to su:

- Proizvodnja topline
- Kombinirana proizvodnja topline i električne energije (kogeneracija)
- Sinteza plina
- Ostale plinifikacijske tehnologije.

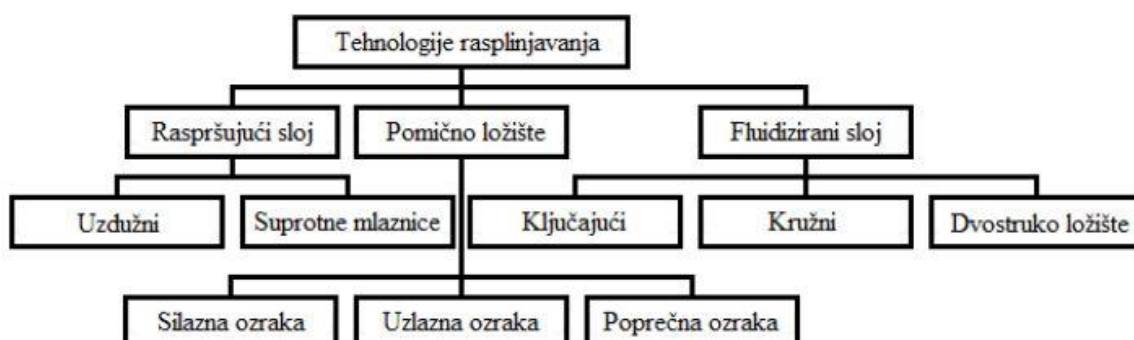
Prema stupnju razvijenosti tehnologije mogu se podijeliti na tri glavna:

- TRL 9 Komercijalna
- TRL 6-7 Demonstracijska
- TRL 4-5 Pilot postrojenja

Gdje TRL (Technology Readiness Level) označava spremnost tehnologije prema kritičnim tehnološkim elementima njene implementacije u komercijalne svrhe bazirane na skali 1-9.

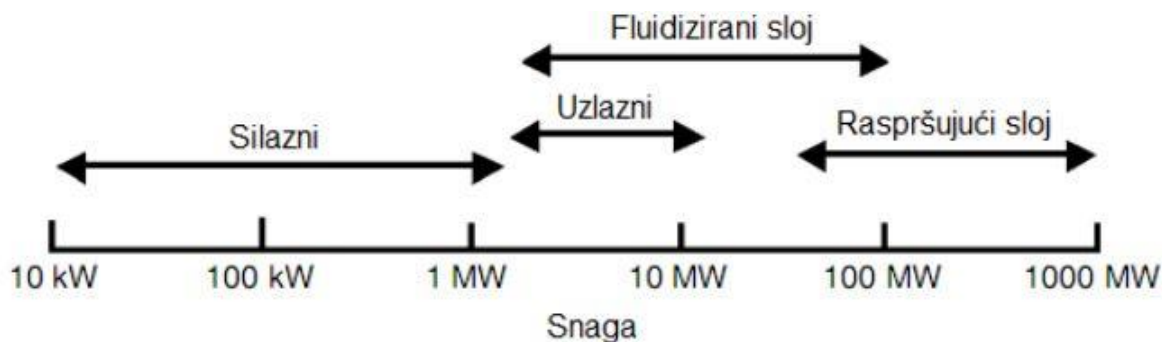
Posljednja podjela je prema statusu postrojenja, odnosno: planirana, u izgradnji, u pogonu i slično.

Reaktori za rasplinjavanje se mogu sistematizirati prema vezi između plina i primarnog energenta i prema radnom mediju za rasplinjavanje. Prema vezi između plina i primarnog energenta reaktori za rasplinjavanje se mogu podijeliti na reaktore sa fiksnim slojem ili pomičnim ložištem, reaktore sa fluidiziranim slojem i reaktore sa raspršujućim slojem.[5] Svaki od nabrojanih tipova reaktora za rasplinjavanje može se dodatno podijeliti sukladno slici 2-3.



Slika 2-3 Vrste tehnologija za rasplinjavanje [5]

Svaka od navedenih tehnologija ima svoj raspon primjene prema radnom kapacitetu. Primjerice, reaktori s pomičnim ložištem koriste se za manje snage između 10 kW i 10 MW, dok se reaktori sa fluidiziranim slojem implementiraju u radne kapacitete u iznosu između 5 MW i 100 MW, a reaktori sa raspršujućim slojem za snage iznad 50 MW. Ti su rasponi prikazani na Slici 2-4. [5]



Slika 2-4 Tipovi reaktora prema opsegu snage [5]

### 2.2.1. Opis tehnologija reaktora

Tijekom plinifikacije dolazi do potpunog termičkog raspadanja čestica biomase u već navedeni sintetski plin, pepeo i hlapljive elemente u prisutstvu oksidacijskog reagensa koji može biti zrak, čisti kisik, vodena para, ugljikov dioksid i slično. Plinifikacija se odvija u uvjetima kada je pretižak zraka manji od 1, odnosno kada je stehiometrijska količina zraka na ulazu manja od one potrebne za potpuno izgaranje, u dvofaznom endotermnom procesu. U prvoj su fazi hlapljive komponente goriva isparene na temperaturi ispod 600°C u kojem nije potrebna prisutnost oksidacijskog reagensa. U isparenoj fazi hlapljivih elemenata nalaze se ugljikovodici, vodik, ugljikov monoksid, ugljikov dioksid, katran i vodena para. Također su produkti drveni ugljen i pepeo. U drugoj fazi, ugljen biva plinificiran u reakciji s kisikom, vodenom parom, ugljičnim dioksidom i/ili vodikom. U nekim plinifikacijskim procesima dio ugljena izgara kako bi oslobodio toplinsku energiju za potrebe endotermne reakcije. Količinski udjeli sudionika i sama količina plina dobivenog ovim procesom ovisi o oksidacijskom reagensu, temperaturi, tlaku, brzini oslobađanja topline te karakteristikama biomase.[10] U nastavku su prikazane glavne kemijske jednadžbe koje se odvijaju u reaktorima preuzete iz [10].

**Primarno rasplinjavanje**

Biomasa → Primarni katran(CHxOy)  
CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O  
ugljen

**Krekiranje**

Primarni katran → Sekundarni katran  
CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>

**Homogene plinske reakcije**

		<b>dH</b>
Sekundarni katran	→ C, CO, H <sub>2</sub>	
H <sub>2</sub> + 0,5 O <sub>2</sub>	→ H <sub>2</sub> O	-242 kJ/mol
CO + 0,5 O <sub>2</sub>	→ CO <sub>2</sub>	-283 kJ/mol
CH <sub>4</sub> + 0,5 O <sub>2</sub>	→ CO + 2 H <sub>2</sub>	-110 kJ/mol
CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub>	→ 2 CO + 2 H <sub>2</sub>	+247 kJ/mol
CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	→ CO + 3 H <sub>2</sub>	+206 kJ/mol
CO + H <sub>2</sub> O	→ CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	-40,9 kJ/mol

**Heterogene reakcije**

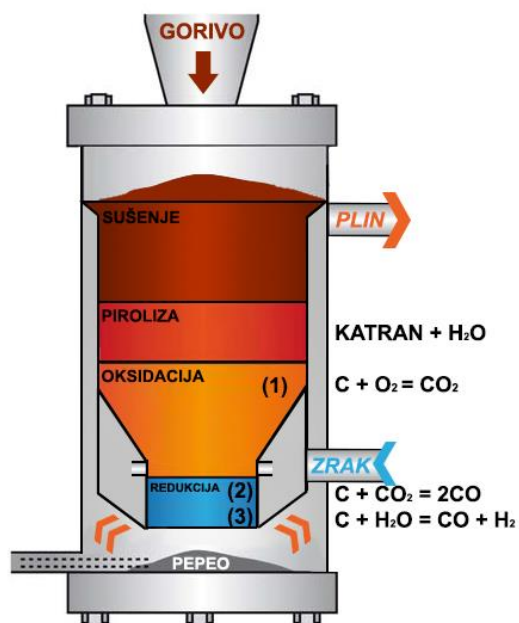
C + O <sub>2</sub>	→ CO <sub>2</sub>	-393,5 kJ/mol
C + 0,5 O <sub>2</sub>	→ CO	-123,1 kJ/mol
C + CO <sub>2</sub>	→ 2 CO	+159,9 kJ/mol
C + H <sub>2</sub> O	→ CO + H <sub>2</sub>	+118,5 kJ/mol
C + 2 H <sub>2</sub>	→ CH <sub>4</sub>	-87,5 kJ/mol

**Reaktori sa fiksnim slojem**

Kao što je već navedeno, ovaj tip reaktora može biti sa silaznom, uzlaznom ili poprečnom ozrakom.

**Reaktori sa silaznom ozrakom**

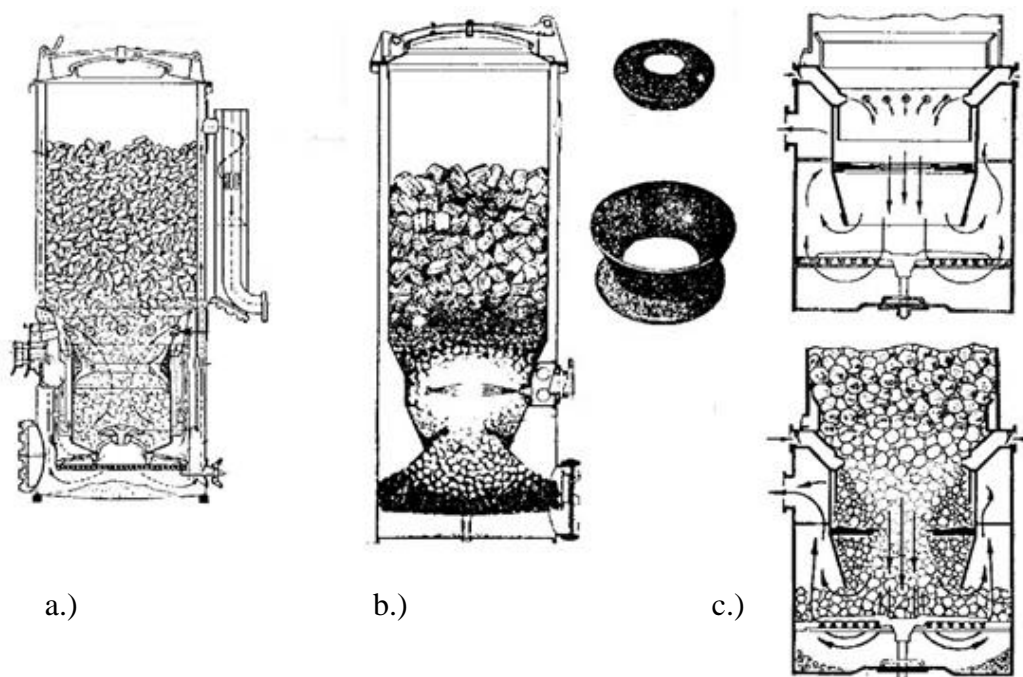
Konstruirani su kako bi pretvarali drvo ili općenito biomasu u sintetski plin sa vrlo niskim udjelom katrana te se pokazao kao najuspješniji dizajn za korištenje u energetskim postrojenjima. Ilustriran je slikom 2-5. Ovaj se tip reaktora ponekad naziva i Imbertovim reaktorom. Prema principu rada mogu biti tlačni i potlačni, ovisno o tome je li nanesen viši tlak u svrhu



Slika 2-5 Ilustracija reaktora sa silaznom ozrakom

protoka zraka kroz gorivo ili je protok zraka prouzrokovan potlakom u bazi reaktora. Uglavnom se koriste potlačni reaktori. Na slici 2-5 nalazi se ilustracija ovog tipa reaktora. Iznad suženog grla nalazi se biomasa u zoni pirolize i sušenja, unutar grla dešava se oksidacija, odnosno izgaranje biomase, a ispod grla odvija se proces redukcije. Reaktor se tijekom procesa mora puniti svakih par sati ovisno o konstrukciji.

Prema slici 2-6 a.), gornji cilindrični dio unutarnje komore je jednostavno spremnik drva. Tijekom pogona, ova je komora punjena svakih par sati ovisno o konstrukciji reaktora. Poklopac na vrhu reaktora u sklopu je sa oprugom i otvara se tijekom punjenja reaktora, a po završetku punjenja oprugom se zatvara, te je tijekom pogona zatvoren. Ta je strana pretlačna pa opruga ima svrhu držanja poklopca u zatvorenom položaju, a u slučaju eksplozije plina djeluje kao sigurnosni ventil koji se otvara. Na otprilike jednoj trećini visine reaktora od dna, radijalno su postavljene mlaznice za zrak koje su usmjerene u smjeru dolje kako bi usmjerile zrak i plinove prema dnu reaktora.



**Slika 2-6 a.) Reaktor sa „Imbertovim“ srcem, b.) reaktor sa redukcijom V oblika, c.) reaktor sa redukcijom na ravnoj ploči. [3]**

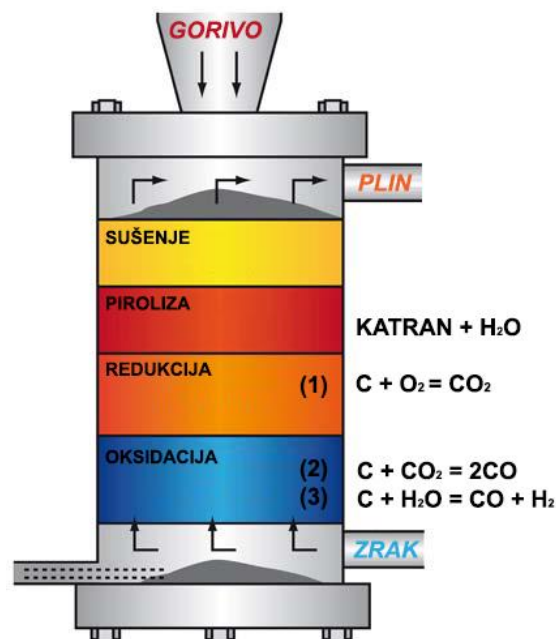
Uobičajeno je da postoji neparan broj mlaznica tako da vrući plinovi izgaranja skupa sa zrakom ne bi ometali suprotnu mlaznicu. Mlaznice su spojene na distribucijski cjevovod koji je spojen na vanjsku stjenku grla. Ovaj je vod spojen preko vanjske stjenke cilindra na dovod zraka. Tijekom pogona, nadolazeći zrak spaljuje i potiče pirolizu drva, katrana, ulja i gornjeg sloja ugljena koji se nalazi ispod mlaznica. Većina mase goriva pretvorena je u sintetski plin u području zone oksidacije. Ovakav reaktor je na više načina samo-podešavajući. Primjerice, ako nema dovoljno ugljena u zoni oksidacije, više će drva biti podloženo pirolizi i proizvoditi će se više ugljena. Obrnuto, ako ima više proizvedenog ugljena, sloj pirolize biti će samim time smanjen zbog povećanja sloja ugljena preko područja mlaznica. Proizvodnja ugljena će tada biti smanjena pa će se na taj način razina ugljena stvorenog pirolizom održavati na razini mlaznica zraka. Ispod zone izgaranja nalazi se zona redukcije plina. Ta je zona ispočetka bila Imbertovog oblika koja se nazivala „Imbertovo srce“ pa se V oblik nakon njega pokazao efikasniji, a u novija vremena pojavila se konstrukcija sa ravnom pločom. Sva tri su ilustrirana slijedećom slikom. „V“ oblik i konstrukcija sa ravnom pločom akumuliraju sloj zadržanog pepela koji predstavlja visokokvalitetnu izolaciju stjenke. Poboljšana izolacija rezultira manjim udjelom katrana u plinu i višoj efikasnosti u širem području opterećenja. Nakon pirolize u kojoj se proizvede katran, ugljen i vodena para, ti se produkti u zoni izgaranja egzotermno tretiraju i na taj način stvaraju ugljični dioksid. Ti se plinovi zajedno sa ugljikom spuštaju u zonu redukcije gdje tvore ugljični monoksid i vodik. Redukcija je kemijski proces koji zahtjeva toplinu, stoga zbog svoje endotermne naravi smanjuje temperaturu plina. Ova zona rezultira nestajanjem skoro svog ugljena i poboljšava kvalitetu nastalog sintetskog plina. Uz plin, produkt je i pepeo koji kroz pomičnu rešetku propada u odvodnju pepela. Dio pepela odlazi u struji nastalog plina, no iz tog razloga plin prolazi kroz ciklonski odvajač ili filter. Uobičajeno drvo sadrži manje od 1% pepela, ali uz pepeo u smjesi ostataka nalazi se malo sitnog ugljena pa je ostatak u iznosu između 2 i 10% masenog udjela unesenog goriva. Što je veća redukcija, to će manje biti mješavine ugljena i pepela u ostatku. Vrijeme reakcije ovog tipa reaktora između je vrlo brzih reaktora sa poprečnom ozrakom i sporih reaktora sa uzlaznom ozrakom. Potrebna je vlažnost biomase na manje od 20% vlage i uniformni promjer čestica drvene biomase na ulazu. Stoga se ostaci poput grančica i kore moraju usitniti ili izbaciti iz smjese goriva. [3]

Ovaj je tip reaktora implementiran u više postrojenja u Europi. Primjerice, Kogeneracijsko postrojenje kapaciteta 1MW u Italiji, Forno di Zoldo, 70kWe u Quingenstole, Italija, 960kWe

i 3.2 MWth u talijanskom gradu Gadesco Pieve Delmona sa statusima TRL 9. Također u Njemačkoj 130 kWe i 280 kWth u Sulzbach-Laufen sa TRL 9, kao i 1MWe u njemačkom gradu Pfazfeld, kao i brojni drugi. U Hrvatskoj su u lipnju 2018. puštena u komercijalni pogon dva postrojenja. Jedno u Virovitici, a drugo u Daruvaru svako snage 550kWe. [12]

### Reaktori sa uzlaznom ozrakom

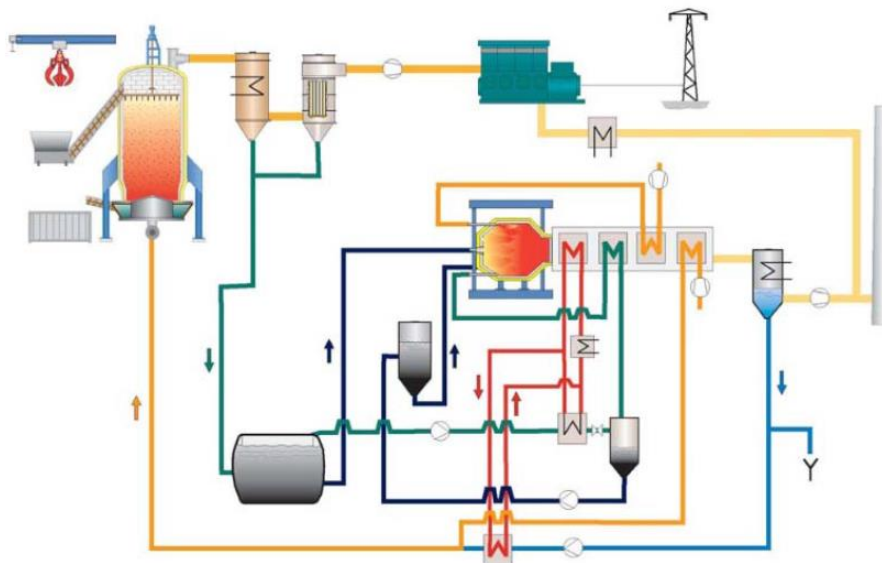
Funkcioniraju na način da se gorivo ubacuje s vrha, a zrak protusmjerno struji iz rešetke na dnu. Potrebno je hladiti rešetku cirkulacijom vode ili recirkulacijom plinova kako bi smanjili temperaturu prve reakcije zbog zaštite rešetke i sprječavanja stvaranja mulja. Stvoreni plinovi putujući uzlazno predaju svoju toplinu gorivu te započinju u prvom sloju pirolizu, a u drugom sušenje goriva. Sav katran u sintetskom plinu nastaje u zoni hlađenja pri nižim temperaturama. Ovi su reaktori limitirani na snagu od 10 GJ/h za metar kubni površine reaktora zbog stvaranja mulja, stabilnosti slojeva, pregrijavanja reaktora i slično. Široko su korišteni u plinifikaciji ugljena, sintetskog ugljena i koksa već proteklih 150 godina, no s obzirom da se ovim načinom povećava udio katrana (5-10%) u reaktorskom plinu, ovaj sustav nije praktičan za energetska postrojenja u kojima se koristi proizvedeni plin. Uz visok udio katrana, ovi su reaktori karakterizirani sporim pokretanjem i lošim odzivom zbog vrlo visoke termičke mase u reaktoru koju plin mora probiti. Uglavnom se ovakav tip reaktora koristi u proizvodnji aktivnog ugljena. [3]



Slika 2-7 Ilustracija reaktora sa uzlaznom ozrakom [10]

Trenutno ovakav tip reaktora ima primjerice kogeneracijsko postrojenje 70kWe i 280kWt u vlasništvu Stirling DK u njemačkom gradu Langballig s implementirana dva stirling motora. Još jedna od uspješnih implementacija ovakvog tipa reaktora je postrojenje Harboore u Danskoj koja je isprva bila zamišljena kao proizvođač topline za obližnje naselje spaljujući sirovi plin u bojleru, a 2000. godine je nadograđena sa dva plinska motora za čiju su potrebu morali uvesti i

čišćenje plina. Jedan je plinski motor električne snage 648, a drugi 768kWe. [10] Shema postrojenja prikazana je slikom 2-8.



Slika 2-8 Shema Harboore postrojenja [10]

### Reaktori sa poprečnom ozrakom

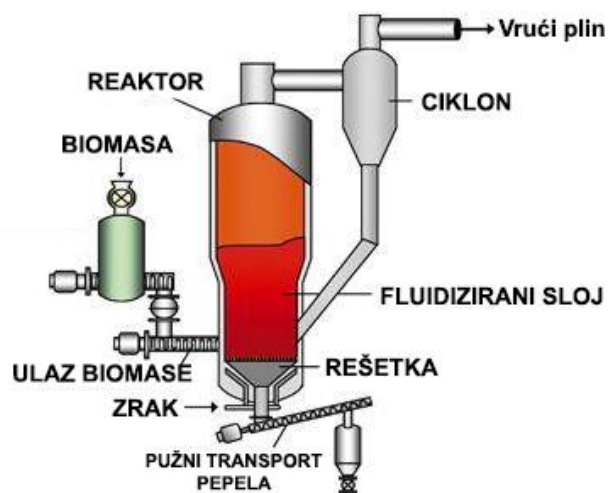
Ovaj je tip reaktora najjednostavnije i najlakše konstrukcije. Zrak ulazi visokom brzinom preko jedne mlaznice i uzrokuje veliku cirkulaciju protokom usmjerenim poprečno od stvorenog sloja goriva. U njima se razvijaju vrlo visoke temperature u malom volumenu te je iz tog razloga produkt sintetski plin sa jako niskim udjelom katrana. Također zbog malog potrebnog volumena reaktora ima vrlo dobar brzu prilagodbu prema radu pogonjenog motora. Gorivo i pepeo čine izolaciju stjenki plinifikatora pa je moguća lakša izvedba ovakvih reaktora osim mlaznice i rešetke koje zahtijevaju implementaciju zračnog ili vodenog hlađenja i korištenje visoko-temperaturnih materijala. Zbog visokih temperatura postoji zahtjev za gorivom sa niskim udjelom pepela kako bi se spriječilo stvaranje mulja koji zagušuje cirkulaciju. Postoji i mogućnost mješovite izvedbe na način da se reaktor sa silaznom ozrakom izvede sa mogućnošću rada u startu poput reaktora sa poprečnom ozrakom kako bi se smanjilo vrijeme postizanja pogonskih parametara i omogućila veća fleksibilnost proizvodnje. Ova je vrsta reaktora uglavnom korištena u plinificiranju ugljena. [10][3]

### Reaktori sa fluidiziranim slojem

U ovom tipu reaktora fluidizacijski medij se propuhuje kroz sloj krutih čestica goriva dovoljnom brzinom da tvori stanje suspenzije. Sloj je zagrijavan, a plin se počinje tvoriti kada se dostigne dovoljno visoka temperatura. Gorivo se ubacuje na dnu, u sloj ili iznad sloja. Čestice se vrlo brzo miješaju sa fluidiziranim slojem i gotovo su trenutno ugrijane na temperature sloja. Rezultat je takvog djelovanja vrlo brza piroliza goriva zbog koje se proizvodi velika količina plina sa snage do 40 GJ/h. U zoni rasplinjavanja dešavaju se reakcije krekiranja. U ovim reaktorima postoji mogućnost plinificiranja materijala sa višim udjelom pepela i generalno su prikladniji za postrojenja većih snaga. Unutar fluidiziranog sloja temperature se kreću između 750 i 900 °C, a te temperature nisu dovoljno visoke za krekiranje svog katrana, pa je potrebno osigurati dodatne mjere kako bi dobili sintetski plin bez katrana.[10]

### Ključajući reaktori sa fluidiziranim slojem (BFB-bubbling fluidized bed)

Riječ je o reaktoru sa stacionarnim fluidizirajućim slojem u kojem materijal poput kvarcnog pijeska, silikata sa udjelom magnezija, željeza i drugih metalnih elemenata i slično formira ključajući visoko turbulentan fluidizirajući sloj. Plinifikacijski reagens (zrak, vodena para i sl.) ulazi na dnu reaktora sa dovoljnom brzinom da stvara takav sloj, ali ne prevelikom kako ne bi odnio čestice sloja dalje sa plinom.



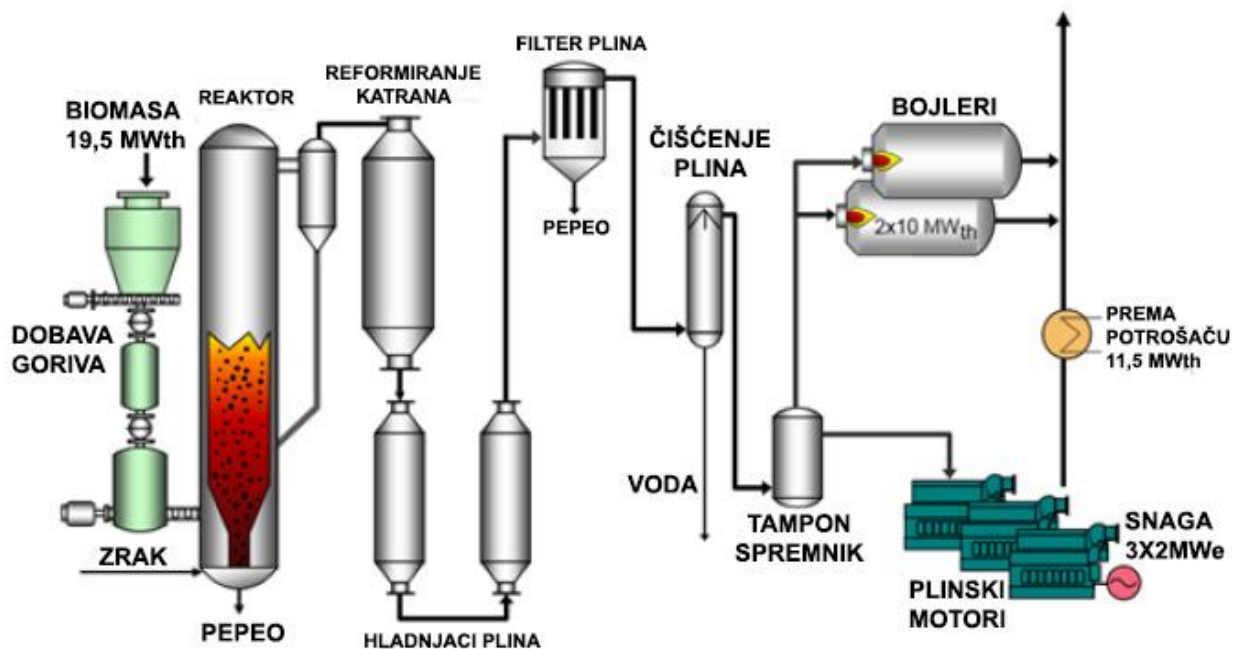
Slika 2-9 Ilustracija BFB reaktora [7]

U ovim je uvjetima biomasa koja se općenito ubacuje sa strane optimalno izmiješana sa slojem, pa na taj način dolazi do brze pirolize i ujednačenih uvjeta pirolize i plinifikacije u reaktoru. Plinovi nastali pirolizom zajedno sa česticama pepela napuštaju fluidiziran sloj, a zbog visoke temperature nastupaju daljnje heterogene i homogene reakcije. Što je reaktor viši, manji je udio katrana u proizvedenom plinu. Iz reaktora uobičajeno plin sa preostalim česticama ulazi u



ciklonski odvajач koji odvaja pepeo i katran koji se spuštaju nazad u reaktorski fluidiziran sloj. Najveća je prednost fleksibilnost na promjene vlažnosti goriva i udjela pepela u gorivu, kao i mogućnost plinifikacije goriva koja sadrže pepeo sa niskim talištem. Najveća je mana visoki udio katrana i prašine, što zahtjeva prikladno čišćenje, kao i visoka temperatura nastalog plina. [10] Ilustracija ovakvog reaktora prikazana je slikom 2-9.

Jedan od primjera dobre prakse ovakvog reaktora nalazi se u Danskoj pod imenom „Skive“ [17]. Shema ovog postrojenja prikazana je slikom 2-10. Bazirana je na niskotlačnom BFB reaktoru sa tri plinska motora po 2MWe svaki. Ovo je prvo postrojenje ovakvog tipa, a financirano je od strane EU, Ministarstva energetike SAD-a i Danske energetske agencije (DEA). Postrojenje proizvodi 30% više električne energije od konvencionalnog parnog procesa sa istom dobavom biomase [10].



Slika 2-10 Shema „Skive“ postrojenja u Danskoj [17]

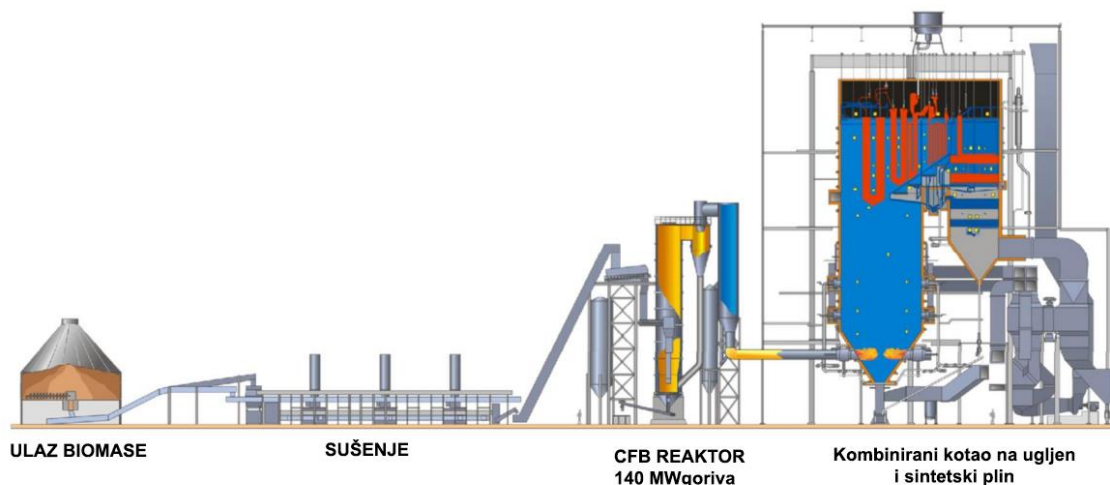
## Reaktori sa kružnim (cirkulirajućim) fluidiziranim slojem (CFB-Circulating fluidised bed)

Pokreću suspenziju čestica biomase kroz vruće ložište u kojem se provodi piroliza, izgaranje i redukcija te na taj način proizvodi sintetski plin. Ova je vrsta reaktora, kao i reaktori sa fluidizirajućim slojem, pogodna za veće snage [3]. Glavna razlika ovog i BFB reaktora jest da se plinifikacijski medij upuhuje pri većim brzinama, što dovodi do prenošenja materijala iz fluidiziranog sloja u struji plina skupa sa pepelom. U ovom slučaju nema razdvajanja fluidiziranog sloja i zone plinifikacije. Skupa sa pepelom, fluidizacijski sloj je odvojen u ciklonskom odvajaću i vraćen nazad u glavni reaktor. Prednosti i mane su jednake kao kod BFB reaktora, a razlika je ta što je ovaj tip prikladan za još veće snage [10]. Ilustriran je slikom 2-11.



Slika 2-11 CFB reaktor [18]

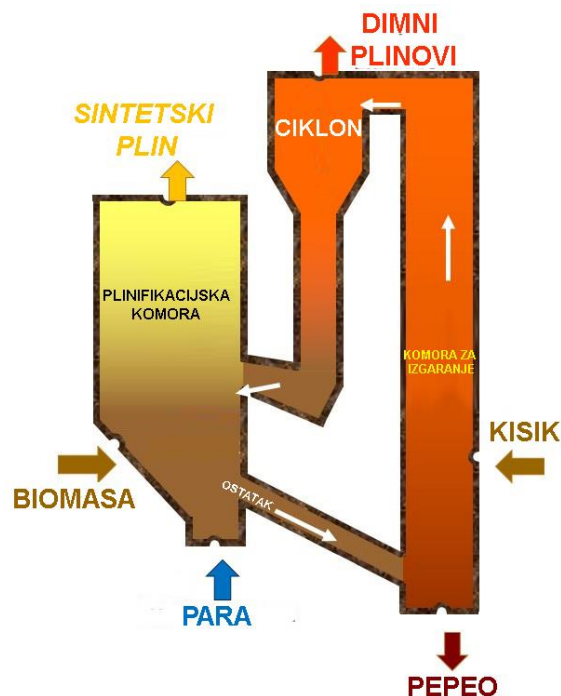
Jedno od postrojenja u kojem je utiliziran CFB reaktor je Vaskiluodon postrojenje u gradu Vaasa na zapadnoj obali Finske. Maksimalan ulazni kapacitet goriva iznosi 560 MW, a produkt je 240 MWe i 170 MWt. U ovom je postrojenju u pogonu najveći reaktor ovog tipa, a produkti se spaljuju u kotlu (i ispušnim plinovima pogonjenom turbinom) u kombinaciji sa ugljenom te godišnje mogu smanjiti potrošnju ugljena za 25-40% i emisiju ugljičnog dioksida za 230 000 tona. U početku je ugljen bio primarni energent ovog postrojenja, no ovom nadogradnjom prelazi u ekološki prihvatljiviji tip postrojenja zbog manje emisije SO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub>. Također planirano je kompletno prebacivanje na sintetski plin, što bi se pokazalo kao dobar primjer prenamjene elektrane na ugljen [19]. Shematski je postrojenje prikazano na slici 2-12.



Slika 2-12 Shema Vaskiluodon postrojenja [19]

### Reaktori sa fluidiziranim slojem i dvostrukim ložištem

Cirkulirajući fluidizirani sloj je iskorišten kao prijenosnik topline. U prvom fluidiziranom sloju dešava se plinifikacija te se materijal fluidiziranog sloja prenosi u drugu komoru u kojoj se izgaranjem dijela tog sloja oslobađa toplina potrebna za plinifikaciju u drugom stupnju. Ostatak koji nije plinificiran vraća se u prvotnu komoru. Glavne su prednosti ovog tipa mogućnost optimizacije izgaranja i plinifikacije zasebno. Zbog fizičke odvojenosti moguće je provoditi izgaranje sa zrakom, a plinifikaciju sa nekim drugim reagensom poput pare što dovodi do veće kvalitete sintetskog plina [10].



Slika 2-13 Reaktor sa fluidizirajućim slojem i dvostrukim ložištem [20]

Primjer postrojenja koje radi sa ovakvim reaktorom je u Güssingu, Austrija. Proizvodi 4.5 MW<sub>th</sub> i 2 MW<sub>e</sub> sa plinskim motorom. Korištena biomasa ima udio vlage između 25 i 40% [10].

Glavne tehnološke i ekološke značajke postrojenja s rasplinjavanjem biomase do sad prikazanom tehnologijom nalaze se u slijedećoj tablici [12].

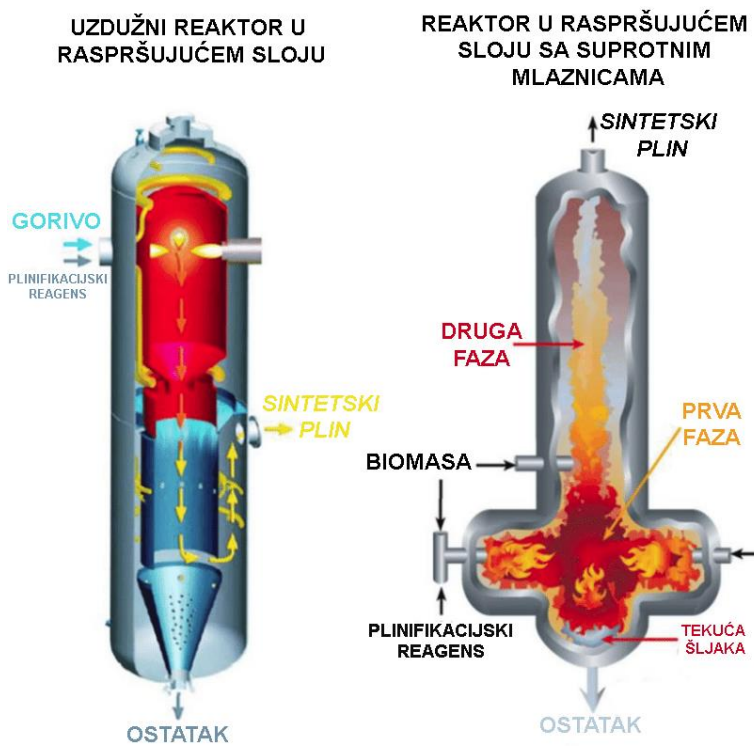
**Tablica 1 Karakteristike reaktora sa fiksnim i fluidiziranim slojem**

		na rešetki		u fluidiziranom sloju	
	jedinica	istostrujni	protustrujni	stacionarni	cirkulirajući
Sadržaj katrana	g/Nm <sup>3</sup>	0,1 - 6,0	10 - 150	1 - 23	1 - 30
Sadržaj čestica	g/Nm <sup>3</sup>	0,2 - 8,0	0,1 - 3,0	1 - 100	1 - 800
Ogrjevna vrijednost	MJ/Nm <sup>3</sup>	4,0 - 5,6	3,7 - 5,1	4,0 - 5,0	3,6 - 5,9
Snaga postrojenja	MW	0,05 - 7,0	0,05 - 7,0	5 - 20	10 - 100
Zahtjevi na sirovinu	---	veliki komadi, vlaga < 30%	vlažnost do 50%	viši zahtjevi na veličinu, vlagu i udio pepela u usporedbi s rešetkom	

### ***Reaktori u raspršujućem sloju***

Princip ovih reaktora razlikuje se od dosad prikazanih jer materijal podložen plinifikaciji ulazi na vrhu zajedno sa plinifikacijskim reagensom i izgara u startu, a u nekim konfiguracijama postoje i dodatni plamenici koji osiguravaju potrebnu energiju za plinificiranje. Uobičajeno je da funkcioniraju na iznimno visokim temperaturama i tlakovima od čak 1 200 °C i 100 bara pretlaka. Takvi uvjeti rezultiraju plinom sa vrlo niskim udjelom katrana i metana, a stjenke ovih reaktora obavezno moraju biti hladene. Troska i pepeo uz stjenke reaktora štite od korozije. Zbog visokih temperatura, rastaljeni pepeo se odvaja u tekućem obliku nakon hlađenja plina, što pogoduje korištenju goriva sa niskom temperaturom tališta pepela. Uobičajeno se koristio

u plinifikaciji ugljena i sirove nafte, ali se u kombinaciji sa uzlaznom nisko-temperaturnom pirolizom može primijeniti za plinificiranje biomase kao što je prikazano na slici 2-14 desno. U tom slučaju bi plin nastao pirolizom u drugoj fazi bio korišten kao gorivo u kombinaciji sa dobivenim ugljenom iz biomase. Prednost ovog tipa reaktora je vrlo dobra mogućnost regulacije i regulacijski odzivi unutar sekunde u kombinaciji sa visoko kvalitetnim plinom. Mana je s druge strane potreba za materijalima koji podnose ovakve uvjete rada i potreba za usitnjavanjem goriva na promjer oko  $100\mu\text{m}$ , kao i hlađenje plina zbog odvajanja pepela koji je u struji plina u tekućem stanju [10][21]. Uglavnom još uvijek samo pilot postrojenja primjenjuju ove reaktore za plinifikaciju biomase [10].



Slika 2-14 Reaktori u raspršujućem sloju [22]

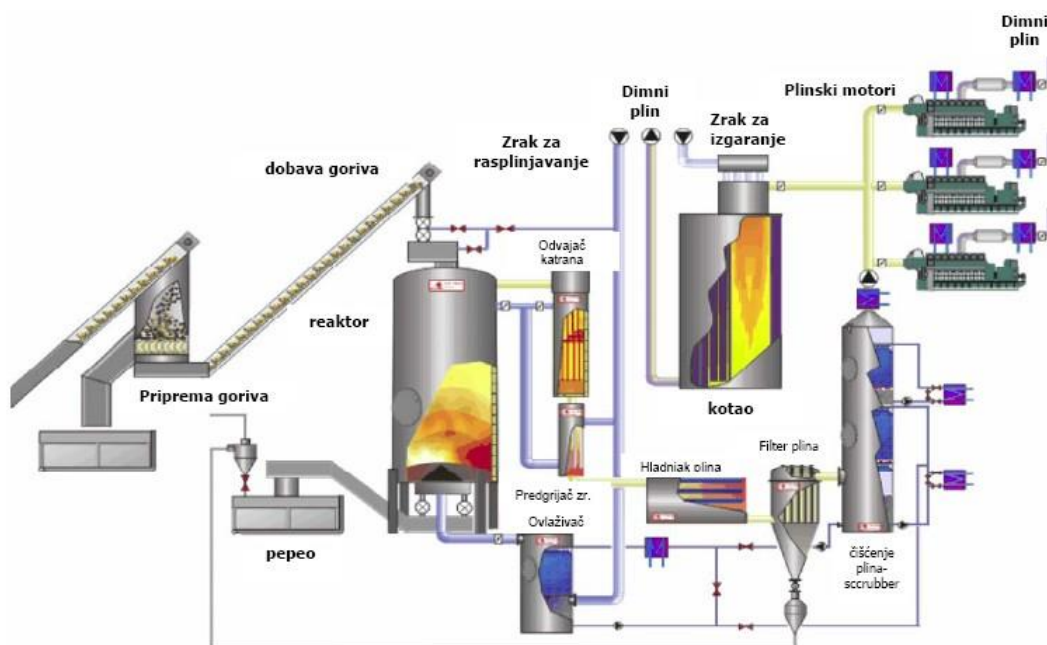
### 2.2.2. Tehnološki procesi

#### Plinski motor

Kogeneracijska postrojenja koja se temelje na rasplinjavanju biomase i izgaranju reaktorskog plina u plinskom motoru, unatoč višoj električnoj iskoristivosti još uvijek ne zauzimaju značajniji tržišni udjel. Razlog ponajprije treba tražiti u svojstvima i sastavu reaktorskog plina koji izrazito ovisi o vrsti biomase i primijenjenoj tehnologiji rasplinjavanja. Reaktorski plin slabe je kvalitete i ogrjevna vrijednost je na razini 15-20 % ogrjevnosti prirodnog plina. Smanjenje ogrjevnosti posljedica je razrjeđivanja plina s dušikom iz

zraka koji je potreban za odvijanje procesa. Ukoliko se kao sredstvo za rasplinjavanje koristi kisik ili vodena para ogrjevna vrijednost reaktorskog plina dostiže i 40% ogrjevne vrijednosti prirodnog plina.

Niža ogrjevna vrijednost reaktorskog plina relativno je malen problem u usporedbi s problemom uklanjanja štetnih tvari koje nastaju procesom rasplinjavanja rasplinjavanja što potvrđuje i izgled tipične konfiguracije postrojenja prikazan na slici 2-8. u kojoj većina komponenti služi pripremi i obradi reaktorskog plina. Reaktorski plinovi dobiveni rasplinjavanjem biomase sadrže različite onečišćivače uključivo i kondenzirajuće ugljikovodike (katrane), čestice, alkalne spojeve i u manjoj mjeri spojeve sumpora i dušika. Ove tvari moraju biti uklonjene prije daljnje eksploatacije reaktorskog plina u svim slučajevima korištenja osim kod izravnog spaljivanja u ložištu kotla (kada se produkti izgaranja zadržavaju dovoljno dugo u ložištu na visokoj temperaturi što omogućava uništavanje štetnih spojeva)[8].



**Slika 2-15 Shema kogeneracijskog postrojenja s rasplinjačem biomase i plinskim motorom[8]**

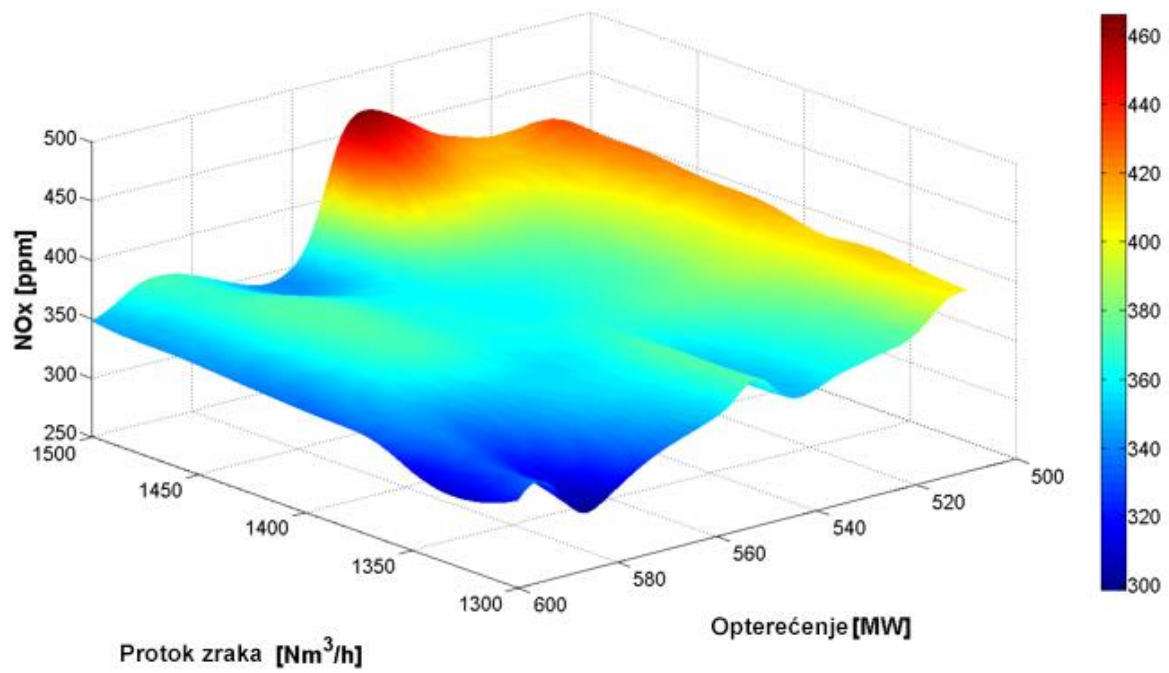
Većina procesa rasplinjavanja koji su u pogonu ili se još razvijaju za uklanjanje onečišćujućih tvari koristi niskotemperaturni postupak. Hlađenjem plina kondenziraju katran i alkalni spojevi dok se čestice uklanjaju konvencionalnim vrećastim filtrima ili elektrostatskim taložnicima. Ukoliko je potrebno koriste se i vlažni postupci eliminacije preostalog katrana i

čestica. Hladni postupak čišćenja reaktorskog plina ima status komercijalne tehnologije iako u termodinamičkom smislu (zbog hlađenja plina) nije najpovoljniji [8].

Uklanjanje onečišćujućih tvari bi se u idealnom slučaju odvijalo na temperaturi i tlaku reakcije rasplinjavanja. Vrući postupak omogućio bi čišćenje plinova bez gubitka toplinske energije sadržane u reaktorskom plinu, ali ovaj postupak još nije komercijalno razvijen. Za pokrivanje toplinskih potreba lokacije toplina se može dobiti hlađenjem ispušnih plinova prije ispuštanja u dimnjak, hlađenjem motora, hlađenjem ulja za podmazivanje, ili izgaranjem plina u namjenskom kotlu. Uobičajeno postrojenje sadrži i vršni kotao koji služi za pokrivanje toplinskih potreba lokacije [8].

### **2.2.3. Regulacija kvalitete plina**

Postoji problematika optimiranja proizvodnje plina u svrhu održanja razine kvalitete plina, što više učinkovitosti procesa, smanjenja emisija i poštivanja ekoloških standarda. Suočavanje sa tim problemima nelinearnog karaktera rješava se razvijanjem matematičkih modela koji se koriste u svrhu predviđanja, odnosno, simulacije ponašanja procesa u svrhu optimiranja procesa i razvoja tehnologije. Bazirani su uglavnom na zakonima održanja mase, energije, momenta gibanja i ravnoteži kemijskih jednadžbi. No, tradicionalni modeli su zbog svoje računске kompleksnosti neprikladni za kontrolu u trenutnom vremenu. Uglavnom su primjenjivi samo za stacionarne pogonske uvjete. Također je moguće uzeti u obzir mali broj pogonskih točaka za optimizaciju, a u predviđanje je uzet jedan ili maksimalno nekoliko pogonskih parametara u obzir. U najnovije vrijeme rade se istraživanja u korištenju umjetne inteligencije, odnosno neuronskih mreža koje ne zahtijevaju poznavanje fizikalnih uvjeta u reaktoru već predviđanja vrše putem algoritama neuronskih mreža i strojnog učenja. Takva vrsta predviđanja zasad bilježi grešku od 10%, što je vrlo dobro za predviđanje parametara plina, iako u marginalnim slučajevima ta greška iznosi do 25%. Vrlo dobro mogu vršiti predviđanje temperature procesa, kvalitete sintetskog plina, dinamike procesa i utjecaja promjene kvalitete biomase. Također je prilagodljiv različitim tipovima rasplinjača, pogonskim uvjetima, a nudi i mogućnost predviđanja u realnom vremenu i regulacije nekoliko pogonskih parametara istovremeno [23]. Primjer predviđanja emisija NO<sub>x</sub> u zavisnosti od protoka zraka i opterećenja neuronskim mrežama dan je slikom 2-16.

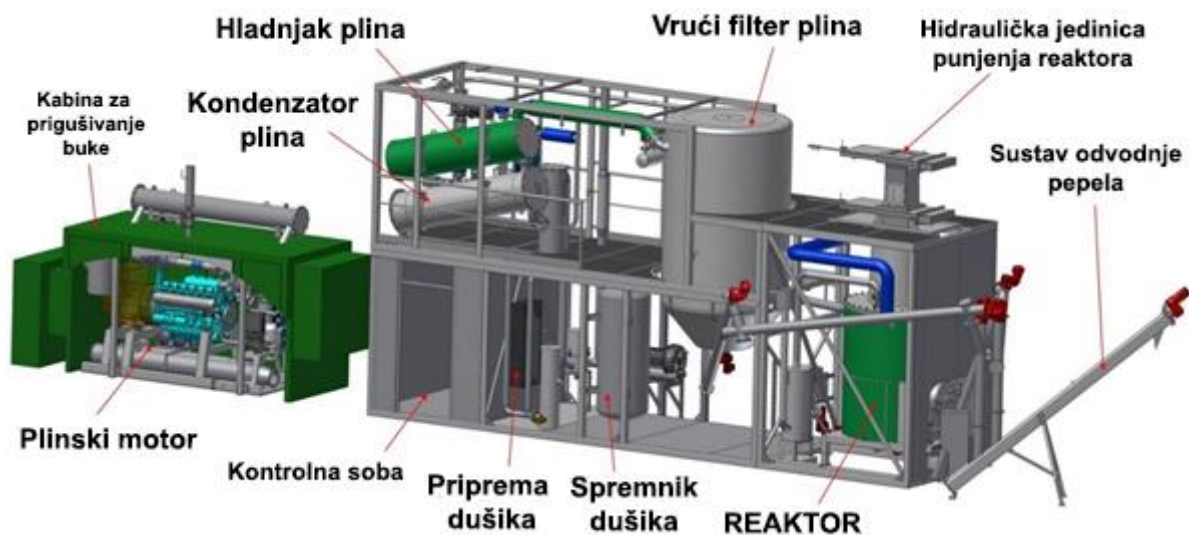


Slika 2-16 Predvidanje emisija NO<sub>x</sub> neuronskim mrežama [23]



### 3. Konfiguracija postrojenja

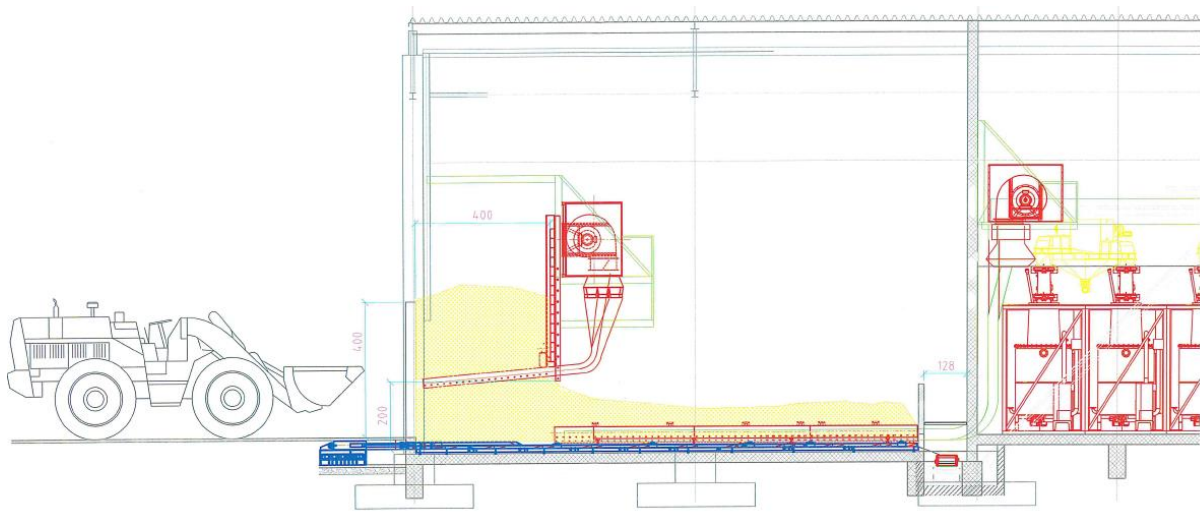
Zadatak je konfigurirati kogeneracijsko postrojenje s motorom s unutrašnjim sagorijevanjem pogonjenim sintetskim plinom. Sintetski plin bi se proizvodio iz drvene biomase putem reaktora sa silaznom ozrakom u nepomičnom sloju. Investitor je procijenio da mu se isplati ulagati u postrojenje snage do 1MWe (netto) i da će za tu snagu imati dovoljnu količinu biomase. Postrojenje je koncipirano za rad s osnovnim gorivom (drvenom sječkom). Predviđeni rad energane je 8000 sati, a utrošak sirovine je predviđen na 9500 tona sječke sa 40% udjela vlage godišnje. U okviru konfiguracije postrojenja, koristiti će se postojeća tehnologija plinifikacije drvene biomase. Prema tim podacima konfigurirati će se gore navedeno postrojenje i provesti tehno-ekonomska analiza cjelogodišnjeg pogona sa stvarnim investicijskim troškovima ovog postrojenja i simulacija upuštanja postrojenja u pogon. Analiza konfiguracije postrojenja započinje sustavom rasplinjavanja. Konfiguracija je zamišljena kroz dvije simetrične linije proizvodnje plina, električne i toplinske energije sa 4 reaktora, jednim filterom plina sa hladnjacima i jednim plinskim motorom u svakoj. Na slici 3-1 prikazana je modularnost tehnologije koja se uvodi. Modularnost je jako bitna jer montiranje postrojenja može biti izvedeno u što kraćem roku, što smanjuje početne troškove instalacije. Na slici 9-1 se vidi modul pripreme plina i modul kogeneracijskog motora.



Slika 3-1 Modul plinifikacije i modul kogeneracijskog motora [9]

*Uz opis postrojenja vrijedno je gledati shemu koja je priložena kao Prilog II.*

### 3.1. Opis sušenja i dobave goriva



**Slika 3-2 Prikaz sušare sa ventilatorima predušenja i sušenja.**

Proces sušenja i dobave gorivom prikazan je slikom 3-2. Tok goriva u postrojenju započinje u prostoru sušare gdje se usitnjena drvena sječka pripremljene vlažnosti doprema na postrojenje kamionima i skladišti u provjetranom grijanom prostoru. Postrojenje za rasplinjavanje koristi običnu sječku iz svježeg šumskog drveta. Glavna frakcija sječke je veličine 20 do 100 mm.

Sječka se suši u konstruiranoj sušari sa profiliranim podom za strujanje zraka na 10% konačnog sadržaj vlage. Samostalno sušenje se provodi putem zagrijanog toplog zraka koji se putem dobavnih ventilacijskih kanala doprema do sušare i upuhuje pri dnu kako bi se osiguralo pravilno strujanje zraka kroz čitavu sušaru. Također, na ulaznom djelu sušare upuhuje se zrak iz prostora kogeneracije u svrhu predušenja. Zagrijani zrak maksimalne temperature 55°C koji struji kroz sušaru dobiva se putem dobavnih ventilatora sa toplinskim izmjenjivačem topline zrak-voda/etilen glikol 30%, a kao ogrjevni medij za zagrijavanje zraka koristi se otpadna toplina iz plinskog motora te sustava za hlađenje sintetskog plina.

Prilikom transporta biomase kroz sušaru zrak struji kroz biomasu, a vlažnost biomase na izlazu se prati uzimanjem uzoraka. Dobavni ventilatori sa toplinskim izmjenjivačima također

---

predstavljaju sigurnosno hlađenje kompletne tehnologije za proizvodnju sintetskog plina, tj. električne i toplinske energije.

Hidraulički upravljani klizni pod unutar sušare vuče drvenu sječku i doprema u horizontalni transporter. Pritisne rešetke se pomiču naprijed, natrag pomoću integriranog hidrauličnog cilindra. Na podnožju držači osiguravaju i sprječavaju povrat materijala. Drvena sječka se dalje transportira putem trakastog horizontalnog prijenosnika van objekta. Na kraju horizontalnog trakastog prijenosnika drvena sječka pada na strmi trakasti transporter koji ju podiže do trakastih transportera sustava za punjenje spremnika. Sustav horizontalnih trakasti transporteri doprema drvenu sječku do svakog hidrauličkog sustava punjenja reaktora. Sječka prolazi kroz sustav za odvajanje finih čestica čija zadaća je ravnomjerno raspodijeliti sječku po cijeloj širini dozatora i razabrati čestice koje se izuzimaju iz procesa. Nakon sustava za odvajanje, sječka se putem dozatora i transportera prenosi u reaktore. Ulazni zaštitni sustav kombinacijom ulaznog vijka za opskrbu propušta odgovarajući materijal do ulazne cijevi u reaktor, odnosno rasplinjač. Odvodni sustav osigurava čvrsto brtvljenje između transportera i rasplinjača. Tu se nalazi relevantno funkcionalno mjerenje ulazne drvene sječke u donjem dijelu ulazne cijevi ispod dvostrukog sustava preklopa, bez ostataka materijala. Tijekom paljenja ili pri drugim kritičnim uvjetima rada ulazni zaštitni sustav drži se zatvoren. Automatsko punjenje reaktora odvija se isključivo tijekom rada ventilatora kojim se osigurava protok zraka.

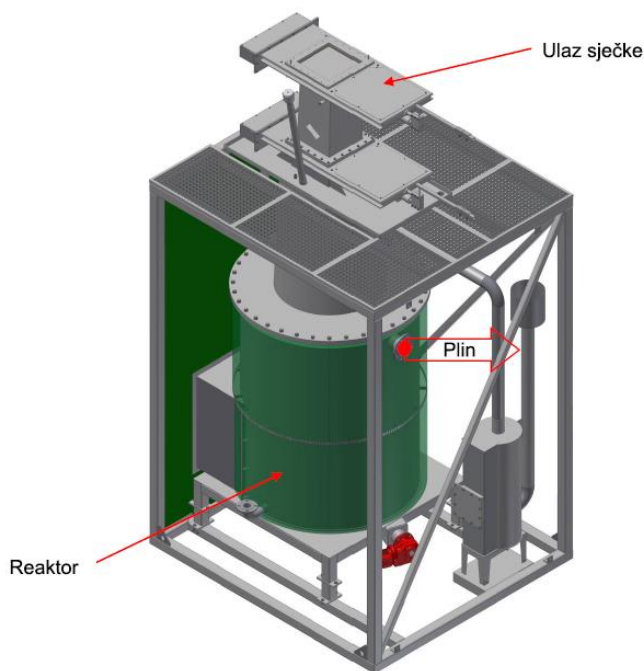
### **3.2. Opis sustava plinifikacije**

Sustav plinifikacije sastoji se od reaktora u nepomičnom sloju sa silaznom ozrakom. Ti su reaktori pogodni za ovaj tip elektrane zbog svog karakterističnog opsega snage do 1MW proizvedenog kapaciteta sintetskog plina. U rasplinjaču, u smjeru strujanja smjese vrši se sušenje, piroliza, oksidacija i rasplinjavanje ili redukcija. Toplina se mora dodati u gornji dio rasplinjača izgaranjem male količine goriva. Dobiveni plin napušta rasplinjač pri visokoj temperaturi, a većina topline se često prenosi na sredstvo za rasplinjavanje dodano u vrhu rasplinjača, što rezultira a energetskom učinkovitošću na razini s protustrujnim tipom. Proizvodni plin se izdvaja pri dnu uređaja, tako da se gorivo i plin pomiču u istom smjeru. Na svojoj putanji prema dolje, kiseline i zakašnjeli produkti destilacije goriva moraju proći kroz užarenu jezgru drvenog ugljena pretvarajući se u postojeće plinove vodika, ugljičnog dioksida,

ugljičnog monoksida i metana. Ovisno o temperaturama u vrućoj zoni i vremenu zadržavanja zaostalih para, postiže se manje ili više potpuno uklanjanje sadržaja katrana. Budući da sav razvijeni katan mora prolaziti kroz vrući sloj ugljena, razina katrana je znatno niža nego kod protustrujnog rasplinjača. Cilindrično kućište izvedeno je kao duplo-stijeno i konstanto hladeno vodom.

Reaktor se sastoji od cilindrične čelične cijevi koja je sužena prema dolje sa sustavom mlaznice kroz koji se zrak upuhuje kao sredstvo za rasplinjavanje. Gorivo se automatskim sustavom (prikazan na shemi dobave goriva u prilogu) dovodi do rasplinjača koji je opremljen osjetnikom razine goriva. Zona sušenja i pirolize je iznad oksidacijske zone, a potrebna toplina dobiva se provođenjem topline i zračenjem. Tijekom procesa pirolize, koji započinje na temperaturi od približno 200 °C, a kreće se do 500 °C, hlapivi sastojci goriva isparavaju. U parnoj smjesi nalaze se ugljični monoksid, vodik, metan, ugljični dioksid, hlapivi katan i voda. Kruti ostatak goriva je drveni ugljen koji se transformira u reaktorski plin s pomoću sredstva za rasplinjavanje (vlažni ili suhi zrak). U zoni oksidacije, proces parne pirolize posebno reagira sa plinifikacijskim sredstvom. Plinovi koji nastaju u oksidacijskoj zoni plinova (CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O) se reduciraju na užarenom ugljenu na CO i H<sub>2</sub> u zoni redukcije. U zoni oksidacije drveni ugljen reagira s kisikom sadržanim u sredstvu za rasplinjavanje i proizvodi reaktorski plin koji je pogodan za opskrbu plinskih motora sa generatorom.

Plinovi se automatski termički zagrijavaju u zoni oksidacije iznad 1000°C, a po izlasku iz zone oksidacije koks i pepeo ulaze u zonu redukcije u kojoj se odvija proces kreiranja. U procesu dolazi do znatnog kreiranja organskih spojeva dugih lanaca u spojevima kratkog lanca i time konverzija katrana u katranskim plinovitim komponentama koji reagiraju u redukcijskoj

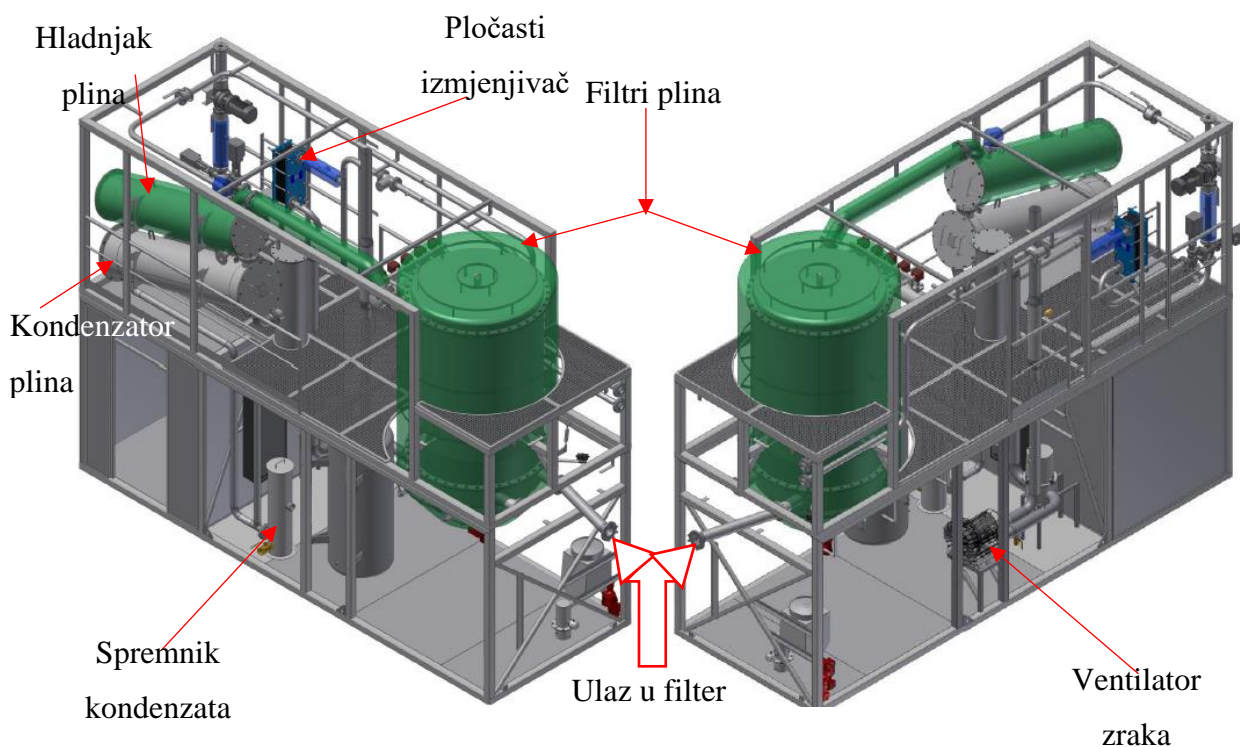


Slika 3-3 Model plinskog reaktora [9]

zoni s koksom i daljnjim stvaranjem plina. Plin izlazi iz sloja ugljena u donjem reaktorskom dijelu i struji između reaktora i vodom hlađene stjenke rasplinjača prema gore.

### 3.3. Opis filtracije i hlađenja plina

Prvi stupanj filtracije sintetskog plina odvija se u visoko-temperaturnom filtru plina. Motor s unutrašnjim izgaranjem usisava plin kroz čitavo postrojenje. Vrući sirovi sintetski plin koji izlazi iz plinskog reaktora vodi se kroz dvoslojno izoliranu cijev u visoko-temperaturni filter za plin. Osim plina, postoji također i pepeo, koji se filtrira u filteru za plin. Periodičko čišćenje filterskih elemenata provodi se puhanjem dušika pod tlakom koji tako pulsira kroz filter. Dušik koji je potreban za rad postrojenja (čišćenje filtra kao i za inertizaciju postrojenja) osigurava se tijekom rada putem automatskog uređaja za separaciju zraka. Filter je opremljen osjetnikom diferencijalnog tlaka čime je omogućeno mjerenje, a samim time i pokretanje čišćenja filtra. Tlačni senzori su instalirani na nečistoj i na čistoj strani, mjereći razlike tlaka. Ako je razlika prevelika, proces čišćenja započinje. Prvo se zatvara ventil koji osigurava sintetski plin motoru s unutrašnjim izgaranjem, kako bi se izbjeglo da tlačni impuls dosegne motor. Motor održava frekvenciju i fazu iz mreže pomoću generatora. Nakon toga se otvara ventil koji je instaliran na strani sirovog plina visoko-temperaturnog filtera.



Slika 3-4 Model čišćenja i hlađenja plina [9]

Nakon čišćenja, filtarski elementi premazuju se sredstvom za predfabriciranje koji povećava učinkovitost odvajanja i jamči dugi vijek trajanja filtera. Kao sredstvo se koristi  $CaCO_3$  prašak kojim se štiti površina filtera i kojim se uklanjaju komponente katrana. Prašina koja se uklanja iz filtera i pepela, kao i iz sredstva za predfabriciranje, automatski se ispuštaju u kontejner za pepeo.

Dušik koji je potreban za čišćenje filterskih elemenata proizvodi se po potrebi u generatoru dušika koji se sastoji od separatora zraka i regulacijske jedinice. Stlačeni se zrak proizvodi putem kompresora, a separator zraka iz ulaznog stlačenog zraka razdvaja dušik i kisik. Razdvajanje se odvija u membrani od šupljih vlakana, a čistoća dušika na izlazu separatora ovisi o tlaku i količini ulaznog zraka.

Nakon filtracije kroz visoko-temperaturni vrući filter, plin se hladi u hladnjaku plina (izmjenjivač topline cijev u cijevi) s konfiguracijom obrnutog protoka, uz korištenje vode kao rashladnog sredstva. Medij za hlađenje plina je voda koja cirkulira u toplovodnom sustavu, te se iskorištava za toplinske potrebe postrojenja.

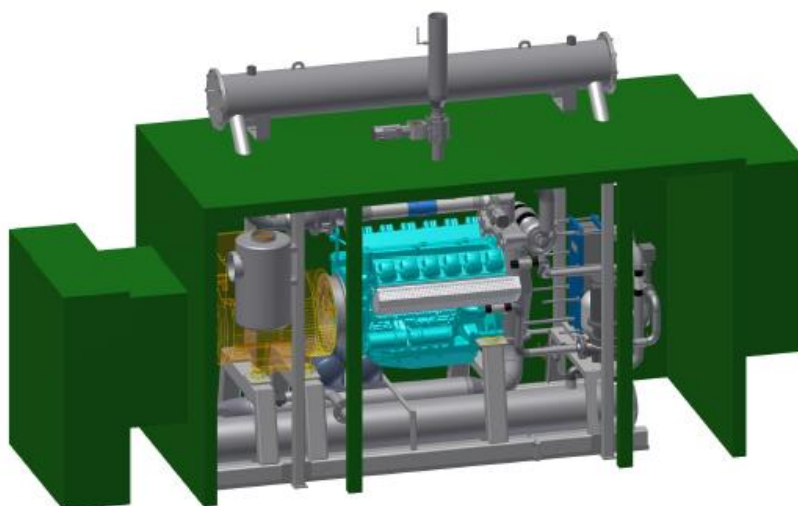
### **3.4. Opis sustava za kondenzaciju plina**

Nakon prolaska kroz hladnjak plina, proizvedeni plin vodi se u kondenzator. Kondenzator je dodatni hladnjak, gdje sintetski plin prolazi kroz izmjenjivač topline plin-voda, pa se plin ohladi na cca. 30°C. Krug vodom hlađenog izmjenjivača topline je zaseban krug hlađenja sa sustavom rashladnog agregata. Stvoreni kondenzat se sakuplja u spremniku za kondenzat i odvodi na obradu putem pumpe, a samom kondenzatoru zbog njegove površine i dizajna omogućeno je jednostavno čišćenje rashladne površine. Proizvedeni plin vodi se do plinskog motora koji se sastoji se od motora s unutrašnjim izgaranjem i sinkronog generatora. Plinski motor radi u optimiziranom pogonu za sintetski plin. Ovakav suhi sintetski plin na ulasku u motor je čisti plin koji u svom sastavu ima isključivo vodik, ugljični dioksid, ugljični monoksid, metan i dušik, a ne sadrži nečistoće, vodu i druge štetne spojeve koje bi dobili izgaranjem biomase.

### 3.5. Opis kogeneracijske motorne jedinice

Plinske kogeneracijske jedinice (plinski motori sa generatorom na slici 3-5) sa pripadajućom opremom, smješteni su svaki u zasebnom prostoru, sa dodatnom zaštitom od buke prema okolini. Unutar samog prostora smješten je plinski motor sa generatorom, pripadajući cjevovodi plinske instalacije kao i cjevovodi za hlađenje motora. Iznad prostora za smještaj plinskog motora smještaju se izmjenjivači topline plin/voda.

Visoko pročišćeni i ohlađeni plin vodi se prema kogeneracijskim jedinicama, odnosno plinskim motorima sa generatorom. Ukupno su predviđena dva plinska motora sveukupne električne snage  $Q_{eluk} = 1\ 100\text{ kW}$ .



**Slika 3-5 Plinski motor sa generatorom [9]**

Svaka kogeneracijska jedinica, sastoji se od pogonskog motora i na njega vezanog generatora električne energije. Motor je klasični motor s unutrašnjim sagorijevanjem, prilagođen zahtjevima plina iz reaktora drvene biomase kao pogonskog goriva i dimenzioniranim na snagu generatora. Generator proizvodi električnu energiju koja se preko odgovarajuće transformatorske stanice distribuira u elektroenergetsku mrežu.

Toplinska energija nastala radom pogonskog plinskog, klipnog, četverotaktnog, Otto-motora s turbo puhalom pogonjenim ispušnim plinovima, je otpadna toplinska energija koja se koristi kao ogrjevni medij za zagrijavanje. Plinska kogeneracijska jedinica je blok izvedbe, što znači da se isporučuje sa svom potrebnom opremom za proizvodnju el. energije i iskorištenje

otpadne topline plinskog Otto-motora (izmjenjivač topline na vodenoj i na zračnoj strani, ulaznoj strani i na strani dimnih plinova, sa pripadnim prigušivačima buke).

Potrebni zrak za izgaranje u plinskom motoru uzima iz prostora u kojem je smješten. Na izlazu ispušnih plinova iz motora montirana je zaštita od plamena sa nadzorom temperature i katalizator koji filtrira NO<sub>x</sub> emisije u dimnim plinovima na manje od 500 mg/Nm<sup>3</sup>. Kao gorivo predviđen je sintetski plin, proizveden u plinskim reaktorima za rasplinjavanje, a zavisno od kvalitete i tlaka iz puhala, vodi se prema kogeneracijskoj jedinici za izgaranje u plinskom motoru i proizvodnju el. energije i/ili prema elektromagnetskom ventilu sa kontrolom nepropusnosti za odvod viška plina prema plinskoj baklji.

Opskrba motora gorivom vrši se putem vidljivog plinovoda na kojem je prije ulaska plina u sam prostor strojarnice postavljena ručna plinska zaklopka za sigurno zatvaranje. Nastali ispušni plinovi iz plinskog motora odводе se putem toplinski izolirane dimovodne cijevi prema izmjenjivaču topline iznad prostora za smještaj plinskog motora. Izmjenjivač topline izveden je kao protustrujni cijevni izmjenjivač topline dimni plinovi/voda.

Nakon izlaska iz izmjenjivača topline ispušni plinovi odводе se preko ispušne cijevi te cijevnog prigušivača buke iznad nivoa krova građevine. Dimovodne cijevi, kao i svi elementi sustava ispušnih plinova trebaju biti izrađeni od nehrđajućeg lima za tu namjenu.

Sustav hlađenja motora pokreće se prilikom startanja generatora i kada temperatura rashladnog sredstva (voda/etilen glikol 30%) pređe 85°C. Rashladno sredstvo distribuira se prema izmjenjivaču topline rashladno sredstvo - voda/etilen glikol 30% gdje se izmijenjena i dobivena toplina na izmjenjivaču koristi dalje u za proces sušenja.

### **3.6. Opis toplovodnog sustava**

Toplovodni sustav prikazan je na shemi u prilogu IV. Ukupna proizvedena toplina u procesu rasplinjavanja (toplina dobivena hlađenjem reaktora, toplina dobivena hlađenjem plina) te toplina dobivena hlađenjem plinskog motora kruži u zatvorenom krugu i predstavlja rashladni krug hlađenja proizvodne opreme i plinskog motora. Rashladni cirkulacijski krugovi na sebi će imati cirkulacijske pumpe rashladnog medija, regulacijskog sklopa, spojnih cjevovoda te prateće zaporne i regulacijske armature. Dobivena toplinska snaga iz procesa tehnologije  $Q=1780 \text{ kW}$  dovodi se na zajednički sabirnik na koji su spojeni sekundarnim



potrošači sušara, sustav radijatorskog grijanja i pripreme PTV-a te sigurnosni suhi hladnjak koji preuzima višak topline predviđenog radnog učina 560 kW.

### **Polazni razdjeljivač**

Cirkulacija tople vode 90°C od plinskih motora i tehnologije omogućena je predviđenim cirkulacijskim pumpama. Predviđena su ukupno četiri priključka za snabdijevanje razdjeljivača ogrjevnom vodom 90°C i to:

- polaz kruga primarnog hlađenja plinskih reaktora 1-4 i izmjenjivača topline hlađenja sintetskog plina linije 1
- polaz kruga primarnog hlađenja dimnih plinova, motora i sintetskog plina prije ulaza u motor linije 1
- polaz kruga primarnog hlađenja rasplinjača 5-8 i izmjenjivača topline hlađenja sintetskog plina linije 2
- polaz kruga primarnog hlađenja dimnih plinova, motora i sintetskog plina prije ulaza u motor linije 2.

Na razdjeljivaču se osim primarnih krugova predviđaju sljedeći ogranci:

- povrat kruga izmjenjivača topline sušare linije 1
- povrat kruga izmjenjivača topline sušare linije 2
- povrat kruga sigurnosnog suhog hladnjaka
- povrat kruga potrošnje toplinske energije (radijatorsko grijanje pomoćnih prostora, priprema PTV i sl.).

### **Povratni razdjeljivač**

Cirkulacija tople vode 70°C od izmjenjivača topline iz sušare linije 1, izmjenjivača topline iz sušare linije 2, sigurnosnog suhog hladnjaka topline i kruga vlastite potrošnje toplinske energije omogućeno je predviđenim cirkulacijskim pumpama sa svom pripadajućom

---

regulacijskom, mjernom i zapornom opremom i armaturom. Predviđena su ukupno četiri kruga za snabdijevanje razdjeljivača ogrjevnom vodom 70°C i to:

- polaz kruga izmjenjivača topline sušare linije 1
- polaz kruga izmjenjivača topline sušare linije 2
- polaz kruga sigurnosnog suhog hladnjaka
- polaz kruga potrošnje toplinske energije (radijatorsko grijanje pomoćnih prostora, priprema PTV i sl.).

Na razdjeljivaču se osim primarnih krugova predviđaju sljedeći ogranci:

- povrat kruga primarnog hlađenja plinskih reaktora 1-4 i izmjenjivača topline hlađenja sintetskog plina linije 1
- povrat kruga primarnog hlađenja izmjenjivača dimnih plinova, motora i sintetskog plina prije ulaza u motor linije 1
- povrat kruga primarnog hlađenja rasplinjača 5-8 i izmjenjivača topline hlađenja sintetskog plina linije 1
- povrat kruga primarnog hlađenja izmjenjivača dimnih plinova, motora i sintetskog plina prije ulaza u motor linije 1.

Svi priključci bit će opremljeni vlastitom cirkulacijskom pumpom, vlastitim mjerilom utroška toplinske energije te svom pripadajućom mjernom, regulacijskom i zapornom armaturom.

Razdjeljivači su antikorozivno zaštićeni, toplinski izolirani u zaštitnoj oblozi od Al lima i predviđeni za montažu na pod. Na njima su osim spomenutih priključaka predviđeni i priključci za ventile za ispust, manometre i termometre, priključak za obilazni vod (by-pass), te priključak za ekspanzijski uređaj.

### 3.7. Opis ventilacije prostora kogeneracijske jedinice

Unutar prostora plinske kogeneracijske jedinice predviđena je prisilna rashladna ventilacija. Zbog disipacije toplinske energije opreme (plinski motor, el. generator, cjevovodi ispušnih plinova i sl.) unutar predmetnog prostora potrebno je dovesti iz vanjskog prostora veću količinu svježeg rashladnog zraka kako bi se temperatura unutar prostora održavala ispod 50°C, od kojeg se dio koristi za izgaranje u plinskom motoru. Svježi rashladni zrak dovodi se u prostor putem frekvencijski upravljanih ventilatora i prigušivača buke u zajedničkom kućištu ugrađenom na vanjskom zidu. Dobavni ventilator ima mogućnost varijabilne dobave svježeg zraka ovisno o opterećenju kogeneracijske jedinice, te temperaturi svježeg zraka i temperaturi zraka unutar prostora. Rashladni zrak tako struji preko el. generatora, plinskog motora i instalacije dimnih plinova, koje se na taj način rashlađuju. Zagrijani zrak odvodi se prestrujavanjem kroz otvor u stropu u okolinu ili putem kanalskog razvoda do sušare biomase za potrebe preosušenja sječke. Regulacija, odnosno preokretanje smjera strujanja otpadnog zraka izvest će se pomoću elektromotornih kanalskih zaklopki.

### 3.8. Opis plinske baklje

Iz tehnoloških i sigurnosnih razloga u sustav rada tehnološkog procesa i plinske kogeneracijske jedinice ugrađena je baklja za spaljivanje plina dimenzionirana za maksimalnu potrošnju plina na plinskim motorima i radni tlak plinskog motora. Plin se, zavisno od kvalitete i tlaka iz puhala vodi prema kogeneracijskoj jedinici za izgaranje u plinskom motoru i proizvodnju el. energije ili na izgaranje na baklji. U slučaju da u plinskom motoru ne izgara plin zbog nekog zastoja onda se plin spaljuje na baklji. Sustav baklje ima na plinovodu sintetskog plina automatski brzo reagirajući ventil, uređaj za automatsko paljenje, plinsku cijev za paljenje sa sustavom zaštite od samozapaljenja, sustav za praćenje plamena, sustav zaštite od samozapaljenja s praćenjem temperature u glavnom dovodu plina. Kod početka rada baklje, dovod plina se otvara nakon preliminarnog puštanja struje zraka, do stupnja potrebnog za paljenje. Kad se pomoću plinskog upaljača baklja upali i kad se stabilizira UV praćenje plamena, dovod plina otvara se u potpunosti. U slučaju greške sustav temperaturnog praćenja i sustav UV praćenja plamena iniciraju zatvaranje brzo reagirajućeg ventila i zatvaranje cjelokupnog sustava. Proces se pokreće ručno radi stvaranja potrebne temperature u zoni

---

sagorijevanja. Potrebno zapreminsko strujanje stvara vakumska crpka. Za fazu paljenja, tj. vrijeme u kojem plin još uvijek nije pogodan za rad kogeneracijskog postrojenja, kao i kod zaustavljanja postrojenja plin se kontrolirano izgara pomoću baklje.

## 4. Tehnički proračuni

### 4.1. Proračun sintetskog plina

U nastavku će se predstaviti potrebne jednadžbe za proračun volumnih udjela sudionika u proizvedenom plinu, te će se analizirati njihove promijene u ovisnosti o dobavi zraka za rasplinjavanje i njegove vlažnosti prema [6]. Također će se proračunati količina dobivenog sintetskog plina i njegova ogrjevna vrijednost kako slijedi.

Projektirani godišnji rad elektrane na nominalnoj snazi:

$$t = 8000 \text{ h}$$

Vlažnost ulazne sječke je:

$$w_0 = 0,4 \text{ kg}_w/\text{kg}_g$$

Na ulazu u prostor sušare imamo osigurani maseni protok sječke u iznosu:

$$m_{g0} = 9\,500 \frac{t}{god} = 1\,187,5 \frac{\text{kg}_g}{h}$$

Za rad reaktora plina potrebna nam je ulazna sječka ciljane vlažnosti:

$$w_1 = 0,1 \text{ kg}_w/\text{kg}_g$$

Maseni protok vode u ulaznoj sječki prema (4).

$$m_{w0} = m_{g0} * w_0 \tag{4}$$

Maseni protok suhe biomase vlažnosti od 0%w prema (5).

$$m_{sg} = m_{g0} - m_{w0} \tag{5}$$

Masa goriva sa ciljanom vlažnosti je prema (6).

$$m_{g1} = m_{sg} + m_{w1} \tag{6}$$

Maseni protok vode u gorivu ciljane vlažnosti je prema (7).

$$m_{w1} = m_{g1} * w_1 \tag{7}$$

Iz prethodne dvije jednadžbe dobijemo:

$$m_{g1} = \frac{m_{sg}}{(1-w_1)} \quad (8)$$

Uvrstivši maseni protok goriva u jednadžbu (7) dobijemo maseni protok vode u reaktor.

Prema tome maseni protok vode koju je potrebno odvesti je:

$$m_{ws} = m_{w0} - m_{w1} \quad (9)$$

Proračunate vrijednosti nalaze se u tablici 2.

**Tablica 2 Maseni protoci goriva i vlage**

$m_{g0}$	1185,5	kg/h
$m_{sg}$	712,5	
$w_0$	40	%
$w_1$	10	%
$m_{g1}$	791,67	kg/h
$m_{w0}$	475	
$m_{w1}$	79,17	
$m_{ws}$	395,83	

U proračun sastava sintetskog plina ulazimo svojstvima ulazne biomase iz [5]. Sastav biomase je zadan masenim udjelima sudionika u gorivu izraženima u masi sudionika po masi suhog goriva vlažnosti 0%. Maseni udio ugljika za gorivo određene vlažnosti dobijemo prema:

$$c = c_0 * (1 - w) [kg_c/kg_g] \quad (10)$$

Gdje je  $w$  vlažnost ulaznog goriva, a  $c_0$  maseni udio ugljika u suhom gorivu. Isto vrijedi za sve ostale sudionike.

Količinu ugljika u gorivu dobijemo prema:

$$C = \frac{c}{M_c} * m_g [kmol/h] \quad (11)$$

Isto vrijedi i za ostale sudionike, gdje  $M$  označava molarnu masu sudionika.

Masa goriva ulazne vlažnosti za jedan reaktor iznosi:

$$m_{g1r} = \frac{m_{g1}}{8} \text{ kg} \quad (12)$$

Proračunati ulazni podaci goriva jednog reaktora za proračun sintetskog plina prikazani su u Tablici 3.

**Tablica 3 Ulazni podaci goriva za jedan reaktor**

$m_{g1r}$	98,958	kg/h					
jedinica	kg/kgsg		kg/kgg		kg/kmol		kmol/h
$c_0$	0,479	<b>c</b>	0,4311	$M_C$	12	<b>C</b>	3,555
$h_0$	0,062	<b>h</b>	0,0558	$M_{H2}$	2	<b>H<sub>2</sub></b>	2,7609
$o_0$	0,433	<b>o</b>	0,3897	$M_{O2}$	32	<b>O<sub>2</sub></b>	1,2051
$n_0$	0,0022	<b>n</b>	0,00198	$M_{N2}$	28	<b>N<sub>2</sub></b>	0,006998
$s_0$	0,00015	<b>s</b>	0,000135	$M_S$	32	<b>S</b>	0,000417
$w_0$	0	<b>w</b>	0,10	$M_{H2O}$	18	<b>H<sub>2</sub>O</b>	0,549769
$a_0$	0,02365	<b>a</b>	0,021285				

Za potrebe proračuna rasplinjavanja bilo kojeg goriva koriste se iste jednadžbe, a razlike u rezultatima ovise o količini ugljika i vodika u gorivu. Ova svojstva goriva opisana su Molierovom karakteristikom  $\sigma$  gdje se vrijednost  $\sigma=1$  dobije za čisti ugljik bez sadržaja vodika,  $\sigma =1,1$  za goriva sa srednjim sadržajem vodika te  $\sigma =1,2$  sa visokim sadržajem vodika. Ova konstanta za biomasu poprima vrijednosti  $\sigma =1,05$ . Pri daljnjim proračunima pretpostavljamo da će se gorivo navedenog sastava u cijelosti raspliniti, a ne da jedan dio suhom destilacijom izmakne rasplinjavanju. Ta je pretpostavka ispunjena kod silaznog rasplinjavanja, odnosno onog koje je primijenjeno u ovom postrojenju jer destilirani sastojci prolaze kroz plinište i sudjeluju u procesu generiranja plina. Kod uzlaznog rasplinjavanja ta pretpostavka ne bi bila istinita.

Jednadžba Molliereove konstante je slijedeća:

$$\sigma = 1 + 3 \frac{h \frac{0-s}{8}}{c} = 1,0494 \quad (13)$$

Kako bi analizirali sastav dobivenog sintetskog plina, količinu i ogrjevnu vrijednost potrebno je navesti jednadžbe dobave zraka gdje će se odrediti minimalna potrebna količina kisika za izgaranje, a potom i stvarna količina suhog zraka koji ubacujemo u reaktor. Utjecaj na rasplinjavanje će imati i vlažnost zraka za rasplinjavanje, te će se i ona uzeti u obzir u slijedećim razmatranjima.

Minimalna potrebna količina kisika za izgaranje:

$$O_{min} = \frac{c}{M_c} * \sigma = 0,03770 \frac{kmol}{kgg} \quad (14)$$

Minimalna potrebna količina zraka za izgaranje:

$$L_{min} = O_{min}/0,21 = 0,17953 \frac{kmol}{kgg} \quad (15)$$

Stvarna količina ubacivanog suhog zraka:

$$L_{stv} = \lambda * L_{min} \quad (16)$$

Gdje je  $\lambda$  faktor pretička zraka.

Ukupan maseni protok zraka:

$$m_{zrak} = \frac{L_{stv} * m_{g1} * M_{zrak}}{1 - w_{zrak}} \quad (17)$$

Gdje je  $M_{zrak} = 28,96 \text{ kg/kmol}$  molarna masa suhog zraka, a  $w_{zrak}$  vlažnost zraka izražena u kgw/kgz.



Za daljnja razmatranja potrebno je izračunati računsku količinu polazne smjese prema kojoj će se svesti svi važni podaci generatorskog pogona. Ona predstavlja sumu količine čistog zraka, količine vode u zraku i količine vode u gorivu. Količina vode u zraku računa se prema:

$$n_{H_2O,zr} = \frac{m_{zrak} * w_{zrak}}{M_{H_2O}} \text{ kmol/h} \quad (18)$$

Količina vode u gorivu potječe jednim dijelom iz higroskopske vode  $w$ , a dijelom iz vezanog vodika prema:

$$n_{H_2O,g} = \left( \frac{w}{M_{H_2O}} + \frac{o-s}{16} \right) * m_{g1r} \text{ kmol/h} \quad (19)$$

Posljedično dobijemo računsku količinu polazne smjese prema:

$$M' = L_{stv} * m_{g1r} + n_{H_2O,zr} + n_{H_2O,g} \text{ kmol/h} \quad (20)$$

Potrošak ugljika  $\xi$  računa se u kmol ugljika po kmol računске količine polazne smjese prema:

$$\xi = \frac{c}{M'} \text{ kmol/kmol} \quad (21)$$

Vlažnost faktične polazne smjese računa se prema:

$$\psi_U = \frac{n_{H_2O,zr}}{L_{stv} * m_{g1r} + n_{H_2O,zr}} \quad (22)$$

Dok se u računsku vlažnost polazne smjese ubraja i vlaga unesena gorivom, a ne samo zrakom pa se računa prema:

$$\psi = \psi_U + \xi(1 - \psi_U) \frac{\frac{w}{18} + \frac{o-s}{16}}{\frac{c}{12}} \quad (23)$$

Za daljnji proračun moramo odrediti temperaturu pliništa. Ona ovisi o više faktora, a to su količina zraka za rasplinjavanje, temperatura zraka za rasplinjavanje, temperatura vode sadržane u gorivu, količina vode u gorivu, količina vode u zraku za rasplinjavanje i njena temperatura, svojstva goriva i količina odvedene topline reaktora. Temperaturu pliništa možemo odrediti prema slici 4-1. Na toj je slici  $i-\psi$  dijagram s ucrtanim izotermama i linijama konstanti  $\xi$ , a opisan je jednadžbom (24).

$$(1 - \psi)i'_U + \psi i_{H_2O} + \xi(q + q_0) = i \quad (24)$$

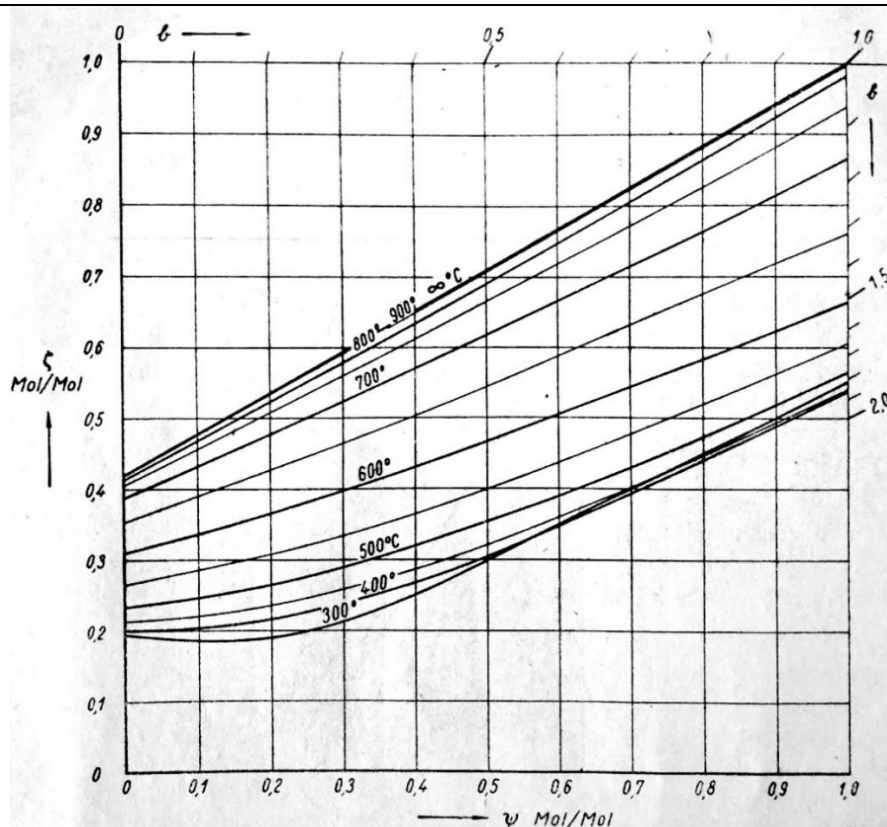
Tu je  $i'_U$  entalpija dovedenog čistog zraka svedena na mol računске smjese, a  $i_{H_2O}$  prosječna entalpija računске vode odnosno vode dodane zraku i vode u gorivu.  $q_0$  predstavlja razliku osjetnih toplina dovedenog goriva i odvedene troske svedene na kmol potrošenog ugljika. Osjetne su topline male, a pogotovo njihova razlika pa će se kod daljnjih računa ta veličina zanemariti. Veličina  $q$  predstavlja toplinu stvaranja goriva, odnosno razliku ogrjevnice goriva i sume donjih ogrjevnih vrijednosti ugljika i slobodnog vodika. Ta se vrijednost računa prema (25).

$$q = \frac{12}{c} * Hd - [97000 + 2 * (\sigma - 1) * 57590] \quad (25)$$

U (25)  $Hd$  predstavlja donju ogrjevnu vrijednost goriva izraženu u kcal po kilogramu goriva, a za drvo iznosi  $Hd = 4039,2$  kcal/kg, odnosno 16,9 MJ/kg. [5]

Za primjenu dijagrama sa slike 4-1 moramo poznavati upotrebljeno gorivo. Iz njegove ogrjevnice i Molliere-ove karakteristike možemo odrediti  $q$ .

U nastavku ćemo iterativnim postupkom odrediti temperaturu pliništa za različite masene protoke vode u zraku za rasplinjavanje. Prvo iz slike 4-1 odredimo pretpostavljenu temperaturu pliništa s obzirom da možemo izračunati računsku vlažnost. Ne znamo potrošak ugljika, ali kao prvu pretpostavku odaberemo potrošak ugljika za onaj unos biomase koji nam je zadan i koji planiramo držati konstantan.



Slika 4-1 ξ-ψ dijagram [6]

Pogrešna procjena temperature nije od utjecaja jer ćemo kasnije odrediti točnu temperaturu u nastavku. Slijedeći je korak odrediti prosječnu entalpiju vode koja se dovodi zrakom i gorivom. Na slici u prilogu VI postoje dvije temperaturne skale s lijeve strane grafa. Donja s naznakom  $H_2O_{tek}$  predstavlja temperaturu predgrijanja tekuće vode u gorivu, te je ona za naš slučaj  $50^\circ\text{C}$ . Skala iznad pokazuje temperaturu predgrijanja vode unesene zrakom, a ona za naš slučaj iznosi  $20^\circ\text{C}$ . Prosječna entalpija vode izražena u kcal po molu računске smjese dobije se tako da se udaljenost između te dvije točke podijeli u omjeru prema izrazu (26).

$$\frac{1-\psi}{1-\psi_U} * \frac{\psi_U}{\psi} \quad (26)$$



Gorivo ima svoju Molliere-ovu karakteristiku koja se razlikuje od karakteristike za upotrijebljeni dijagram na slici u prilogu VI za iznos od 0,05. Prema [6] ovako dobivena temperatura pliništa neznatno se razlikuje od one koji bismo dobili u dijagramu za karakteristiku biomase, stoga je bez izmjene možemo upotrijebiti za daljnje proračune.

U tablici 4 su prikazani dobiveni rezultati koji se odnose za jedan reaktor, a odgovaraju konstantnom masenom unosu biomase prema tablici 3.

**Tablica 4 Rezultati optimalnog omjera vlažnosti i pretička zraka**

$m_w$	0	10	25	50	60	65	kgw/h
$w$	0	6	14	30	42	53	%
$\lambda$	0,35	0,32	0,3	0,23	0,16	0,11	kmol/kmol
$\xi_{gorivo}$	0,39	0,3864	0,3674	0,3619	0,3893	0,4172	kmolc/kmolrs
$\xi_{potrebno}$	0,39	0,385	0,37	0,365	0,39	0,418	kmolc/kmolrs
$\psi$	0,3225	0,3821	0,4493	0,5839	0,6888	0,7707	kmol/kmol
$\vartheta_{plinište}$	590	570	540	490	440	390	°C

Slijedeće veličine potrebne za izračun volumnog udjela sudionika u sintetskom plinu su:  
 $\chi$  - udio stvaranja vodika u sintetskom plinu,

$\mu$ - udio vodika koji se vezao u metan i

$\omega$ - faktor razdiobe kisika na CO<sub>2</sub> i CO.

Sastav vlažnoga plina u kmol/kmol<sub>vsp</sub> je slijedeći:

$$[H_2O] = \frac{(1-\chi-\mu)*[\psi+2\xi(\sigma-1)]}{V_{vl}} \quad (24)$$

$$[H_2] = \frac{\chi[\psi+2\xi(\sigma-1)]}{V_{vl}} \quad (25)$$

$$[CH_4] = \frac{0,5\mu[\psi+2\xi(\sigma-1)]}{V_{vl}} \quad (26)$$

$$[CO] = \frac{2(1-\omega)[0,21(1-\psi)+0,5(\chi+\mu)\psi-\xi(\sigma-1)(1-\chi-\mu)]}{V_{vl}} \quad (27)$$

$$[CO_2] = \frac{\omega[0,21(1-\psi)+0,5(\chi+\mu)\psi-\xi(\sigma-1)(1-\chi-\mu)]}{V_{vl}} \quad (28)$$

Gdje je  $V_{vl}$  količinski udio vlažnog sintetskog plina u 1kmol računске smjese, a dobije se prema:

$$V_{vl} = 0,79(1 - \psi) + (1 - 0,5\mu)\psi + (2 - \omega)[0,21(1 - \psi) + 0,5(\chi + \mu)\psi] + \xi(\sigma - 1)[2 - \mu - (2 - \mu)(1 - \chi - \mu)] \text{ kmol/kmol} \quad (29)$$

Ove jednadžbe proizlaze iz bilanci kisika, vodika, ugljika i dušika između goriva i sintetskog plina te iz definicijskih jednadžbi za  $\chi$ ,  $\mu$  i  $\omega$ . Te se veličine mogu očitati iz slike u prilogu V za  $\sigma=1$  i za  $\sigma=1,1$  te pripadnu temperaturu pliništa i računске vlažnosti polazne smjese. Za biomasu se vrijednosti tih veličina iz ove dvije slike mogu interpolirati pa vrijede za  $\sigma=1,05$ . Dobiveni rezultati su su u tablici 4. Za lakši komentar rezultata prikazati ćemo ih dijagramski na slici 14 u ovisnosti o masenom protoku vode u zraku.

Na slici 4-3 možemo vidjeti volumni sastav pojedinih sudionika u vlažnom sintetskom plinu. Ovi su rezultati dobiveni konstantnim održavanjem projektiranog protoka biomase. Dodavanje vode u zrak potrebno je smanjivati pretičak zraka koji se odnosi na suhi zrak unesen u reaktor, inače bi nam potrošnja goriva rasla dodavanjem vode. Na ovaj način smanjujemo temperaturu pliništa i mijenjamo udjele pojedinih sudionika.

Dodavanjem vode u početku pri višim temperaturama pliništa voda se počinje rastvarati u vodik pa dobijemo veći udio vodika u sintetskom plinu. Kako temperatura pliništa pada, sve se manje vode uspije raspliniti u vodik, a udio ugljikovog dioksida, metana i vode raste dok udio monoksida pada. Nakon ubačenih 10 kg vode po satu, stvaranje slobodnog vodika počinje

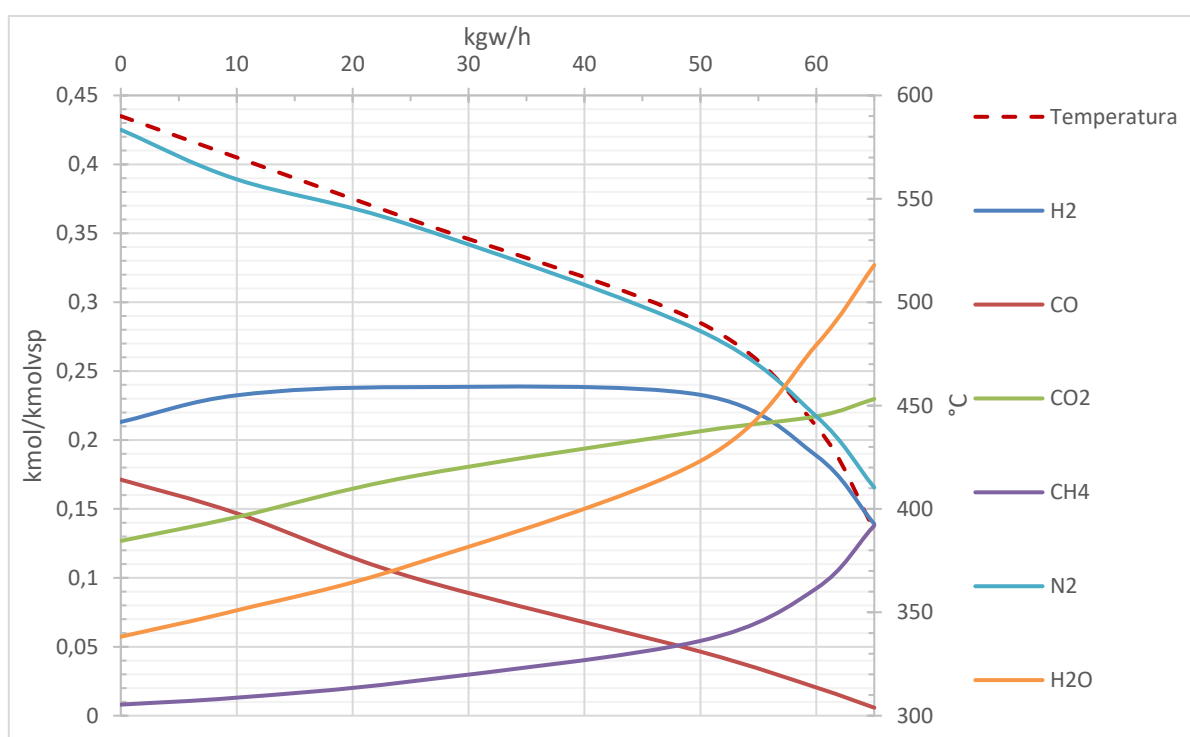
stagnirati, a ostali sudionici se nastavljaju ponašati kao i do tog trenutka. Temperatura pliništa opada praktički linearno sve do protoka vode od 50 kg/h.

**Tablica 5 Prikaz parametara plina iz reaktora**

$\vartheta_{plinište}$	590	570	540	490	440	390	°C
$\lambda$	0,35	0,32	0,3	0,23	0,16	0,11	kmol/kmol
$w$	0	6	14	30	42	53	%
$m_w$	0	10	25	50	60	65	kg/h
$m_{sz}$	180						kg/h
$m_g$	98,95833						kg/h
$n_{sz}$	6,218	5,685	5,3298	4,0862	2,843	1,954	kmol/h
$n_{w,z}$	0	0,555	1,3877	2,7754	3,33	3,608	kmol/h
$\psi$	0,3225	0,3821	0,4493	0,5839	0,6887	0,7707	kmol/kmol
$\xi_{gorivo}$	0,3873	0,3864	0,3674	0,3619	0,3893	0,4171	kmol/kmol
$[H_2]$	0,213	0,232	0,238	0,232	0,188	0,138	kmol/kmolvsp
$[CO]$	0,171	0,146	0,101	0,046	0,020	0,005	kmol/kmolvsp
$[CO_2]$	0,126	0,144	0,173	0,205	0,216	0,229	kmol/kmolvsp
$[CH_4]$	0,008	0,013	0,024	0,054	0,092	0,137	kmol/kmolvsp
$[N_2]$	0,425	0,389	0,355	0,279	0,216	0,165	kmol/kmolvsp
$[H_2O]$	0,057	0,076	0,109	0,184	0,268	0,326	kmol/kmolvsp
$V_{vl}$	1,259	1,254	1,222	1,178	1,132	1,094	kmol/kmolrs
$M'$	9,1781	9,2	9,6775	9,8216	9,133	8,522	kmol/h

Nakon toga temperatura pliništa naglo opada, a udio vode i metana naglo počinje rasti na račun vodika čiji udio naglo počinje padati zbog niske temperature pliništa. S obzirom da ubacujemo biomasu početne vlažnosti 10%, nemamo u potpunosti suhi proces rasplinjavanja koji bi dostizao visoke temperature pliništa i samim time visoki udio monoksida i vodika. Ovom

vlažnošću i protokom goriva koja je direktno vezana na utrošak ugljika ne možemo dobiti više temperature pliništa. Kada bi pokušali dobiti više temperature povišenjem protoka zraka, automatski time raste i potrošnja ugljika, a samim time i zahtjev za većim protokom biomase. Ovakva karakteristika rasplinjavanja izuzetno paše ovom pogonskom procesu zbog toga što ne dolazi do stvaranja vodika u većem volumnom udjelu. Što pogoduje kogeneracijskim jedinicama. Kada bismo imali veće udjele vodika, došlo bi do pojave eksplozija pri izgaranju, što dovodi do naglog povišenja pritiska i temperature u cilindrima Mitsubishi motora, što bi dovelo do nemirnog rada motora i mogućih oštećenja cilindra i ventila.



Slika 4-3 Volumni udjeli sudionika u sintetskom plinu svedeni na vlažni plin



S obzirom da vodu u plinu nakon reaktora kondenziramo, da bi dobili ogrjevnu vrijednost sintetskog plina, potrebno je izračunati količinu suhog sintetskog plina i udjele u suhom sintetskom plinu.

Jednadžba količine vlažnog sintetskog plina:

$$n_{vsp} = V_{vl} * M' \text{ kmol/h} \quad (30)$$

Količina vode u vlažnom sintetskom plinu:

$$n_{H_2O} = [H_2O] * n_{vsp} \text{ kmol/h} \quad (31)$$

Količina suhog sintetskog plina:

$$n_{ssp} = n_{vsp} - n_{H_2O} \quad (32)$$

Za vodik u suhom sintetskom plinu sudionike vrijedi:

$$H_2 = \frac{[H_2]n_{vsp}}{n_{ssp}} \quad (33)$$

Isto vrijedi i za ostale sudionike, a rezultat je molni udio sudionika u suhom sintetskom plinu.

Ogrjevna vrijednost sudionika prema Toplinskim tablicama, Galović, Halasz, Boras, Zagreb 2008. je kako slijedi:

$$\Delta H_{md,H_2} = 241,1 \text{ MJ/kmol}$$

$$\Delta H_{md,CO_2} = 283,3 \text{ MJ/kmol}$$

$$\Delta H_{md,CH_4} = 802,3 \text{ MJ/kmol}$$

Ukupna donja ogrjevna vrijednost suhog sintetskog plina računa se prema:

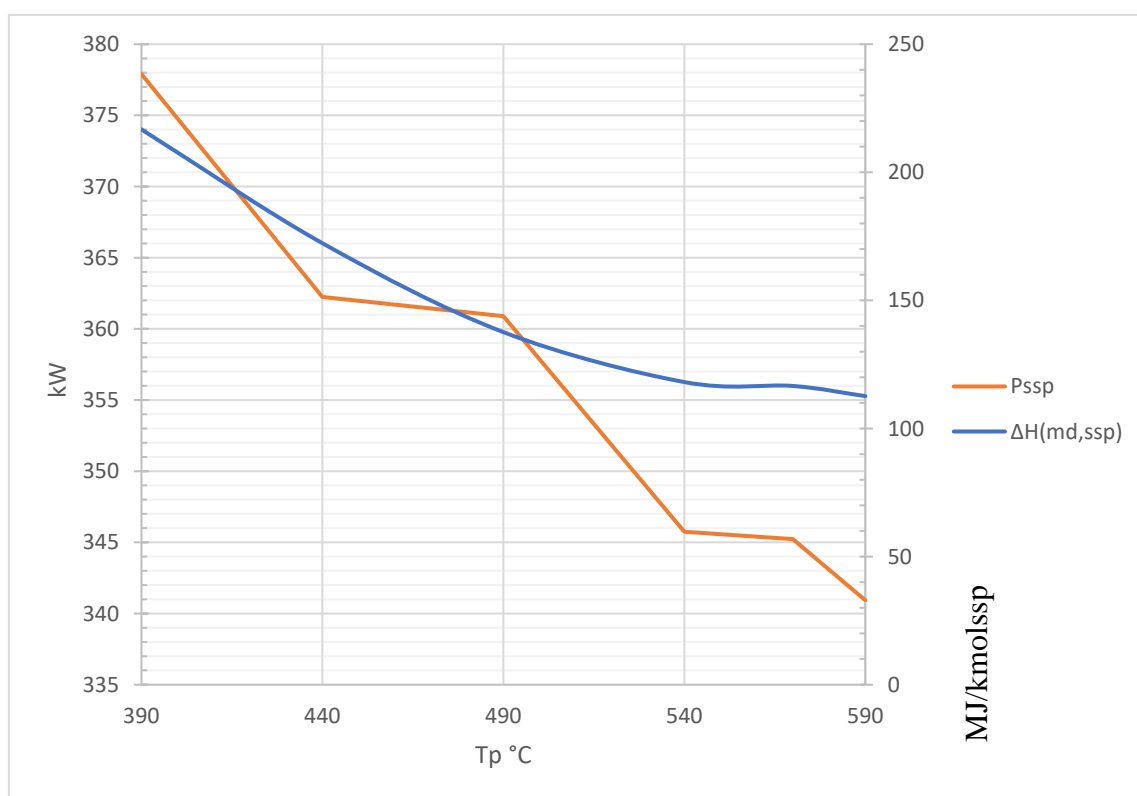
$$\Delta H_{md,ssp} = H_2 * \Delta H_{md,H_2} + CO_2 * \Delta H_{md,CO_2} + CH_4 * \Delta H_{md,CH_4} \text{ MJ/kmol}_{ssp} \quad (34)$$

Također, može se izračunati i snaga sintetskog plina prema:

$$P_{ssp} = \Delta H_{md,ssp} * n_{ssp} * \frac{1000}{3600} \text{ kW} \quad (35)$$

U nastavku su prikazani dobiveni rezultati snage i ogrjevne vrijednosti plina, kako tablično u tablici 6, tako i grafički na slici 4-4. Primijetimo dvije faze stagnacije snage plina u

periodu temperature pliništa između 570 i 540 °C te između 490 i 440°C. Prva je faza stagnacije zbog toga što se u tom razdoblju smanjuje rast volumnog udjela vodika, a proizvodnja metana stagnira. Uz to dobivamo sve manju količinu sintetskog plina jer nam udio vode još uvijek raste. Nakon prve faze počinje sve veća proizvodnja metana koja povoljno utječe na ogrjevnu vrijednost i snagu plina, ali se na 490°C naglo počinje smanjivati proizvodnja vodika, ali udio vode u plinu još više počinje rasti, pa ogrjevna snaga stagnira, ali zbog povećane proizvodnje metana ogrjevna vrijednost plina nastavlja rasti. Nakon druge faze stagnacije naglo raste ogrjevna vrijednost plina i snaga plina. Razlog tome je jako velika količina proizvedenog metana kojem pogoduje temperatura ispod 440°C. Kada bi dalje povećavali protok vode uz ovu količinu goriva, proces rasplinjavanja bi se zaustavio zbog nedostatka ugljika u reaktoru, što je odgovor na povećanu potrošnju ugljika u procesu. Također bi se temperatura pliništa smanjivala te se proces rasplinjavanja na još nižim temperaturama ne bi mogao odvijati.



Slika 4-4 Grafički prikaz donje ogrjevne vrijednosti sintetskog plina i snage plina

**Tablica 6 Rezultati donje ogrjevne vrijednosti, snage i količine plina**

$\vartheta_{plinište}$	590	570	540	490	440	390	°C
$n_{ssp}$	10,896	10,66	10,537	9,441	7,568	6,277	kmol/h
$\Delta H_{md,ssp}$	112,64	116,59	118,13	137,61	172,32	216,72	MJ/kmolssp
$P_{ssp}$	340	345	345	360	362	378	kW

U daljnje proračune nastavljamo sa sintetskim plinom koji je nastao u pliništu temperature **390°C**.

#### 4.2. Energija kogeneracijske jedinice

Kao što je u opisu navedeno, Proizvođač električne i toplinske energije biti će Mitsubishijev motor s unutrašnjim izgaranjem sa spojenim generatorom električne energije. Prema specifikacijama proizvođača navodimo električnu, toplinsku i ukupnu učinkovitost ove kogeneracijske jedinice.

$$\eta_{el} = 0,37$$

$$\eta_t = 0,47$$

$$\eta_{uk} = 0,84$$

Ulaz je dobivena snaga suhog i očišćenog sintetskog plina, a prema tome dobijemo dobivenu toplinsku i električnu snagu za jednu liniju procesa. Na svaku kogeneracijsku jedinicu dolazi plin iz 4 reaktora.

$$P_{el,1} = \eta_{el} * n_r * P_{ssp} = 559kW_{el} \quad (36)$$

$$Q_m = \eta_t * n_r * P_{ssp} = 710kW_t \quad (37)$$

$Q_m$  je toplinska snaga koja se vraća u toplovodni sustav.

### 4.3. Snaga izmjenjivača topline za hlađenje sintetskog plina

Hlađenje sintetskog plina vrši se nakon visok-temperaturnog filtera sintetskog plina. Plin se u prvom stupnju hlađenja hladi na temperaturu 120°C, a u izmjenjivač topline ulazi sa temperaturom od 280°C. Temperatura sintetskog plina na izlazu iz filtra dobivena je od renomiranog proizvođača tehnologije, a do te točke se hladi chillerom preko rashladnog medija u filtru plina. Plin se nakon filtera hladi toplovodnim sustavom, a toplinska snaga koja se preuzima od sintetskog plina računa se prema:

$$Q_{hsp} = n_{vsp} * c_{mp,vsp}^{280^{\circ}C} * (\vartheta_{ulaz} - \vartheta_{izlaz}) \quad (38)$$

Gdje je  $c_{mp,vsp}^{280^{\circ}C}$  srednji specifični toplinski kapacitet sintetskog plina za navedene temperature. Izračunat je prema podacima iz toplinskih tablica FSB-a i za dobiveni sintetski plin iznosi:  $c_{mp,vsp}^{280^{\circ}C} = 37,2548 \text{ kJ/kmolK}$ . Snaga izmjenjivača za hlađenje plina iznosi  $Q_{hsp} = 15 \text{ kWt}$  za jedan reaktor, odnosno za jednu liniju  $Q_{hsp,l1} = 60 \text{ kWt}$ .

### 4.4. Toplinska potreba sušare

Sušara preuzima toplinu iz toplovodnog sustava preko izmjenjivača topline zrak/voda-etilen/glikol. U slučaju sječke sa većim udjelom vlage od 40%, ona se dovodi na projektnu vlažnost predušenjem sa zrakom iz prostora kogeneracije koji je više temperature zbog disipacije topline motora s unutrašnjim izgaranjem.

Potrebna snaga sušare računa se prema slijedećoj jednadžbi:

$$Q_{ps} = (m_{sg} * c_{mp,g,10\%}^{\vartheta_s} (\vartheta_s - \vartheta_{ok}) + m_{ws} * c_{mp,w}^{\vartheta_s} (\vartheta_s - \vartheta_{ok}) + m_{ws} * r_w^{\vartheta_s}) \quad (39)$$

Unutar ove jednadžbe pojedini dijelovi imaju slijedeće značenje:

$m_{sg} * c_{mp,g,10\%}^{\vartheta_s} (\vartheta_s - \vartheta_{ok})$  – toplinska snaga koju je potrebno dovesti za zagrijavanje sječke,

$m_{ws} * c_{mp,w}^{\vartheta_s} (\vartheta_s - \vartheta_{ok})$  - snaga potrebna za zagrijavanje one količine vode koju je potrebno odvesti iz mokre sječke sa temperature na kojoj se nalazi na projektnu temperaturu sušenja,

$m_{ws} * r_w^{\vartheta_s}$  – snaga potrebna za isparavanje vode na projektnoj temperaturi sušenja sječke.

Na ovaj način posebno promatramo vodu koju je potrebno odvesti iz sječke vlažnosti 40 %, a posebno energiju zagrijavanja preostale sječke i vode u iznosu vlažnosti od 10%.

$Q_{ps}$  - snaga sušare.

$c_{mp,g,10\% \vartheta_{ok}}^{\vartheta_s}$  - srednji specifični toplinski kapacitet sječke vlažnosti 10%.

$c_{mp,w \vartheta_{ok}}^{\vartheta_s}$  - srednji specifični toplinski kapacitet vode.

$\vartheta_s$  – projektna temperatura sušenja

$\vartheta_{ok}$  – temperatura okoliša, odnosno polazna temperatura mokre sječke.

Srednji specifični toplinski kapacitet sječke računa se prema [7]:

$$c_{mp,g,w\% \vartheta_{ok}}^{\vartheta_s} = \left( 1 - \frac{100}{100+w\%} + \frac{26,6}{100+w\%} + \frac{0,116}{100+w\%} * \frac{\vartheta_s + \vartheta_{ok}}{2} \right) * 4,186 \text{ kJ/kgK} \quad (40)$$

Specifični toplinski kapacitet vode je određen iz toplinskih tablica za temperaturu 50°C.

$$c_{mp,w \vartheta_{ok}}^{\vartheta_s} = 4,1796 \text{ kJ/kgK.}$$

Ostale vrijednosti prikazane su u tablici 1. Da bi izračunali energiju koju predajemo u sušaru iz toplovodnog sustava, moramo dobiti energiju predanu zraku za zagrijavanje od temperature okoliša do temperature potrebne za prijenos potrebne energije sušenja.

Potrebna temperatura zraka na ulazu u sušaru dobije se prema:

$$\vartheta_{zr,ul} = \frac{Q_{ps}}{V_z * \rho_{sr,zr} * c_{p,zr,sr}} + \vartheta_{zr,izl} \quad (41)$$

Temperatura zraka nakon sušenja sječke je pretpostavljena i iznosi:

$$\vartheta_{zr,izl} = 55^\circ\text{C}$$

Volumenski protok zraka sušenja određen je odabirom ventilatora za dobavu zraka sušari, a iznosi:

$$V_z = 110\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Gustoća zraka  $\rho_{sr,zr}$  određena je prema pretpostavljenoj srednjoj temperaturi zraka od 60°C prema toplinskim tablicama, isto kao i  $c_{p,zr,sr}$ , odnosno specifični toplinski kapacitet zraka. S obzirom da gustoća i specifični toplinski kapacitet zraka ostaju pri različitim temperaturama i atmosferskom tlaku gotovo jednaki, njihova promjena ne utječe puno na rezultat, pa korekcija nije potrebna.

$$\rho_{sr,zr} = 1,0457 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p,zr,sr} = 1,0089 \text{ kJ/kgK}$$

Nakon dobivene potrebne temperature zraka za sušenje dobijemo potrebnu toplinu koju predajemo zraku preko:

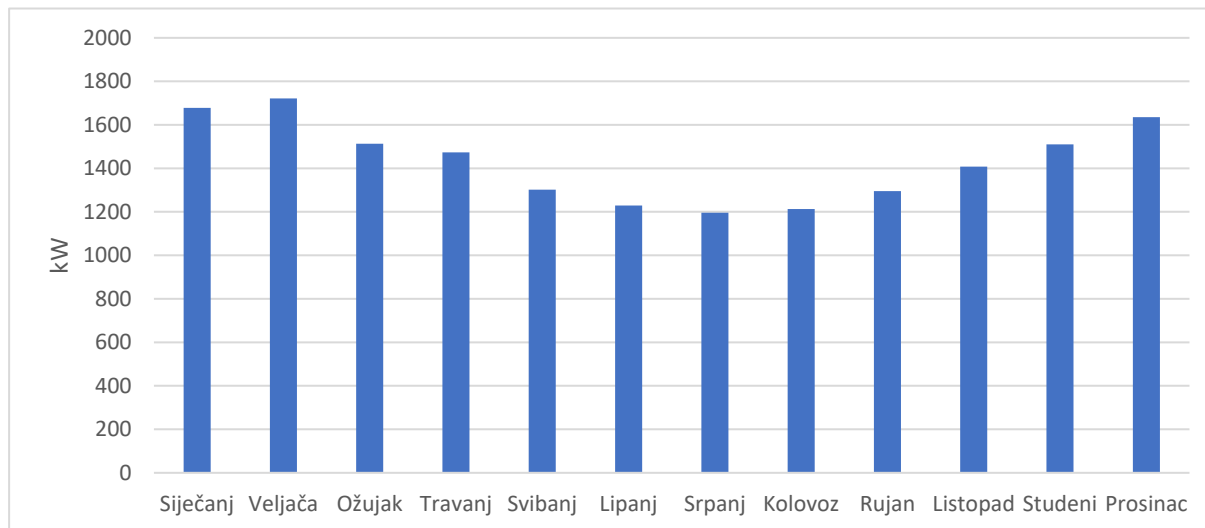
$$Q_{s,uk} = V_z * \rho_{sr,zr} (\vartheta_{zr,ul} - \vartheta_{ok}) \quad (42)$$

Time smo dobili potrebnu snagu sušare. Rezultati su prikazani slikom 4-5 i tablicom 7.

Najviša potreba za toplinom je u Veljači u iznosu od 1721 kWt. Time dokazujemo da je proizvedena toplinska energija u procesu dovoljna za potrebe sušare vlažne sječke. Višak topline iz toplovodnog sustava odvodi se preko suhog hladnjaka projektiranog za najniže toplinske potrebe sušare.

**Tablica 7 Potreba topline za sušaru prema mjesecima**

Mj.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	
$\vartheta_{ok,sr}$	12	10,7	17	18,2	23,4	25,6	26,6	26,1	23,6	20,2	17,1	13,3	°C
$Q_{ps}$	292,1	293,1	288,2	287,3	283,2	281,4	280,6	281	283,0	285,7	288,1	291,1	kW
$\vartheta_{zr,ul}$	64,06	64,09	63,94	63,91	63,79	63,73	63,70	63,72	63,78	63,86	63,94	64,03	°C
$Q_{s,uk}$	<b>1678</b>	<b>1721</b>	<b>1513</b>	<b>1474</b>	<b>1302</b>	<b>1229</b>	<b>1196</b>	<b>1213</b>	<b>1295</b>	<b>1408</b>	<b>1510</b>	<b>1635</b>	kW



**Slika 4-5 Grafčki prikaz prosječne snage sušare kroz godinu**

#### 4.5. Energetska bilanca

Shema energetske bilance prikazana je slikom 16. Sustavom hlađenja reaktora, hlađenja sintetskog plina, hlađenja dimnih plinova i hlađenja motora vratio se dio toplinske energije u toplovodni sustav koja se kasnije iskorištava za potrebe sušare i za daljnju distribuciju, odnosno prodaju.

Ukupna vraćena toplinska snaga za jednu liniju iznosi:

$$Q_{t,l1} = Q_m + Q_{hsp,l1} + n_r * Q_{hr1} = 710 + 60 + 4 * 30 = 890 \text{ kWt} \quad (43)$$

Dok za cijelo postrojenje sa dvije linije iznosi duplo:

$$Q_{t,uk} = 1780 \text{ kWt}.$$

Ukupna električna snaga za obje linije iznosi:

$$P_{el,uk} = 2 * P_{el,1} = 1118 \text{ kW}_e \quad (44)$$

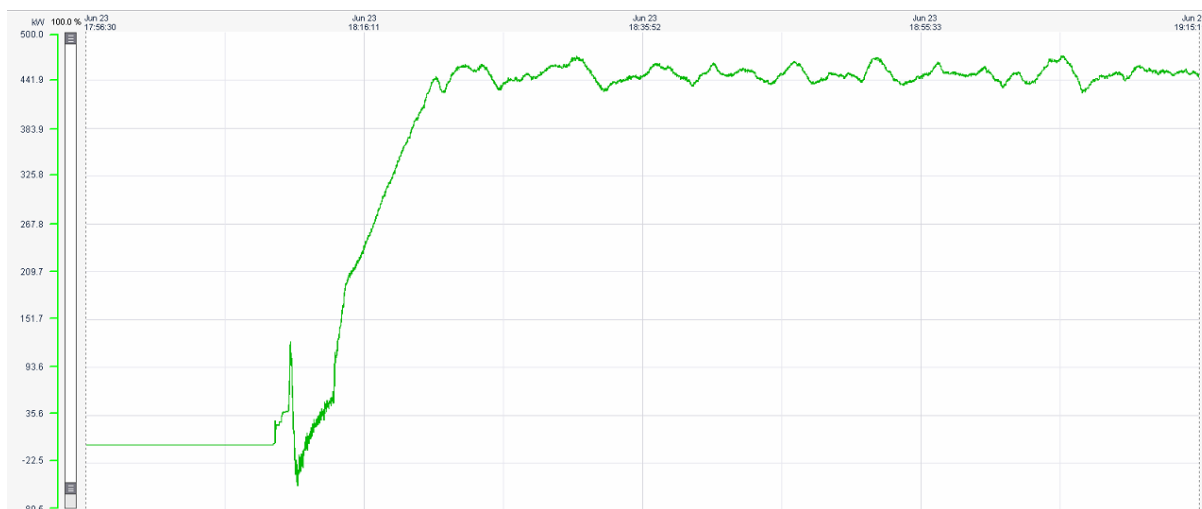
Dio te električne energije koristi se za vlastitu potrošnju, a dio se pretvori u toplinsku energiju zbog gubitaka transformatora. Učinkovitost transformatora iznosi 98,9%, a snaga potrebna za vlastitu potrošnju iznosi 106.9 kW.

Ukupna snaga koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži iznosi:

$$P_{el,vn} = (P_{el,uk} - P_{vp}) * 0,989 = 999.98 \text{ kW}_{el} \approx 1 \text{ MW}_{el} \quad (45)$$

## 5. Simulacija i model upuštanja postrojenja u pogon

Proces upuštanja u pogon započinje punjenjem reaktora biomasom i uključivanjem kompresora zraka prema bočnim kanalima. Nakon 15 minuta dovođenja zraka i potpaljivanja početne količine goriva nastaje žar u zoni oksidacije te je pokrenuto stvaranje sintetskog plina. S obzirom da kvaliteta plina još uvijek nije zadovoljavajuća za pokretanje plinskog motora, ventil na dovodu plina u motor je zatvoren, a plin se pušta na plinsku baklju na spaljivanje, pri čemu nastali plin prolazi cijeli proces čišćenja i hlađenja. Nakon 6 sati proizvodnje ovakvog plina svi su parametri sintetskog plina poput količinskih udjela i ogrjevne vrijednosti plina zadovoljavajući, ventil se može otvoriti, a baklja se može isključiti i odvojiti. Tada se pokreće plinski motor. Motor je spojen na asinkroni generator te se pokreće od strane generatora u startnoj fazi, dok motor ne dosegne 1500 okretaja u minuti jer se od tog broja okretaja koji ostaje konstantan počinje pokretati generator. Na slici 5-1 je prikazano upuštanje u pogon postrojenja iste tehnologije, ali različite snage.

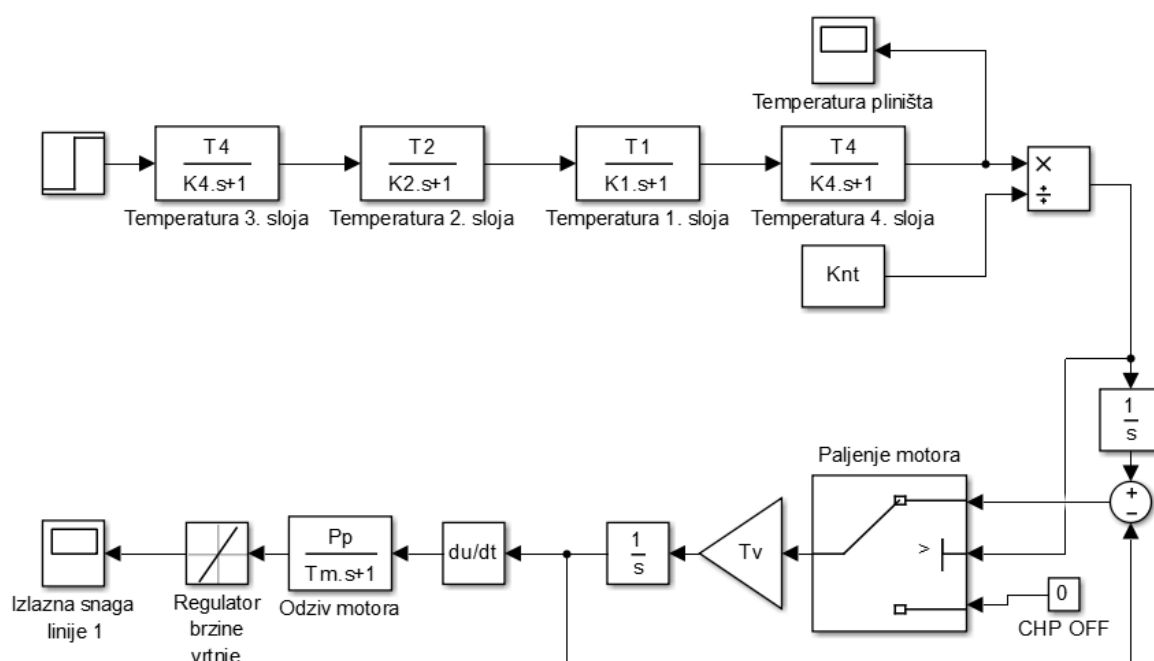


**Slika 5-1** Snaga (apcisa) u vremenu (oordinata) tijekom upuštanja u pogon postrojenja s istom tehnologijom

Jednostavni model postrojenja koji simulira njegovo upuštanje u pogon napravljen je u računalnom programu Matlab/Simulink, a model je prikazan slikom 5-2. U modelu je promjena temperature rasplinjavanja u reaktoru opisana za svaki sloj proporcionalnim članovima djelovanja 1. reda u ovisnosti o ulaznom protoku goriva za optimalni omjer količine zraka i

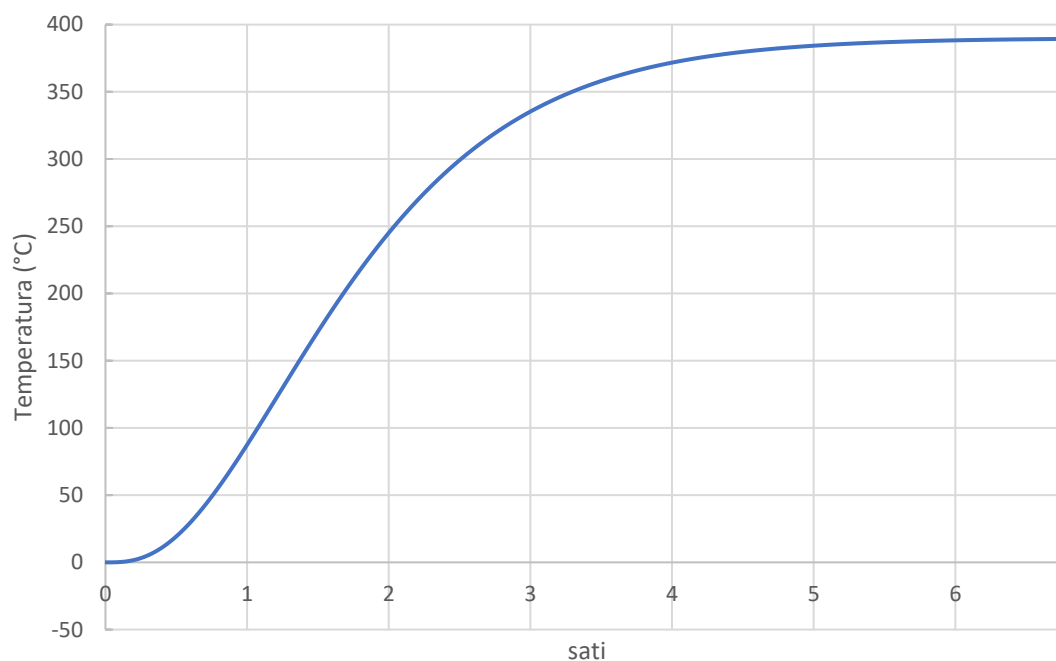


vode prema prethodnim izračunima uz vremensku karakteristiku promjene temperature K1-K4 te potrebne temperature sloja T1-T4. Prema temperaturi u zoni 4. proporcionalno je definiran protok plina. Nakon što reaktor postigne željenu potrebnu količinu plina pali se kogeneracijska jedinica čije je djelovanje definirano vremenskom konstantnom reakcije  $T_m$  i snagom  $P_p$ . Također je modeliran ventil koji ima svoju vremensku karakteristiku  $T_v$  i regulator brzine vrtnje okretaja CHP jedinice. Prema slikama 5-3 i 5-4 dobivene su promjene temperature u zoni plinifikacije i izlazna snaga motora. Prema ovom modelu se može usporedbom stvarnih mjerenja u postrojenju i rezultatima modela regulirati upuštanje u pogon i predvidjeti reakcija kogeneracijske jedinice prema promjeni protoka plina, odnosno goriva i temperature pliništa.

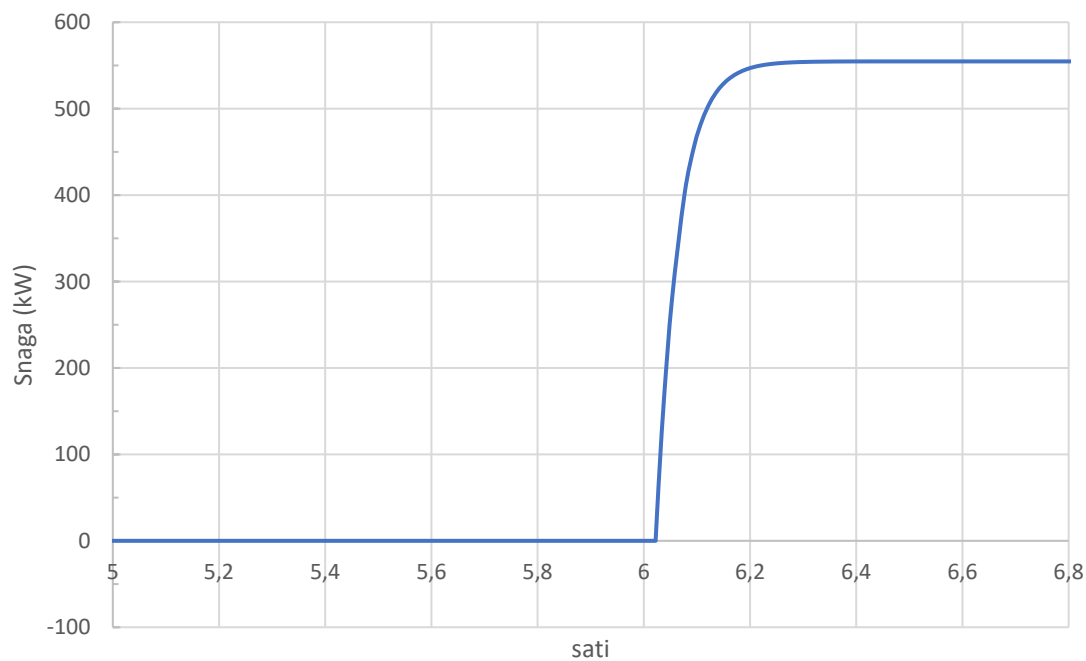


**Slika 5-2** Pojednostavljeni model postrojenja u simulinku

Prema modelu proces od početka punjenja reaktora do dostizanja zadovoljavajuće količine plina traje 6 sati, a motoru je potrebno do dostizanja nazivnih parametara oko 800 sekundi, što se poklapa sa stvarnim mjerenjima sličnih postrojenja.



**Slika 5-3** Temperatura pliništa u ovisnosti o vremenu



**Slika 5-4** Izlazna snaga kogeneracijske jedinice u ovisnosti o vremenu

## 6. Tehno-ekonomska analiza cjelogodišnjeg pogona

Tehno-ekonomska analiza projekta izrađena je prema ponudi dobavljača opreme, cijeni energenta, tj. biomase u obliku drvene sječke, cijeni toplinske energije i povlaštenoj cijeni električne energije po tarifnom sustavu za obnovljive izvore energije i kogeneraciju. Treba voditi računa da postrojenje radi približno 8.000 sati godišnje. Višak toplinske energije koja nije nužna za predsušenje sječke na vlažnost 10% potrebno je prodati vanjskim potrošačima u što većoj količini čime će se osigurati brži povrat investicije. Predviđeno je zapošljavanje najmanje troje ljudi. Posada bi radila u tri smjene i time pokrivala 24h dnevno.

Tehnologija koja će se primijeniti kod realizacije projekta sastoji se od sušare za sušenje drvene sječke, pomičnog poda, 8 reaktora za rasplinjavanje sječke, 2 sustava za filtriranje i hlađenje sintetskog plina i 2 plinska motora nazivne snage po 550 kWel s pripadajućim generatorom električne energije i toplinskom podstanicom.

Predviđena proizvodnja električne energije iznosi 8 000 MWh godišnje. Unutar analize uključena će biti 2 načina rada. Prvi uključuje iskorištavanje toplinske energije isključivo za sušenje sječke, a ostatak topline odvodio bi se suhim hladnjacima po potrebi. Drugi način uključuje iskorištavanje potrebne topline za rad sušare, a višak bi se prodavao vanjskim korisnicima. Ukupna godišnja potrebna toplinska energija za sušenje prema promjenjivim vremenskim uvjetima lokacije izračunat je u poglavlju 4.4, a godišnje iznosi 11 450 MWht. Ukupna proizvedena toplinska energija iznosi 14 240 MWht. Samim time razlika raspoloživa za prodaju u drugom slučaju iznosi 2 790 MWh godišnje uz godišnji rad postrojenja od 8 000h. Proizvedena električna energija plasirati će se na tržište na osnovu ugovora s HROTE-om u trajanju od 14 godina po cijeni važećoj za postrojenja na biomasu električne snage do 2 MW koja se jednom godišnje korigira prema indeksu maloprodajnih cijena. Drvna sječka bi se u prvoj godini pretežito dobavljala od privatnih proizvođača, a nakon prvog sljedećeg natječaja od Hrvatskih Šuma na osnovi dugogodišnjeg ugovora o kupoprodaji drvene sječke. Ukupna potreba za sječkom vlažnosti 40% iznosi 9 500 tona godišnje. Uzimajući u obzir donju ogrjevnu vrijednost sječke ove vlažnosti u iznosu od 2,9 kWh/kg, ulazna energija sječke u godini dana iznosi 27 550 MWh godišnje.

## 6.1. Povlaštena cijena prodaje električne energije

Na temelju članka 30. stavka 3. Zakona o energiji (»Narodne novine«, broj 120/2012), Vlada Republike Hrvatske donijela je Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i kogeneracije. Ovim Tarifnim sustavom za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije određuje se poticajna cijena za električnu energiju proizvedenu u proizvodnom postrojenju koje koristi obnovljive izvore energije i kogeneracijskom postrojenju.

Prema članku 5. ovog Tarifnog sustava osnovna cijena električne energije za elektrane na biomasu instalirane snage do 2MW iznosi  $C=1,25$  kn/kWh električne energije. Za elektrane na biomasu uvodi se korekcija poticajne cijene  $C_k$  koja se određuje za tekuću godinu prema ukupnoj godišnjoj učinkovitosti ostvarenoj u prethodnoj godini. Taj je koeficijent određen prema (46).

$$C_k = C * k \quad (46)$$

Gdje je  $k$  korektivni koeficijent za postizanje ukupne godišnje učinkovitosti proizvodnog postrojenja u pretvorbi primarne energije goriva u isporučenu električnu i proizvedenu korisnu toplinu. Izračun ukupne učinkovitosti računa se prema (47).

$$\eta_{uk} = \frac{E_{el} + Q_t}{Q_{ul}} \quad (47)$$

Gdje je  $E_{el}$  ukupna proizvedena električna energija u godini,  $Q_t$  ukupna korisna proizvedena toplinska energija, a  $Q_{ul}$  energija ulazne sječke.

Za prvi način rada:

$$\eta_{uk,1} = \frac{8000 + 11450}{27550} * 100\% = 70.59\%$$

Za drugi način rada:

$$\eta_{uk,2} = \frac{8000 + 14240}{27550} * 100\% = 80.59\%$$

Za oba slučaja kogeneracijsko postrojenje ima učinkovitost veću od 50%, pa prema Tarifnom sustavu spada u c. kategoriju sa korektivnim koeficijentom  $k=1,2$ . Prema tome iznos korigirane poticajne cijene prodaje električne energije iznosi:  $C_k=1,5 \text{ kn/kWh}$ .

## 6.2. Procjena investicije

Investicija projekta sastoji se od investicije u reaktore, motore, filtere i ostale tehnologije renomiranih proizvođača, svih projektantskih troškova glavnog i izvedbenog projekta, troškova građevinskih radova, strojarske, električne i ostale tehnologije koja nije u obimu isporuke proizvođača tehnologije rasplinjavanja, cijene zemljišta, nadzora izgradnje, naknada za banke i osiguranje, komunalnih troškova i ostalih troškova koji uključuju biomasu za početak rada, administrativne i slične troškove.

Ukupna procjena investicijskih troškova iznosi oko 5 200 000 eura prema tablici 8 iskazana u eurima.

**Tablica 8 Procjena investicije (€)**

Postrojenje s reaktorom	64,90%	3 375 000
Ostala oprema	14,42%	750 000
Trošak svih projektiranja	3,00%	156 000
Banke i osiguranje	0,58%	30 000
Građevinski radovi	14,42%	750 000
Nadzor izgradnje	0,50%	26 000
Komunalni doprinosi	0,10%	5 000
Zemljište	1,44%	75 000
Ostalo	0,63%	33 000
<b>Ukupno</b>		<b>5 200 000</b>

### 6.3. Pogonski troškovi

Podjela pogonskih troškova je na troškove održavanja, troškove posade, administrativnih troškova, troškova osiguranja i troškova goriva. Troškovi goriva će za potrebe analize biti varijabilni.

Troškovi održavanja prema ugovoru sa proizvođačem tehnologije je za prve dvije pogonske godine pokriven plaćanjem troškova tehnologije. Slijedeće tri godine godišnja cijena održavanja iznosi 40 000 € godišnje, a posljednjih 5 godina 50 000 € godišnje.

Trošak posade računa se prema potrebi tehnološkog procesa. Potrebna je jedna osoba 24 sata dnevno. Ukupno zapošljava tri osobe raspodijeljene u 3 smjene koji primaju mjesečno oko 7500 kn bruto. Samim time godišnji troškovi posade iznose 270 000 kn, odnosno oko 36 000 € godišnje.

Procjena administrativnih troškova temelji se primjenom iskustvenog koeficijenta sa sličnih projekata, a iznosi 1.25% ukupnih operativnih prihoda, odnosno dobiti od prodaje električne i toplinske energije.

Troškovi osiguranja su projicirani sukladno ponudi osiguravajuće kuće za osiguranje od standardnih rizika u iznosu od 0.15% na nabavnu vrijednost postrojenja i opreme te premija iznosi oko 7 300 € godišnje.

### 6.4. Specifični trošak proizvodnje električne energije

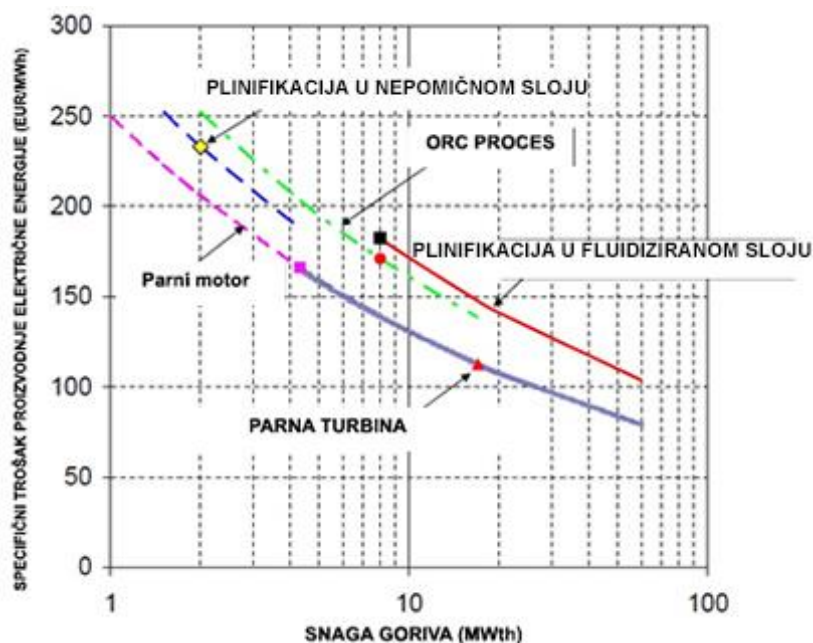
Prema [8] se za potrebe preliminarne analize isplativost ulaganja u kogeneracijsko postrojenje može se procijeniti na temelju usporedbe specifičnog troška proizvodnje električne energije prema trenutnom važećem tarifnom sustavu. Pri takvoj analizi je potrebno uključiti cijenu goriva i očekivano trajanje postrojenja pri nazivnoj snazi. Specifični trošak proizvodnje električne energije računa se prema izrazu (48).

$$C_E = \frac{I_A + C_{OM} * E_{CHP} + C_F * F_{CHP} - C_H * H_{CHP}}{E_{CHP}} \quad (48)$$

U kojem  $I_A$  označava godišnji investicijski trošak,  $C_{OM}$  specifične troškove pogona i održavanja,  $C_F$  specifični trošak goriva,  $E_{CHP}$  godišnju proizvodnju električne energije u kogeneracijskom

postrojenju,  $F_{CHP}$  godišnju potrošnju goriva,  $H_{CHP}$  godišnju isporučenu korisnu toplinu,  $C_H$  cijenu topline.

Ilustracija rezultata proračuna specifičnih troškova proizvodnje električne energije i usporedba različitih tehnologija prema stanju tehnike i cijenama opreme u 2002. godini prikazana je na slici 3. Krivuljama su predstavljeni ekstrapolirani troškovi proizvodnje električne energije za pojedine tehnologije.[8]



Slika 6-1 Specifični trošak proizvodnje električne energije pojedinih tehnologija[8]

Pojedini faktori računaju se prema izrazima (49),(50),(51) i (52).

$$I_A = I * CRF = C_i * P * \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} \quad (49)$$

$$E_{CHP} = d * P \quad (50)$$

$$F_{CHP} = \frac{E_{CHP}}{\eta_{CHP,e}} = \frac{d * P}{\eta_{CHP,e}} \quad (51)$$

$$H_{CHP} = F_{CHP} * \eta_{CHP,t} = d * P * \left( \frac{\eta_{CHP,uk}}{\eta_{CHP,e}} - 1 \right) \quad (52)$$

Gdje  $C_i$  označava specifični investicijski trošak, CRF označava anuitetni faktor izračunat u funkciji obračunske kamatne stope  $i$  (%/a),  $t$  ekonomskog vijeka investicije  $n$ ,  $P$  označava

nazivnu električnu snagu kogeneracijskog postrojenja, a  $d$  predstavlja ekvivalentni godišnji broj sati pogona na nazivnoj snazi. Uvrštavanjem (49) – (52) u (48) specifični trošak proizvodnje električne  $C_E$  energije može se izraziti u funkciji parametara koji ovise o izabranoj tehnologiji i veličini postrojenja (investicijskom trošku  $I$ , specifičnim troškovima pogona i održavanja  $C_{OM}$ , električnoj učinkovitosti pogona kogeneracijskog postrojenja  $\eta_{CHP,e}$ , ukupnoj energetskej učinkovitosti pogona kogeneracijskog postrojenja  $\eta_{CHP,uk}$ ), te parametara koji definiraju specifične rubne uvjete (cijenu/trošak goriva  $C_F$ , cijenu toplinske energije  $C_H$  i trajanje pogona na nazivnoj snazi  $d$ ).

$$C_E = \frac{C_i}{d} * \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} + C_{OM} + \frac{C_F}{\eta_{CHP,e}} - C_H * \left( \frac{\eta_{CHP,uk}}{\eta_{CHP,e}} - 1 \right) \quad (53)$$

Specifični investicijski trošak računa se u ukupnoj investiciji po MW električne snage postrojenja i iznosi:

$$C_i = \frac{5\,200\,000}{1} = 5\,200\,000 \text{ €/MW}$$

Obračunska kamatna stopa:

$$i = 6\%$$

Specifični troškovi održavanja računaju se za razdoblje od 14 godina. Srednji godišnji operativni trošak je suma svih troškova tijekom 14 godina podijeljena sa navedenim razdobljem. Specifični troškovi održavanja izraženi su u eurima po električnoj snazi postrojenja u MW pa samim time vrijedi iskazano u tablici 9. Troškovi iza desete godine jednaki su kao i u desetoj. Za potrebe preliminarne analize zanemareni su administrativni troškovi.

**Tablica 9 Godišnji O&M troškovi (€)**

godina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Održavanje	0	0	40000	40000	40000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000
Posada	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000
Osiguranje	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300
suma	43300	43300	83300	83300	83300	93300	93300	93300	93300	93300	93300	93300	93300	93300

Prema tome prosječan godišnji operativni trošak iznosi 84 728 €/god.

$$C_{OM} = \frac{84\,728}{8000} = 10,591 \text{ €/MWh}$$

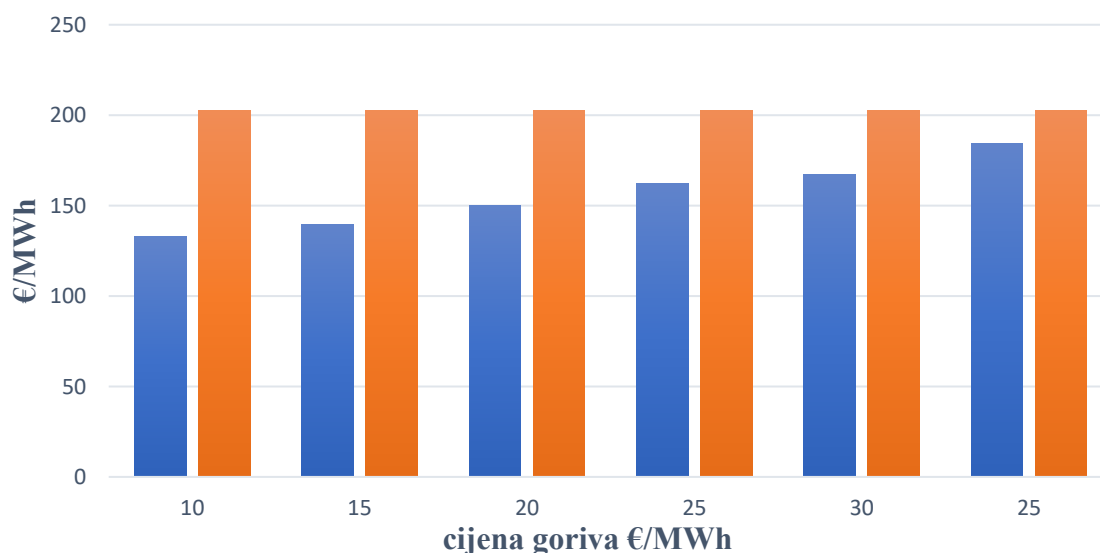


Cijena sječke biti će promatrana kao varijabilna i izražena u €/t sječke. Trenutna cijena sječke na lokaciji sa transportom se kreće oko 50 €/t sječke vlažnosti 40%, no napraviti će se analiza za cijenu sječke 30-70 €/t kako bi se promatrala osjetljivost. Kako je već navedeno ukupna energetska vrijednost 9 500 tona sječke iznosi 27 550 MWh, što je 2,9 MWh/t. Samim time cijena će se kretati 10-25 €/MWh, a trenutna je cijena 17,59 €/MWh.

Prema tečaju eura 7,4kn poticajna cijena električne energije po MWh iznosi 202,70 €/MWh.

### Prvi slučaj

Prema navedenim ulazni podacima grafički su prikazani rezultati na slici 6-1

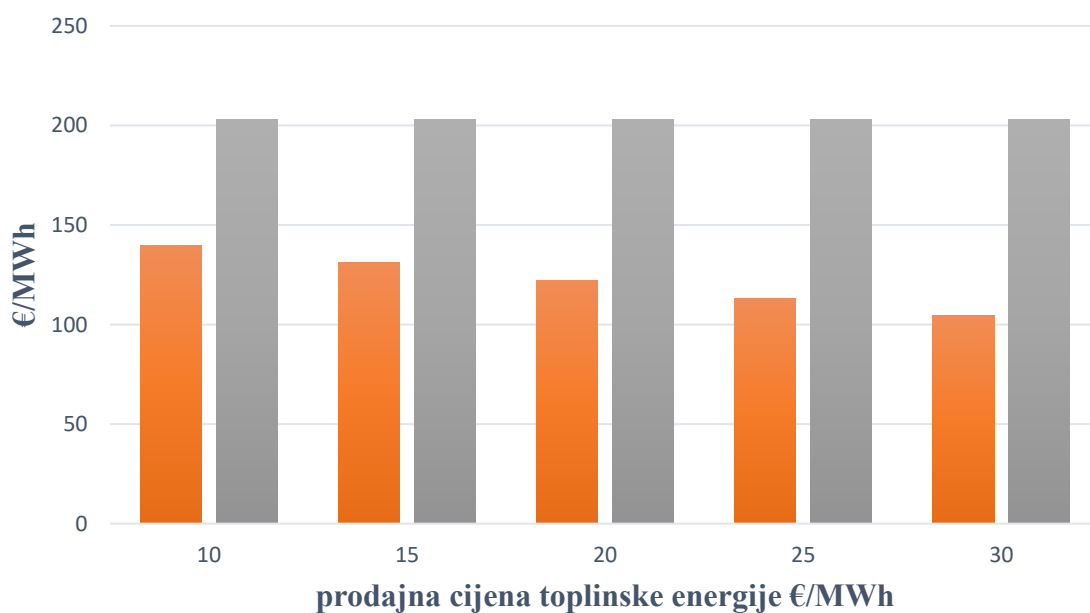


**Slika 6-2 Usporedba specifičnog troška proizvodnje el. Energije (plavo) i povlaštene cijene prodaje električne energije prema tarifnom sustavu (narančasto)**

Prema preliminarnoj analizi uočljivo je kako ovaj konkretan projekt nije osjetljiv na velike varijacije cijene sječke, te je samim time projekt vrlo niskog rizika. U ovom slučaju prodaja toplinske energije uopće nije uračunata jer se promatra kao da se kompletna toplinska energija koristi za sušaru i odvodi suhim hladnjacima. Cijena proizvodnje električne energije za trenutnu cijenu sječke od 50€/t iznosi 162 €/MWh, a poticajna prodajna cijena propisana važećim tarifnim sustavom je 1.5kn/kWh, odnosno 202.70 €/MWh.

### Drugi slučaj

U drugom slučaju uključiti će se utjecaj prodaje toplinske energije za referentnu cijenu sječke od 50 €/toni, odnosno 17.5 €/MWh. Gledati će se etalonski slučaj da prodamo svu dostupnu toplinsku energiju koju nismo iskoristili u sušari i to po cijenu 10-30 €/MWh. Iako je ovaj slučaj nerealan zbog niske ili nikakve potrebe za toplinskom energijom u ljetnim razdobljima, može biti dobar etalonski pokazatelj raspona moguće zarade. Prema slici 6-2 gdje je sivom bojom označena otkupna cijena električne energije, a narančastom specifični trošak proizvodnje, primjećujemo kako se specifični trošak proizvodnje električne energije kreće između 130 i 100 €/MWh u slučaju da prodajemo sav višak toplinske energije po cijeni između 10 i 30 €/MWh toplinske energije. Primjetimo kako u slučaju kada prodajemo po 10 €/MWh, specifični se trošak proizvodnje nije previše smanjio, a ukoliko je cijena 30 €/MWh, specifični trošak proizvodnje pada na čak 100 €/MWh.



**Slika 6-3** Usporedba specifičnog troška proizvodnje el. Energije (narančasto) i povlaštene cijene prodaje električne energije prema tarifnom sustavu (sivo) u slučaju prodaje topline

## 6.5. Izvor financiranja projekta

Pokrivanje investicijskih troškova financirati će se 25% iz vlastitih sredstava, te 75% vrijednosti projekta kreditom HBOR-a iz programa Gospodarstvo – kreditiranje investicije.

Uvjeti planiranog kredita su slijedeći:

- Iznos kredita: 3 900 000 €
- Rok otplate: 10 godina (uključujući početak od 1 god.)
- Kamatna stopa: 6%
- Način otplate: Kvartalni anuiteti

## 6.6. Amortizacija

Proračun amortizacije investicijskih ulaganja u osnovna sredstva odvija se u skladu s odredbama Pravilnika o amortizaciji, po zakonski propisanim stopama za ubrzani otpis prema tablici 10.

**Tablica 10 Amortizacija ubrzanim otpisom**

<b>Amortizacija ubrzanim otpisom (€)</b>			
<b>Opis imovine</b>	<b>vrijednost</b>	<b>stopa amortizacije</b>	<b>godišnji iznos amortizacije</b>
Projektna dokumentacija, dozvole i razvoj projekta	217 000,00	50%	108 500,00
Građevinski radovi	750 000,00	10%	75 000,00
Oprema	4 125 000,00	20%	825 000,00

Godišnji iznosi amortizacije tijekom trajanja projekta prikazani su u u tablici 11.

**Tablica 11 Izračun amortizacije (€)**

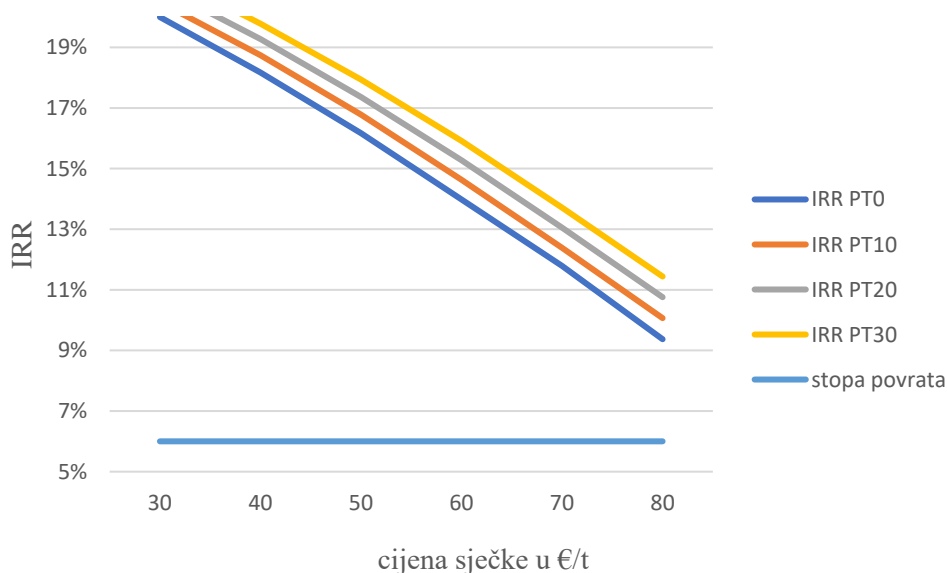
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
108 500.00	108 500.00								
75 000.00	75 000.00	75 000.00	75 000.00	75 000.00	75 000.00	75 000.00	75 000.00	75 000.00	75 000.00
825 000.00	825 000.00	825 000.00	825 000.00	825 000.00					

## 6.7. Analiza

Prema detaljnoj analizi prikazanoj u tablici 12, potvrđena je izjava o projektu niskog rizika. Uz referentnu cijenu sječke od 50 €/t i prethodno izračunatim komponentama ekonomskog proračuna unutarnja stopa povrata (IRR) iznosi 16,17%, što je više nego dvostruko veće stopi povrata od 6%, a Neto sadašnja vrijednost projekta (NPV) iznosi **3 131 578 €**.

Također ćemo ispitati osjetljivost na cijenu sječke i sate rada na nominalnom opterećenju. Na slici 6-4 je prikazana osjetljivost unutarnje stope povrata. Vidljivo je da bez obzira na varijaciju cijene sječke između 30 i 70 eura po toni, unutarnja stopa povrata (IRR PT0) veća je od stope povrata 6% kada uopće ne prodajemo toplinu.

Zanimljivo je promotriti i slučaj kada prodajemo toplinsku energiju kao i preliminarnoj analizi, no ovaj puta obaviti ćemo analizu prema cijeni 10, 20 i 30 €/MWh topline i varijabilnoj cijeni sječke. Prema Slici 6-4. Vidljivo je kako prodaja topline ne utječe puno na IRR, svega oko 2,5 % razlike za prodaju po cijeni od 30 €/MWh. S obzirom da velik dio topline ni ne možemo prodati, upitno je koliko je isplativo baviti se tom aktivnošću zbog velike potrebe sušare.

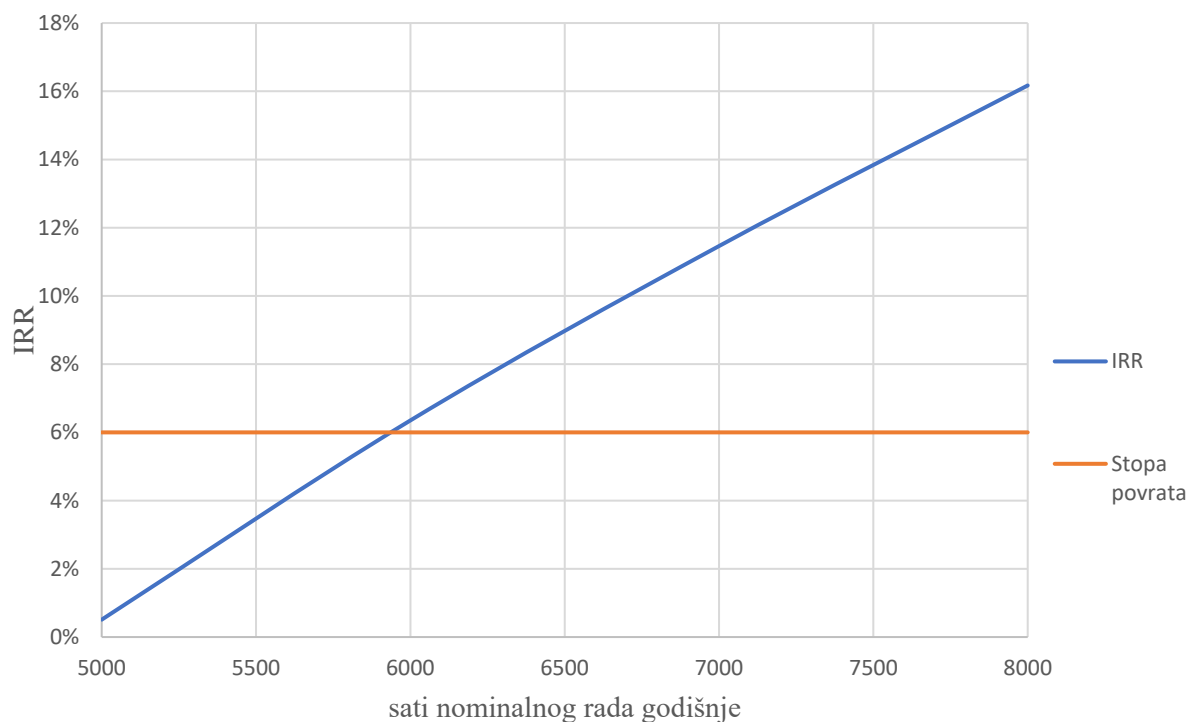


Slika 6-4 Analiza promijene IRR-a u ovisnosti o cijeni sječke

**Tablica 12 Izračun IRR-a i NPV-a bez prodaje topline i sa cijenom sječke 50 €/t**

Godine	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Investicija	5 200 000														
sječka		475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000	475 000
O&M bez sječke		43 300	43 300	83 300	83 300	93 300	93 300	93 300	93 300	93 300	93 300	93 300	93 300	93 300	93 300
Prihod od prodaje električne energije		1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622
Amortizacija		1 008 500	1 008 500	900 000	900 000	900 000	75 000	75 000	75 000	75 000	75 000	0	0	0	0
Administracija		18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649	18 649
Bruto prihod		1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622	1 621 622
Bruto rashod		1 545 449	1 545 449	1 476 949	1 476 949	1 486 949	661 949	661 949	661 949	661 949	661 949	586 949	586 949	586 949	586 949
Bruto dobit		76 173	76 173	144 673	144 673	134 673	959 673	959 673	959 673	959 673	959 673	1 034 673	1 034 673	1 034 673	1 034 673
Kredit	3 900 000														
Glavnica	0	390 000	390 000	390 000	390 000	390 000	390 000	390 000	390 000	390 000	390 000	0	0	0	0
Kamata	234 000	225 225	201 825	178 425	155 025	131 625	108 225	84 825	61 425	38 025	14 625	0	0	0	0
rata	234 000	615 225	591 825	568 425	545 025	521 625	498 225	474 825	451 425	428 025	404 625	0	0	0	0
Porezna osnovica		-149 052	-125 652	-33 752	-10 352	3 048	851 448	874 848	898 248	921 648	945 048	1 034 673	1 034 673	1 034 673	1 034 673
Porez na dobit		0	0	0	0	762	212 862	218 712	224 562	230 412	236 262	258 668	258 668	258 668	258 668
Neto dobit	-5 200 000	76 173	76 173	144 673	144 673	133 911	746 811	740 961	735 111	729 261	723 411	776 005	776 005	776 005	776 005
<b>NETO PRIMICI</b>	<b>-5 200 000</b>	<b>1 084 673</b>	<b>1 084 673</b>	<b>1 044 673</b>	<b>1 044 673</b>	<b>1 033 911</b>	<b>821 811</b>	<b>815 961</b>	<b>810 111</b>	<b>804 261</b>	<b>798 411</b>	<b>776 005</b>	<b>776 005</b>	<b>776 005</b>	<b>776 005</b>
Kamatna stopa	6%														
stopa povrata	6%														
<b>IRR</b>	<b>16.17%</b>														
<b>NPV</b>	<b>3 131 579 EUR</b>														

S druge strane, najveći rizik zapravo predstavlja mogućnost dobave potrebne količine sječke za nominalni rad od 8000 sati godišnje. Na slici 6-5 prikazano je kretanje IRR-a ukoliko se vrijeme nominalnog rada postrojenja smanjuje.



**Slika 6-5 Analiza IRR-a prema satima nominalnog rada**

Ako bi se desili problemi sa dobavom potrebne količine sječke i smanjili bi se sati rada na nominalnom opterećenju, pitanje isplativosti projekta javlja se već na 6000 sati rada godišnje, što je ekvivalent godišnjoj potrošnji sječke od cca 7000 tona. Iz tog razloga je potrebno osigurati minimalno 7000 tona sječke godišnje po cijeni 50€/t kako bi projekt bio u zoni isplativosti u periodu od 14 godina.

---

## 7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je konfigurirati kogeneracijsko postrojenje sa motorom s unutrašnjim sagorijevanjem pogonjenim sintetskim plinom. Sintetski plin bi se proizvodio iz drvene biomase putem reaktora sa silaznom ozrakom u nepomičnom sloju. Osnovni parametri projektiranog postrojenja su električna snaga do 1MWe (netto) i iskoristiva toplinska snaga do 1780 kW. Postrojenje je koncipirano za rad sa osnovnim gorivom (drvenom sječkom). Predviđeni rad energane je 8000 sati, a utrošak sirovine je predviđen na 9500 tona sječke sa 40% udjela vlage godišnje. U okviru konfiguracije postrojenja, koristila se postojeća tehnologija plinifikacije drvene biomase renomiranog proizvođača. Prema tim podacima konfiguriralo se gore navedeno postrojenje i provela tehno-ekonomska analiza cjelogodišnjeg pogona sa stvarnim investicijskim troškovima ovog postrojenja i simulacija upuštanja postrojenja u pogon. Postrojenje se sastoji od dvije simetrične linije proizvodnje plina, električne i toplinske energije sa 4 reaktora, jednim filerom plina sa hladnjacima i jednim plinskim motorom u svakoj.

Na temelju energetske bilance dobila se ukupna godišnja potrošnja toplinske energije sušare za navedeno postrojenje u iznosu od 11 450 MWht, a proizvodnja topline je iznosila 14 240 MWht. Unutar ekonomske analize uključena su bila 2 načina rada. Prvi je uključivao iskorištavanje toplinske energije isključivo za sušenje sječke, a ostatak topline odvodio bi se suhim hladnjacima po potrebi. Drugi način je uključio iskorištavanje potrebne topline za rad sušare, a višak se prodavao vanjskim korisnicima. Razlika raspoloživa za prodaju u drugom slučaju iznosila je 2 790 MWh godišnje uz godišnji rad postrojenja od 8 000h. Proizvedena električna energija plasirala se na tržište na osnovu ugovora s HROTE-om u trajanju od 14 godina po cijeni važećoj za postrojenja na biomasu električne snage do 2 MW. Zaključnom tehno-ekonomskom analizom pokazalo se da se povrat investicije postrojenja uz prodaju toplinske energije mijenja u idealnom slučaju svega 2%. Uz referentnu cijenu sječke od 50 € po toni i prethodno izračunatim komponentama ekonomskog proračuna unutarnja stopa povrata (IRR) iznosila je 16,17%, a Neto sadašnja vrijednost projekta (NPV) iznosila **3 131 579 €**. Ti su rezultati pokazali točnost tvrdnje u preliminarnoj analizi da je ovaj projekt visoke isplativosti. Promjena cijene biomase u širokom rasponu također nije značajno utjecala na isplativost, ali nesigurnost dobave može predstavljati ozbiljan problem.

Na biomasu kao energent gleda se kao na obnovljivi izvor energije, pa samim time ovakav tip elektrane nije samo isplativ nego i ekološki prihvatljiv.

---

**LITERATURA**

- [1] Coal Energy Systems, Bruce G. Miller
- [2] <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/history-gasification#one>
- [3] Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems
- [4] Construction of a Simplified Wood Gas Generator for Fueling Internal Combustion Engines in a Petroleum Emergency, H. LaFontaine, Biomass Energy Foundation, Inc. Miami, Florida, F. P. Zimmerman, Oak Ridge National Laboratory, Energy Division, 1989.
- [5] Priručnik o gorivima iz drvne biomase; Regionalna energetska agencija Sjeverozapadne Hrvatske;2008.
- [6] Rasplinjavanje I čađenje, dr. ing. Fran Bošnjaković, Zagreb
- [7] Specifični toplinski kapacitet drva, Radmanović, Đukić, Pervan, 2014.
- [8] Podrška developerima – primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvnu biomasu , Lončar, Krajačić, Vujanović, Zagreb 2009.
- [9] Urbas Maschinenfabrik GmbH
- [10] Status report on thermal biomass gasification in countries participating in IEA Bioenergy Task 33, Dr. Hrbek, Vienna University of Technology, Austria, April 2016
- [11] <http://www.xylowatt.com/notar-gasifier/>
- [12] <http://www.ieabioenergytask33.org>
- [13] M. Kralemann, Statusbericht Kraft-Wärme-Kopplung mit biogenen Festbrennstoffen im kleinen Leistungsbereich, 3N-Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V., März 2011, [www.3-n.info](http://www.3-n.info)
- [14] Gard, K.O., Biomass Based Small Scale Combined Heat and Power Technologies, Master Thess, Leulea University of Technology, 2008.
- [15] [www.turboden.it](http://www.turboden.it)
- [16] Hulkkonen, S., CHP generation from biomass fuels, 5Eures International training, Joensuu, 14.6.2006
- [17] <https://www.renewableenergyworld.com/index.html>



[18] IEA Bioenergy / Task 33: Fluidized bed conversion of biomass and waste, Valmet, Denmark, 2017.

[19] Advanced Gasification Technologies for Large Scale Energy Production, Njemačka, 2014.

[20] <http://www.edisonpower.co.jp>

[21] Bacovsky, Dallos, Wörgetter Status of 2nd Generation Biofuels Demonstration Facilities T39-P1b, 2010

[22] <https://www.researchgate.net/>

[23] Artificial neural network modelling approach for a biomass gasification process in fixed bed gasifiers, Mikulandrić, Lončar, Bohning, Bohme, Beckmann, 2014.

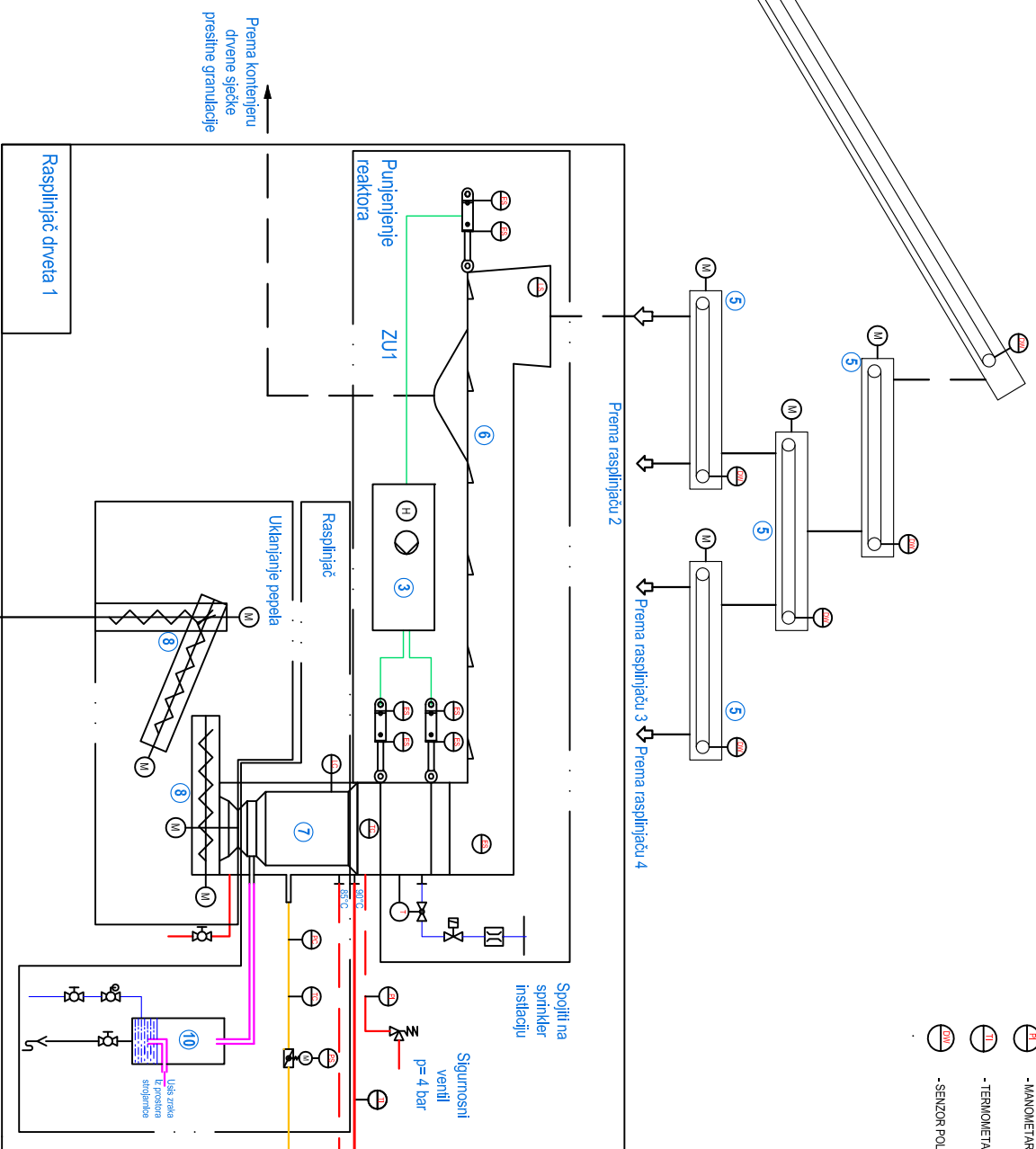
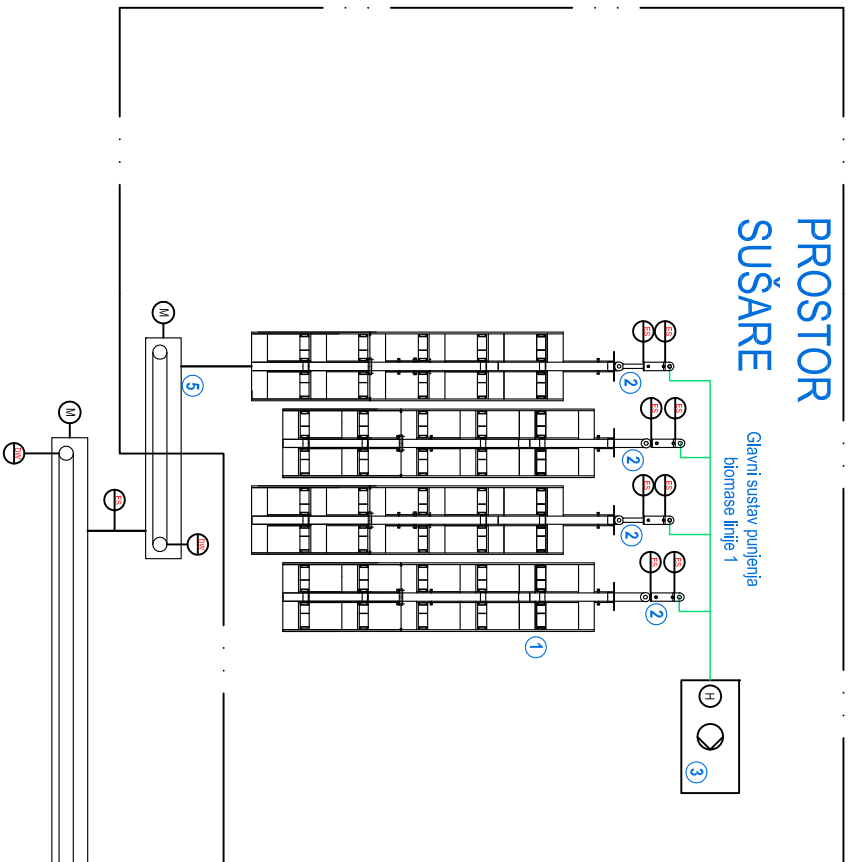
## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Shema postrojenja
- III. Shema dobave goriva
- IV.  $\chi, \mu, \omega$  u ovisnosti od  $\psi$  za  $\sigma=1$  (gore) i za  $\sigma=1,1$  (dolje) [6]
- V.  $i-\psi$  dijagram sa  $\xi=\text{konst.}$ [6]



# PROSTOR SUŠARE

Glavni sustav punjenja biomase linije 1



- 1 Pokretni pod
- 2 Hidraulički dozator goriva
- 3 Hidraulički set
- 4 Stalni trakasti transporter
- 5 Trakasti transporter sjekice
- 6 Odvajач stitnih čestica
- 7 Reaktor
- 8 Pužni transport pepela
- 10 Ovlaživač zraka

- DREVNA SJEKICA
- OMEKŠANA HLADNA VODA
- ZAGRIJANI ZRAK IZ POSTROJENJA
- HIDRAULIKA
- SENZOR RANIJEG POLOŽAJA
- SENZOR RAZINE
- OSJETNIK TEMPERATURE
- OSJETNIK TEMPERATURE
- OSJETNIK RAZINE
- OSJETNIK TLAKA
- OSJETNIK POLOŽAJA
- MANOMETAR
- TERMOMETAR
- SENZOR POLOŽAJA
- POLUZ OGRJEVNE VODE (vodotellan-glikol 30%)
- POUVRAT OGRJEVNE VODE (vodotellan-glikol 30%)
- DRVNI PUNJ
- ZAPORNI VENTIL SA PLOVKOM
- ELEKTROMOTorni POGON
- HIDRAULIČKI SET
- MATERIJLO PROTOKA
- ELEKTROMAGNETNI VENTIL
- TERMOSTATSKI VENTIL SA KONTAKTNIM OSJETNIKOM TEMPERATURE
- VENTIL SA ELEKTROMOTORNIM POGONOM
- SIGURNOSNI VENTIL
- ZAPORNI VENTIL RUKNI
- HIDRAULIČKI POGON

## LEGENDA

Prema konjenju drvene sjekice prestine granulacije

Raspiljač drveta 1

Punjenje reaktora ZU1

Prema raspiljaču 2

Prema raspiljaču 3

Prema raspiljaču 4

Prema glavnom separatoru pepela

Spojiti na sprinkler instalaciju

Sigurnosni ventil p=4 bar

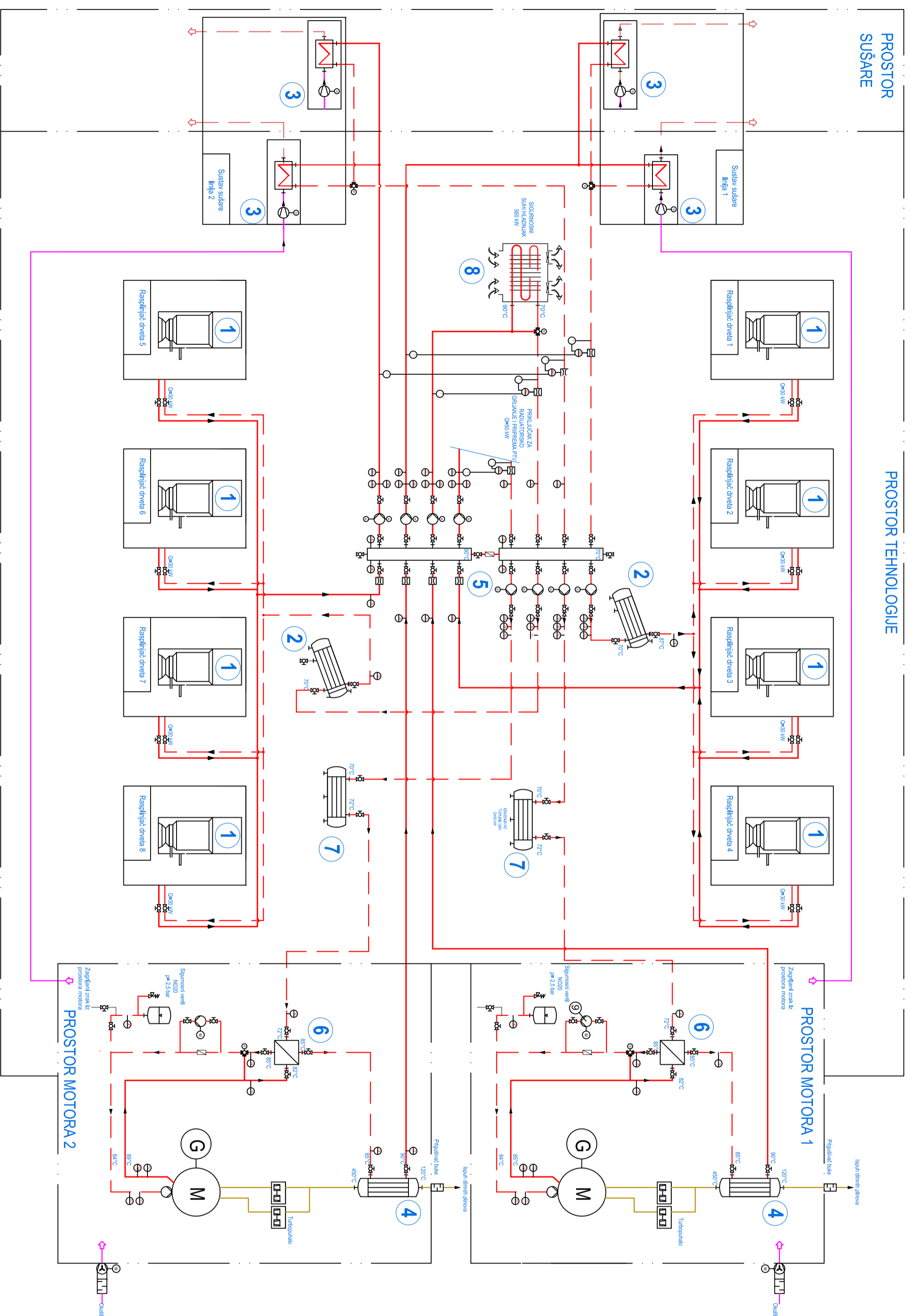
Q=35 kW

Prema toplododnom sustavu

Prema sustavu dšćenja plina

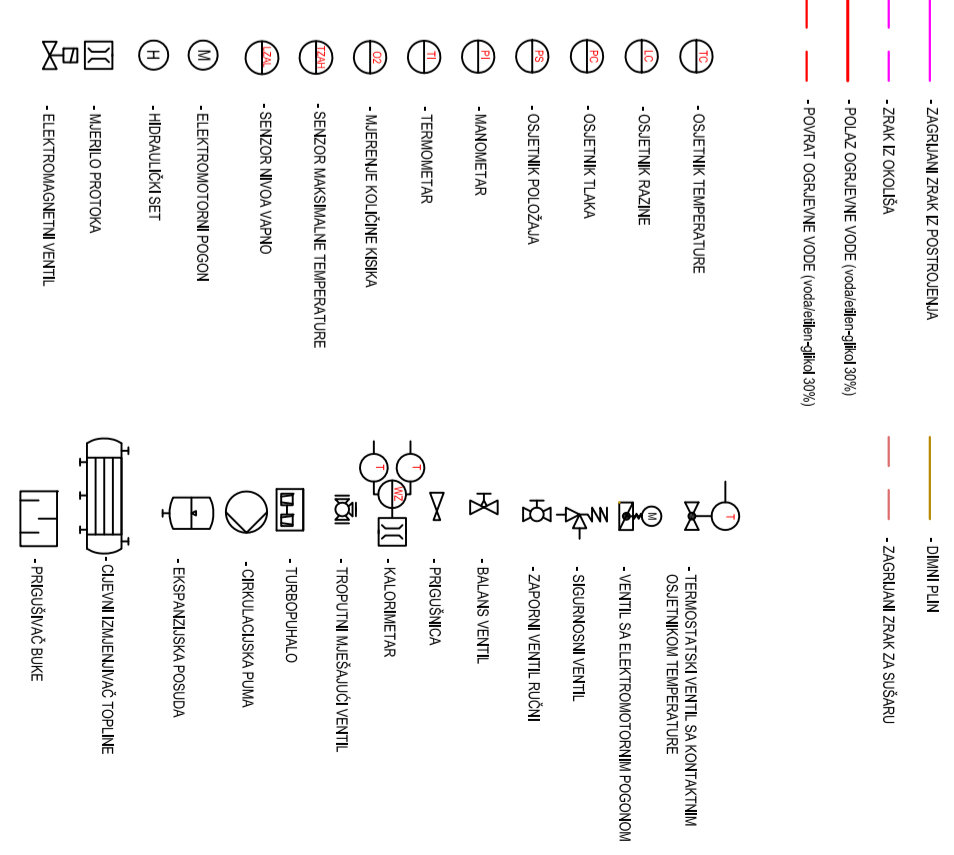
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis
Razradio			
Crtao		Valentino Kudeljian	
Pregledao			
Objekt: Funkcionalna shema			
dobave goriva			
Objekt broj:			
R. N. broji:			



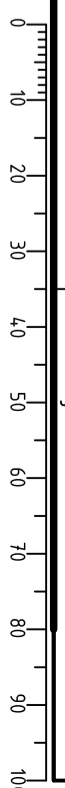


- 1 Reaktor sintetskog plina
- 2 Hladnjač plina
- 3 Izmenjivač topline sušare
- 4 Izmenjivač topline dimnih plinova
- 5 Razdjelnik i sabirnik
- 6 Izmenjivač topline hlađenja motora
- 7 Izmenjivač topline hlađenja sintetskog plina na ulazu u motor
- 8 Sigurnosni suhi hladnjač

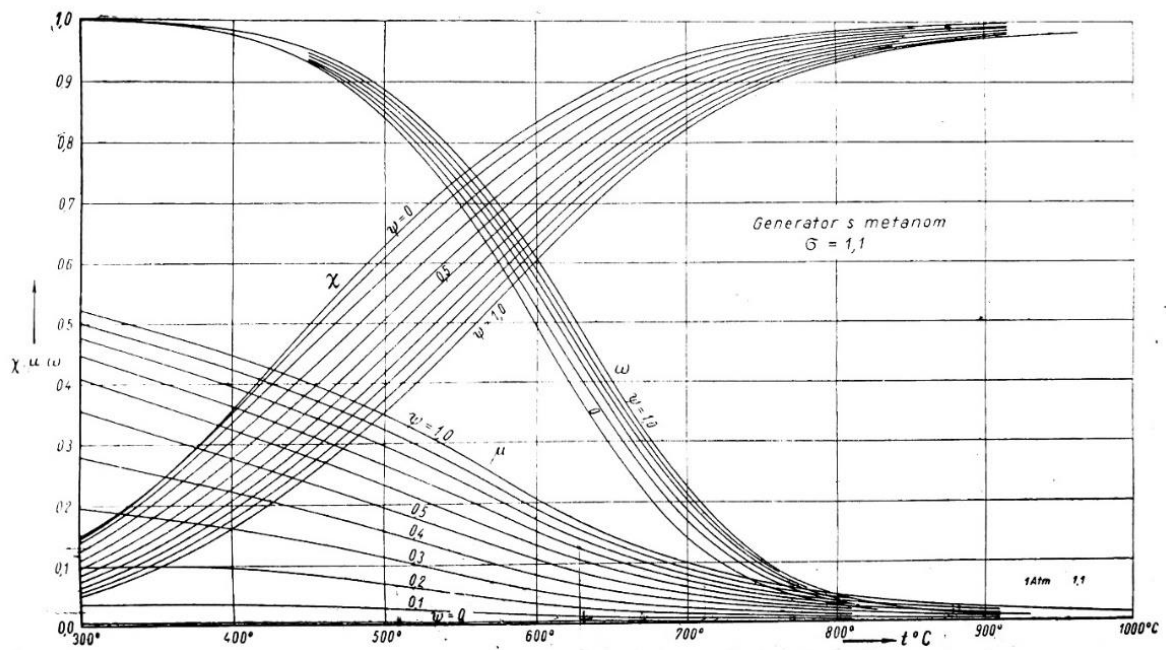
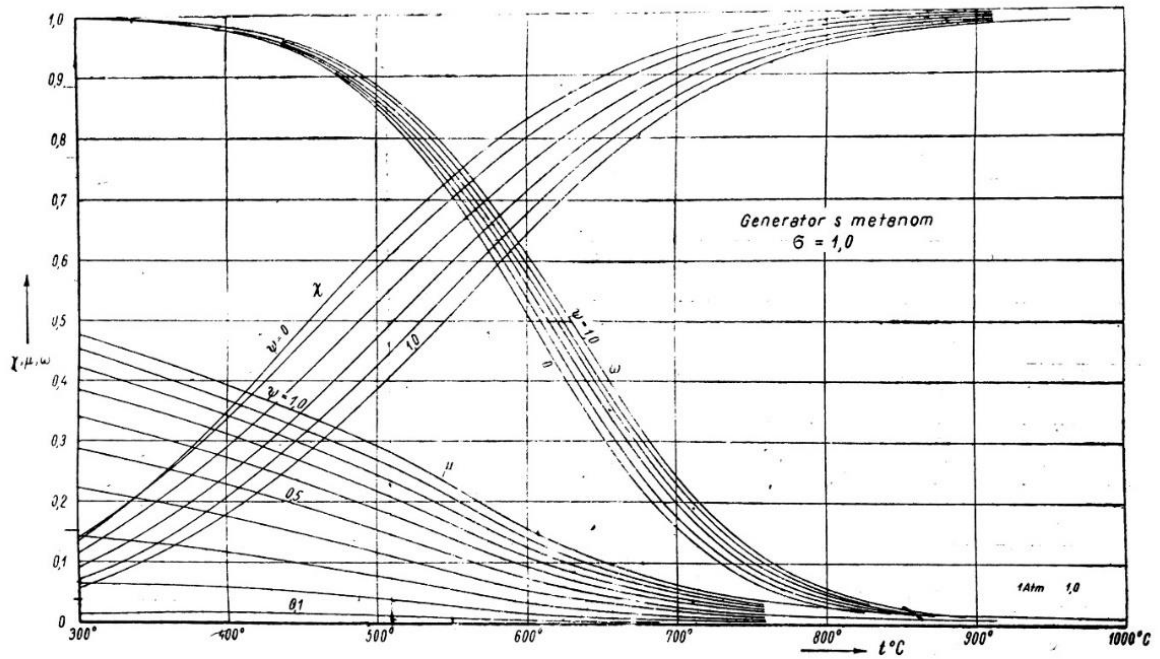
**LEGENDA**



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Portis
Razradio			
Crtao		Valentino Kudeljani	
Pregledao			
Objekt:	Funkcionalna shema toplivodnog sustava		Objekt broj:
			R. N. broji:



Prilog V



Prilog VI

