

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Andrej Plevnik

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Bogdan, dipl. ing.

Student:

Andrej Plevnik

Zagreb, 2012.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Bogdanu i tvrtki Enerkon na savjetima i pomoći tijekom rada.

Andrej Plevnik



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA.....	3
POPIS OZNAKA	4
SAŽETAK.....	5
1. UVOD.....	5
1.1. Zakonski okvir za izgradnju postrojenja.....	6
1.2. Drvna industrija.....	7
2. Podaci o drvnoj industriji.....	8
2.1. Opis postojećeg stanja.....	8
2.2. Novo stanje opreme	10
3. Kogeneracijska postrojenja na biomasu	14
3.1. Kogeneracija s parnim kotlom i kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare.....	14
3.2. Kogeneracija s parnim kotlom i protutlačnom turbinom	15
3.3. Kogeneracija s vrelouljnim kotlom i ORC sustavom	16
4. Uklapanje pojedinog rješenja u promatranu drvnu industriju	17
5. Tehno - ekonomska analiza predloženih rješenja.....	26
6. Ekonomska analiza	35
7. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37

POPIS SLIKA

Slika 1. Dijagram toplinskih potreba za komore za direktno parenje	10
Slika 2. Dijagram toplinskih potreba za komore za indirektno parenje	11
Slika 3. Dijagram toplinskih potreba za sušare za piljenice.....	11
Slika 4. Dijagram toplinskih potreba za sezonsko grijanje	12
Slika 5. Kogeneracija s kondenzacijskom turbinom	14
Slika 6. Kogeneracija s protutlačnom turbinom.....	15
Slika 7. Kogeneracija s ORC sustavom	16
Slika 8. Skupni dijagram potrošnje toplinske energije po mjesecima.....	17
Slika 9. Dijagram trajanja toplinskog opterećenja	17
Slika 10. Dijagram pokrivanja za kogeneraciju s kondenzacijskom turbinom	18
Slika 11. Dijagram pokrivanja za kogeneraciju s protutlačnom turbinom.....	21
Slika 12. Dijagram pokrivanja za kogeneraciju sa standardnim ORC sustavom.....	24
Slika 13. Dijagram pokrivanja rezervnih kotlova u varijanti sa standardnim ORC sustavom.	24

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zajamčene cijene otkupa el. energije iz obnovljivih izvora za 2012. Godinu	7
Tablica 2. Toplinski potrošači-sušare i parionice.....	8
Tablica 3. Toplinski potrošači-grijanje	9
Tablica 4. Sadašnji kotlovi	9
Tablica 5. Moguća rješenja	13
Tablica 6. Rezultati ekonomske analize.....	31

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
m_{od}	kg/s	protok pare na reguliranom oduzimanju
Φ_{od}	kW	maksimalna toplinska snaga oduzimanja
h_1	kJ/kg	entalpija pare na ulazu u turbinu
h_2	kJ/kg	entalpija pare na ekspanzijskoj krivulji turbine na 2,5 bar
h_3	kJ/kg	entalpija pare na ulazu u turbinu
h_4	kJ/kg	entalpija povratnog kondenzata
h_5	kJ/kg	entalpija napojne vode
m_1	kg/s	protok svježere pare na ulazu u turbinu
η_g		stupanj korisnog djelovanja generatora
η_k		stupanj korisnog djelovanja kotla
Q_{kogen}	kWh	energija unesena gorivom u kogeneracijski kotao
$Q_{vršno}$	kWh	energija unesena gorivom u vršni kotao
$Q_{rezerva}$	kWh	energija unesena gorivom u rezervni kotao
H_d	kWh/kg	donja ogrjevna vrijednost
m_{2max}	kg/s	protok pare na protutlaku turbine od 1,5 bar za maksimalnu toplinsku snagu
Φ_{max}	kW	maksimalna toplinska snaga
h_{2p}	kJ/kg	entalpija pare na ekspanzijskoj krivulji turbine na 1,5 bar
$m_{prosjek}$	kg/s	prosječni godišnji protok pare za protutlačnu turbinu
M_{bio}	t/god	godišnja potrošnja biomase

SAŽETAK

Kogeneracija je postupak istovremene proizvodnje električne i korisne toplinske energije u jedinstvenom procesu. Toplina dobivena iz postrojenja je na nižoj energetskej razini i najčešće se koristi za grijanje ili u nekim drugim proizvodnim procesima koji koriste toplinu. Kogeneracija se odlično uklapa u drvne industrije jer imaju mogućnost koristiti otpad od obrade drveta kao gorivo. U obrađenom primjeru drvne industrije, uz standardnu temperaturu tople vode za opskrbljivanje sušara i za grijanje potrebna je i topla voda na većem temperaturnom nivou za parenje bukovih proizvoda. U obzir su se uzela tri rješenja.

Tri su moguće varijante kogeneracije:

- Kogeneracija s parnim kotlom i kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare

Najskuplja varijanta koja uz dodatne kotlove za pokrivanje vršnih opterećenja i opterećenja za vrijeme remonta može bez problema opskrbljivati toplinom potrošače na nižem i višem temperaturnom nivou.

- Kogeneracija s parnim kotlom i protutlačnom turbinom

Varijanta sa najvećim stupnjem iskoristivosti jer se toplina proizvodi po potrebi i ne baca se u okoliš. Snižanjem proizvodnje topline pada i proizvodnja električne energije što doprinosi smanjenju prihoda od prodaje električne energije.

- Kogeneracija s vrelouljnim kotlom i ORC (Organic Rankine Cycle) modulom

Najniža investicija sa upola manjim brojem zaposlenih od ostalih varijanti zbog zakonskih propisa za posude pod tlakom. Nemogućnost opskrbljivanja toplinskom energijom potrošače na većem temperaturnom nivou tako da je za njih potreban rezervni kotao. Izvan sezone grijanja sva toplina se baca u okoliš što rezultira najnižim stupnjem iskoristivosti od svih predloženih varijanti.

Detaljnou tehno-ekonomskom analizom obrađeni su svi troškovi i prihodi za svaku varijantu kogeneracije.

1. UVOD

Kogeneracija je postupak istovremene proizvodnje električne i korisne toplinske energije u jedinstvenom procesu. Kogeneracija koristi toplinu na nižoj energetskej razini koja nastaje uobičajenom proizvodnjom električne energije u termoenergetskim postrojenjima, te se najčešće koristi za grijanje građevina odnosno cijelih naselja ili u drugim proizvodnim procesima. Toplinska energija može se koristiti za proizvodnju pare, zagrijavanje vode ili zraka. Kogeneracija je termodinamički učinkovito korištenje goriva. Prilikom klasične proizvodnje električne energije, dio energije ispušta se u okoliš kao otpadna toplina, a u kogeneraciji ta toplinska energija postaje korisna. Dakle, osnovna prednost kogeneracije je povećana učinkovitost energenta u odnosu na konvencionalne elektrane koje služe samo za proizvodnju električne energije te industrijske sustave koji služe samo za proizvodnju pare ili vruće vode za tehničke procese. U drvnim industrijama gdje je potrebno dosta procesne topline i uz to imaju oko 60% drvnog otpada od ukupne ulazne količine drveta, kogeneracija na taj drveni otpad je odlično rješenje za pokrivanje svih potrošača topline i za istodobnu proizvodnju električne energije. Biomasa koja je obnovljivi izvor energije isto ide u korist za podržavanje kogeneracije na biomasu u sklopu drvnih industrija.

U ovom radu obradit će se integracija kogeneracijskog postrojenja u jednu realnu drvenu industriju sa potrošačima na različitim temperaturnim nivoima. Nakon toga provest će se tehnička i ekonomska analiza za svaku od triju mogućih izvedbi kogeneracije: para-voda ciklus sa protutlačnom turbinom, para-voda ciklus sa kondenzacijskom turbinom i ORC (Organic Rankine Cycle) modulom. Kako svaka izvedba ima svoje prednosti i mane, bez ove analize teško je znati koju izvedbu izabrati a da ista bude najpovoljnija.

1.1. Zakonski okvir za izgradnju postrojenja

Liberalizacija tržišta električne energije, te proizvodnja i plasman električne i toplinske energije propisani su zakonom. Uz te zakone, doneseni su i podzakonski akti koji definiraju položaj obnovljivih izvora energije i kogeneracije. Prema Uredbi o minimalnom udjelu električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, čija se proizvodnja potiče, cilj Republike Hrvatske je da minimalni udio električne energije

proizvedene iz obnovljivih izvora energije i isporučene u prijenosnu, odnosno distribucijsku mrežu iznosi 20 % u ukupnoj potrošnji električne energije do 2020. godine.

Postrojenja koja proizvode električnu energiju iz kogeneracija na biomasu propisana su kao postrojenja koja mogu ostvariti status povlaštenog proizvođača, a status se stječe u Hrvatskoj energetske regulatornoj agenciji (HERA). Ugovor o otkupu električne energije sklapa se s Hrvatskim operatorom tržišta energije (HROTE) na 12 (odnosno 14 po novom Prijedlogu tarifnog sustava) godina, a električna energija predaje se u elektroenergetski sustav. Tarifni sustav propisuje visine tarifnih stavki za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, kao i korektivne faktore cijene koji osiguravaju da proizvodna cijena električne energije i u budućnosti ostane poticajna.

HROTE na svojim web stranicama izvještava o otkupnim cijenama električne energije, a važeće cijene otkupa električne energije za 2012. godinu za obnovljive izvore energije instalirane snage manje ili jednake 1 MW_{el} prikazane su u tablici 1.

godina	2009.	2010.	2011.	2012.
Cijena (kn/kWh)	1,3064	1,3312	1,3552	1,3837

Tablica 1. Zajamčene cijene otkupa el. energije iz obnovljivih izvora za 2012. Godinu

1.2. Drvna industrija

Kao primjer drvne industrije uzet će se tvrtka "Drvni centar Glina" koja je dio Sherif grupe. Drvna industrija nalazi se u Sisačko-moslavačkoj županiji u gradu Glini. Dvije glavne vrste drva koje Sherif grupa izvozi na svoja tržišta su bukva i hrast koje je moguće dobiti u raznim obradama. Od ostalih proizvoda koji se izvoze na tržišta su rezane građe jasena, lipe, jele/smreke i graba. Toplina potrebna za sušare i grijanje koja je potrebna uglavnom svim drvnim industrijama, ovoj koja obrađuje bukvu, potrebna je još toplina na višem temperaturnom nivou za parenje.

2. Podaci o drvnoj industriji

2.1. Opis postojećeg stanja

2.1.1. Postojeće stanje opreme

Drvena industrija ima sljedeće instalirane procesne toplinske potrošače:

Oznaka	Opis	Instalirana snaga	Napomena
	Sušare		
T1.1 – T1.4	Sušara za piljenice 4 x 100 m ³	1200 kW	
T1.5 – T1.8	Sušara za piljenice 4 x 100 m ³	1200 kW	
	Sušare ukupno:	2400 kW	Faktor istovremenosti 0,7
	Korigirana potrebna snaga	1680 kW	
	Komore za parenje		
T1.9 – T1.10	Komora za parenje 2 x 40 m ³	800 kW	Indirektno parenje
	Ukupno komore za ind. parenje	800 kW	Faktor istovremenosti 0,9
	Korigirana potrebna snaga	720 kW	
T2.1	Komora za parenje 100 m ³	900 kW	Direktno parenje
T2.2 – T2.3	Komore za parenje 2 x 50 m ³	1000 kW	Direktno parenje
	Ukupno komore za dir. parenje	1900 kW	Faktor istovremenosti 0,85
	Korigirana potrebna snaga	1615 kW	
	Sveukupna potrebna snaga	4015 kW	

Tablica 2. Toplinski potrošači-sušare i parionice

Drvena industrija ima sljedeće instalirane sezonske toplinske potrošače (za grijanje):

Oznaka	Opis	Potrebna snaga	Napomena
G1	Proizvodni pogon 2814 m ²	650 kW	Sada se ne grije
G2	Nova pilana 720 m ²	250 kW	Sada se ne grije
G3	Skladište 720 m ²	150 kW	Sada se ne grije
G4	Uredski prostor 1134 m ²	150 kW	Grije se u manjem opsegu
	Ukupno grijanje	1200 kW	

Tablica 3. Toplinski potrošači-grijanje

Ukupna potrebna vršna toplinska snaga je oko 5.215 kW, što uz 5 - 10% rezerve to iznosi oko 5.500 - 5.800 kW.

2.1.2. Postojeća energetska oprema

Drvena industrija ima instalirane sljedeće kotlovske jedinice:

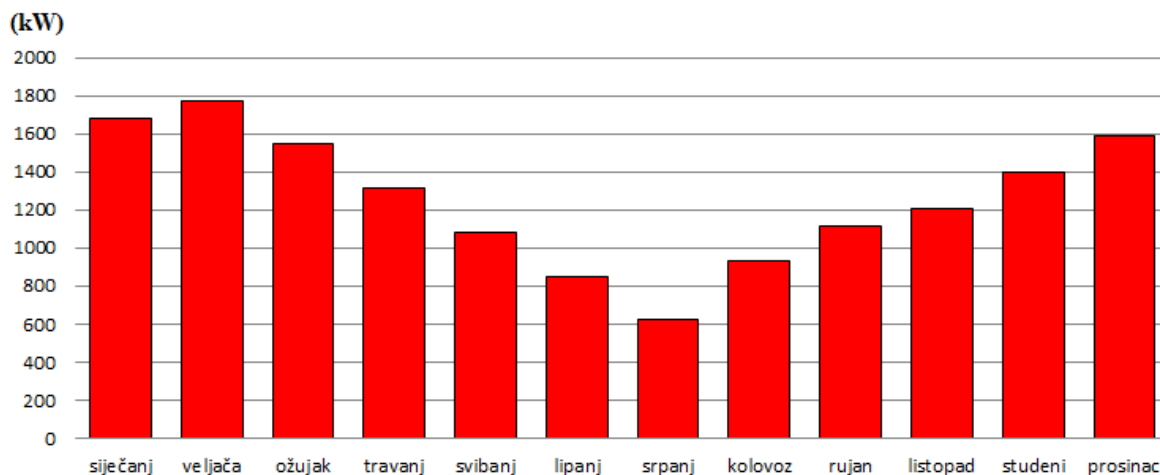
Oznaka	Opis	Instalirana snaga	Napomena
K1	Toplovodni kotao UNICOMFORT tip CMT/F 250	2900 kW	Loženje biomasom Fiksna rešetka s donjim dovodom goriva, 2006. g.
K2	Niskotlačni parni kotao KOHLBACH tip K9-D	1650 kW	Loženje biomasom Fiksna rešetka s donjim dovodom goriva, 2005. g.

Tablica 4. Sadašnji kotlovi

2.2. Novo stanje opreme

2.2.1. Potrošnja toplinske energije različitih tehnoloških potrošača po mjesecima

a) Komore za direktno parenje



Slika 1. Dijagram toplinskih potreba za komore za direktno parenje

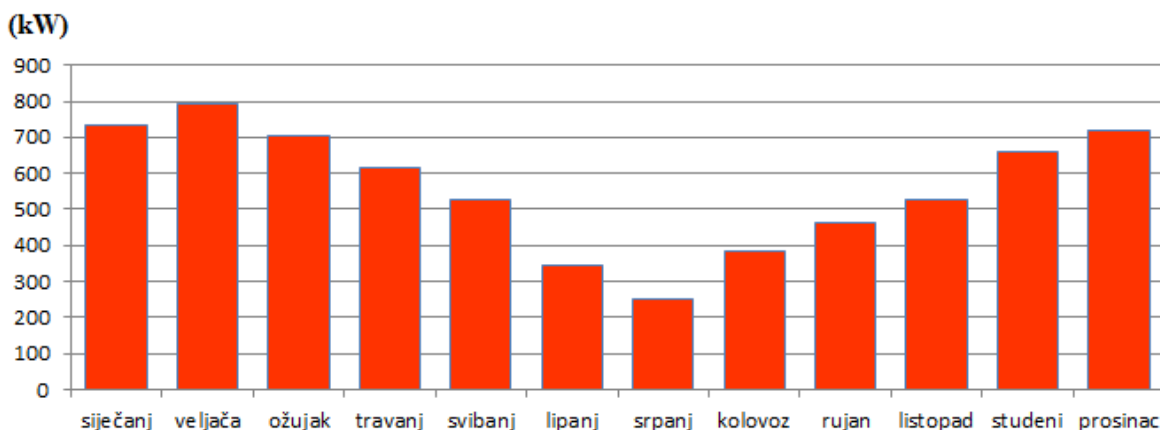
Komore za direktno parenje koriste paru iz niskotlačnog parnog kotla KOHLBACH tip K9-D, toplinske snage 1650 kW. Razlika između komora za direktno i indirektno parenje je to da se para koja nastane u parnom kotlu direktno troši na parenje dok se kod indirektnog topli voda (110 °C) koristi za uparivanje vode u sekundarnom krugu. Te komore je moguće preraditi na komore za indirektno parenje što će omogućiti višestruke koristi:

- 100% povrat kondenzata (manji gubitak omekšane vode) što će rezultirati ekonomskim uštedama,
- veće toplinske uštede zbog iskorištenja energije povratne tople vode u zatvorenom ciklusu.

Uštede nakon rekonstrukcije komora za direktno parenje će osobito doći do izražaja u kogeneracijskom ciklusu u kojem je kvaliteta pripremljene vode (pare) vrlo visoka (zbog zahtjeva visokotlačnog kotla i parne turbine).

Nakon rekonstrukcije, ove komore će biti izjednačene u radnom mediju (toploj vodi 110 °C) s komorama za indirektno parenje, te će za vrijeme redovnog remonta kogeneracijskog postrojenja (u bilo kojoj varijanti) moći koristiti toplinsku energiju iz bilo kojeg postojećeg (rezervnog) kotla na biomasu. To cijelom sustavu opskrbe toplinskom energijom daje veću pouzdanost u pogonu.

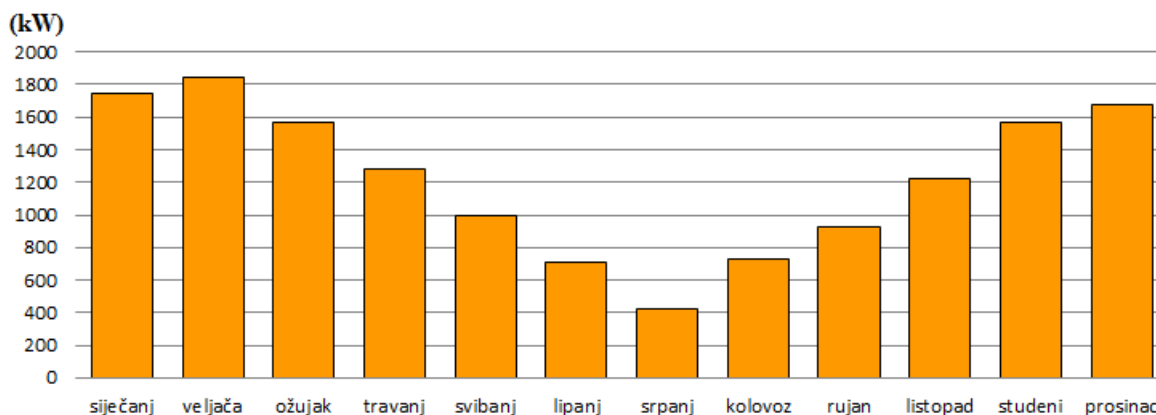
b) Komore za indirektno parenje



Slika 2. Dijagram toplinskih potreba za komore za indirektno parenje

Komore za indirektno parenje već koriste toplu vodu 110 °C, te njihova opskrba toplinskom energijom nije upitna ni u kojoj varijanti.

c) Sušare za piljenice



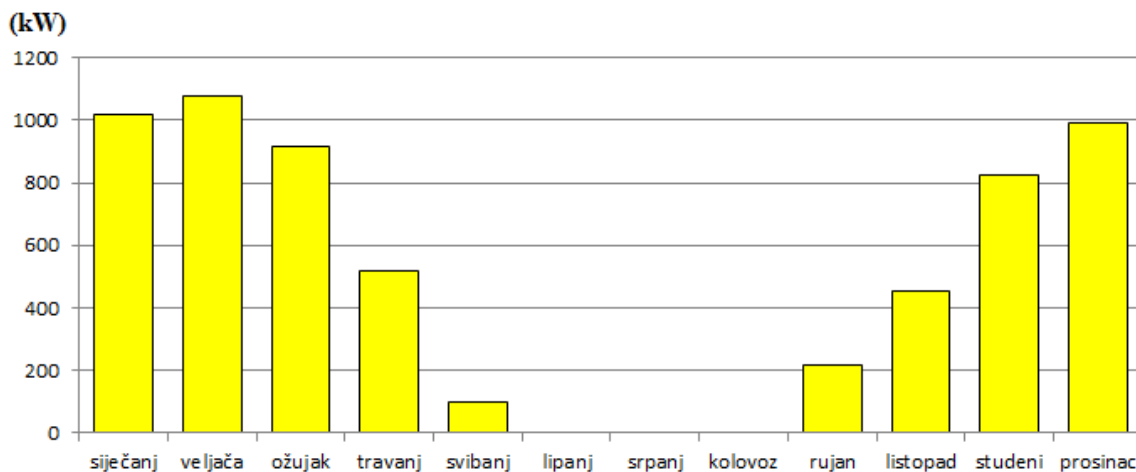
Slika 3. Dijagram toplinskih potreba za sušare za piljenice

Sušare koriste kao medij za prijenos toplinske energije toplu vodu radnih parametara (standardno) oko 90 / 70 °C. To znači da se uklapaju ravnopravno u bilo koju varijantu rješenja kogeneracijskog postrojenja.

Za vrijeme planiranog (redovnog) remonta kogeneracijskog postrojenja, opskrba toplinskom energijom može biti iz bilo kojeg postojećeg (rezervnog) kotla na biomasu. Kako se redoviti

servisni pregledi i remontu planiraju u ljetnom periodu, iako sušare rade 365 dana u godini, ne postoji nikakav problem opskrbe toplinskom energijom iz rezervnog izvora.

d) Sezonsko grijanje



Slika 4. Dijagram toplinskih potreba za sezonsko grijanje

Temperaturni režim za sezonsko grijanje radnih prostorija (proizvodnih hala i ureda) je vrlo fleksibilan i može se prilagoditi bilo kojem rješenju kogeneracije. Vrijeme sezone grijanja se poklapa sa vršnim toplinskim opterećenjima komora za parenje i sušara, no postojeći kotlovi će preuzeti ulogu vršnih kotlova upravo za takve situacije. Zbog velike rezerve u instaliranoj toplinskoj snazi postojećih kotlova na biomasu nije upitan priključak novih potrošača za grijanje nakon izgradnje kogeneracijskog postrojenja. To je dodatna indirektna korist od izgradnje kogeneracijskog postrojenja.

2.2.2. Varijante primjene promatranih kogeneracijskih postrojenja

Novi koncept potrošnje toplinske energije za komore za parenje sastoji se u djelomičnoj rekonstrukciji postojećih direktnih komora za parenje u indirektnu, te grupiranje istih na jedan izvor. Isto je u planu postojeći niskotlačni parni kotao pretvoriti u toplovodni koji će služiti kao rezerva za vrijeme planiranog remonta novog postrojenja.

Dakle način rada u raznim varijantama rješenja izgleda ovako:

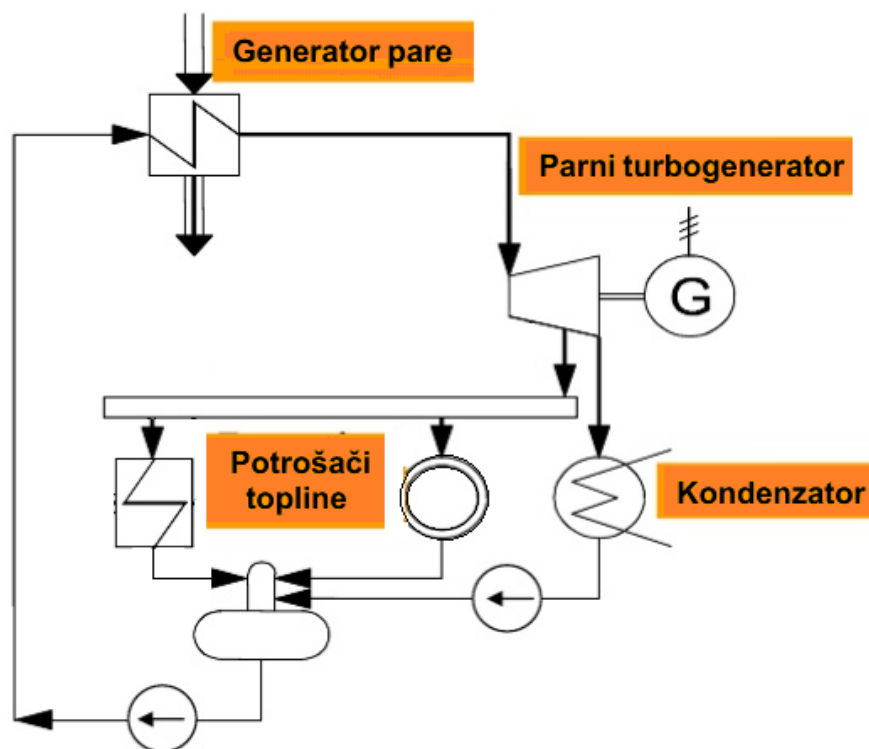
Varijanta rješenja	Redovni pogon kogeneracijskog postrojenja oko 8000 h/god	Vršno opterećenje (oko 1000 h/god) i rezerva za period remonta kogeneracijskog postrojenja (oko 700 h/god)
Voda – para ciklus Kondenzacijska parna turbina 1 MW s regulir. oduzimanjem pare 2,5 bar	Moguća toplinska snaga procesne pare na reguliranom oduzimanju parne turbine je oko 4000 kW. To pokriva sve procesne potrošače (ukupne snage 4015 kW)	Toplina za sezonsko grijanje pokriva se iz postojećeg kotla K2 nakon rekonstrukcije u toplovodni (1650 kW). Za vrijeme redovnog remonta procesni potrošači se pokrivaju iz kotla K1 (2900 kW).
Voda – para ciklus Protutlačna parna turbina oko 1,2 MW s protutlakom 1,5 bar	Moguća toplinska snaga procesne pare na reguliranom oduzimanju parne turbine je oko 5500 – 1500 kW. To pokriva sve procesne potrošače (ukupne snage 4015 kW) i sezonske potrošače (oko 1200 kW).	Remont se vrši izvan sezone grijanja. Za vrijeme redovnog remonta procesni potrošači se pokrivaju iz kotla K1 (2900 kW).
ORC ciklus Turbogenerator 1 MW s kondenzatorom oko 4 MW na temp. 85 / 60 °C	Moguća toplinska snaga na kondenzatoru ORC-a je oko 4000 kW na razini oko 85 °C, što je dostatno za niskotemperaturne potrošače (sušare) i sezonsko grijanje – zajedno oko 3000 – 400 kW. Visokotemperaturni potrošači se pokrivaju iz postojećeg kotla K1 (2900 kW)	Remont se vrši izvan sezone grijanja. Niskotemperaturni potrošači (sušare) se pokrivaju iz postojećeg kotla K2 (1650 kW).

Tablica 5. Moguća rješenja u tri osnovne varijante

3. Kogeneracijska postrojenja na biomasu

3.1. Kogeneracija s parnim kotlom i kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare

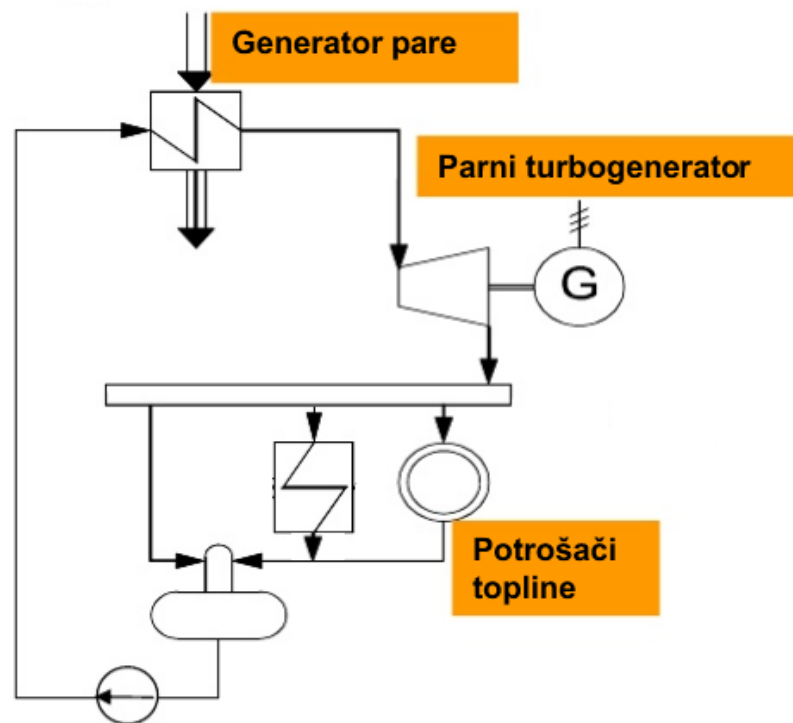
Za ovakav sustav potrebno je imati na raspolaganju turbinu sa dva stupnja: visokotlačni i niskotlačni. Nakon ekspanzije u visokotlačnom dijelu turbine vrši se oduzimanje pare na konstantnom tlaku. Ovaj pogon je povoljan budući da imamo dva stupnja rada: čisti kondenzacijski i protutlačni. Čisti kondenzacijski pogon znači da ne postoji potreba za toplinom pa se proizvodi samo električna energija. U suprotnom primjeru kod protutlačnog slučaja potreba za toplinskom energijom je toliko velika da uopće nema proizvodnje u niskotlačnom dijelu turbine. Realno, 100% protutlačni režim se ne može voditi jer se niskotlačni stupanj mora hladiti tako da dio pare (oko 30%) mora uvijek prolaziti kroz turbinu.



Slika 5. Kogeneracija s kondenzacijskom turbinom

3.2. Kogeneracija s parnim kotlom i protutlačnom turbinom

Najjednostavniji i najčešći oblik, postrojenje protutlačne turbine je bazični proces gdje imamo paru proizvedenu u generatoru pare, ekspanđiranu u turbini i potom dovedenu do razvodnika koji odvodi toplinu dalje u vrelovodni sustav. Turbina je protutlačna i vrši se ekspanzija do protutlaka s temperaturom zasićenja. Ovaj tip postrojenja prisutan je najčešće u industriji kod proizvodnje topline i električne energije. Ova postrojenja su jeftinija, a samim time i jednostavnija za održavanje i upravljanje. Potreba i potrošnja toplinske i električne energije varira tako da u slučaju da imamo preveliku količinu pare, višak uvijek možemo izbacivati u atmosferu. Potreba koju imamo za toplinskom energijom u pogonu određivati će režim rada postrojenja. Količina proizvedene električne i toplinske energije ne može se bilancirati što je najveći problem.



Slika 6. Kogeneracija s protutlačnom turbinom

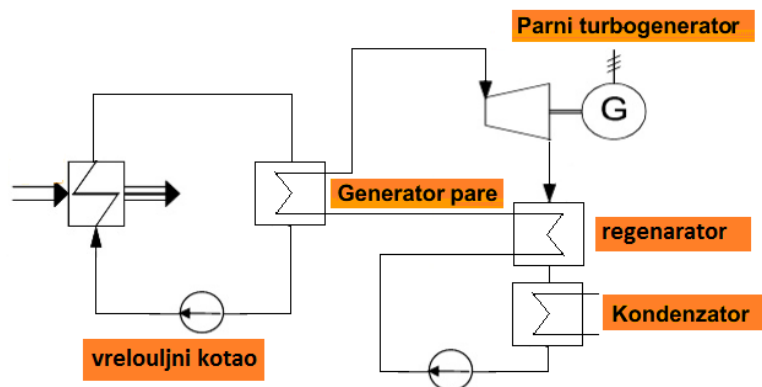
3.3. Kogeneracija s vrelouljnim kotlom i ORC sustavom

Toplina proizvedena u kotlu na biomasu prenosi se u ORC modul preko kruga termo ulja. Korištenje termo ulja kao medija za prijenos topline omogućuje rad kotla s nižim radnim tlakom (za razliku od parnih kotlova) i bez promjene faza radnog medija (isparavanje). ORC postrojenje proizvodi električnu energiju i niskotemperaturnu toplinu u zatvorenom termodinamičkom ciklusu prema Organskom Rankinovom Ciklusu (ORC proces). Prednosti ORC modula su: niža investicija i upola manje potrebno zaposlenih, dok je glavni nedostatak taj da ne može pokrivati toplinskom energijom potrošače na većem temperaturnom nivou (110 °C).

U ORC procesu, koji je projektiran kao zatvoreni ciklus, organski radni medij se:

- 1) predgrijava u regeneratoru
- 2) predgrijava i isparava u izmjenjivaču topline s vrelim termo uljem
- 3) ekspandira u turbini koja pogoni generator
- 4) hladi se (još uvijek u parnoj fazi) u regeneratoru koji predgrijava organski radni medij (i povećava električni učinak u samom krugu radnog medija ORC modula)
- 5) kondenzira u izmjenjivaču topline koji zagrijava krug vode u režimu 90/70°C. Toplinska energija vode koristi se za grijanje prostora tvornice ili se odvodi u okolinu uz pomoć zračnog hladnjaka.
- 6) radnom crpkom vraća na tlak potreban za radni ciklus.

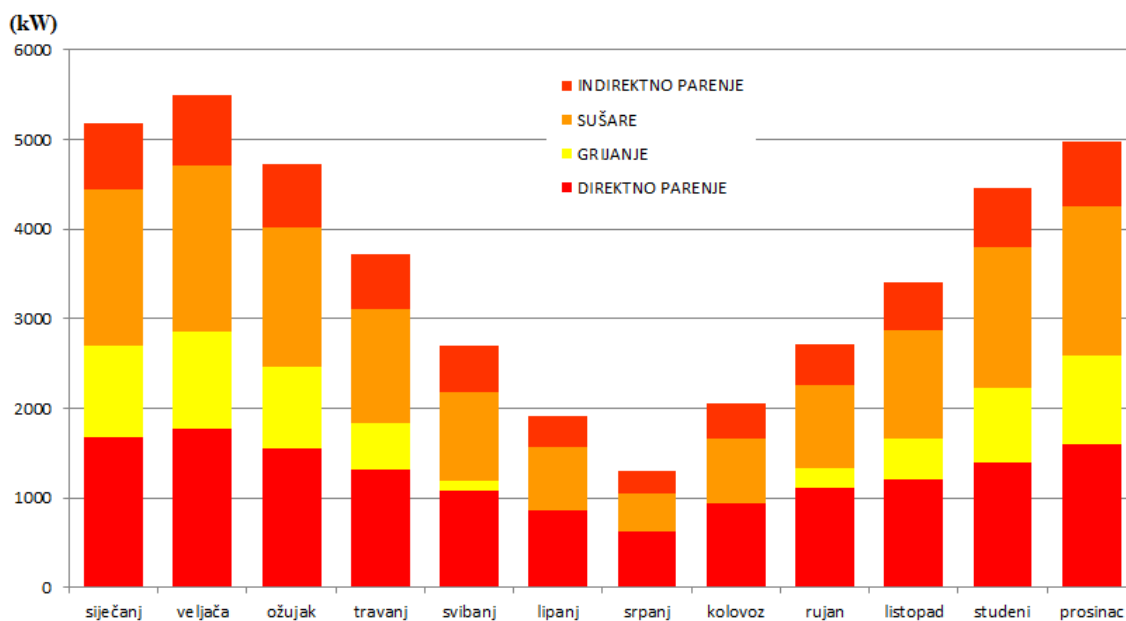
Rad ORC postrojenja u normalnim radnim uvjetima potpuno je automatiziran, kao i procedure za slučaj nužde, te nema potrebe za stalnim nadzorom osoblja.



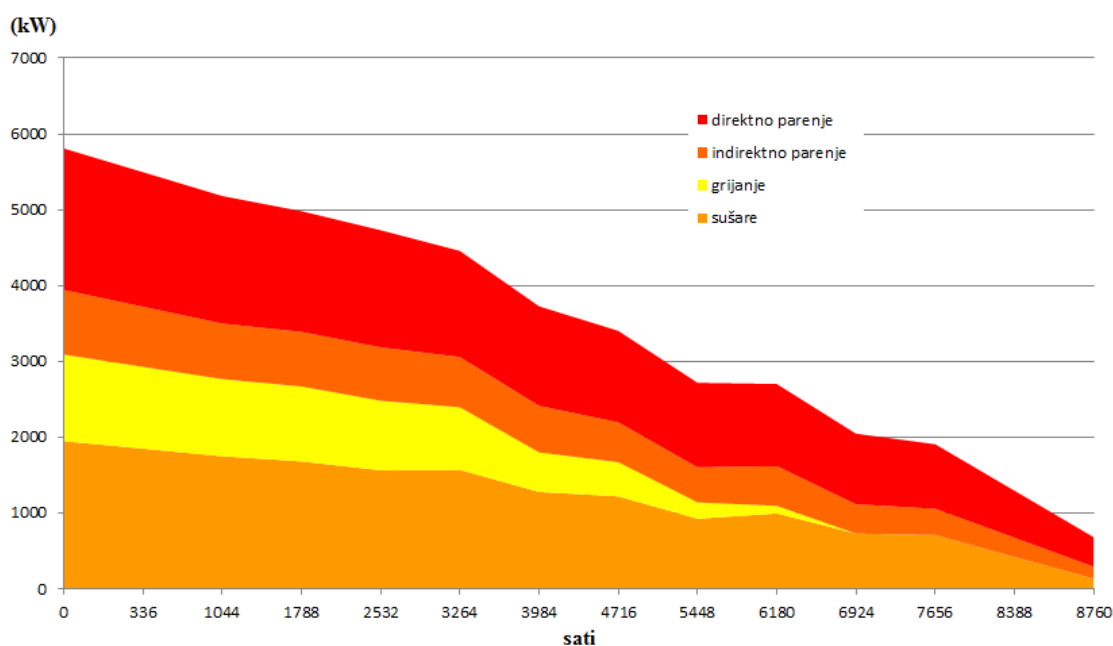
Slika 7. Kogeneracija s ORC sustavom

4. Uklapanje pojedinog rješenja u promatranu drvenu industriju

Iz poglavlja 2.2. u kojem su prikazani svi pojedinačni potrošači toplinske energije možemo izraditi sumarni prikaz potrošnje toplinske energije po mjesecima. To je osnova za izradu dijagrama trajanja opterećenja za cijelu godinu prema kojem će biti moguće analizirati uklapanje svake varijante po odabranim kriterijima.

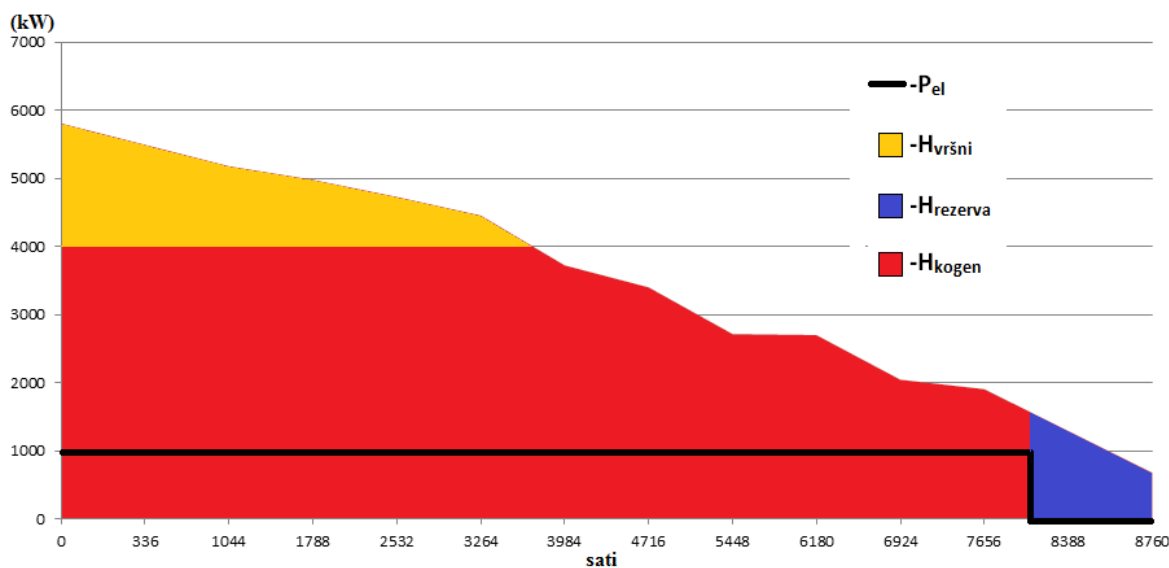


Slika 8. Skupni dijagram potrošnje toplinske energije po mjesecima



Slika 9. Dijagram trajanja toplinskog opterećenja

4.1. Kogeneracija s parnim kotlom i kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare



Slika 10. Dijagram pokrivanja za kogeneraciju s kondenzacijskom turbinom

Iz dijagrama je vidljivo da kogeneracijsko postrojenje može „pokriti“ toplinske potrošače do ukupne snage od 4,0 MW (u dijagramu označeno crvenom bojom i oznakom H_{kogen}). U vrijeme vršnog opterećenja (žuta boja i oznaka $H_{vršni}$) kao i za vrijeme redovnog remonta postrojenja (plava boja i oznaka $H_{rezerva}$) koristit će se jedan od postojećih kotlova na biomasu. Mora se naglasiti da je proizvodnja električne energije (snaga turboagregata) konstantna jer razlike u toplinskom opterećenju nadoknađuje parni kotao s produkcijom svježe pare u rasponu od 70 do 100 % svog kapaciteta.

Ukupna potrošnja biomase (drvene sječke) za godišnji pogon postrojenja je jedan od važnih pokazatelja kvalitete koncepta, te je stoga nužno to izračunati i prikazati.

- Potrošnja biomase

Iz prikazanog dijagrama na slici 10. je vidljivo da kogeneracija pokriva područje potrošnje toplinske energije koje se može aproksimirati dovoljno točno kao dvije površine, i to:

- Dio koji čini kvadrat s ordinatom 4,0 MW i apscisom 3714 h. Predana energija iznosi 14856 MWh.
- Dio koji čini aproksimirani trapez s ordinatom između 4,0 MW i 1,62 MW i apscisom između 3714 h i 8000 h. Predana energija iznosi oko 12043,7 MWh.

Međutim, u parnom kotlu proizvedena toplinska energija za pogon parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare za navedene toplinske potrošače računa se po sljedećem pojednostavljenom postupku:

Ako je potrebna toplinska snaga od 4,0 MW u oduzimnoj pari, tada se potrebna količina pare računa po izrazu:

$$m_{od} = \frac{\Phi_{od}}{h_2 - h_4} = \frac{4000}{2750 - 380} = 1,688 \text{ kg/s}$$

gdje je:

m_{od} – protok pare na reguliranom oduzimanju na tlaku 2,5 bar

Φ_{od} – maksimalna toplinska snaga oduzimanja (iznosi 4000 kW)

h_2 – entalpija pare na ekspanzijskoj krivulji turbine na 2,5 bar (iznosi oko 2750 kJ/kg)

h_4 – entalpija povratnog kondenzata (na 90 °C iznosi približno oko 380 kJ/kg)

Iz svega navedenog proizlazi da je za 4,0 MW toplinske energije potrebno oko 1,69 kg/s procesne pare na reguliranom oduzimanju. Para istih parametara se koristi i za regenerativno predgrijavanje kondenzata u napojnom spremniku s otplinjačem, a prije ulaza u parni kotao, gdje se iskustveno uzima za ovakvu vrstu proračuna oko 8 % od količine svježe pare na izlazu iz kotla. Da bismo planirano proizveli neto 1 MW električne energije za plasman u mrežu, računamo da nam je potrebna snaga agregata koja sadržava i vlastitu potrošnju električne energije za pogon postrojenja oko 1200 kW (elektromotori ventilatora dimnih plinova i zraka za izgaranje biomase, napojnih i kondenzatnih pumpi, transporter biomase i pepela, itd).

Proračun kapaciteta parnog kotla za zajedničku proizvodnju električne i toplinske energije u parnoj turbini s generatorom možemo prikazati formulom:

$$m_1 = \frac{P_g + m_{od} \cdot \eta_g \cdot (h_2 - h_3)}{\eta_g \cdot [(h_1 - h_2) + (h_2 - h_3) - 0,08 \cdot (h_2 - h_3)]}$$

Gdje je:

P_g - bruto snaga generatora (odabrano 1200 kW)

m_{od} – protok pare na reguliranom oduzimanju na tlaku 2,5 bar

h_1 - entalpija pare na ulazu u turbinu (odnosno na izlazu iz kotla, za parametre 40 bar / 400 °C

$$h_1 = 3215 \text{ kJ/kg))}$$

h_2 – entalpija pare na ekspanzijskoj krivulji turbine na 2,5 bar (iznosi oko 2750 kJ/kg)

h_3 - entalpija pare na ulazu u kondenzator (za kondenzatorski tlak 0,1 bar $h_3 = 2400$ kJ/kg)

m_1 – količina svježe pare na ulazu u turbinu (odnosno na izlazu iz kotla)

η_g - stupanj korisnog djelovanja generatora (za 1,2 MW $\eta_g = 0,958$)

(za 4/4 opterećenja $\eta_g=95,8$ %, za 3/4 $\eta_g=95,8$ %, za 2/4 $\eta_g=95,0$ %, za 1/4 $\eta_g=92,8$ %)

$$m_1 = \frac{1200 + 1,688 \cdot 0,958 \cdot (2750 - 2400)}{0,958 \cdot [(3215 - 2750) + (2750 - 2400) - 0,08 \cdot (2750 - 2400)]} = 2,343 \text{ kg/s}$$

Kako se kotlovi tradicionalno dimenzioniraju na zaokruženu dimenziju u t/h, odabire se kotao kapaciteta 8,5 t/h odnosno 2,36 kg/s. Obzirom da se na kotlu vrši proces odsoljavanja i odmuljivanja (koji zajedno iznose oko 1,5 % kapaciteta kotla), maseni protok napojne vode odnosno pare kroz kotao iznosi 2,4 kg/s.

Energija unesena gorivom u kotao računa se prema formuli:

$$Q_{kogen1} = \frac{m_1 \cdot (h_1 - h_5)}{\eta_k} \cdot 3714 \text{ sati} = \frac{2,4 \cdot (3215 - 440)}{0,86} \cdot 3714 = 28761907 \text{ kWh}$$

Gdje je:

Q_{kogen1} – energija unesena gorivom u kotao za dio pod a)

η_k – stupanj korisnog djelovanja kotla ($\eta_k=0,86$)

m_1 – količina napojne vode (iznosi 2,4 kg/s)

h_5 – entalpija napojne vode (za temperaturu 105 °C iznosi 440 kJ/kg)

Q_{kogen2} – energija unesena gorivom u kotao za dio pod b)

Istim postupkom dolazimo do energije za drugi dio i konačno do ukupne energije:

$$Q_{kogen2} = 28\,406\,351 \text{ kWh}$$

$$Q_{vršno} = 3\,908\,337 \text{ kWh}$$

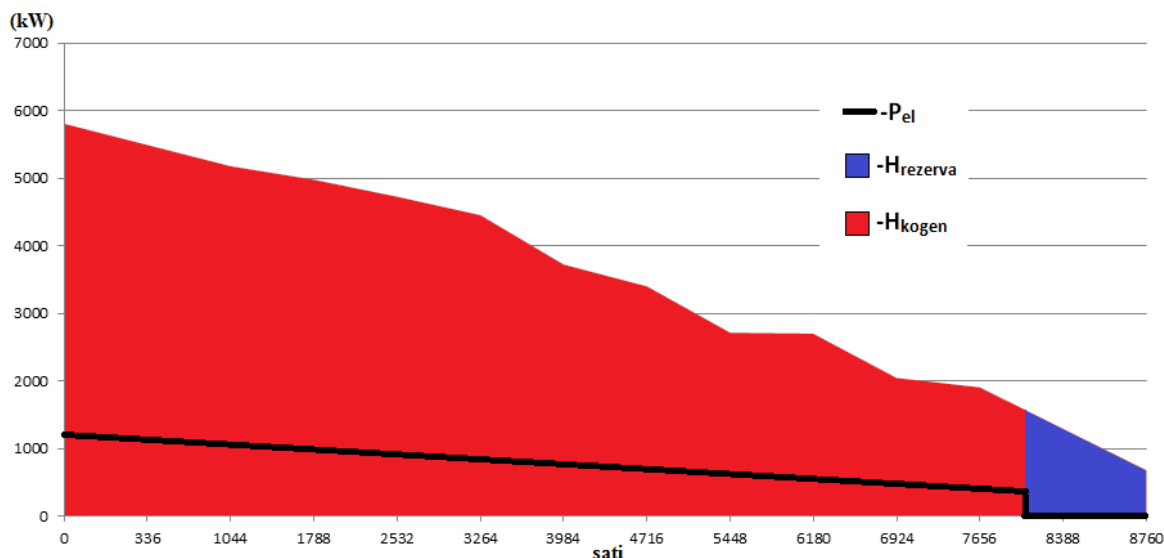
$$Q_{rezerva} = 1\,016\,279 \text{ kWh}$$

$$Q_k = Q_{kogen1} + Q_{kogen2} + Q_{vršno} + Q_{rezerva} = \mathbf{62\,092\,874 \text{ kWh/god}}$$

Potrošnja biomase sa ogrjevnom vrijednosti $H_d = 2,778$ kWh/kg iznosi:

$$M_{bio} = Q_k / (1000 \cdot H_d) = \mathbf{22351,6 \text{ t/god}}$$

4.2. Kogeneracija s parnim kotlom i protutlačnom turbinom



Slika 11. Dijagram pokrivanja za kogeneraciju s protutlačnom turbinom

Iz dijagrama je vidljivo da kogeneracijsko postrojenje može „pokriti“ sve toplinske potrošače do ukupne snage od 5,8 MW (u dijagramu označeno crvenom bojom i oznakom H_{kogen}). U vrijeme redovnog remonta postrojenja (plava boja i oznaka $H_{rezerva}$) koristit će se jedan od postojećih kotlova na biomasu. Mora se naglasiti da proizvodnja električne energije (snaga turboagregata) proporcionalno ovisi o potrošnji toplinske energije (sa zanemarivom razlikom u stupnju djelovanja od maksimalnog do minimalnog opterećenja). Pri tome je odgovarajuća i produkcija svježeh pare u parnom kotlu. Ukupna potrošnja biomase (drvene sječke) za godišnji pogon postrojenja je jedan od važnih pokazatelja kvalitete koncepta, te je stoga nužno to izračunati i prikazati.

- Potrošnja biomase

Iz prikazanog dijagrama na slici 11. je vidljivo da kogeneracija pokriva područje potrošnje toplinske energije koje se može aproksimirati dovoljno točno kao trapez s ordinatom između 5,8 MW i 1,62 MW i apscisom između 0 i 8000 h. Predana energija iznosi oko 30 260 830 MWh. Međutim, u parnom kotlu proizvedena toplinska energija za pogon protutlačne parne turbine za navedene toplinske potrošače računa se po sljedećem pojednostavljenom postupku: Ako je potrebna toplinska snaga od 5,8 MW u protutlačnoj pari, tada se potrebna količina pare računa po izrazu:

$$m_{2\max} = \frac{\Phi_{\max}}{h_{2p} - h_4} = \frac{5800}{2700 - 380} = 2,5 \text{ kg/s}$$

Gdje je:

$m_{2\max}$ – protok pare na protutlaku parne turbine 1,5 bar

Φ_{\max} – maksimalna potrebna toplinska snaga (iznosi 5800 kW)

h_{2p} – entalpija pare na ekspanzijskoj krivulji turbine na 1,5 bar (iznosi oko 2700 kJ/kg)

h_4 – entalpija povratnog kondenzata (na 90 °C iznosi približno oko 380 kJ/kg)

Iz svega navedenog proizlazi da je za 5,8 MW toplinske energije potrebno oko 2,5 kg/s procesne pare na protutlaku turbine. Para istih parametara se koristi i za regenerativno predgrijavanje kondenzata u napojnom spremniku s otplinjačem, a prije ulaza u parni kotao, gdje se iskustveno uzima za ovakvu vrstu proračuna oko 6 % od količine svježe pare na izlazu iz kotla što iznosi oko 0,16 kg/s. Raspoloživa snaga agregata koja sadržava i vlastitu potrošnju električne energije za pogon postrojenja može se prikazati pojednostavljenom formulom:

$$P_g = m_1 \cdot \eta_g \cdot (h_1 - h_{2p})$$

Gdje je:

P_g - bruto snaga generatora

h_1 - entalpija pare na ulazu u turbinu (odnosno na izlazu iz kotla, za parametre 40 bar / 400 °C
($h_1 = 3.215 \text{ kJ/kg}$))

h_{2p} – entalpija pare na ekspanzijskoj krivulji turbine na 1,5 bar (iznosi oko 2700 kJ/kg)

m_1 – količina svježe pare na ulazu u turbinu (odnosno na izlazu iz kotla)

η_g - stupanj korisnog djelovanja generatora (za 1,2 MW $\eta_g = 0,958$)

(za 4/4 opterećenja $\eta_g = 95,8 \%$, za 3/4 $\eta_g = 95,8 \%$, za 2/4 $\eta_g = 95,0 \%$, za 1/4 $\eta_g = 92,8 \%$)

$$P_{g\max} = m_{1\max} \cdot \eta_g \cdot (h_1 - h_{2p}) = 2,66 \cdot 0,958 \cdot (3215 - 2700) = 1312 \text{ kW}$$

Minimalna snaga agregata računa se istim postupkom:

$$m_{2\min} = \frac{\Phi_{\min}}{h_{2p} - h_4} = \frac{1620}{2700 - 380} = 0,698 \text{ kg/s}$$

$$m_{1\min} = m_2 / 0,94 = 0,743 \text{ kg/s}$$

$$P_{g \min} = m_1 \cdot \eta_g \cdot (h_1 - h_2) = 0,743 \cdot 0,928 \cdot (3215 - 2700) = 355 \text{ kW}$$

Obzirom da krivulja u dijagramu potrošnje toplinske energije ima otprilike oblik trapeza, možemo izračunati da je prosječna godišnja bruto snaga agregata oko 835 kW.

Vlastita potrošnja električne energije postrojenja iznosi oko 100 kW, što znači da je prosječna neto snaga agregata oko 730 kW.

Iz prosječne bruto snage agregata možemo izračunati i prosječnu količinu pare:

$$m_{\text{prosijek}} = \frac{P_g}{\eta_g \cdot (h_1 - h_2)} = \frac{835}{0,95 \cdot (3215 - 2700)} = 1,707 \text{ kg/s}$$

Energija unesena gorivom u kotao računa se prema formuli:

$$Q_{\text{kogen}} = \frac{m_{\text{prosijek}} \cdot (h_1 - h_5)}{\eta_k} \cdot 8000 = \frac{1,733 \cdot (3215 - 440)}{0,86} \cdot 8000 = 44735581 \text{ kWh}$$

Gdje je:

Q_{kogen} – energija unesena gorivom u kotao

η_k – stupanj korisnog djelovanja kotla ($\eta_k=0,86$)

m_{prosijek} – količina napojne vode (iznosi 1,733 kg/s)

h_5 – entalpija napojne vode (za temperaturu 105 °C iznosi 440 kJ/kg)

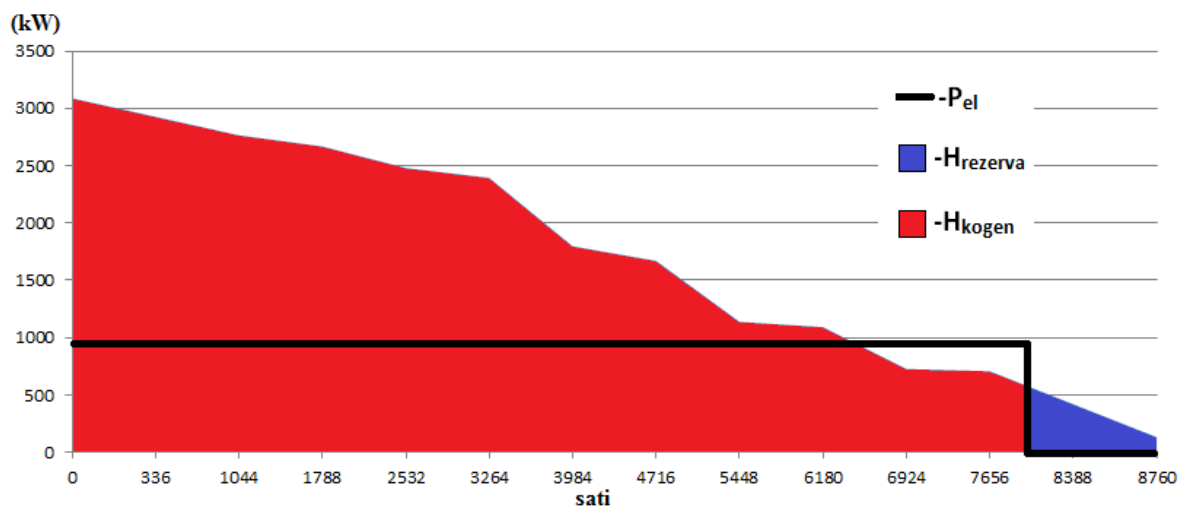
$$Q_{\text{rezerva}} = 1\ 016\ 279 \text{ kWh}$$

$$Q_p = Q_{\text{kogen}} + Q_{\text{rezerva}} = \mathbf{45\ 751\ 860 \text{ kWh/god}}$$

Potrošnja biomase sa ogrjevnom vrijednosti $H_d = 2,778 \text{ kWh/kg}$ iznosi:

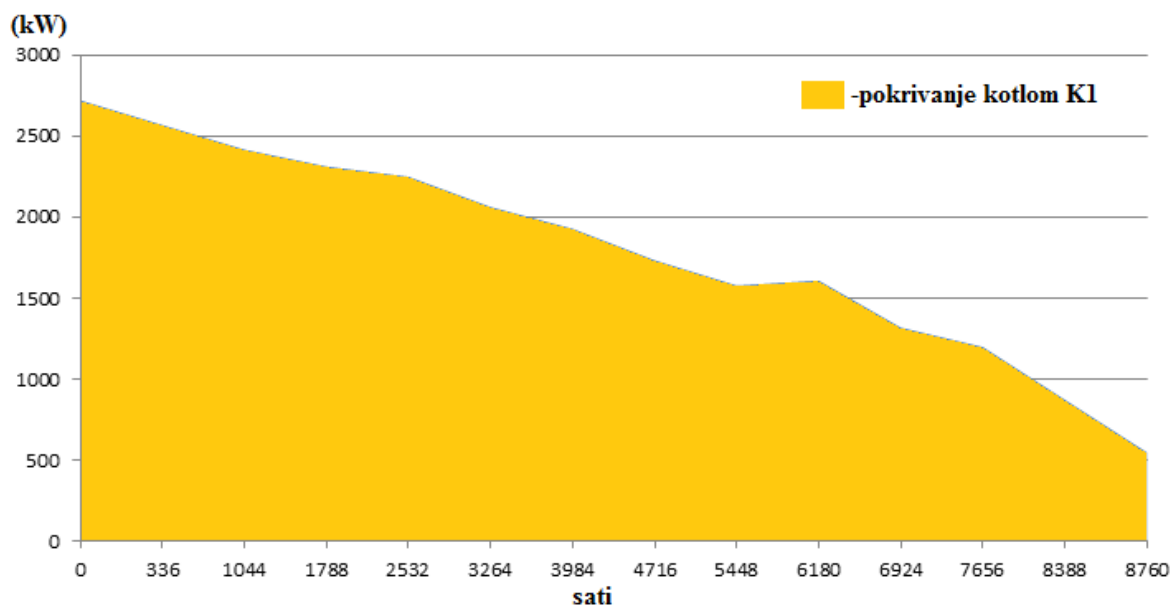
$$M_{\text{bio}} = Q_p / (1000 \cdot H_d) = \mathbf{16469,4 \text{ t/god}}$$

4.3. Kogeneracija s vrelouljnim kotlom i standardnim ORC sustavom



Slika 12. Dijagram pokrivanja za kogeneraciju sa standardnim ORC sustavom

Standardni ORC sustav se nudi kao koncepcija koja proizvodi 1 MW električne energije i daje oko 4 MW toplinske energije na razini tople vode 80 °C. Ta ista voda se može dogrijati izlaznim dimnim plinovima do razine oko 90 °C. Dakle, kogeneracija sa standardnim ORC sustavom može „pokriti“ sve toplinske potrošače koji ne zahtijevaju višu razinu temperature, a to su sušare za piljenice i sezonsko grijanje. Ostali tehnološki potrošači toplinske energije biti će pokriveni radom postojećih rezervnih kotlova.



Slika 13. Dijagram pokrivanja rezervnih kotlova u varijanti sa standardnim ORC sustavom

- Potrošnja biomase

Iz prikazanog dijagrama na slici 12. i 13. je vidljivo da kogeneracija pokriva područje potrošnje toplinske energije za niskotemperaturne potrošače, a rezervni kotlovi visokotemperaturne potrošače.

Glavne tehničke karakteristike ORC postrojenja su:

Snaga na stezaljkama generatora:	949 kW
Vlastita potrošnja el. energije:	165 kW
Potrošnja goriva:	2150 kg/h
Energetska vrijednost goriva	10 MJ/kg

Korisna toplina preuzeta iz ORC sustava je zbroj toplinske energije za sušare i toplinske energije za grijanje. Sušare za piljenice za vrijeme 8000 h rada ORC sustava mogu preuzeti 10 362696 kWh toplinske energije. U isto vrijeme grijanje može preuzeti 4 438008 kWh toplinske energije. Zajedno to iznosi 14 800704 kWh toplinske energije. Ostatak raspoložive toplinske energije iz ORC sustava (oko 17 200000 kWh) mora se baciti preko rezervnih hladnjaka u okoliš.

Istovremeno se za potrebe visokotemperaturnih potrošača (komora za parenje) moraju koristiti postojeći toplovodni kotlovi. Ukupna toplinska energija potrebna za komore za parenje (4 892640 + 11 011272 + 315000) iznosi 16 218912 kWh.

Potrošnja biomase sa ogrjevnom vrijednosti $H_d = 10$ MJ/kg iznosi:

$$M_{\text{bio}} = M_{\text{ORC}} + M_{\text{rezerva}} = \frac{2150 \cdot 8000}{1000} + \frac{16218912}{2,778 \cdot 1000} = 23,038t / \text{god}$$

5. Tehno - ekonomska analiza predloženih rješenja

5.1. Kogeneracija s kondenzacijskom turbinom i s reguliranim oduzimanjem

1) Prihodi i uštede od rada postrojenja

Ukupni prihodi kogeneracijskog postrojenja računaju se kao suma prihoda od prodaje električne energije, prihoda od prodaje toplinske energije i ostalih prihoda.

$$\sum \text{Pr} = \text{Pr } EE + \text{Pr } TE + O\text{Pr}$$

- Produkcija električne energije

Uvjeti prodaje električne energije na hrvatskom tržištu električne energije propisani su energetsom legislativom iz koje slijedi da novo kogeneracijsko postrojenje kao proizvođač električne energije iz obnovljivih izvora energije može steći status povlaštenog proizvođača električne energije s pravom na poticaje. Sukladno toj otkupnoj cijeni napravljen je izračun prihoda od proizvodnje električne energije. Snaga električne energije koja se može plasirati u mrežu za prosječni godišnji režim rada iznosi 1.070 kW. Iz prosječne snage električne energije (1.070 kW) i očekivanog broja radnih sati postrojenja (8.000 h) dobije se godišnja proizvodnja električne energije u iznosu od:

$$1070 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ h} = 8\,560\,000 \text{ kWh/god}$$

Cijena električne energije (prema Prijedlogu tarifnog sustava) za energane na biomasu do 2 MW_{el} iznosi:

$$c = 1,3837 \text{ kn/kWh}$$

Dakle, prihod od prodaje električne energije iznosi:

$$\text{Pr } EE = 8\,560\,000 \text{ kWh} \cdot 1,3837 \text{ kn/kWh} = \mathbf{11\,844\,472 \text{ kn/god}}$$

- Obračunska ušteda od proizvodnje toplinske energije za vlastite potrebe

Interna obračunska cijena toplinske energije procijenjena je na 200,00 kn/MWh (odnosno 0,20 kn/kWh), što pomnoženo sa količinom predane toplinske energije iznosi:

Potrošači	kWh/god
Komore za direktno parenje	11 011272
Komore za indirektno parenje	4 892640
Grijanje	4 438008
Sušare	10 677696
UKUPNO	31 019616

$$PrTE = 31\,019\,616 \text{ kWh} \cdot 0,20 \text{ kn/kWh} = \mathbf{6\,203\,923 \text{ kn/god}}$$

Naziv prihoda	Iznos kn/god
PrEE	11 844472
PrTE	6 203923
UKUPNO	18 048395

- Ostali prihodi

Pod ostale prihode mogli bi se uračunati potencijalni prihodi od prodaje emisija CO₂ koje na trenutnom tržištu imaju cijenu od oko 100 kn/t ili neki drugi potencijalni prihodi, ali oni u ovoj analizi nisu uzeti u obzir.

2) Troškovi pogona

Ukupni troškovi pogona se računaju kao suma troškova goriva, troškova plaća djelatnika, troškova održavanja i vlastite potrošnje te administrativnih troškova:

$$\sum PT = TG + TP + TO + AT$$

- Troškovi goriva

Troškovi goriva računaju se kao umnožak godišnje potrošnje i cijene goriva. Procjenjuje se da će godišnja potrošnja biomase biti oko 22351,6 t/god što će uz cijenu od 300,00 kn/t za troškove pripreme i transporta, dati iznos za troškove goriva u vrijednosti od:

$$TG = 22351,6 \text{ t/god} \cdot 300 \text{ kn/t} = \mathbf{6\ 705\ 494 \text{ kn/god}}$$

- Troškovi plaća djelatnika

Troškovi plaća djelatnika računaju se kao godišnja suma bruto plaća svih djelatnika u kogeneracijskom postrojenju. U kogeneraciji je predviđeno 10 radnih mjesta. Prosječna bruto plaća djelatnika iznosi oko 10.000 kn/mjesečno što na godišnjem nivou iznosi:

$$TP = 10 \text{ radnih mjesta} \cdot 10000 \text{ kn/mj} \cdot 12 \text{ mjeseci} = \mathbf{1\ 200\ 000 \text{ kn/god}}$$

- Troškovi održavanja i vlastite proizvodnje

Troškovi održavanja i vlastite potrošnje računaju se kao suma troškova održavanja, vlastite potrošnje i ostalih promjenjivih troškova održavanja. Prosječni godišnji troškovi održavanja pretpostavljeni su između 1,5 i 2% od investicije u pojedine dijelove opreme i iznose oko 700000,00 kn. Prilikom rada pogona, kogeneracijsko postrojenje troši određeni dio električne energije, što se registrira kao vlastita potrošnja električne energije, a iznos vlastite potrošnje električne energije procijenjen je na oko 1000 MWh/g. Kako smo već uzeli u obzir neto snagu agregata, ove troškove nećemo računati u voda-para ciklusima.

Ostali promjenjivi troškovi održavanja su troškovi vode i održavanja koji nisu vezani uz osnovnu opremu i oni su procijenjeni na 250000 kn/g.

$$TO = \mathbf{950\ 000 \text{ kn/god}}$$

- Administrativni troškovi

Administrativni troškovi su svi troškovi nužni za administrativno funkcioniranje kogeneracijskog postrojenja na tržištu energije i njihov pretpostavljeni iznos je 250000,00 kn/g.

$$TA = 250000 \text{ kn/god}$$

Naziv troška	Iznos troška (kn/god)
Troškovi goriva	6 705494
Troškovi plaća	1 200000
Troškovi održavanja	950000
Administrativni troškovi	250000
UKUPNO	9 105494

3) Stupanj djelovanja postrojenja

Stupanj djelovanja postrojenja računa se prema formuli:

$$\eta_{kond} = \frac{Q+P}{G}$$

Gdje je:

Q – toplinska energija dobivena iz postrojenja s kondenzacijskom turbinom

P – neto proizvedena električna energija

G – energija dovedena gorivom

$$\eta_{kond} = \frac{Q+P}{G} = \frac{26899700 + 8560000}{57168258} = 62,02\%$$

5.2. Kogeneracija s protutlačnom turbinom

1) Prihodi i uštede od rada postrojenja

- Proizvodnja električne energije

Iz prosječne snage električne energije (730 kW) i očekivanog broja radnih sati postrojenja (8.000 h) dobije se godišnja proizvodnja električne energije u iznosu od:

$$730 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ h} = 5 840000 \text{ kWh/god}$$

Cijena električne energije (prema Prijedlogu tarifnog sustava) za energane na biomasu do 2 MW_{el} iznosi:

$$c = 1,3837 \text{ kn/kWh}$$

Dakle, prihod od prodaje električne energije iznosi:

$$\text{PrEE} = 5\,840\,000 \text{ kWh} \cdot 1,3837 \text{ kn/kWh} = \mathbf{8\,080\,808 \text{ kn/god}}$$

- Obračunska ušteda od proizvodnje toplinske energije za vlastite potrebe

Iznosi isto kao i za kondenzacijsku turbinu :

$$\text{PrTE} = 31\,019\,616 \text{ kWh} \cdot 0,20 \text{ kn/kWh} = \mathbf{6\,203\,923 \text{ kn/god}}$$

Naziv prihoda	Iznos kn/god
PrEE	8 080808
PrTE	6 203923
UKUPNO	14 284731

2) Troškovi pogona

- Troškovi goriva

Troškovi goriva računaju se kao umnožak godišnje potrošnje i cijene goriva. Procjenjuje se da će godišnja potrošnja biomase biti oko 16469,4 t/god što će uz cijenu od 300,00 kn/t za troškove pripreme i transporta, dati iznos za troškove goriva u vrijednosti od:

$$\text{TG} = 16469,4 \text{ t/god} \cdot 300 \text{ kn/t} = \mathbf{4\,940\,820 \text{ kn/god}}$$

- Troškovi plaća djelatnika

Iznosi isto kao i za kondenzacijsku turbinu:

$$\text{TP} = 10 \text{ radnih mjesta} \cdot 10000 \text{ kn/mj} \cdot 12 \text{ mjeseci} = \mathbf{1\,200\,000 \text{ kn/god}}$$

- Troškovi održavanja i vlastite potrošnje

Troškovi održavanja i vlastite potrošnje računaju se kao suma troškova održavanja, vlastite potrošnje i ostalih promjenjivih troškova održavanja. Prosječni godišnji troškovi održavanja pretpostavljeni su između 1,5 i 2% od investicije u pojedine dijelove opreme i iznose oko 650000,00 kn. Prilikom rada pogona, kogeneracijsko postrojenje troši određeni dio električne energije, što se registrira kao vlastita potrošnja električne energije, a iznos vlastite potrošnje električne energije procijenjen je na oko 840 MWh/g. Kako smo već uzeli u obzir neto snagu agregata, ove troškove nećemo računati u voda-para ciklusima. Ostali promjenjivi troškovi održavanja su troškovi vode i održavanja koji nisu vezani uz osnovnu opremu i oni su procijenjeni na 250000 kn/g.

$$TO = 900000 \text{ kn/god}$$

- Administrativni troškovi

Administrativni troškovi su svi troškovi nužni za administrativno funkcioniranje kogeneracijskog postrojenja na tržištu energije i njihov pretpostavljeni iznos je 250000,00 kn/g.

$$TA = 250000 \text{ kn/god}$$

Naziv troška	Iznos troška (kn/god)
Troškovi goriva	4 940820
Troškovi plaća	1 200000
Troškovi održavanja	900000
Administrativni troškovi	250000
UKUPNO	7 290820

3) Stupanj djelovanja postrojenja

Stupanj djelovanja postrojenja računa se prema formuli:

$$\eta_{kond} = \frac{Q + P}{G}$$

Gdje je:

Q – toplinska energija dobivena iz postrojenja s protutlačnom turbinom

P – neto proizvedena električna energija

G – energija dovedena gorivom

$$\eta_{kond} = \frac{Q + P}{G} = \frac{30260870 + 5840000}{44735581} = 80,7\%$$

5.3. Kogeneracija sa ORC modulom

1) Prihodi i uštede od rada postrojenja

- Proizvodnja električne energije

Prema specifikaciji proizvođača opreme snaga na stezaljkama generatora za standardni ORC modul iznosi 949 kW. Istovremeno postoji podatak da je vlastita potrošnja električne energije za pogon postrojenja 165 kW. Dakle, neto snaga postrojenja iznosi 784 kW za plasman u mrežu.

$$784 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ h} = 6\,272\,000 \text{ kWh/god}$$

Cijena električne energije (prema Prijedlogu tarifnog sustava) za energane na biomasu do 2 MW_{el} iznosi:

$$c = 1,3837 \text{ kn/kWh}$$

Dakle, prihod od prodaje električne energije iznosi:

$$\text{PrEE} = 6\,272\,000 \text{ kWh} \cdot 1,3837 \text{ kn/kWh} = \mathbf{8\,678\,566 \text{ kn/god}}$$

- Obračunska ušteda od proizvodnje toplinske energije za vlastite potrebe

Obzirom da se u ovoj varijanti pokrivaju potrebe za ukupnom toplinskom energijom ona iznosi isto kao za prethodne dvije varijante:

$$\text{PrTE} = 31\,019\,616 \text{ kWh} \cdot 0,20 \text{ kn/kWh} = \mathbf{6\,203\,923 \text{ kn/god}}$$

Naziv prihoda	Iznos kn/god
PrEE	8 678 566
PrTE	6 203 923
UKUPNO	14 882 489

2) Troškovi pogona

- Troškovi goriva

Troškovi goriva računaju se kao umnožak godišnje potrošnje i cijene goriva. Procjenjuje se da će godišnja potrošnja biomase biti oko 23038 t/god što će uz cijenu od 300,00 kn/t za troškove pripreme i transporta, dati iznos za troškove goriva u vrijednosti od:

$$TG = 23038 \text{ t/god} \cdot 300 \text{ kn/t} = \mathbf{6\,911\,400 \text{ kn/god}}$$

- Troškovi plaća djelatnika

Troškovi plaća djelatnika računaju se kao godišnja suma bruto plaća svih djelatnika u kogeneracijskom postrojenju. U kogeneraciji je predviđeno 5 radnih mjesta. Prosječna bruto plaća djelatnika iznosi oko 10000 kn/mjesečno što na godišnjem nivou iznosi:

$$TP = 5 \text{ radnih mjesta} \cdot 10000 \text{ kn/mj} \cdot 12 \text{ mjeseci} = \mathbf{600\,000 \text{ kn/god}}$$

- Troškovi održavanja i vlastite potrošnje

Troškovi održavanja i vlastite potrošnje računaju se kao suma troškova održavanja, vlastite potrošnje i ostalih promjenjivih troškova održavanja. Prosječni godišnji troškovi održavanja pretpostavljeni su između 1,5 i 2% od investicije u pojedine dijelove opreme i iznose oko 650000,00 kn. Prilikom rada pogona, kogeneracijsko postrojenje troši određeni dio električne energije, što se registrira kao vlastita potrošnja električne energije, a iznos vlastite potrošnje električne energije procijenjen je na oko 1,320 MWh/g. Kako smo već uzeli u obzir neto snagu agregata, ove troškove nećemo računati. Ostali promjenjivi troškovi održavanja su troškovi vode i održavanja koji nisu vezani uz osnovnu opremu i oni su procijenjeni na 250000 kn/g.

$$TO = \mathbf{900\,000 \text{ kn/god}}$$

- Administrativni troškovi

Administrativni troškovi su svi troškovi nužni za administrativno funkcioniranje kogeneracijskog postrojenja na tržištu energije i njihov pretpostavljeni iznos je 250000,00 kn/g.

$$TA = \mathbf{250\,000 \text{ kn/god}}$$

Naziv troška	Iznos troška (kn/god)
Troškovi goriva	6 911400
Troškovi plaća	600000
Troškovi održavanja	900000
Administrativni troškovi	250000
UKUPNO	8 661400

3) Stupanj djelovanja postrojenja

Stupanj djelovanja postrojenja računa se prema formuli:

$$\eta_{kond} = \frac{Q + P}{G}$$

Gdje je:

Q – toplinska energija dobivena iz postrojenja s ORC modulom

P – neto proizvedena električna energija

G – energija dovedena gorivom

$$\eta_{kond} = \frac{Q + P}{G} = \frac{14800704 + 6272000}{47781600} = 44,1\%$$

6. Ekonomska analiza

Ekonomska analiza sve tri odabrane varijante treba istaknuti najpovoljniju varijantu za promatrani slučaj.

Najvažniji čimbenici za analizu su:

- Visina investicije za pojedino rješenje
- Ukupni godišnji prihodi za vrijeme rada postrojenja
- Ukupni godišnji troškovi pogona postrojenja

Ostali važni čimbenici su:

- Visina kamatne stope za otplatu kredita
- Iznos inflacije

Postupkom ekonomske analize dolazimo do sljedećih rezultata:

- Jednostavnog povrata investicije (bez utjecaja cijene kapitala)
- Vrijeme otplate investicije (koje uzima u obzir cijenu kapitala i visinu inflacije)

Još važniji podaci za ocjenu kvalitete pojedinog rješenja su:

- Interna stopa rentabilnosti
- Neto sadašnja vrijednost
- Kvocijent neto sadašnje vrijednosti

Analiza je rađena za period od 12 godina, što je vrijeme trajanja ugovora za prodaju električne energije iz obnovljivih izvora po povlaštenoj cijeni.

Za ulazne podatke u ekonomsku analizu uzelo se:

- Visina inflacije od 3%
- Kamatna stopa kombinacije HBOR-a i komercijalne banke u iznosu od 5%
- Realna kamatna stopa od 1,9%

Rezultati ekonomske analize prikazani su u tablici 6.

Varijante	Kondenzacijska turbina	Protutlačna turbina	ORC modul
Investicija	37 500000 kn	35 250000 kn	33 750000 kn
Prihodi	18 048395 kn	14 284731 kn	14 882489 kn
Troškovi pogona	9 105494 kn	7 290820 kn	8 661400 kn
Povrat investicije	4,2	5,0	5,4
Otplata kredita	4,4	5,4	5,8
Interna stopa rentabilnosti	24	20	18
Neto sadašnja vrijednost	110 150276 kn	80 221802 kn	68 962253 kn
Kvocijent neto sadašnje vrijednosti	2,94	2,28	2,04
godina	12	12	12

Tablica 6. Rezultati ekonomske analize

7. ZAKLJUČAK

U vrijeme povećane brige o zaštiti okoliša raste potražnja za što većim stupnjem iskoristivosti postrojenja u kombinaciji sa obnovljivim izvorima energije. Jedno od boljih rješenja je integracija kogeneracije na biomasu u drvne industrije. Umjesto da se velike količine ostataka od obrade drveta deponiraju mogu se spaljivati u energetskom postrojenju i tako proizvoditi električnu energiju i toplinsku energiju koja se koristi u raznim procesima u proizvodnji. U promatranom slučaju drvne industrije uz standardni potrebni temperaturni nivo od 90°C za opskrbljivanje toplinom sušara i prostorija za grijanje, potreban nam je i viši temperaturni nivo od 110°C za opskrbljivanje parionica bukovih proizvoda.

Uz sve ponuđene varijante samo postrojenje sa standardnim ORC modulom ne može proizvoditi toplinu na temperaturnoj razini od 110°C koje bi se u slučaju drvne industrije bez parionica sigurno puno bolje uklopilo tako da se ta toplina mora proizvoditi iz postojećih kotlova što je i razlog smanjenju iskoristivosti kogeneracije. U slučaju postrojenja s parnim kotlom i protutlačnom turbinom uz odličnu iskoristivost goriva i pokrivanje toplinskom energijom svih potrošača imamo kao nedostatak za vrijeme smanjenog opterećenja smanjenu proizvodnju električne energije što doprinosi smanjenju prihoda od prodaje iste. Isto tako bi se i ova varijanta puno bolje uklopila da je tijekom godine toplinsko opterećenje približno konstantno, ali kako grijanje u vrijeme ljetnih mjeseci nije potrebno, a i ostali potrošači u tom periodu imaju izraženo malu potrebu za toplinskom energijom, niti ova varijanta nije najbolje rješenje.

Kao što je analiza pokazala, kogeneracija s parnim kotlom i kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem pare najbolje se uklapa u promatrani slučaj. Iako je visina investicije najveća od promatranih varijanti, zbog većih i stabilnih prihoda od prodaje električne energije ova varijanta ima puno kraće vrijeme povrata investicije.

Da je u analizi uzeta drvna industrija sa sličnim godišnjim toplinskim opterećenjem u kojoj se svi procesi mogu opskrbiti toplinom na standardnoj temperaturnoj razini od oko 90°C, vjerojatno bi se kogeneracija s parnim kotlom i kondenzacijskom turbinom pokazala kao lošiji slučaj, a ostali detalji bi odlučili o najpovoljnijem rješenju između ostale dvije varijante.

LITERATURA

- [1] Bogdan, Ž., Termoenergetska postrojenja, skripta
- [2] D. Lončar, G. Krajačić, M. Vujanović, Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu, Zagreb, 2009.
- [3] Skupina autora, Osnove primjene biomase, 2012.
- [4] http://hr.wikipedia.org/wiki/Glavna_stranica