Korištenje biomase za proizvodnju električne energije

Primorac, Rebeka

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:967843

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni studij

KORIŠTENJE BIOMASE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Diplomski rad

Rebeka Primorac

Osijek, 2016.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

ETFOS ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek,

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Rebeka Primorac
Studij, smjer:	Diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	
Mentor:	Doc.dr.sc. Hrvoje Glavaš
Sumentor:	
Predsjednik Povjerenstva:	
Član Povjerenstva:	
Naslov diplomskog rada:	**Korištenje biomase za proizvodnju električne energije**
Primarna znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika**
Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:	**Elektrostrojarstvo**
Zadatak diplomskog rada:	Zadatak rada je objasniti postupke proizvodnje električne energije iz biomase. Treba izvršiti analizu rada malih instalacija za proizvodnju bioplina, rasplinjavanje biomase i tehničkim rješenjima poput vijčanog motora, parne turbine, ORC procesa, motora na biljno ulje i stirling motora.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: Jasnoća pismenog izražavanja: Razina samostalnosti:

Potpis sumentora:	Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

U Osijeku, godine

Potpis predsjednika Odbora:

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek,

Ime i prezime studenta:	Rebeka Primorac
Studij :	Diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**:**

Korištenje biomase za proizvodnju električne energije

izrađen pod vodstvom mentora

Doc.dr.sc. Hrvoje Glavaš

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj:

1. UVOD 1

2. POSTUPAK PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ BIOMASE 2

2.1. Proces rasplinjavanja 2

2.2. Modeliranje reaktora za rasplinjavanje 3

2.3. Proizvodnja električne energije 8

2.4. Pročišćavanje bioplina do razine biometana 10

2.5. Tehnologije za pročišćavanje bioplina i proizvodnju biometana 12

2.5.1. Fizička apsorpcija – Pranje (scrubbing) vodom pod pritiskom 12

2.5.2. Kemijska apsorpcija – pranje (scrubbing) aminima 13

2.5.3. Adsorcija s varijacijama tlaka 13

2.5.4. Membranska tehnologija permeacije plina 14

3. TEHNIČKA RJEŠENJA 15

3.1. Kogeneracija 15

3.2. Parna turbina 16

3.3. Plinske turbine 18

3.4. Stirlingov motor 22

3.5. Organski Rankineov ciklus (ORC) 25

3.6. Mikroturbine 27

3.7. Kombinirani ciklus 29

4. ANALIZA RADA MALIH INSTALACIJA ZA PROIZVODNJU BIOPLINA 32

4.1. Usporedba tehnologija 33

4.2. Proračun analize rada malih instalacija za proizvodnju bioplina, na različitim tehnologijama rada bioelektrana 36

4.2.1. Plinski motor 36

4.2.2. Plinska turbina 37

4.2.3. Mikroturbina 39

4.2.4. Stirlingov motor 40

ZAKLJUČAK 42
POPIS SLIKA 45
POPIS TABLICA 47
SAŽETAK 48
ABSTRACT 48
ŽIVOTOPIS 49

1. UVOD

Zadatak rada je objasniti postupke proizvodnje električne energije iz biomase kroz analizu rada malih instalacija za proizvodnju bioplina, rasplinjavanje biomase i tehničkim rješenjima poput vijčanog motora, parne turbine, ORC procesa, motora na biljno ulje i stirling motora.

Biomasa je biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka poljoprivredne proizvodnje (biljnog i životinjskog porijekla), šumarske i srodnih industrija. Energija iz biomase dolazi u čvrstom, tekućem (npr. biodizel, bioetanol, biometanol) i plinovitom stanju (npr. bioplin, plin iz rasplinjavanja biomase i deponijski plin).

Najvažniji obnovljivi izvor energije u Republici Hrvatskoj je biomasa koju možemo podijeliti na drvnu, nedrvnu i životinjski otpad, unutar čega se mogu razlikovati [5]: drvna biomasa (ostaci iz šumarstva, otpadno drvo), drvna uzgojena biomasa (brzorastuće drveće), nedrvna uzgojena biomasa (brzorastuće alge i trave), ostaci i otpaci iz poljoprivrede, životinjski otpad i ostaci, gradski i industrijski otpad

U prvom dijelu ovog rada je objašnjen postupak proizvodnje električne energije iz biomase. To jest kako od biomase dolazimo različitim metodama do pogonskog goriva. Objašnjene su neke od metoda kao na primjer rasplinjavanje biomase, te različiti procesi pročišćavanja bioplina.

Drugi dio je tehnički zanimljiviji. U njemu su opisana tehnička rješenja za proizvodnju električne energije, dani određeni grafički prikazi, sheme sa pripadajućim objašnjenjima procesa. Pošto imamo više tehnologija za proizvodnju električne energije iz biomase, opisano je više pogonskih strojeva i njihovih principa rada, kao na primjer stirlingov motor, organski rainkeinov ciklus i parna turbina, plinska turbina itd.

U trećem dijelu rada možemo vidjeti razlike u dostupnim snagama te učinkovitosti pojedinih pogonskih strojeva. Tu ujedno i vidimo kako određena tehnička rješenja nisu primjenjiva na sva područja, jedna su više bazirana za industriju dok su druga prikladnija za mala postrojenja. Također su i napravljene energetske bilance za pojedine tehnologije različitih snaga.

2. POSTUPAK PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ BIOMASE

2.1. Proces rasplinjavanja

Rasplinjavanje s energetskog gledišta je kemijski proces pretvaranja neke čvrste ili tekuće tvari na primjer ugljena, biomase i sličnih tvari u plin. Ovim se procesom dobiva smjesa plinova poznata kao generatorski plin, koji u svom sastavu sadrži CO, CH_4 i H_2 i ima sljedeće prednosti s obzirom na kruta goriva: lakša i učinkovitija regulacija snage u termoenergetskim postrojenjima, korištenje goriva s ekološko prihvatljivim emisijama i povećanje energetske učinkovitosti termoenergetskih blokova.

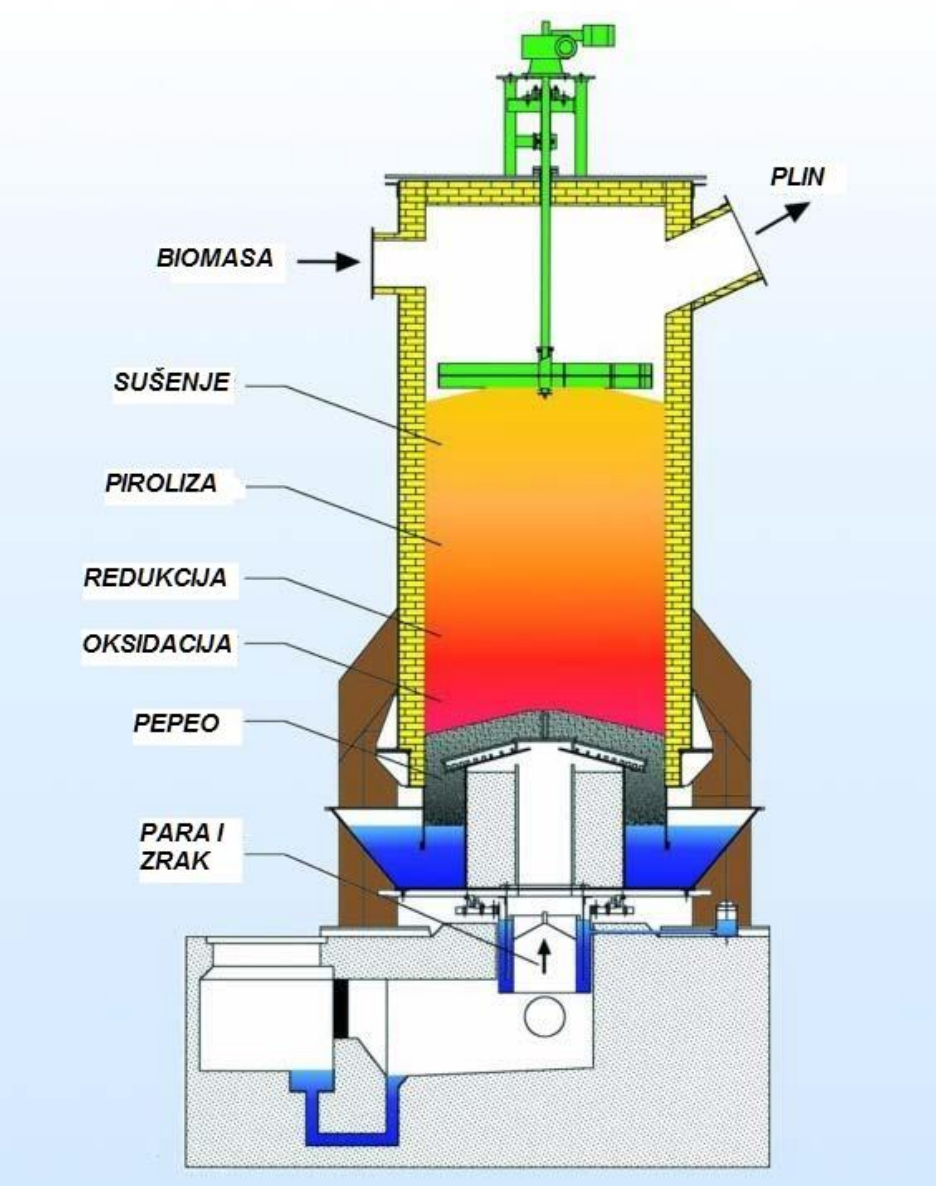
Prilikom rasplinjavanja primarnom energentu se uslijed dodavanja vodika dobiva plin – ugljikovodik. Osnovni proces rasplinjavanja sastoji se od sušenja, toplinske razgradnje organske tvari ili pirolize, djelomičnog izgaranja plinova, para i ugljena iz biomase i rasplinjavanja ostataka. Sama piroliza se odvija na visokoj temperaturi uz dovedenu toplinu bez prisutnosti kisika i vode.

Za rasplinjavanje je potreban rasplinjavajući medij (para, zrak ili kisik) za kemijsku promjenu molekularne strukture sirovine od složenih molekula primarnog energenta do manje složenih molekula plina. Kisik je vrlo čest medij koji se koristi pri rasplinjavanju, bilo da se koristi u čistoj formi (rijetko) ili se uzima iz zraka. Ogrjevna moć i kemijski sastav dobivenog plina značajno ovise o primarnom energentu i količini rasplinjavajućih reagensa [2].

Glavne faze procesa rasplinjavanja:

- sušenje goriva, na temperaturi do približno 200 °C
- piroliza (zagrijavanje bez kisika do temperature od približno 500 °C)
- oksidacija (na temperaturama sloja do 900 °C)
- i redukcija (pri temperaturi do približno 1200 °C)

ilustrirane su na slici 2.1., na shematskom prikazu procesa rasplinjavanja u protustrujnom reaktoru [1].



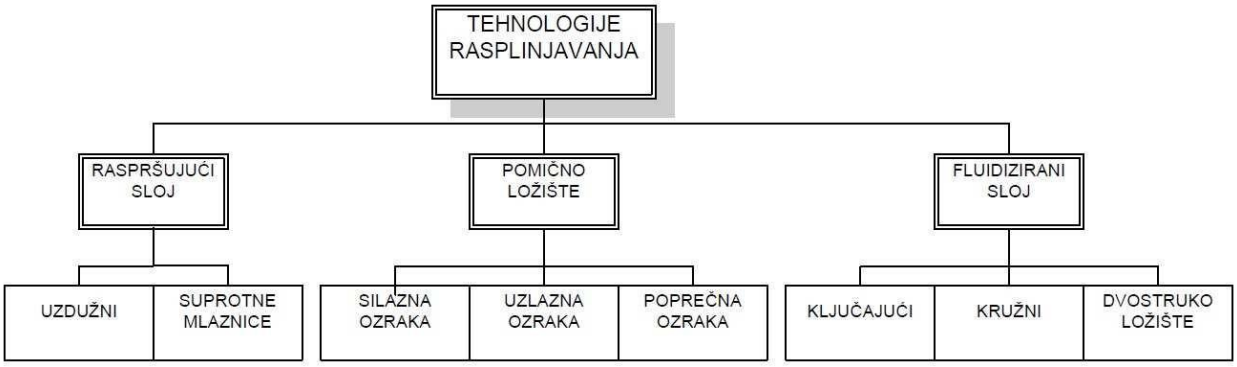
Sl. 2.1. Shema protustrujnog reaktora i faze procesa rasplinjavanja u nepokretnom sloju, prema [1]

2.2. Modeliranje reaktora za rasplinjavanje

Elektrane sa integriranom plinifikacijom osim reaktora za rasplinjavanje sadrže sustav za obradu biomase, sustav za opskrbu reaktora biomasom, sustav za čišćenje plina i sustav za uklanjanje pepela i krutih ostataka. [2]

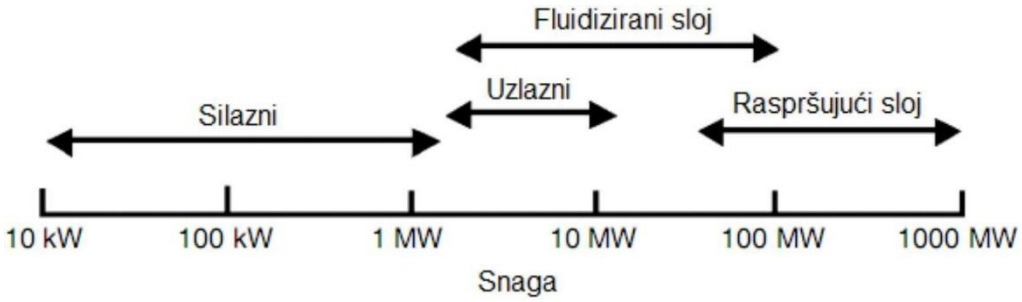
Reaktori za rasplinjavanje se mogu sistematizirati prema vezi između plina i primarnog energenta i prema radnom mediju za rasplinjavanje. Prema vezi između plina i primarnog energenta reaktori za rasplinjavanje se mogu podijeliti na reaktore sa fiksnim ili pomičnim

ložištem, reaktore sa fluidiziranim slojem i reaktore sa raspršujućim slojem. Svaki od nabrojenih tipova reaktora za rasplinjavanje može se dodatno podijeliti sukladno slici 2.2. [2]



Sl. 2.2. Vrste tehnologija za rasplinjavanje, prema [2]

Važno je naglasiti da svaki reaktor za rasplinjavanje funkcionira isključivo za uzak radni kapacitet. Primjerice, reaktori za rasplinjavanje s pomičnim ložištem (silazna i uzlazna ozraka) koriste se za manje snage (10 kW - 10 MW), reaktori sa fluidiziranim slojem su prikladni za srednje snage (5 MW - 100 MW), a reaktori sa raspršujućim slojem za velike snage (>50 MW), kako je prikazano na slici 2.3. [2]



Sl. 2.3. Tipovi reaktora za rasplinjavanje korišteni pri različitim opsezima snaga, prema [2]

Tab. 2.1. Usporedba nekih komercijalnih reaktora za rasplinjavanje, prema [2]

PARAMETAR	FIKSNO/POMIČNO LOŽIŠTE	FLUIDIZIRANI SLOJ	RASPRŠUJUĆI SLOJ
Širina otvora za gorivo	< 51 mm	< 6 mm	< 0,15 mm
Tolerancija prema sitnim nečistoćama	ograničena	dobra	odlična
Tolerancija prema sirovosti	vrlo dobra	dobra	loša
Temperatura izlaznog plina	450 - 650 °C	800 - 1000 °C	> 1260 °C
Sirovina	Niskokalorični ugljen	Niskokalorični ugljen i biomasa	Bilo koji ugljen, ali neprikladan za biomasu
Potreba za reagensom	niska	umjerena	visoka
Temperatura reakcijske zone	1090 °C	800 - 1000 °C	1990 °C
Potreba za parom	visoka	umjerena	niska
Pepeo	suh	suh	rastaljen
Korisnost hladnog plina	80 %	89 %	80 %
Volumen	mali	srednji	veliki
Problemi	Proizvodnja katrana i iskorištenje nečistoća	Ugljeniziranje	Hlađenje sirovog plina

Potrebno je kod projektiranja reaktora za rasplinjavanje odrediti osnovnu masenu bilancu tvari i energetsku bilancu koja uključuje izračun masenog toka proizvedenog plina i izračun potrebne mase goriva. Najvažnije je znati kolika je snaga (MW) na izlazu iz reaktora odnosno ulazna snaga plina (volumni i maseni protok plina uz poznatu donju ogrjevnu moć plina) u primarni agregat (TE, TE-TO, PTE, plinski motor) [2].

Iz proračuna slijedi:

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{Q}}{H_{d,g}} [m^3/s] \tag{2-1}$$

Ovdje je $\dot{Q}$ snaga reaktora za rasplinjavanje, a $H_{d,g}$ donja ogrjevna moć goriva (MJ/m3). Za određivanje potrebnog masenog protoka goriva, M_f mora se znati snaga reaktora $\dot{Q}$, donja ogrjevna moć biomase $H_{d,bm}$ [MJ/kg] i stupanj korisnog djelovanja reaktora η_{gef} :

$$\dot{M}_f = \frac{\dot{Q}}{H_{d,bm} \cdot \eta_{gef}} [kg/s] \tag{2-2}$$

Važno je odrediti stehiometrijsku masu zraka potrebnu za potpuno izgaranje jedinice mase goriva m_{th}. Ako je zrak radni medij reaktora za rasplinjavanje, masa potrebnog zraka ma za rasplinjavanje jedinice mase goriva računa se:

$$\mathrm{m}_a = m_{th} \cdot ER \tag{2-3}$$

gdje je m_{th} jedinica mase goriva, a *ER* omjer korištenog radnog medija i stehiometrijske vrijednosti radnog medija. Ako se u račun uzme maseni protok potrebnog goriva:

$$\dot{M_{fa}} = m_{th} \cdot ER \cdot \dot{M}_f [kg/s] \tag{2-4}$$

$$\mathrm{ER}(<1{,}0)_{rasplinjavanja} = \frac{korištena\ količina\ zraka}{stehiometrijska\ količina\ zraka} = \mathrm{ER}(<1{,}0)_{izgaranja} \tag{2-5}$$

Ovdje je *EA* koeficijent pretička zraka. *ER* određuje svojstva reaktora za rasplinjavanje: tijekom pirolize ovaj je parametar nula, a za vrijeme rasplinjavanja biomase kreće se između 0,2 i 0,3. Kvaliteta generatorskog plina značajno ovisi o vrijednosti *ER* jer mora biti manja od 1,0 radi osiguravanja rasplinjavanja (bez izgaranja) i veća od 0,2 da ne dolazi do nepotpunog rasplinjavanja, koji ima za posljedicu pretjerano gomilanje ugljenizirane biomase i u konačnici nisku ogrjevnu moć plina. Obično je *ER* između 0,2 i 0,4 [2].

Kisik je potrebno dovesti kao preduvjet za dobivanje toplinske energije nužne za endotermičke kemijske reakcije rasplinjavanja. Veći dio toplinske energije generira se prilikom rasplinjavanja biomase:

$$\begin{gathered} \mathrm{C} + 0{,}5O_2 \rightarrow CO + 111\ kJ/mol \\ \mathrm{C} + O_2 \rightarrow CO_2 + 394\ kJ/mol \end{gathered} \tag{2-6}$$

Reaktor treba i toplinsku energiju nužnu za podizanje temperature biomase i radne tvari na temperaturu odvijanja kemijskih reakcija, kao i za nadoknadu toplinskih gubitaka na vanjskoj oplati reaktora. Kod samoodrživog procesa u reaktoru, dio nužne toplinske energije dobiva se iz kemijskih reakcija u reaktoru a dio dolazi iz procesa izgaranja [2].

Ako je radna tvar zrak (70 % slučajeva), dušik iz zraka razrjeđuje plin. U ovom je slučaju ogrjevna moć plina prilično niska, približno 4 - 6 MJ/m^3. Ako je pak radna tvar čisti kisik dobiven odvajanjem (separacijom) iz zraka, ogrjevna moć je puno veća i kreće se od 10-15 MJ/m^3. Značajan nedostatak korištenja kisika je utrošak velike količine energije za odvajanje kisika iz zraka (~2,18 MJ/kg O_2). Za slučaj da se kao radna tvar koristi pregrijana para sama ili u kombinaciji sa zrakom, ili kisikom, dobiva se više vodika [2]:

$$\mathrm{C} + H_2O \rightarrow CO + H_2 \tag{2-7}$$

Potrebna masa pare po jedinici mase goriva, m_{fh}, dobiva se iz molarnog omjera pare i ugljika (S/C):

$$m_{fh} = 18 \cdot \frac{M_f \cdot C}{12} (S/C)[kg_h] \tag{2-8}$$

gdje je M_f masa goriva, a C postotak ugljika u gorivu. Uz ER, S/C molarni omjer također ima velik utjecaj u sastavu plina, vrijednost mu se kreće između 2,0 - 2,5. Za rasplinjavanje biomase potrebne su temperature između 800 - 900 °C, a temperature dimnih plinova su niže. Projektiranje i odabir reaktora započinje sa željenim sastavom izlaznog plina. Kroz odabir vrste korištene biomase i kroz proračun, uzimajući u obzir sve parametre dobiva se kemijski sastav izlaznog plina. [2]

Sastav dimnih plinova nastalih izgaranjem određenog goriva uz poznatu količinu dovedenog zraka pretežno je načinjen od ugljičnog dioksida i pare čija se količina vrlo lako može prilično dobro procijeniti na osnovi kemijskih relacija. Pri kemijskim reakcijama rasplinjavanja ovaj proračun nije tako jednostavan. Količina potrebnog goriva i sastav izlaznog plina moraju se vrlo oprezno procjenjivati jer kemijske reakcije rasplinjavanja nisu uvijek u ravnoteži, pa se može dobiti samo gruba procjena odvijanja reakcija kroz ravnotežne proračune. [2]

2.3. Proizvodnja električne energije

Krajnji proizvod rasplinjavanja drvne biomase je plin bogat metanom, koji se koristi pri proizvodnji električne energije uz pomoć plinskog motora. Izgaranjem rasplinjenog plina u motoru, na vratilu motora se dobiva okretni moment. Vratilo motora je čvrsto spojeno s rotorom generatora. Kao posljedica rada motora dolazi do vrtnje rotora generatora i stvaranja okretnog magnetskog polja. Isto to okretno magnetsko polje presijeca namot statora generatora i dolazi do proizvodnje električne energije [2].

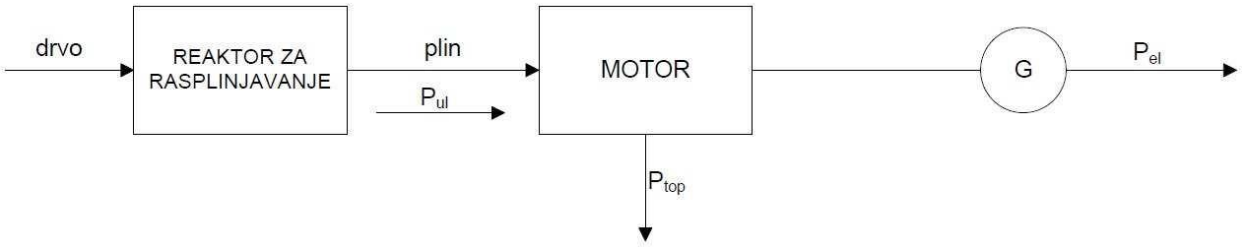
Osnovna shema sustava za proizvodnju električne energije pomoću rasplinjavanja drvne biomase mora sadržavati slijedeće dijelove: reaktor za rasplinjavanje, motor i generator. U sustavu za proizvodnju električne energije rasplinjavanjem drvne biomase sustav sadrži sve one pomoćne sustave i komponente koje su mu neophodne za proizvodnju plina. Motor i generator uglavnom dolaze u kompletu [2].

Pri modeliranju sustava koristio se reaktor učinkovitosti 80 % i Jenbacherov modul za proizvodnju električne energije JMS 420 GS-N.L., [2].

Tab. 2.2. Tehničke karakteristike modula za proizvodnju električne energije, prema [2]

CO-GEN modul		
Izlazna snaga	kWe	1415
Izlazna toplinska snaga (120 °C)	kW	1492
Ulazna snaga	kW	3373
Potrošnja goriva bazirana na Hd od 9,5 kWh/m3	m3/h	355
Električna učinkovitost	%	41,9
Toplinska učinkovitost	%	44,2
Ukupna učinkovitost	%	86,2
Izgubljena toplina (LT-krug)	kW	110
Emisija plinova	Nox < 250 mg/m3 (5 % O2)	

Na slici 2.4. prikazan je primjer sustava za proizvodnju električne energije rasplinjavanjem drvne biomase, [2].



Sl. 2.4. Primjer sustava za proizvodnju električne energije rasplinjavanjem drvne biomase, prema [2]

Kako su poznati podaci motora i generatora te količina i ogrjevna moć plina za proizvodnju 1,415 MWe energije, treba proračunati masu drva potrebnu za proizvodnju iste električne energije. Drvo korišteno pri rasplinjavanju sastoji se od 50,6 % ugljika, 6,0 % vodika, 0,3 % dušika, 41,7 % kisika i 1,4 % pepela (p), a gornja ogrjevna moć mu je 24 MJ/kg. Ova vrijednost ogrjevne moći od 24 MJ/kg vrijedi samo za suho drvo. Kako drvo koje se koristi u postrojenjima za rasplinjavanje nikada nije apsolutno suho, prava ogrjevna moć se mora izračunavati uz poznatu vlažnost drva.

Ako je poznata gornja ogrjevna moć drva, vlažnost i udio vodika u strukturi drva, donja ogrjevna moć računa se prema:

$$H_{d,bm} = H_{g,bm} \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 20300 \cdot \frac{h}{100} - 2260 \cdot \frac{w}{100} \tag{2-9}$$

gdje je w vlažnost izražena u postotcima, h udio vodika izražen u postotcima. Nakon uspješnog određivanja ogrjevne moći drva, može se započeti izračunavanje mase goriva potrebnog za proizvodnju 355 m3/h volumnog protoka izlaznog plina donje ogrjevne moći 9,5 kWh/m3. Upravo su te vrijednosti plina potrebne za proizvodnju 1,415 MW električne energije (podaci za plin i električnu energiju definirani su tehničkim podacima JMS 420 GS-N.L modula). Maseni protok potrebne biomase određene vlažnosti računa se prema:

$$\dot{M}_f = \frac{\dot{Q}}{H_{d,bm} \cdot \eta_{gef}} \tag{2-10}$$

Ovdje je η_{gef} učinkovitost, a $\dot{Q}$ snaga reaktora za rasplinjavanje na izlazu.

Povećanjem vlažnosti drva povećavaju se i zahtjevi za masom drvne biomase koju koristimo kao gorivo. Pri najmanjoj vlažnosti koja se koristila u proračunu (10 %), najmanja je i

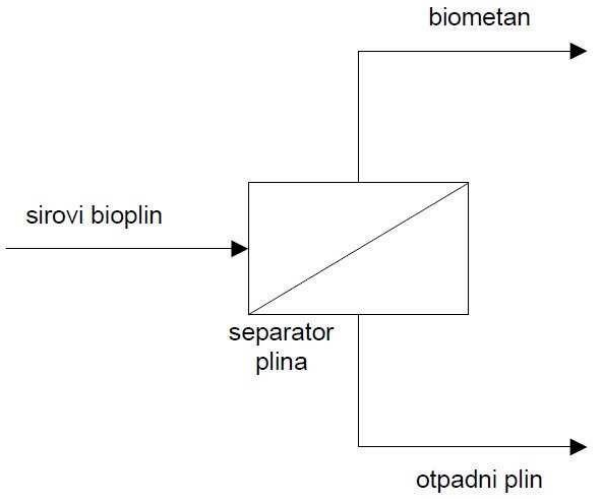
potrošnja drvne biomase (0,753 t/h). Kao što se može očekivati s povećanjem udjela vlage veća je i potrošnja drvne biomase.

Kao što je slučaj kod vlažnosti, masa goriva potrebnog za rasplinjavanje uvelike ovisi o ogrjevnoj moći drvne biomase. Koristi li se drvna biomasa najveće ogrjevne moći, masa drvne biomase potrebne za rasplinjavanje će biti najmanja.

Povećanjem vlažnosti drvne biomase smanjuje se donja ogrjevna moć drva. Za donju ogrjevnu moć potrebno je osim vlažnosti poznavati i postotak vodika u drvnoj biomasi (6 %). Kao i kod mase potrebnog goriva, donja ogrjevna moć se smanjuje sa povećanjem vlažnosti.

2.4. Pročišćavanje bioplina do razine biometana

Pročišćavanje bioplina sastoji se od separiranja plinova, čime se na kraju dobiva struja proizvedenog plina bogatog metanom, s određenom specifikacijom. Ovisno o sastavu sirovog bioplina, to separiranje obuhvaća separiranje ugljičnog dioksida (čime se povećava toplinska vrijednost i Wobbe-indeks), sušenje plina, uklanjanje supstanci u tragovima kao što su kisik, dušik, sumporovodik, amonijak ili siloksani, kao i komprimiranje na pritisak potreban za daljnju uporabu plina [6].



Sl. 2.5. Osnovna shema procesa pročišćavanja bioplina, prema [6]

Nadalje, možda se moraju obaviti poslovi poput odorizacije (ako se utiskuje u lokalnu mrežu prirodnog plina s niskim pritiskom) ili usklađivanja s toplinskom vrijednosti putem doziranja propana. Na slici 2.5. prikazana je osnovna shema procesa pročišćavanja bioplina, koja pruža kratak pregled separiranja i uključenih plinskih struja.

Pri pročišćavanju bioplina, sirovi bioplin u osnovi se dijeli na dvije plinske struje: struju biometana bogatu metanom i struju otpadnog plina (offgas) bogatu ugljičnim dioksidom. Budući da ni jedna tehnologija separiranja nije savršena, ta struja otpadnog plina još uvijek sadrži određenu količinu metana, ovisno o tome koliko se primijenjenom tehnologijom proizvodi metana. Može li se ta plinska struja po zakonu ispustiti u atmosferu ili je se mora dalje obrađivati, ovisi o tom sadržaju metana, o gubitku metana iz postrojenja za pročišćavanje (količina metana u otpadnom plinu u odnosu na količinu metana u sirovom bioplinu) i o pravnoj situaciji na lokaciji postrojenja [6].

U sljedećim odjeljcima opisat će se dostupne tehnologije za najvažnije poslove pri pročišćavanju bioplina (desulfurizacija, uklanjanje ugljičnog dioksida, sušenje). Na kraju ovog odjeljka nakratko će se raspraviti uklanjanje komponenti u tragovima i prikazati mogućnosti tretiranja otpadnog plina.

Sljedeća tablica sadrži tipične sastave bioplina i deponijskog plina, te usporedbu tih vrijednosti s danskim prirodnim plinom. Čini se da je kvaliteta tog prirodnog plina prilično reprezentativna za kvalitete prirodnog plina raspoloživog diljem Europe [6].

Tab. 2.3. Usporedba bioplina, deponijskog plina i prirodnog plina (Danskog), prema [6]

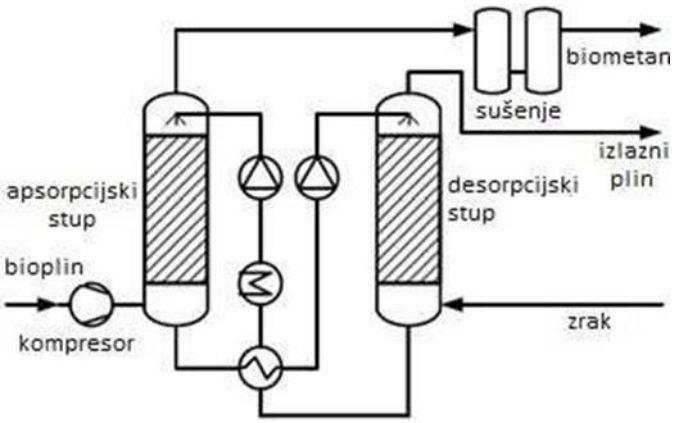
PARAMETAR	BIOPLIN	DEPONIJSKI PLIN	PRIRODNI PLIN (DANSKI)
Metan [vol %]	60 - 70	36 - 65	89
Drugi ugljikovodici [vol %]	0	0	9,4
Vodik [vol %]	0	0-3	0
Ugljični dioksid [vol %]	30 - 40	15 - 50	0,67
Dušik [vol %]	do 1	5 - 40	0,28
Kisik [vol %]	do 0,5	0 - 5	0
Sumporovodik [ppmv]	0 - 4000	0 - 100	2,9
Amonijak [ppmv]	do 100	do 5	0
Niža toplinska vrijednost [kWh/m3(STP)]	6,5	4,4	11

2.5. Tehnologije za pročišćavanje bioplina i proizvodnju biometana

2.5.1. Fizička apsorpcija – Pranje (scrubbing) vodom pod pritiskom

Nedostatak ove metode jest to što se komponente zraka kisik i dušik otapaju u vodi pri regeneraciji, pa se dakle prenose u pročišćenu plinsku struju biometana. Stoga biometan proizveden pomoću te tehnologije uvijek sadrži kisik i dušik. Kako je proizvedena struja biometana zasićena vodom, završni korak u pročišćavanju obično je sušenje plina, primjerice primjenom pranja glikolom.

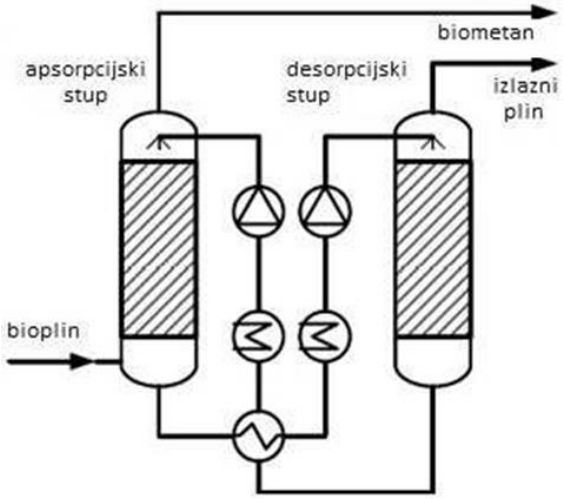
Prednosti su u sljedećim slučajevima: Može se tolerirati sadržaj kisika i dušika u biometanu, uz smanjenu toplinsku vrijednost. Projektirani kapacitet postrojenja je srednji ili velik. Struja biometana može se direktno upotrijebiti pod pritiskom pri isporuci i nije potrebno daljnje stlačivanje. Toplinske potrebe postrojenja za bioplin mogu se (djelomično) pokriti tretmanom otpadnog plina [6].



Sl. 2.6. Shema procesa za pročišćavanje bioplina pomoću pranja vodom pod pritiskom, prema [6]

2.5.2. Kemijska apsorpcija – pranje (scrubbing) aminima

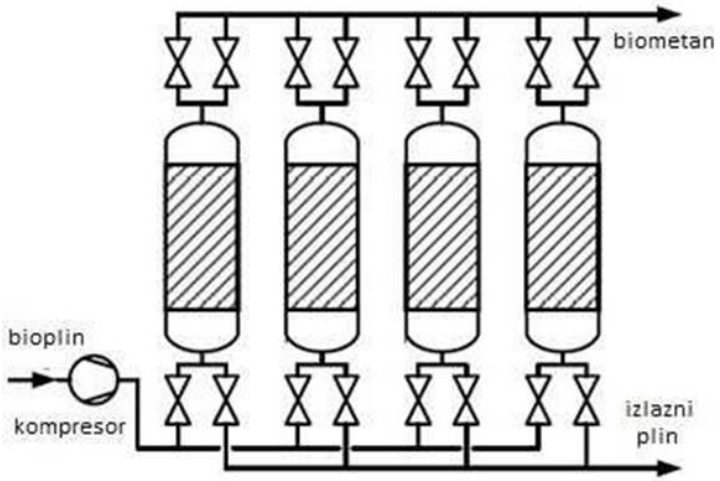
Prednosti: Velika proizvodnja metana je poželjna pa stoga nije potreban nikakav daljnji tretman otpadnog plina da bi se smanjile emisije metana. Visok sadržaj metana u struji biometana je poželjan. Projektirani kapacitet postrojenja je srednji ili velik. Struja biometana može se koristiti pri gotovo atmosferskom pritisku kod isporuke i nije potrebna nikakva daljnja kompresija. Toplinske potrebe koraka regeneracije mogu se pokriti infrastrukturom raspoloživom u postrojenju za bioplin [6].



Sl. 2.7. Shema procesa za pročišćavanje bioplina pomoću amina, prema [6]

2.5.3. Adsorcija s varijacijama tlaka

Prednosti ove tehnologije su u sljedećim slučajevima: Sadržaj metana u struji biometana (95 – 99 vol %) prikladan je za daljnju uporabu. Projektirani kapacitet postrojenja je malen ili srednji. Struja biometana može se koristiti direktno pod pritiskom pri isporuci i nije potrebna nikakva daljnja kompresija. Toplinske potrebe postrojenja za bioplin mogu se (djelomično) pokriti tretmanom otpadnog plina [6].

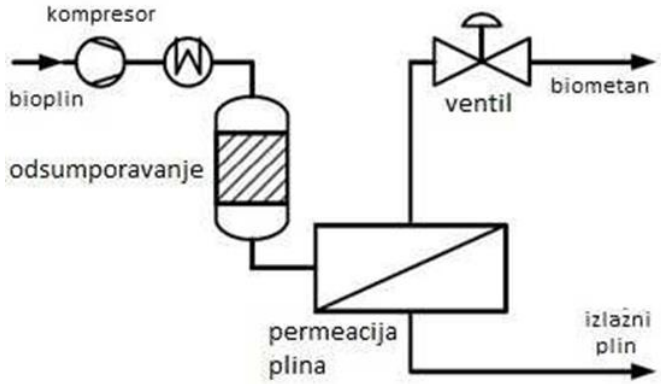


Sl. 2.8. Shema procesa za pročišćavanje bioplina adsorcijom s varijacijama tlaka, prema [6]

2.5.4. Membranska tehnologija permeacije plina

Prednosti ove tehnologije su u sljedećim slučajevima: Poželjni su velika fleksibilnost prema organizaciji procesa i prilagodba lokalnom objektu za proizvodnju bioplina, kao i fleksibilno ponašanje pri djelomičnom opterećenju i dinamičnost postrojenja. Sadržaj metana u struji biometana (95 - 99 vol %) prikladan je za daljnju uporabu. Projektirani kapacitet postrojenja je malen ili srednji.

Struja biometana može se koristiti direktno pod pritiskom pri isporuci i nije potrebna nikakva daljnja kompresija. Toplinske potrebe postrojenja za bioplin mogu se (djelomično) pokriti tretmanom otpadnog plina. Dodatne kemikalije i druge potrošne materijale treba izbjegavati. Mora se realizirati brzo pokretanje iz stanja hladnog mirovanja i postupak uključivanja/isključivanja [6].



Sl. 2.9. Shema procesa za pročišćavanje bioplina membranskom tehnologijom permeacije plina, prema [6]

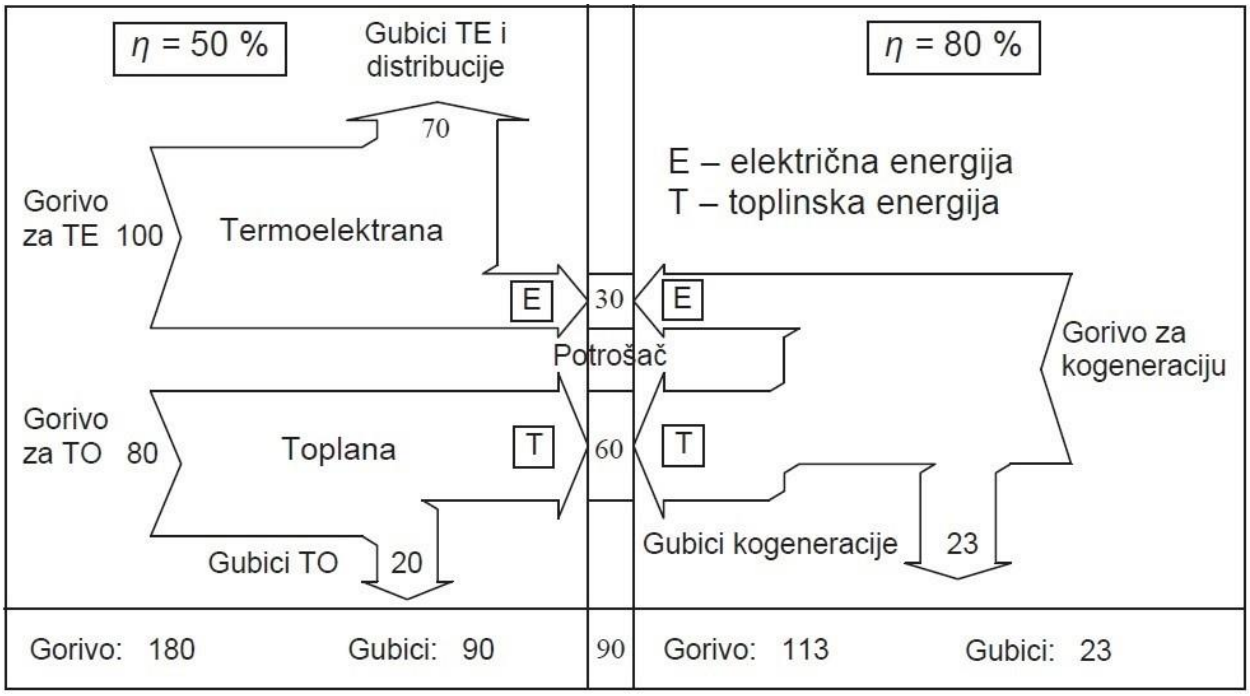
3. TEHNIČKA RJEŠENJA

U današnje vrijeme svjesni smo činjenice da racionalno gospodarenje energijom predstavlja ključnu pretpostavku održivog razvoja. Društvo se usmjerava na korištenje efikasnijih tehnologija, koje će omogućiti maksimalno iskorištenje primarne energije u svim energetskim procesima, te pored ekonomskih ostvariti i ekološke uštede, doprinoseći tako smanjivanju štetnog utjecaja na okoliš [1].

3.1. Kogeneracija

Kogeneracija je tehnologija istovremene proizvodnje električne i korisne toplinske energije. Potencijalna mjesta za primjenu kogeneracije nalaze se svugdje gdje postoji istovremena potreba za električnom i toplinskom energijom. Osim energana u različitim industrijama, kogeneracija je pogodna za sustave daljinskog grijanja, za hotele, bolnice, zračne luke, trgovačke centre, sportske dvorane ili bazene.

Prednosti kogeneracijskih sustava, u odnosu na sustave odvojene opskrbe vidljive su pri usporedbi gubitaka koji nastaju proizvodnjom električne i toplinske energije. Za istu količinu primarne energije (fosilnog goriva, vodika, biomase, industrijskog ili poljoprivrednog otpada) kogeneracijsko postrojenje isporučit će u nekim slučajevima i do 40 % više električne i toplinske energije nego sustav s odvojenom opskrbom. Ilustracija usporedbe gubitaka odvojene i kogeneracijske proizvodnje prikazana je na slici 3.1 [1].



Sl. 3.1. Usporedba energetske učinkovitosti kogeneracije i odvojene proizvodnje, prema [5]

Veličina kogeneracijskog postrojenja kreće se u rasponu od nekoliko kW do više stotina MW. Postrojenja čija snaga ne prelazi 1 MW_e nazivaju se male kogeneracije dok se postrojenja snage do 50 kW_e nazivaju mikrokogeneracije.

U glavne elemente kogeneracijskog postrojenja ubrajaju se [1]:

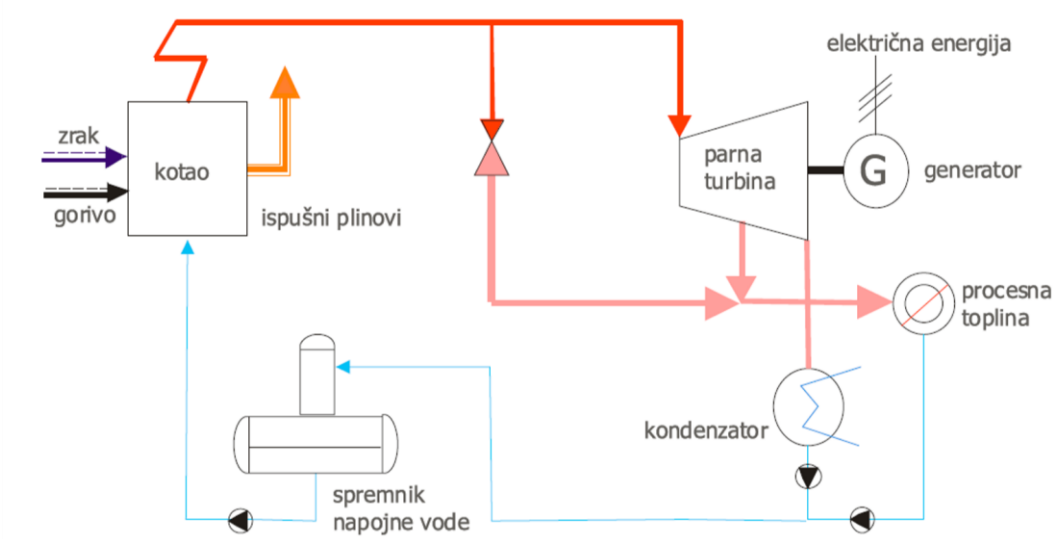
- pogonski stroj,
- električni generator,
- sustav za iskorištavanje otpadne topline i
- sustav vođenja procesa.

Najčešće se za pogon električnog generatora koriste parne turbine, plinske turbine, kombinirani proces **plinske** i **parne turbine**, te **motori s unutarnjim izgaranjem**. U novije vrijeme na tržište se vraćaju i stari koncepti (kao što su parni stapni motor ili **Stirlingov motor**), ali i nove tehnologije koje se nalaze u različitim stadijima komercijalizacije kao što su **gorivni članci**, **mikroturbine**, **organski Rankine-ov ciklus**, **parni vijčani motor** ili **plinske turbine** s indirektnim zagrijavanjem radnog medija. Najznačajniji kogeneracijski koncepti koji kao gorivo koriste (bio)plin su termomotorna kogeneracija, plinsko-turbinska, mikroturbine, kombinirani ciklus, te stirlingov motor [1].

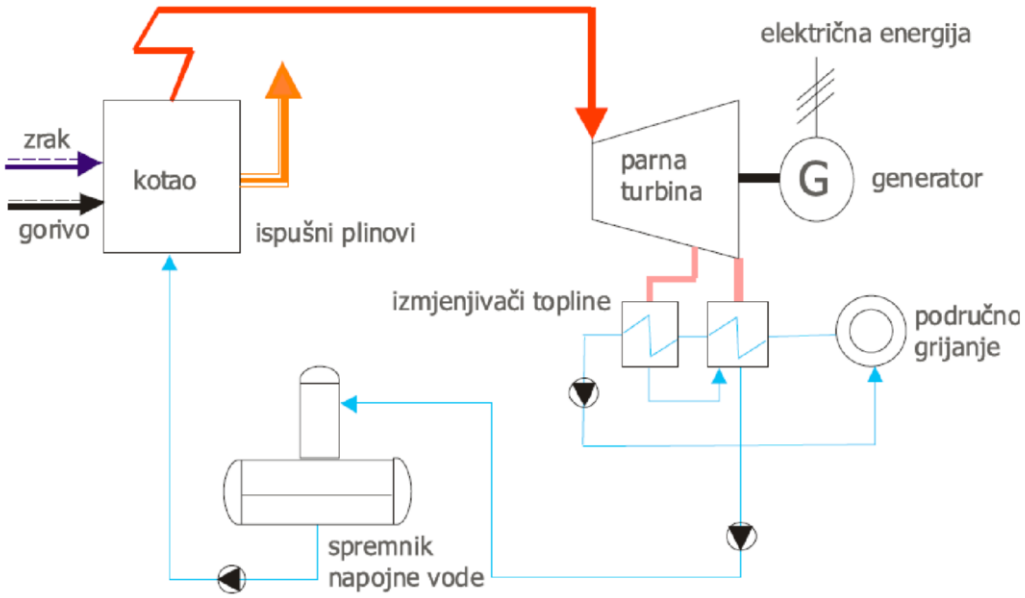
3.2. Parna turbina

Kogeneracija s parnim turbinama ili parno-turbinski kogeneracijski proces sastoji se od dva osnovna elementa - parne turbine i generatora pare te pomoćnih sustava. S obzirom na proces, odnosno tlak pare na izlazu iz turbine, postoje dva tipa parno-turbinskih kogeneracija [3]:

- kogeneracija s kondenzacijskom turbinom s oduzimanjem (tlak pare na izlazu iz turbine niži od atmosferskog), (Slika 3.2)
- kogeneracija s protutlačnom turbinom (tlak pare na izlazu iz turbine viši od atmosferskog), (Slika 3.3).



Sl. 3.2. Principijelna shema kogeneracije na bazi kondenzacijske parne turbine, prema [3]



Sl. 3.3. Principijelna shema kogeneracije na bazi protutlačne turbine, prema [3]

U protutlačnim turbinama se za proizvodnju toplinske energije direktno koristi para iz turbine, dok se u kondenzacijskim turbinama koristi para s oduzimanja iz srednjih turbinskih stupnjeva (eventualno i toplina kondenzacije pare koja bi se inače morala odvesti rashladnom vodom). Koncepcija, parametri i izvedba postrojenja ovise o potrebama potrošača energije te o raspoloživu gorivu.

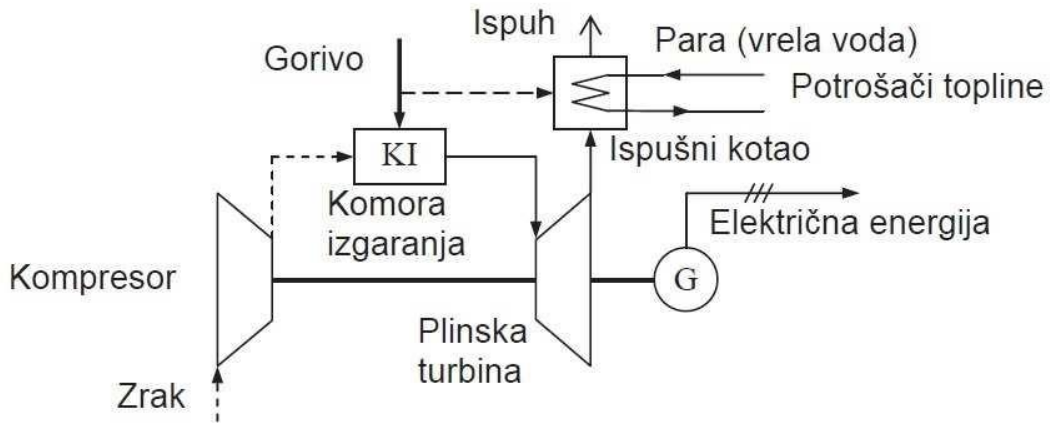
Kondenzacijske turbine najčešće nisu dio industrijskih ili kogeneracijskih postrojenja u poljoprivredi, ali se češće primjenjuju u kogeneracijskim procesima javnih toplana. Ukupna energetska učinkovitost parno-turbinske kogeneracije je relativno visoka i uobičajeno iznosi od 60 do 85 %. Postrojenje na bazi parne turbine proizvodi bitno manje električne energije nego toplinske i električna učinkovitost najčešće iznosi od 15 do 20 % [3].

Za razliku od ostalih kogeneracijskih uređaja, primjene s parnom turbinom ne ograničavaju se na jedno gorivo (kao npr. plin), budući da se generatori pare mogu koristiti različitim krutim, tekućim ili plinovitim gorivima, ako to dopušta normativa o zaštiti okoliša (ugljen, lako i teško ulje, plin, ostala goriva). Ova vrsta postrojenja često se može naći u industrijskim postrojenjima u kojima se zahtijeva para pod različitim tlakom ili u postrojenjima s velikom energetskom potrošnjom (toplinskom ili električnom).

Zbog ekonomskih razloga, manja kogeneracijska postrojenja s parnim turbinama imaju opravdanje samo za primjenu krutih goriva, posebno biomase, i danas se najčešće koriste upravo na lokacijama gdje je biomasa raspoloživa kao gorivo. Najpovoljnije je rješenje kada je izvor goriva sam tehnološki proces industrijskog postrojenja (izgorivi nusproizvodi ili tehnološki otpad) pa se na taj način uz proizvodnju energije rješava i problem otpada. Također su česte primjene u centraliziranim toplinskim sustavima za opskrbu toplinskom i električnom energijom manjih mjesta i gradova, posebno u ruralnim sredinama gdje je raspoloživa i veća količina biomase [3].

3.3. Plinske turbine

Plinsko turbinska kogeneracija zasniva se na plinskim turbinama otvorenog ciklusa, koje u sprezi s generatorom proizvode električnu energiju. Na slici 3.4. prikazana je shema plinsko turbinske kogeneracije. Plinska turbina koristi se za proizvodnju električne energije (ili za pogon kompresora i pumpi), a vrući ispušni plinovi koriste se za proizvodnju toplinske energije (tople/vrele vode i/ili procesne pare) u kotlu na otpadnu toplinu.



Sl. 3.4. Shema plinsko turbinske kogeneracije, prema [5]

Na sličnom konceptu temelje se i kogeneracijska postrojenja s plinskim motorom u kojima se za proizvodnju toplinske energije koristi kotao na ispušne plinove. Kao dodatni "izvor" toplinske energije koriste se hladnjaci rashladne vode i ulja. Za razliku od "konvencionalnih" postrojenja u kojima se kao gorivo najčešće koristi prirodni plin, u postrojenjima na biomasu kao gorivo se koristi reaktorski plin dobiven rasplinjavanjem krutih goriva ili bioplin dobiven procesom anaerobne digestije [8].

Plinska turbina primjenjuje se kod koncipiranja malih kogeneracijskih elektrana najčešće za veće snage, iznad 1 MW_e. Ovakva kogeneracijska postrojenja su doživjela najveći napredak u tehnologiji te su znatno sniženi troškovi rada postrojenja zbog veće dostupnosti plina koji je u svakom slučaju prihvatljiviji energent od nafte. U tablici 3.1. prikazane su značajke plinskoturbinskih agregata za kogeneraciju [5].

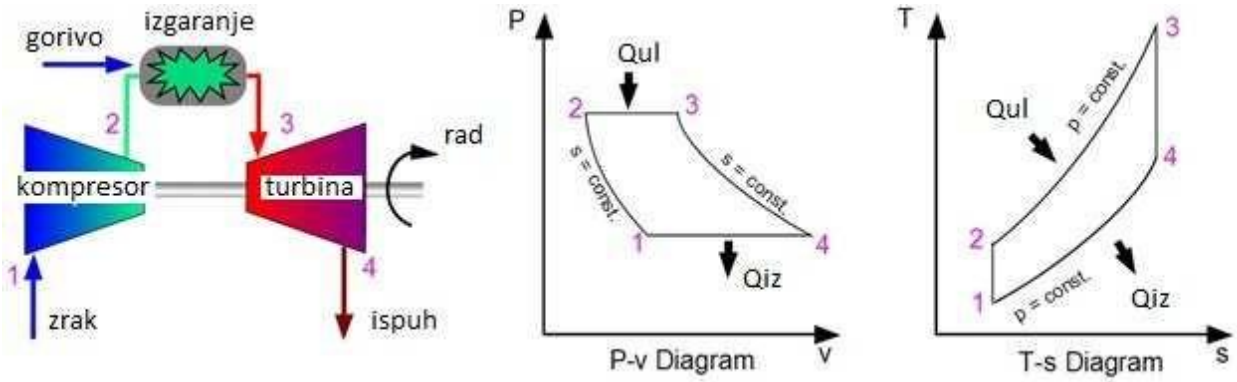
Tab. 3.1. Značajke plinsko turbinskih agregata za kogeneraciju, prema [5]

ELEKTRIČNA SNAGA AGREGATA [kW_e]	SPECIFIČNI POTROŠAK TOPLINE [kJ/kWh_e]	ISKORISTIVA TOPLINSKA SNAGA [kW_t]	GORIVO
25 – 150	12000 – 10000	40 – 200	lož-ulje
200 – 1000	10000 – 8000	250 – 1200	lož-ulje, plin
1000 – 2500	9000 – 8500	1200 – 2600	lož-ulje, plin
2500 – 5000	8500 – 7500	2600 – 5000	lož-ulje, plin

Plinske turbine odlikuju se:

- velikom učinkovitošću,
- malo zagađenje okoliša,
- velika pouzdanost,
- niska cijena izgradnje,
- potreban mali prostor,
- mogućnost modulne izvedbe,
- kratko vrijeme do pune snage.

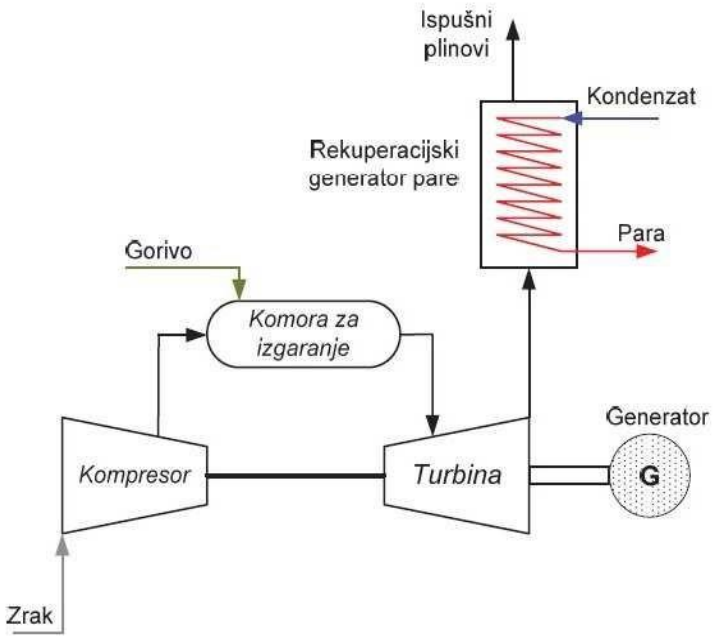
Ciklus koji se koristi je Braytonov kružni ciklus, a karakteristika mu je prikazana na slici 3.5.



Sl. 3.5. Braytonov kružni ciklus, prema [9]

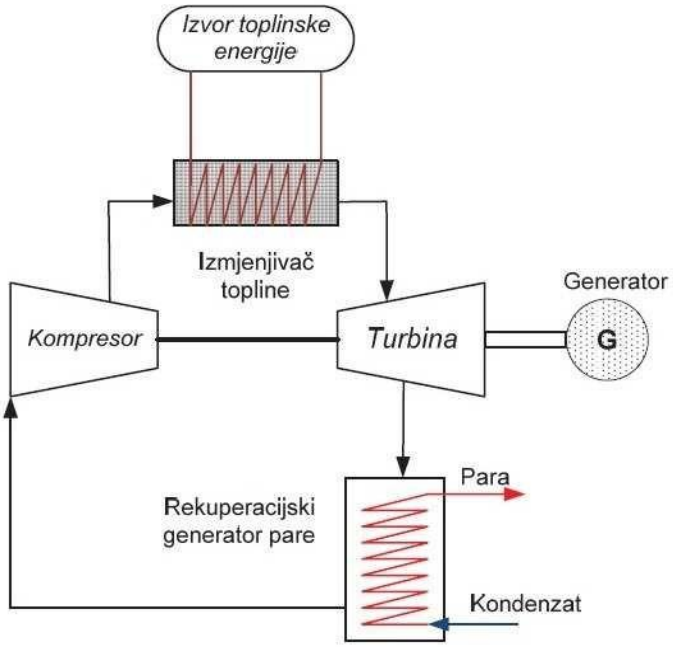
Plinske turbine (i proces) dijele se na plinske turbine otvorenog kruga i plinske turbine zatvorenog kruga. Kod plinske turbine otvorenog kruga ispušni plinovi na izlasku iz turbine se ispuštaju u okolinu (na izlasku iz turbine temperature su 450 ^{o}C do 500 ^{o}C). Ti plinovi su iskoristivi za grijanje ili proizvodnju pare za dodatnu proizvodnju električne energije.

Glavne prednosti koje odlikuju plinske turbine otvorenog kruga su vrlo brzi start cjelokupnog sustava, relativno mala masa i veličina samog sustava, sposobnost izgaranja različitih vrsta goriva, od goriva visoke oktanske vrijednosti pa sve do teških dizelskih ulja, te nije potreban sustav za hlađenje [4].



Sl. 3.6. Plinska turbina otvorenog kruga, prema [10]

Kod plinskih turbina zatvorenog kruga fluid koji se koristi u sustavu je u većini slučajeva zrak, a ponekad i helij, konstantnog volumena i čist. Plin se grije u izmjenjivaču topline prije ulaska u turbinu te se nakon izlaska iz turbine rashlađuje otpuštajući korisnu toplinu. Izvor topline može biti i vanjska komora za izgaranje bilo kojeg goriva.



Sl. 3.7. Plinska turbina zatvorenog kruga, prema [10]

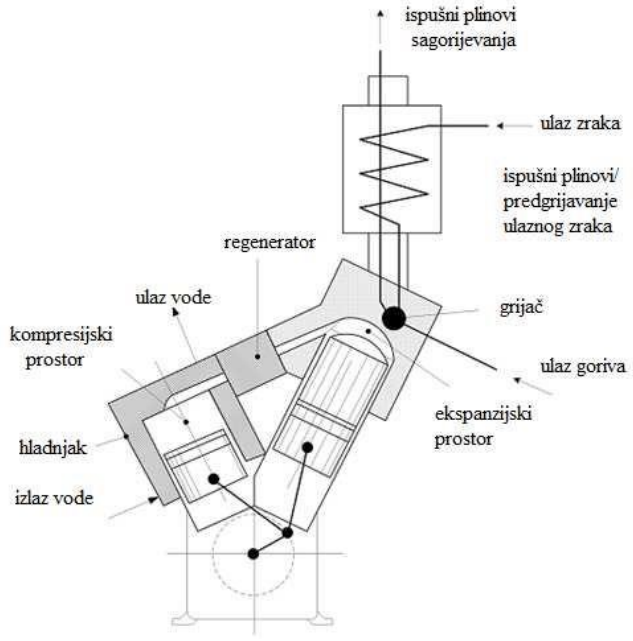
Glavne prednosti ovakvog sustava su to što izlazni tlak može biti niži što povećava energetsku učinkovitost i smanjuje dimenzije sustava za istu snagu. Isto tako, eliminirani su filteri

i pročiščivači zraka te ne dolazi do erozije na lopaticama turbine od nakupina nečistoća i prašine što omogućava stalan stupanj djelovanja uz redovito održavanje[4].

3.4. Stirlingov motor

Stirlingov motor se bazira na zatvorenom ciklusu, gdje se kao radni medij upotrebljava zrak, helij, vodik ili dušik koji je obično pod tlakom i naizmjence komprimira u hladnom volumenu cilindra i ekspandira u vrućem volumenu cilindra. Toplina potrebna za izgaranje goriva se prenosi izvana na radni plin pri visokoj temperaturni (od 700 do 750 °C). Toplina koja nije iskorištena za rad na osovini, vraća se pomoću rashladna vode na temperature od 40 – 85 °C.

Na slici 3.8. je prikazan jednostavni Stirlingov motor s osnovnim dijelovima. Stirlingov kružni proces je termodinamički idealan proces za transformaciju topline u mehaničku energiju. Teoretski postiže stupanj korisnosti kao i Carnotov kružni proces, ali suprotno njemu Stirlingov kružni proces je moguće realizirati. Međutim visoka korisnost u praksi je smanjena zbog trenja, ograničenog prijenosa topline, gubitka tlaka i drugih utjecaja. Za proizvodnju električne energije korisnost je u rasponu od 15 % do 30 %.



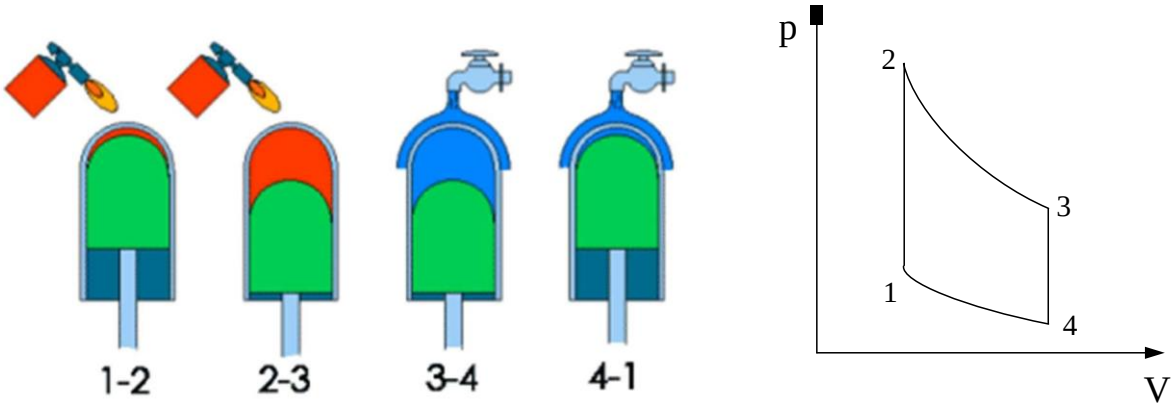
Sl. 3.8. Presjek Stirlingovog motora s osnovnim dijelovima, prema [13]

Bitna prednost ovog motora u odnosu na motor s unutrašnjim sagorijevanjem (eng. IC – internal combustion), je u tome da bilo koji izvor visoke temperature može biti iskorišten za

zagrijavanje radnog medija putem izmjenjivača topline. Vrući dimni plinovi nastali izgaranjem čvrstih, tekućih ili plinovitih goriva pa čak i solarna energija mogu biti iskorišteni za ovu namjenu.

Plinovi koji se koriste za izgaranje moraju biti što čišći kako bi se izbjegla korozija ili taloženje na površini izmjenjivača topline motora. Ukoliko drvo koje se koristi kao gorivo, daje ispušne plinove koju su agresivni i uzrokuju koroziju, onda se zahtjeva posebna izvedba i materijal za površinu izmjenjivača topline. Izmjenjivač topline mora bit izgrađen na način da se lako može čistit.

Na slici 3.9. je prikazan Stirlingov kružni ciklus. Slika je podijeljena na 4 dijela koja prikazuju kružni ciklus. 1 – 2; Klip ostaje na vrhu. Tlak radnog plina u cilindru se povećava grijanjem (Izohorna promjena stanja). 2 – 3; Izotermna ekspanzija. Radni medij se širi pri konstantnoj temperaturi. 3 – 4; Proces izohornog hlađenja. Klip ostaje na dnu. Tlak radnog medija u cilindru se smanjuje hlađenjem. 4 - 1; Proces izotermne kompresije, radni medij se komprimira uz konstantnu temperaturu.



Sl. 3.9. Stirlingov kružni proces sa p-V dijagramom, prema [13]

Stirlingovi motori dizajnirani su tokom godina pomoću osnovnog termodinamičkog koncepta. Možemo ih podijeliti po mehaničkoj konfiguraciji, npr. mogu imati kinematičko ili slobodnoklipno (eng. free-piston) rješenje. Kinematički motori imaju radilicu i mehanički su povezani na klip. Električna energija se proizvodi pomoću sinkronog generatora. Kinematički strojevi su općenito mehanički složeniji ali i jednostavni za analizu. Slobodno-klipni motori obično generiraju električnu energiju pomoću linearnog alternatora formiranog oscilatornim pomacima klipa u magnetskom polju. Slobodno-klipni strojevi su mehanički jednostavni ali termodinamički i dinamički su veoma složeni.

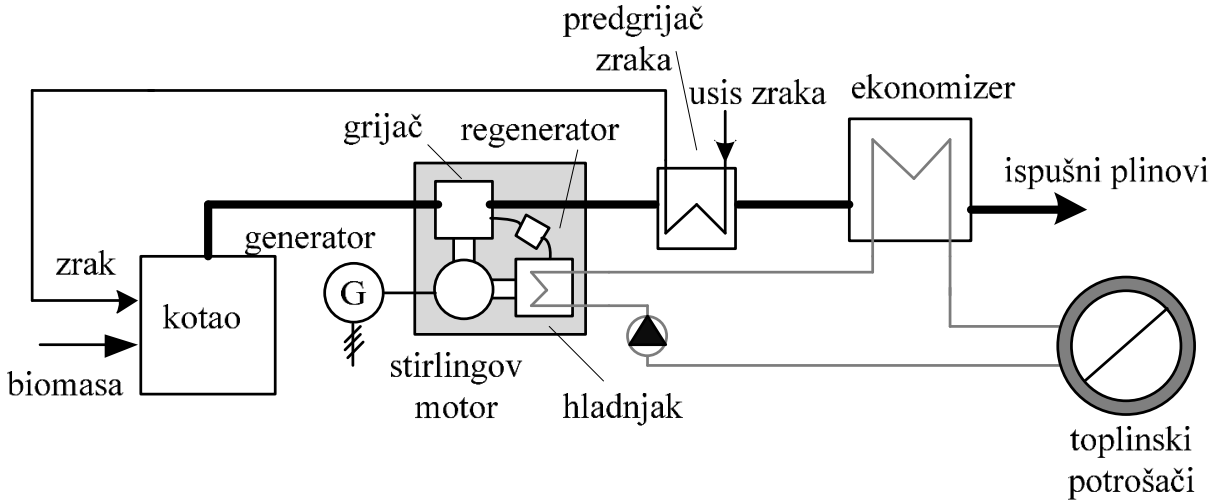
Konfiguracije Strilingovih motora možemo podijeliti na izvedbe:

- alfa,
- beta ili
- gama.

Alfa motori imaju dva ili više odvojenih klipova koji mehanički osciliraju sa stalnim faznim pomakom. Radni medij prolazi kroz hladnjak, regenerator i grijač dok se kreće naprijed i natrag između cilindara. Svaki klip zahtijeva svoju brtvu kako bi zadržao radni medij. Svi alfa motori su kinematički motori. Ovaj tip motora ima visok omjer snaga/volumen, ali i mnogo tehničkih problema kao što su visoka temperatura klipa, i klipnih prstenova.

Beta motori mogu biti kinematički ili slobodno-klipni motori. Ovaj motor može postići visok omjer kompresije, jer se radni klip i klip potiskivač preklapaju u pokretu. Klip potiskivač pomiče radni medij natrag i naprijed između toplog i hladnog kraja motora. Topli kraj je ekspanzijski prostor a hladni kraj je kompresijski prostor. Radni medij struji naprijed natrag i prolazi kroz hladnjak, regenerator i grijač. Beta motori mogu biti kinematički ili slobodno-klipni. Ovaj tip motora može postići visok omjer kompresije jer se radni klip i klip potiskivač preklapaju u kretanju.

Gama motori imaju takav oblik gdje su radni klip i klip potiskivač u odvojenim cilindrima. Klip potiskivač pomiče radni plin nazad i naprijed između tople i hladne strane motora. Hladni prostor obuhvaća i hladnu stranu klipa potiskivača te glavnog klipa. Radni plin se pomiče naprijed – nazad te prolazi kroz hladnjak, regenerator i grijač. Gama motori mogu biti kinematički ili slobodno-klipni, ova konfiguracija ima manju kompresiju od prethodne.



Sl. 3.10. Kogeneracijska elektrana sa Stirlingovim motorom, prema [13]

3.5. Organski Rankineov ciklus (ORC)

Organski Rankineov ciklus (ORC) varijacija je Rankineovog ciklusa u kojem se umjesto vode kao radni medij koristi organski fluid (silikonsko ulje, izopentan, izooktan, amonijak). Isti radni mediji mogu se koristiti i u primarnom krugu rashladnih postrojenja i toplinskih pumpi. Zbog relativno niske temperature isparavanja radnog medija ORC je pogodan za iskorištavanje topline na znatno nižim temperaturama. Proces se najviše primjenjuje u geotermalnoj proizvodnji električne energije, te u teškoj industriji gdje se iskorištava otpadna toplina industrijskog procesa. Novije primjene usmjerene su ka korištenju sunčeve energije i energije biomase [1].

U pogonu je više od 80 kogeneracijskih postrojenja na biomasu s ORC procesom (najviše u Njemačkoj, Austriji i Italiji) [24]. Biomasa izgara u kotlu na pokretnoj ili fiksnoj rešetki s automatiziranom dobavom goriva i odvođenjem pepela. Toplina izgaranja predaje se termičkom ulju koje se koristi kao posrednik (odnosno zamjena za vodu). Temperatura ulja održava se u rasponu 250-300 °C. Dimni plinovi hlade se u ekonomajzeru što omogućava povećanje ukupne iskoristivosti do 80 %.

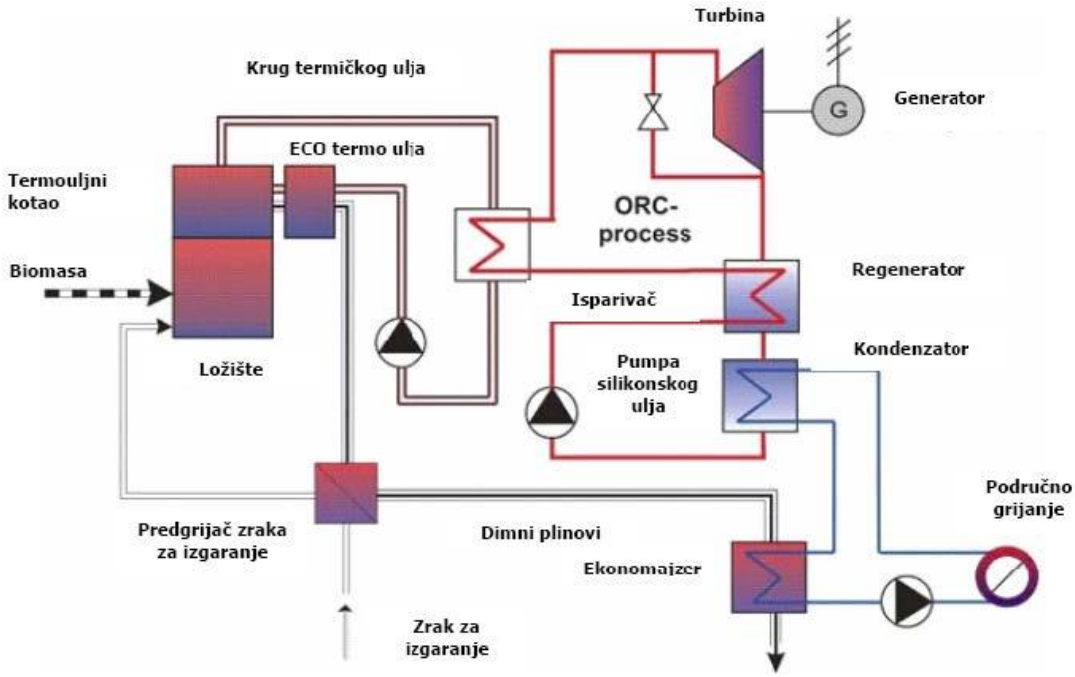
U nekim se slučajevima instalira i predgrijač zraka. Organski medij isparava u izmjenjivaču a zatim pare ekspandiraju u turbini koja se vrti s relativno malim brzinama vrtnje što omogućava izravno spajanje na generator kao i smanjivanje mehaničkih gubitaka. Ekspandirani organski medij hladi se u regeneratoru u cilju podizanja iskoristivosti ciklusa. Nakon regeneratora organski medij

kondenzira u ogrjevnom kondenzatoru, grijući vodu u sustavu područnog grijanja. Ohlađeno ulje pumpama se vraća u kotao, a kondenzirani radni medij u izmjenjivač.

Glavna razlika ORC procesa u odnosu na klasični vodeno parni Rankineov ciklus ogleda se u termodinamičkim svojstvima radnih fluida među kojima se najčešće koriste silikonsko ulje i izopentan. U usporedbi s vodenom parom izopentan je gušći a ima i negativan nagib krivulje zasićenja suhozasićene pare što omogućava ekspanziju pare u pregrijano područje. Energetske transformacije odvijaju se na nižim temperaturnim razinama (250 – 300 °C). ORC se u postrojenjima na biomasu primjenjuje u rasponu snaga od 200 kW_e do više od 2000 kW_e uz električnu iskoristivost od 10 do 15 % [1].

Proces se odlikuje relativno visokom iskoristivosti na nižim opterećenjima što predstavlja prednost kod pogona kogeneracijskog postrojenja u režimu koji slijedi toplinsku potrošnju. Korištenjem termičkog ulja umjesto vode omogućen je pogon kotla loženog biomasom na nižim tlakovima s čime se, u usporedbi s vodeno parnim procesom, smanjuju naprezanja i produljuje životni vijek kotla. Za pogon na nižim tlakovima nije potrebna dozvola inspektora parnih kotlova kao što je slučaj s parnim kotlovima u mnogim zemljama. Proces se može potpuno automatizirati.

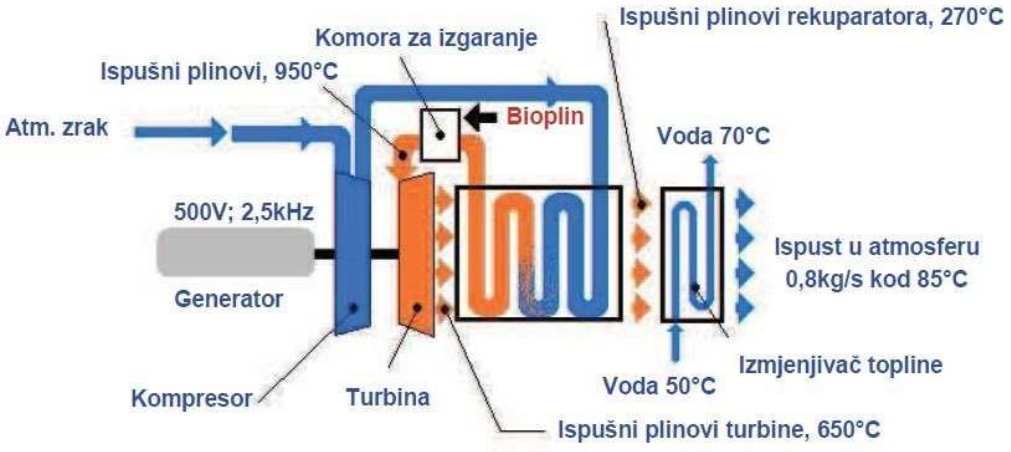
U nedostatke ORC procesa ubrajaju se visoki specifični investicijski troškovi (kod manjih postrojenja > 5.000 EUR/kWe (37.500 kn/kWe), zapaljivost silikonskog ulja na sobnim temperaturama kao i potrebna primjena dodatnih mjere zaštite od propuštanja vrelouljnog kotla. Na slici 3.11 prikazana je shema ORC procesa u postrojenju loženom biomasom [1].



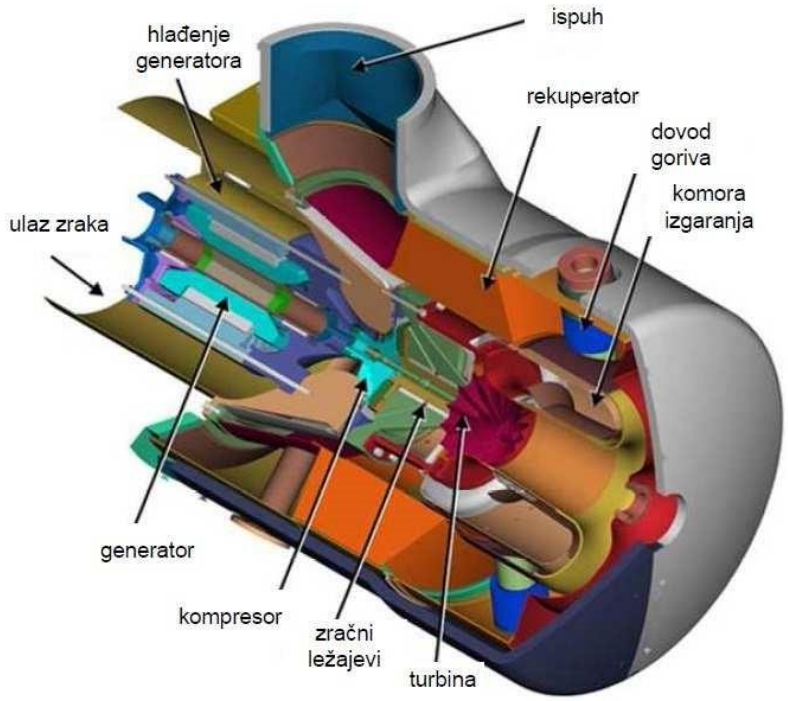
Sl. 3.11. Shema ORC kogeneracijskog postrojenja na biomasu, prema [1]

3.6. Mikroturbine

Mikroturbine predstavljaju novu vrstu plinskih turbina, a njihova komercijalna primjena započela je 1998. godine. Kao distribuiranom izvoru energije, snaga mikroturbina je u rasponu od 25 do 500 kW. Uz iskorištavanje otpadne topline mogu se koristiti kao kogeneracijska tehnologija, čime se postiže energetska učinkovitost veća od 80 posto. Mikroturbine imaju široku primjenu u industriji i za komercijalnu uporabu. Budući da su veličine hladnjaka, ne zahtijevaju veliki prostor. Kao gorivo, osim fosilnih goriva, mogu koristiti i bioplin ili deponijski plin, što objedinjava korištenje obnovljivih izvora energije i tehnologiju kogeneracije [11].



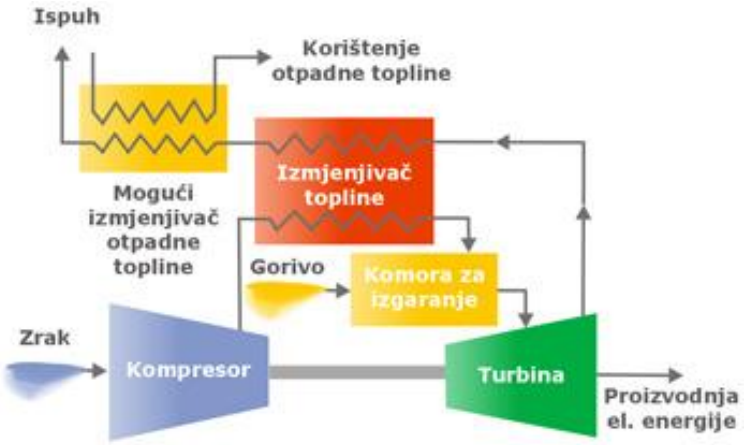
Sl. 3.12. Funkcionalna skica mikroturbine, prema [11]



Sl. 3.13. Konstrukcijski dijelovi mikroturbine, prema [11]

Mikroturbine imaju brojne prednosti u odnosu na ostale tehnologije male snage, uključujući mogućnost pouzdanog napajanja, korištenje na udaljenim lokacijama i u vrijeme vršnog opterećenja. Ostale prednosti su jednostavnije održavanje, dulji životni vijek trajanja, relativno niska emisija buke, veća učinkovitost, manje emisije stakleničkih plinova te brzi start.

U bioplinskim mikroturbinama se zrak pomiješan s bioplinom utiskuje u komoru za izgaranje pod visokim tlakom. Mješavina zraka i bioplina izgara i radi porasta temperature dolazi do ekspanzije plinske mješavine. Vrući plinovi se propuštaju kroz turbinu, koja je povezana s električnim generatorom. Shema mikroturbine prikazana je na slici 3.14. Karakteristična snaga mikroturbine je ispod 200 kW_{el}, iako su tržišno dostupne snage od 30 kW_{el} do 1 MW_{el} [11].



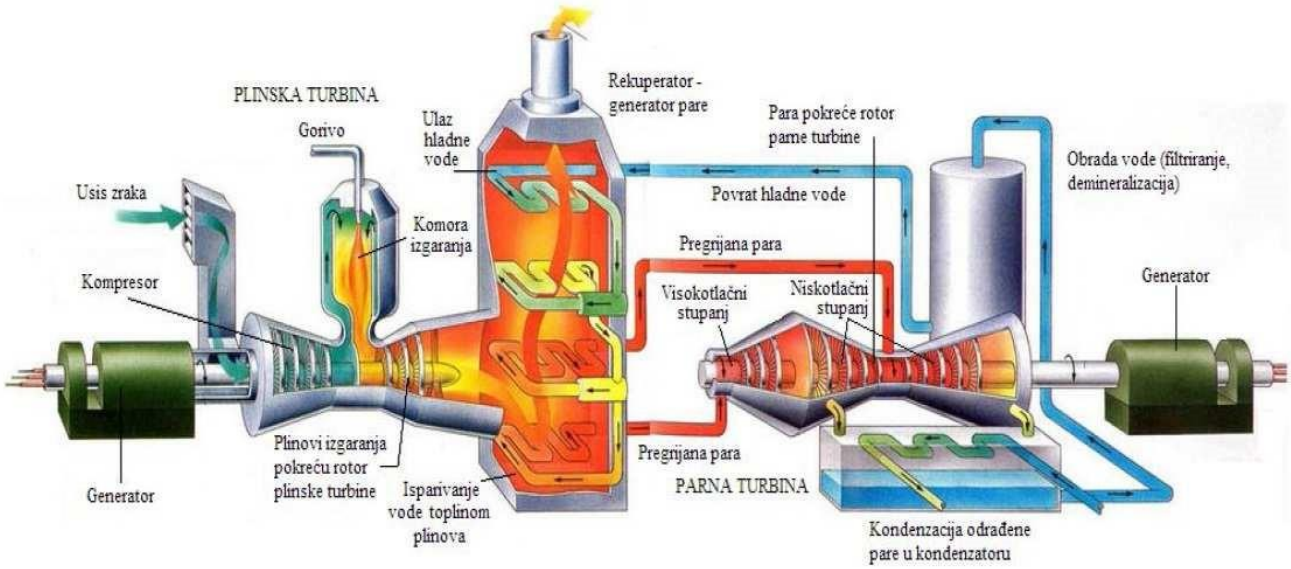
Sl. 3.14. Plinska mikroturbina, prema [11]

Osnovni nedostaci mikroturbina, u trenutačnoj fazi razvoja, su relativno skromno iskustvo u njihovom korištenju, te veći troškovi u odnosu na plinske motore, no očekuje se da će s napredovanjem tehnologije u budućnosti doći i do smanjenja troškova.

3.7. Kombinirani ciklus

Kombinirane termoelektrane su energetska postrojenja koja su sastavljena od plinsko-turbinskog i parno-turbinskog dijela. Glavni dijelovi su naravno plinska i parna turbina. Osnovna namjena ovakvih postrojenja je iskorištenje topline nastale na izlazu iz plinske turbine. Pošto ispušni plinovi koji izlaze iz plinske turbine imaju visoke temperature, oko 600 °C mogu se iskoristiti kao sredstvo koje će grijati vodu i proizvoditi vodenu paru za parnu turbinu.

Time povećavamo iskoristivost samog procesa jer toplinu koju bi inače izgubili, koristimo za daljnju proizvodnju pare. Iskoristivost takvog postrojenja doseže i do 60 %. Plinska turbina za proizvodnju električne energije javlja se krajem 1930-tih godina, ali razvoj se zaustavlja u periodu II. svjetskog rata. Prvo plinskoturbinsko postrojenje bilo je instalirano u elektroenergetskom sustavu SAD 1949. godine, a bilo je u sastavu kombi-procesa [12].



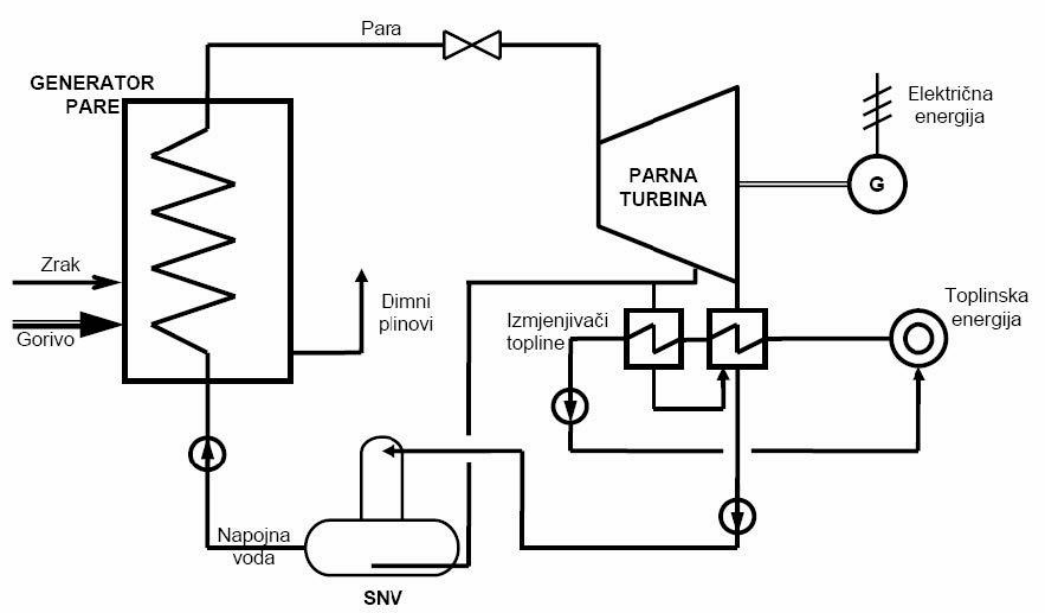
Sl. 3.15. Princip rada kombiniranog ciklusa, prema [1]

Proces počinje od kompresora koji komprimira zrak i šalje ga u komoru izgaranja gdje se istovremeno dovodi gorivo za izgaranje. Plinovi izgaranja vrlo visoke temperature vode se iz komore izgaranja u plinsku turbinu, gdje ekspandiraju dajući koristan rad na vratilu spojenom na rotor plinske turbine. Vratilo pokreće generator električne struje i proizvodi električnu energiju koja se šalje u mrežu. Nakon ekspanzije, ispušni se plinovi iz plinske turbine vode u utilizator (generator pare na otpadnu toplinu). Jedna od vrlo dobrih karakteristika plinske turbine je ta što je kod nje prisutan vrlo visok omjer zrak/gorivo budući se dodaje nekoliko puta više zraka zbog hlađenja lopatica plinske turbine.

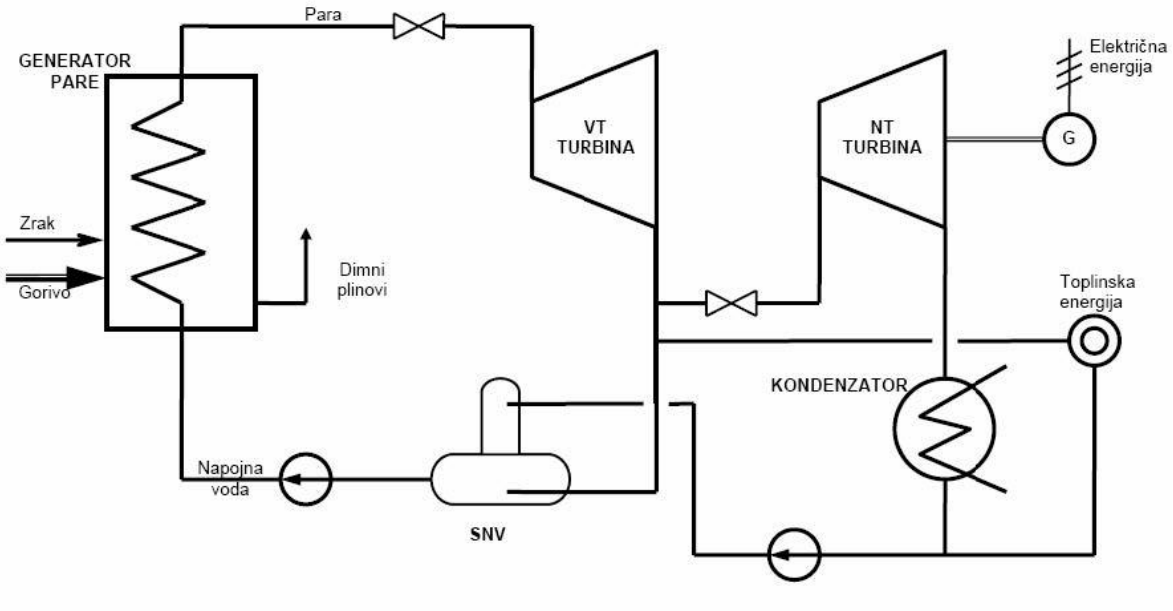
Na izlazu iz plinske turbine ostaje još dosta neiskorištenog zraka, koji se koristi za izgaranje dodatnog goriva u utilizatoru. U utilizatoru se napojna voda zagrijava do isparavanja i pregrijava na zadane parametre. Pregrijana para odlazi iz generatora pare u parnu turbinu gdje ekspandira i predaje mehanički rad generatoru električne struje. Nakon toga para, niskih parametara, odlazi u kondenzator gdje kondenzira. Nakon kondenzacije, voda se pumpom vraća u utilizator na ponovno zagrijavanje. Proces bi bio puno iskorišteniji ako bi temperatura radne tvari kod dovođenja topline bila jednaka temperaturi ogrjevnog spremnika, a temperatura radne tvari kod odvođenja postane jednaka temperaturi rashladnog spremnika. Tada govorimo o idealnom Carnotovom procesu [12].

Kombiniranim ciklusom se iskorištavaju sve prednosti Rankineovog kod parne i Braytonovog ciklusa kod plinske turbine. Razlikujemo kombinirani ciklus s protutlačnom

turbinom, prikazan je na slici 3.16., te kombinirani ciklus s kondenzacijskom turbinom s oduzimanjem pare, prikazan na slici 3.17..



Sl. 3.16. Kombinirani ciklus sa protutlačnom turbinom, prema [1]



Sl. 3.17. Kombinirani ciklus s kondenzacijskom turbinom s oduzimanjem pare, prema [1]

4. ANALIZA RADA MALIH INSTALACIJA ZA PROIZVODNJU BIOPLINA

Male kogeneracijske elektrane su višenamjenski objekti, koji iz fosilnih goriva i biomase postupkom kogeneracije proizvode električnu i toplinsku energiju, a u određenim slučajevima proizvodi se i hladna voda za potrebe hlađenja. Goriva za pogon malih kogeneracijskih elektrana su plinovita, tekuća i kruta. Pored konvencionalnih goriva Odgovarajuće toplinske snage ovise o vrsti energetskog agregata i kreću se u rasponu 20 – 20000 kW_e [7].

Osnovna prednost malih kogeneracijskih elektrana u odnosu na odvojenu proizvodnju električne i toplinske energije je smanjenje troškova goriva za proizvodnju navedene energije, a time i smanjenje zagađenja okoliša. Pored prednosti kogenerativne proizvodnje energije, korištenjem malih kogeneracijskih elektrana otpada prijenos na veće udaljenosti, jer se toplina i struja proizvode okolišno prihvatljivo u težištima potrošnje. Toplina se predaje izravno u objektu ili u obližnju toplinsku mrežu. Električna energija se također koristi u objektu, a višak se isporučuje u postojeću lokalnu niskonaponsku, ili srednjenaponsku mrežu.

Prednost malih kogeneracijskih elektrana je i u modularnoj izvedbi, pa se veličina malih kogeneracijskih objekata može prilagoditi porastu potrošnje električne i toplinske energije stupnjevitom izgradnjom odnosno dodatnim modulima. Postojeće toplane i rezervni električni agregati mogu se dograditi, odnosno rekonstruirati u male kogeneracijske elektrane. U prednosti malih kogeneracijskih elektrana mogu se još ubrojiti relativno mala dodatna ulaganja isplativa za nekoliko godina, lokacija je redovito u okviru industrijskog ili javnog objekta što olakšava ishođenje dozvola i kratak rok izgradnje, te kratak rok izgradnje zbog modularne izvedbe.

Međutim, kogeneracija nije isplativa u svim uvjetima. Ona je isplativa za odgovarajuću kombinaciju potrošnje električne i toplinske energije. Kako je višak električne energije u svakom trenutku moguće prodati elektroenergetskom sustavu do snage 5 MW_e, onda je zapravo toplinsko opterećenje determinirajuće za isplativost malih kogeneracijskih elektrana. Ako toplinsko opterećenje traje više od 3000 - 5000 sati godišnje za očekivati je isplativost kogeneracije. Potencijalna mjesta za primjenu kogeneracije nalaze se svugdje gdje postoji istovremena potreba za električnom i toplinskom energijom. Kogeneracijsko postrojenje projektira se i vodi s ciljem pokrivanja toplinskih potreba procesa ili objekta [5].

Najzanimljiviji objekti za primjenu kogeneracije su oni kod kojih se toplinska energija troši što stalnije i što duže tijekom dana, tjedna i godine. Isto tako zanimljivi su slučajevi gdje postoje otpadna goriva, kao što su različite vrste bioplina (deponijski, muljni, destilacijski i sl.), te drvni otpad [5].

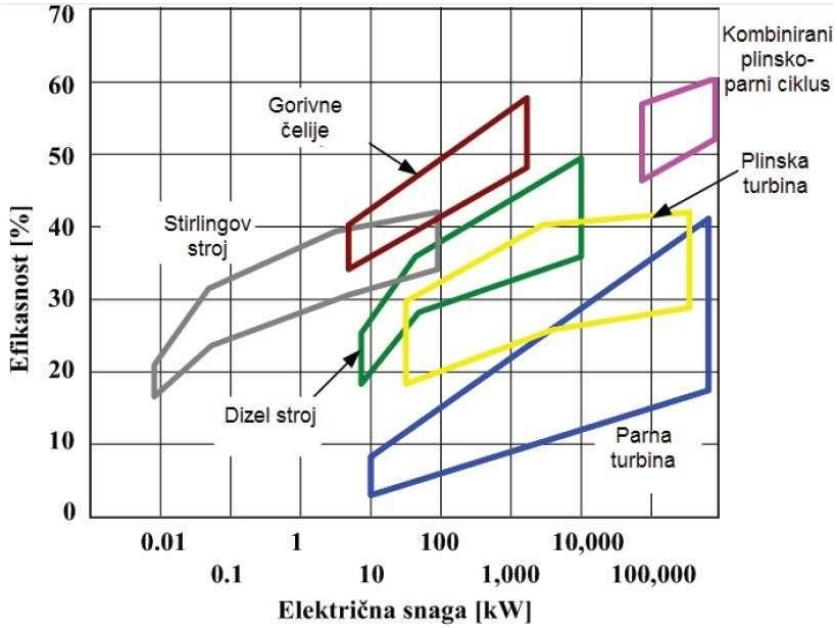
U sljedećem dijelu je prikazana analiza rada malih instalacija za proizvodnju bioplina, na različitim tehnologijama rada bioelektrana.

4.1. Usporedba tehnologija

Usporedbu pojedinih tehnologija možemo vidjeti u tablici 4.1.

Tab. 4.1. Osnovne karakteristike kogeneracijskih tehnologija, prema [3]

Vrsta agregata	***Gorivo***	***Kapacitet [MW_e]***	***Učinkovitost***		***Temperaturna razina***	***Najčešća primjena***
			Električna	**Ukupna**		
Parna turbina	Bilo koje	500 kW_e - 500 MW_e	7 - 20 %	60 - 80 %	120 – 400 °C	Korištenje biomase (područno grijanje i industrija)
Plinska turbina	Plinovito i tekuće	250 kW_e 50MW_e	25 - 42 %	65 - 87 %	120 – 500 °C	Industrija, područno grijanje
Kombinirani ciklus	Plinovito i tekuće	3MW_e- 300 MW_e	35 - 55 %	73 - 90 %	120 – 400 °C	Industrija (procesna), područno grijanje
Plinski i diesel motor	Plinovito i tekuće	3kW_e- 20MW_e	25 - 45 %	65 - 92 %	80 – 120 °C	Sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije - prehrambena i tekstilna industrija, staklenici
Goriva ćelija	Plinovito i tekuće	3kW_e- 3MW_e	~37 - 50 %	~85 - 90 %	80 – 100 °C	Sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije
Stirling motor	Bilo koje	3kW_e- 1,5 MW_e	~40 %	65 – 85 %	80 – 120 °C	Sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije



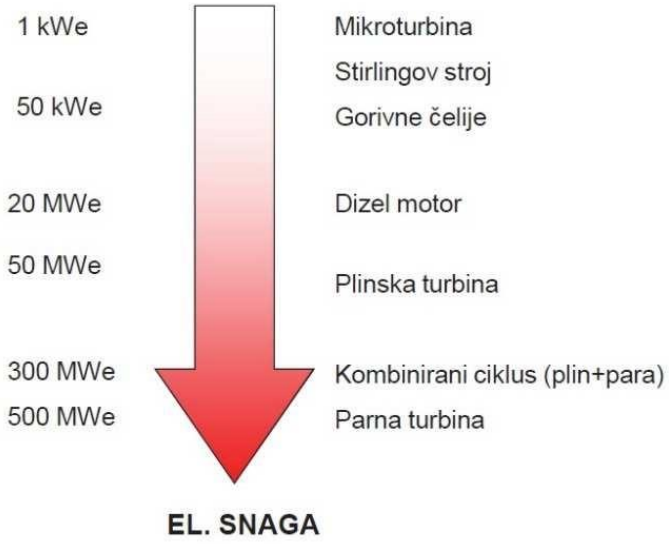
Sl. 4.1. Stupanj korisnosti različitih kogeneracijskih tehnologija, prema [10]

Kogeneracijska postrojenja koja se temelje na rasplinjavanju biomase i izgaranju 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. Niža ogrjevna vrijednost reaktorskog plina relativno je malen problem u usporedbi s problemom uklanjanja štetnih tvari koje nastaju procesom rasplinjavanja. Reaktorski plinovi dobiveni rasplinjavanjem biomase sadrže različite onečišćivače uključivo i kondenzirajuće ugljikovodike (katrane), čestice, alkalne spojeve i u manjoj mjeri spojeve sumpora i dušika [1].

Plinska turbina primjenjuje se kod koncipiranja malih kogeneracijskih elektrana najčešće za veće snage, iznad 1 MWe. Plinske turbine odlikuju se: velika učinkovitost , malo zagađenje okoliša, velika pouzdanost, niska cijena izgradnje, potreban mali prostor, mogućnost modularne izvedbe, kratko vrijeme do pune snage.

Mikroturbine su namijenjene nižim snagama, od 25 do 500 kW. Iskorištavanjem otpadne topline, odnosno mikroturbinskom kogeneracijom se postiže energetska učinkovitost veća od 80 posto. Budući da su dimenzijski vrlo male i ne zahtijevaju veliki prostor, mikroturbine imaju široku primjenu u industriji i za komercijalnu uporabu.

Spajanjem plinskog i parnog turbinskog postrojenja, kombinirani ciklus postiže mnogo veći stupanj korisnosti nego što je u klasičnom plinsko turbinskom postrojenju ili parno turbinskom postrojenju. Kao osnovni razlozi povećanju korisnosti su dovođenje topline pri znatno višoj temperaturi u odnosu na odvojeni parni proces, pošto se plinski ciklus odvija kod temperatura viših od temperatura u najmodernijim zasebnim parno turbinskim postrojenjima, te odvođenje topline pri znatnoj nižoj temperaturi u odnosu na odvojeni plinski proces, što znači da temperatura ohlađenih dimnih plinova koja se kreće oko 140 °C je znatno niža od bilo koje vrste plinsko turbinskog procesa. U odnosu na ostala klasična termoenergetska postrojenja za proizvodnju električne energije, kombinirana plinsko-parna postrojenja imaju najveću korisnost.



Sl. 4.2. Ovisnost glavnog agregata o snazi kogeneracijskog postrojenja, prema [10]

Stirlingov motor iskorištava toplinu slično parnoj turbini, a zbog malih snaga koje su u rasponu od 1 kW do 25 kW, koristi se kao mikrokogeneracija u kućanstvima. Premda je vrlo malih dimenzija, električna učinkovitost može biti i veća od 30 posto. Stirlingov motor s dobrom tehnologijom iskorištenja topline kao kogeneracija može postići učinkovitost od čak 98 posto, jer se na neki način iskoristi sva toplinska energija (grijanje vode ili prostora). Prednosti su niske emisije stakleničkih plinova, mala buka i vibracije, velika pouzdanost i jednostavno održavanje, relativno malo mehanički jednostavnih pokretnih dijelova, mogućnost korištenja raznih vrsta goriva i dugi životni vijek. Negativna obilježja su visoka cijena (jer su još u rijetkoj uporabi) i niska učinkovitost [11].

4.2. Proračun analize rada malih instalacija za proizvodnju bioplina, na različitim tehnologijama rada bioelektrana

4.2.1. Plinski motor

Za razmatranje je uzet plinski motor proizvođača JENBACHER 320. Parametri motora prilagođenog za rad na bioplin su dani u tablici.

Tab. 4.2. Podaci proizvođača za plinski motor snage 1065 kW_{el}

P_{el}	1065	kW
η_{el}	40,9	%
P_{th}	1099	kW
η_{th}	42,2	%
η_{ukupno}	83,1	%
n	1500	rpm
f	50	Hz

Prema podacima proizvođača za količinu od 100 jedinica goriva, do energetske bilance plinskog motora tip 320 može se doći na slijedeći način.

$$Q_{dov} = 100\ \% \tag{4-1}$$

Iznos električne energije dobivamo množenjem ulazne energije i električnog stupnja djelovanja.

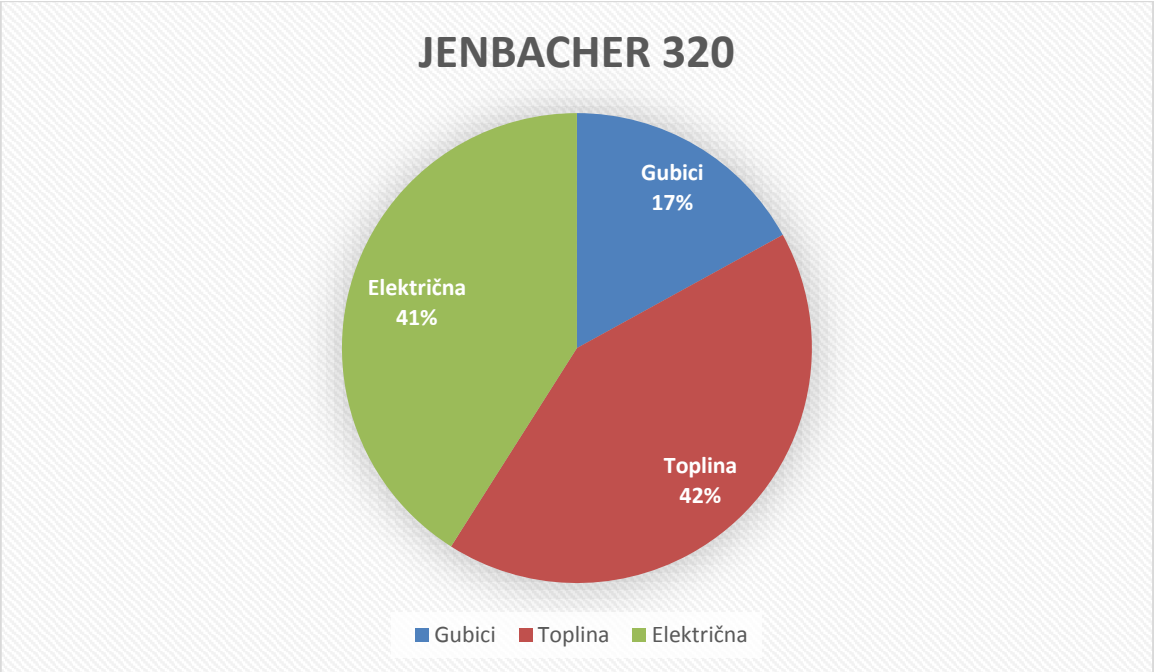
$$W_{el} = Q_{dov} \cdot \eta_{el}$$
$$W_{el} = 100 \cdot \frac{40{,}9}{100} \tag{4-2}$$
$$W_{el} = 40{,}9\ \%$$

Analogno tome dobivamo i toplinsku energiju.

$$Q_{th} = Q_{dov} \cdot \eta_{th}$$
$$Q_{th} = 100 \cdot \frac{42{,}2}{100} \tag{4-3}$$
$$Q_{th} = 42{,}2\ \%$$

Gubici u sustavu su jednaki razlici ulazne topline i korisne energije.

$$Q_{gubici} = Q_{dov} - (W_{el} + Q_{th})$$
$$Q_{gubici} = 100 - (40{,}9 + 42{,}2) \tag{4-4}$$
$$Q_{gubici} = 16{,}9\ \%$$



Sl. 4.3. Energetska bilanca plinskog motora JENBACHER 320

4.2.2. Plinska turbina

Za razmatranje je uzeta plinska turbina proizvođača KAWASAKI tip GPB06. Parametri plinske turbine dani su u tablici.

Tab. 4.3. Podaci proizvođača za plinsku turbinu KAWASAKI GPB06, prema [14]

P_{el}	634	kW
η_{el}	19,4	%
P_{th}	1637	kW
η_{th}	48,4	%
η_{ukupno}	67,8	%
f	50	Hz

Prema podacima proizvođača za količinu od 100 jedinica goriva, do energetske bilance plinske turbine tip GPB06 dolazimo na sljedeći način.

$$Q_{dov} = 100\ \% \tag{4-5}$$

Iznos električne energije dobivamo množenjem ulazne energije i električnog stupnja djelovanja.

$$W_{el} = Q_{dov} \cdot \eta_{el}$$

$$W_{el} = 100 \cdot \frac{19{,}4}{100} \tag{4-6}$$

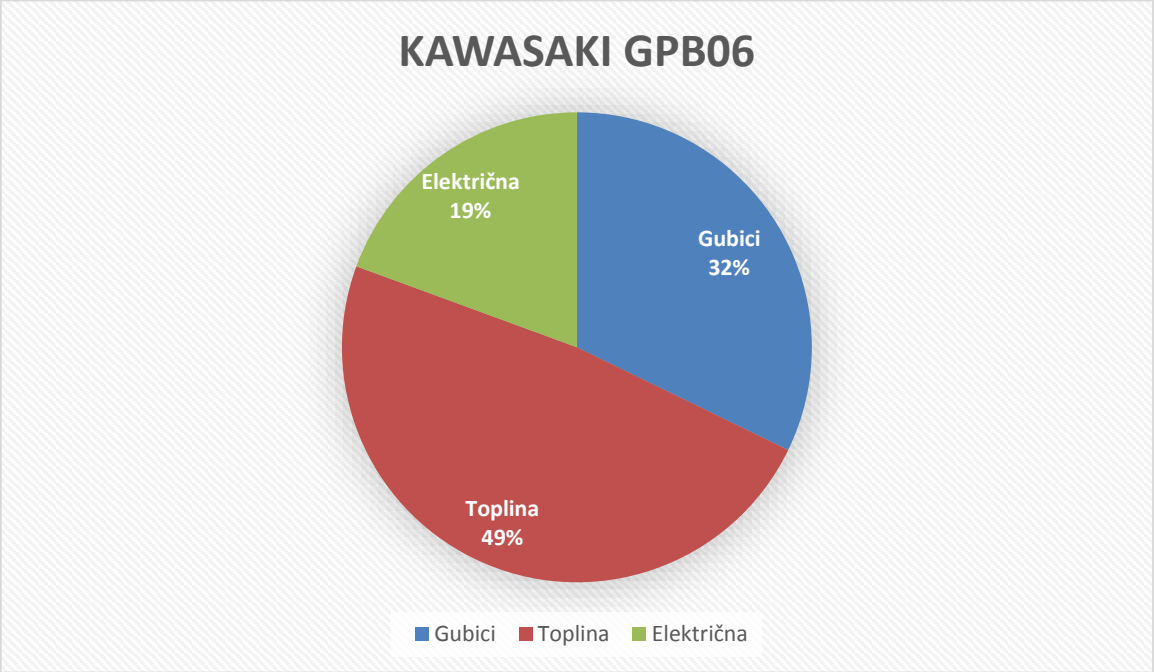
$$W_{el} = 19{,}4\ \%$$

Analogno tome dobivamo i toplinsku energiju.

$$Q_{th} = Q_{dov} \cdot \eta_{th}$$
$$Q_{th} = 100 \cdot \frac{48{,}4}{100} \tag{4-7}$$
$$Q_{th} = 48{,}4\ \%$$

Gubici u sustavu su jednaki razlici ulazne topline i korisne energije.

$$Q_{gubici} = Q_{dov} - (W_{el} + Q_{th})$$
$$Q_{gubici} = 100 - (19{,}4 + 48{,}4) \tag{4-8}$$
$$Q_{gubici} = 32{,}2\ \%$$



Sl. 4.4. Energetska bilanca plinske turbine tip KAWASAKI GPB06

4.2.3. Mikroturbina

Za razmatranje je uzeta mikroturbina proizvođača CAPSTONE C65. Parametri mikroturbine dani su u tablici.

Tab. 4.4. Podaci proizvođača za mikroturbinu CAPSTONE C65, prema [15].

P_{el}	65	kW
η_{el}	29	%
P_{th}	120	kW
η_{th}	61	%
η_{ukupno}	90	%
f	50	Hz

Prema podacima proizvođača za količinu od 100 jedinica goriva, do energetske bilance mikroturbine može se doći na isti način kao i za plinski motor.

$$Q_{dov} = 100\ \% \tag{4-9}$$

Iznos električne energije dobivamo množenjem ulazne energije i električnog stupnja djelovanja.

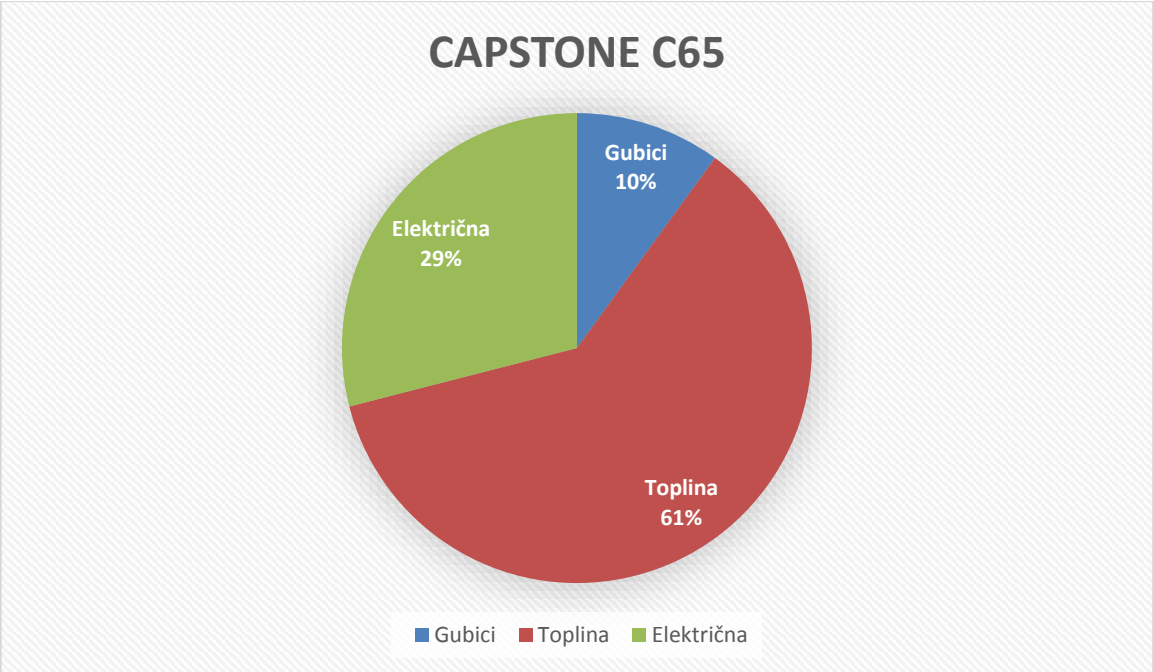
$$W_{el} = Q_{dov} \cdot \eta_{el}$$
$$W_{el} = 100 \cdot \frac{29}{100} \tag{4-10}$$
$$W_{el} = 29\ \%$$

Analogno tome dobivamo i toplinsku energiju.

$$Q_{th} = Q_{dov} \cdot \eta_{th}$$
$$Q_{th} = 100 \cdot \frac{61}{100} \tag{4-11}$$
$$Q_{th} = 61\ \%$$

Gubici u sustavu su jednaki razlici ulazne topline i korisne energije.

$$Q_{gubici} = Q_{dov} - (W_{el} + Q_{th})$$
$$Q_{gubici} = 100 - (29 + 61) \tag{4-12}$$
$$Q_{gubici} = 10\ \%$$



Sl. 4.5. Energetska bilanca mikroturbine CAPSTONE C65

4.2.4. Stirlingov motor

Za razmatranje je uzeta mikroturbina proizvođača WUDAG SD4-E. Parametri Stirlingovog motora dani su u tablici

Tab. 4.5. Podaci proizvođača za Stirlingov motor WUDAG tip SD4-E, prema [16].

P_{el}	35	kW
η_{el}	17,5	%
P_{th}	145	kW
η_{th}	72,5	%
η_{ukupno}	90	%
f	50	Hz

Prema podacima proizvođača za količinu od 100 jedinica goriva, do energetske bilance Stirlingovog motora dolazimo na sljedeći način.

$$Q_{dov} = 100\ \% \tag{4-13}$$

Iznos električne energije dobivamo množenjem ulazne energije i električnog stupnja djelovanja.

$$W_{el} = Q_{dov} \cdot \eta_{el}$$

$$W_{el} = 100 \cdot \frac{17{,}5}{100} \tag{4-14}$$

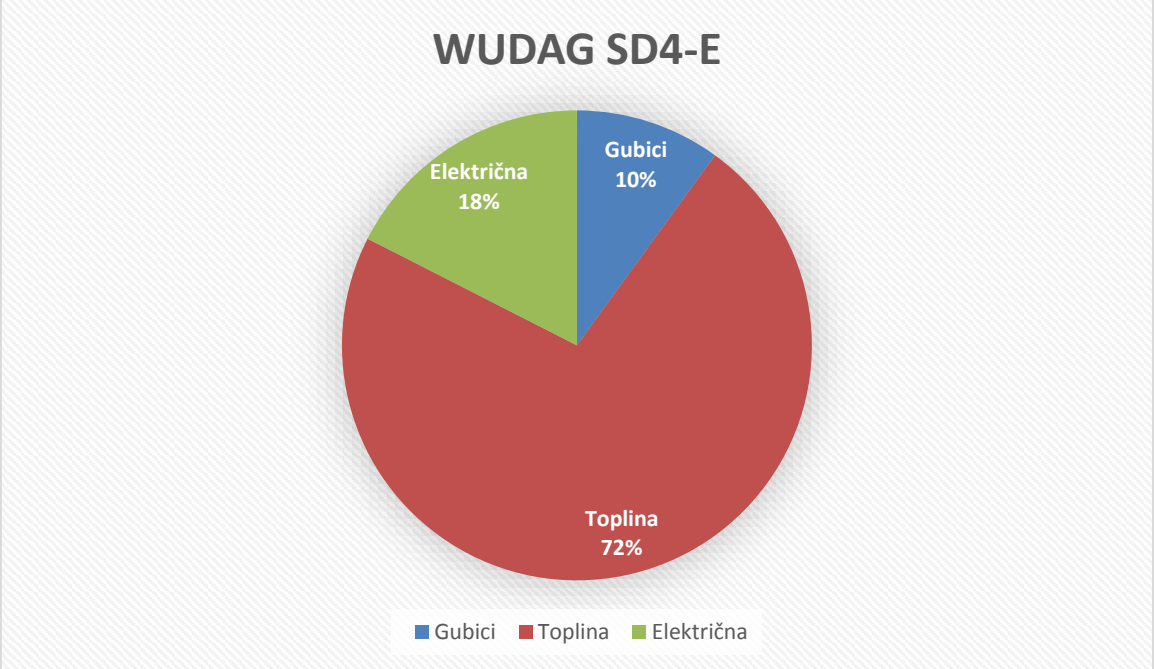
$$W_{el} = 17{,}5\ \%$$

Analogno tome dobivamo i toplinsku energiju.

$$Q_{th} = Q_{dov} \cdot \eta_{th}$$
$$Q_{th} = 100 \cdot \frac{72{,}5}{100} \tag{4-15}$$
$$Q_{th} = 72{,}5\ \%$$

Gubici u sustavu su jednaki razlici ulazne topline i korisne energije.

$$Q_{gubici} = Q_{dov} - (W_{el} + Q_{th})$$
$$Q_{gubici} = 100 - (17{,}5 + 72{,}5) \tag{4-16}$$
$$Q_{gubici} = 10\ \%$$



Sl. 4.6. Energetska bilanca Stirlingovog motora WUDAG SD4-E

ZAKLJUČAK

Usporedbom različitih tehnoloških rješenja za proizvodnju električne energije iz biomase dolazimo do zaključka da su određene tehnologije pogodne za kućanstva, a određene za industriju. U pravilu ovisno o izabranoj snazi se odabire tehnologija. Kao što je detaljno prikazano u četvrtom poglavlju rada.

Mikroturbine, stirlinogov motor i gorivne ćelije se koriste za postrojenja do 50 kWe. Stirlingov motor i mikroturbine su pogodne za kućanstva tj. za komercijalnu upotrebu. Prednosti su niske emisije stakleničkih plinova, mala buka i vibracije, velika pouzdanost i jednostavno održavanje, relativno malo mehanički jednostavnih pokretnih dijelova, mogućnost korištenja raznih vrsta goriva i dugi životni vijek. Jedini nedostatak je visoka cijena jer su još u rijetkoj uporabi.

Plinski motori i plinske turbine su namijenjeni za veće snage do 50 MWe. Pogodni su za industrije i elektrane. Plinska turbina ima niz prednosti: veliku učinkovitost, malo zagađenje okoliša, veliku pouzdanost, nisku cijenu izgradnje, potreban mali prostor, mogućnost modularne izvedbe, brzi start.

U slučaju da imamo odabranu još veću snagu, onda se koristi kombinirani ciklus (plin + para) i parne turbine. Njihove snage su do nekoliko stotina MWe. Dok se ostatak toplinske energije koristi za industrijsko grijanje, bolnice to jest područno grijanje. Za razliku od ostalih tehnologija parna turbina i kombinirani ciklus se može pokretati na više vrsta goriva. Ukupna energetska učinkovitost parno-turbinske kogeneracije je relativno visoka i uobičajeno iznosi od 60 do 80 %, dok kod kombiniranog doseže čak i visokih 90 % sa većom učinkovitosti proizvodnje električne energije.

Međutim naglasak ovog rada je na analizi rada malih postrojenja. Te se pokazalo da su tehnologije za mala postrojenja još nedovoljno komercijalizirana, te se zbog svoje visoke cijene ne isplate. No zahvaljujući poticajima iz europskih fondova i velikom energetskom potencijalu bioenergije broj bioelektrana u Republici Hrvatskoj raste.

U Osijeku će se izgraditi prva velika elektrana na biomasu BE-TO Osijek sa vrijednosti investicije **16 milijuna eura (122 milijuna kuna)**, dok će glavna namjena BE-TO Osijek, sa ukupno 3 MWe/10 MWt, biti proizvodnja toplinske energije za centralizirani toplinski sustav grada Osijeka i tehnološke pare za industrijske potrošače. Godišnja proizvodnja električne energije iznosit će oko 16.500 MWh, tehnološke pare oko 32.400 tona, a toplinske energije za centralizirani toplinski sustav oko 53.200 MWh. Prosječni godišnji stupanj iskorištenja postrojenja tako će biti veći od 70 %.

LITERATURA

[1] D. Lončar, G. Krajačić, M. Vujanović: „Podrška developerima – primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvnu biomasu“, Zagreb, 2009.

[2] D. Šljivac, M. Stojkov, K. Markanović, D. Topić, Z. Janković, E. Hnatko: „Energetska učinkovitost rasplinjavanja drvne biomase u proizvodnji električne energije“, 3. međunarodni skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, Osijek, 2012.

[3] I. Raguzin: „Model analize troškova i dobiti uporabe biomase u proizvodnji električne energije“, magistarski rad, Slavonski Brod, 2011.

[4] K. Zetović: „Usporedba tehnologija malih kogeneracijskih elektrana na bioplin“, diplomski rad, Osijek, 2014.

[5] D. Šljivac, Z. Šimić: „Obnovljivi izvori energije“, Zagreb, 2009.

[6] Tehnološko sveučilište u Beču: „Prikaz tehnologije za preradu bioplina u biometan“, projekt u okviru programa Inteligentna energija u Europi, Austrija, 2012.

[7] Wikipedia, Bioelektrana, https://hr.wikipedia.org/, (pristup ostvaren 07.02.2016.)

[8] Bamainvent d.o.o.: „Tehničko tehnološki elaborat udruge klaster proizvođača masivnog namještaja Masiva“, Zagreb, 2013.

[9] PowerLab FSB, Energetske transformacije, http://powerlab.fsb.hr/, (pristup ostvaren 07.02.2016.)

[10] D. Šljivac, „Obnovljivi izvori energije, kogeneracija i trigeneracija – GFOS“, Osijek, 2013.

[11] Hrote, Turbine-Mikroturbine, http://hrote.hr, (pristup ostvaren 07.02.2016.)

[12] Wikipedia, Kombinirane termoelektrane, https://hr.wikipedia.org/, (pristup ostvaren 07.02.2016.)

[13] M. Vujanović: „Računalna simulacija u kompleksnoj geometriji generatora pare na otpadnu toplinu“, diplomski rad, Zagreb, 2003.

[14] Kawasaki turbina, Gas turbine generator set GPB06, http://www.kawasaki-gasturbine.de, (pristup ostvaren 14.02.2016.)

[15] Capstone, Mikroturbina CAPSTONE C65, http://www.capstoneturbine.com, (pristup ostvaren 14.02.2016.)

[16] Wudag, Stirling SD4-E Motor, http://www.stirling-energie.de/, (pristup ostvaren 14.02.2016.)

[17] Hep, Novosti – Počinje izgradnja BE-TO Osijek, http://hep.hr/, (pristup ostvaren 14.02.2016.)

POPIS SLIKA

Sl. 2.1. Shema protustrujnog reaktora i faze procesa rasplinjavanja u nepokretnom sloju, prema [1] 3
Sl. 2.2. Vrste tehnologija za rasplinjavanje, prema [2] 4
Sl. 2.3. Tipovi reaktora za rasplinjavanje korišteni pri različitim opsezima snaga, prema [2] 4
Sl. 2.4. Primjer sustava za proizvodnju električne energije rasplinjavanjem drvne biomase, prema [2] 9
Sl. 2.5. Osnovna shema procesa pročišćavanja bioplina, prema [6] 10
Sl. 2.6. Shema procesa za pročišćavanje bioplina pomoću pranja vodom pod pritiskom, prema [6] .....**Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.**
Sl. 2.7. Shema procesa za pročišćavanje bioplina pomoću amina, prema [6]**Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.**
Sl. 2.8. Shema procesa za pročišćavanje bioplina adsorcijom s varijacijama tlaka, prema [6] .....**Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.**
Sl. 2.9. Shema procesa za pročišćavanje bioplina membranskom tehnologijom permeacije plina, prema [6] .....**Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.**
Sl. 3.1. Usporedba energetske učinkovitosti kogeneracije i odvojene proizvodnje, prema [5] 15
Sl. 3.2. Principijelna shema kogeneracije na bazi kondenzacijske parne turbine, prema [3] 17
Sl. 3.3. Principijelna shema kogeneracije na bazi protutlačne turbine, prema [3] 17
Sl. 3.4. Shema plinsko turbinske kogeneracije, prema [5] 19
Sl. 3.5. Braytonov kružni ciklus, prema [9] 20
Sl. 3.6. Plinska turbina otvorenog kruga, prema [10] 21
Sl. 3.7. Plinska turbina zatvorenog kruga, prema [10] 21
Sl. 3.8. Presjek Stirlingovog motora s osnovnim dijelovima, prema [13] 22
Sl. 3.9. Stirlingov kružni proces sa p-V dijagramom, prema [13] 23
Sl. 3.10. Kogeneracijska elektrana sa Stirlingovim motorom, prema [13] 25
Sl. 3.11. Shema ORC kogeneracijskog postrojenja na biomasu, prema [1] 27
Sl. 3.12. Funkcionalna skica mikroturbine, prema [11] 27
Sl. 3.13. Konstrukcijski dijelovi mikroturbine, prema [11] 28
Sl. 3.14. Plinska mikroturbina, prema [11] 29
Sl. 3.15. Princip rada kombiniranog ciklusa, prema [1] 30
Sl. 3.16. Kombinirani ciklus sa protutlačnom turbinom, prema [1] 31

Sl. 3.17. Kombinirani ciklus s kondenzacijskom turbinom s oduzimanjem pare, prema [1] 31
Sl. 4.1. Stupanj korisnosti različitih kogeneracijskih tehnologija, prema [10] 34
Sl. 4.2. Ovisnost glavnog agregata o snazi kogeneracijskog postrojenja, prema [10] 35
Sl. 4.3. Energetska bilanca plinskog motora JENBACHER 320 37
Sl. 4.4. Energetska bilanca plinske turbine tip KAWASAKI GPB06.....38
Sl. 4.5. Energetska bilanca mikroturbine CAPSTONE C65 40
Sl. 4.6. Energetska bilanca Stirlingovog motora WUDAG SD4-E.....41

POPIS TABLICA

Tab. 2.1. Usporedba nekih komercijalnih reaktora za rasplinjavanje, prema [2] 5
Tab. 2.2. Tehničke karakteristike modula za proizvodnju električne energije, prema [2] 8
Tab. 2.3. Usporedba bioplina, deponijskog plina i prirodnog plina (Danskog), prema [6] 11
Tab. 3.1. Značajke plinsko turbinskih agregata za kogeneraciju, prema [5] 19
Tab. 4.1. Osnovne karakteristike kogeneracijskih tehnologija, prema [3] 33
Tab. 4.2. Podaci proizvođača za plinski motor snage 1065 kW_{el} 36
Tab. 4.3. Podaci proizvođača za plinsku turbinu KAWASAKI GPB06, prema [14] 37
Tab. 4.4. Podaci proizvođača za mikroturbinu CAPSTONE C65, prema [15]. 39
Tab. 4.5. Podaci proizvođača za Stirlingov motor WUDAG tip SD4-E, prema [16]. 40

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu je opisana tehnologija proizvodnje električne energije iz biomase. Tehnička rješenja koja se koriste, te je naveden raspon snaga za pojedine tehnologije. Također je grafički i analitički dodatno pojašnjena svaka tehnologija. U zadnjem poglavlju je prikazana analiza rada malih instalacija za proizvodnju bioplina.

Ključne riječi: biomasa, bioplin, bioenergija, rasplinjavanje, stirlingov motor, ORC, rainkenov ciklus, parna turbina, plinska turbina, kombinirani ciklus

ABSTRACT

This thesis describes the technology of electricity generation from biomass. The technical solutions used, and each technologies has its own specific range of power. Each technology is also graphically and analytically additionally explained. The last chapter analyzes the work of small installations for biogas production.

Keywords: biomass, biogas, bioenergy, gasification, Stirling engine, ORC, rankine cycle, steam turbine, gas turbine, combined cycle

ŽIVOTOPIS

Rebeka Primorac rođena je u Vinkovcima 1990. godine. Završila je Osnovnu školu A. G. Matoš u Vinkovcima, te nakon toga upisala Gimnaziju M. A. Reljković u Vinkovcima. Godine 2009. upisala Elektrotehnički fakultet Osijek gdje je završila preddiplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika. Nakon završetka preddiplomskog studija godine 2012. upisuje diplomski studij elektroenergetike.

Slobodno vrijeme provodi s prijateljima. Sklonost timskom radu očituje se kroz volontiranje u staračkom domu u Vinkovcima, te domu za djecu i odrasle s posebnim potrebama Vinkovci. Od srednje škole aktivan je član mladih Crvenog križa Vinkovci.

Služi se aktivno engleskim jezikom, računalom, Office i CAD programima.

Potpis:

_____