

Energetska učinkovitost rasplinjavanja drvene biomase u proizvodnji električne energije

Energy efficiency of wood biomass gasification in electricity production

**D. Šljivac¹, M. Stojkov^{2,*}, K. Markanović¹, D. Topić¹, Z. Janković²,
E. Hnatko²**

¹Elektrotehnički fakultet Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

²Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, Hrvatska

*Autor za korespondenciju. E-mail: mstojkov@sfsb.hr

Sažetak

Izgradnja i funkcioniranje reaktora za rasplinjavanje podrazumijeva razumijevanje i poznavanje procesa rasplinjavanja, sastav primarnog energenta (biomase), i utjecaj operacijskih parametara na radna svojstva elektrane. Dobro razumijevanje osnovnih procesa je ključno za planiranje, izgradnju, funkcioniranje, uklanjanje grešaka i unaprjeđenje procesa elektrana. Ovakva vrsta elektrana sa integriranom plinifikacijom, osim reaktora za rasplinjavanje, uključuje još i sustav za obradu biomase, sustav za opskrbu reaktora biomasom, sustav za čišćenje plina i sustav za uklanjanje pepela i krutih ostataka.

Abstract

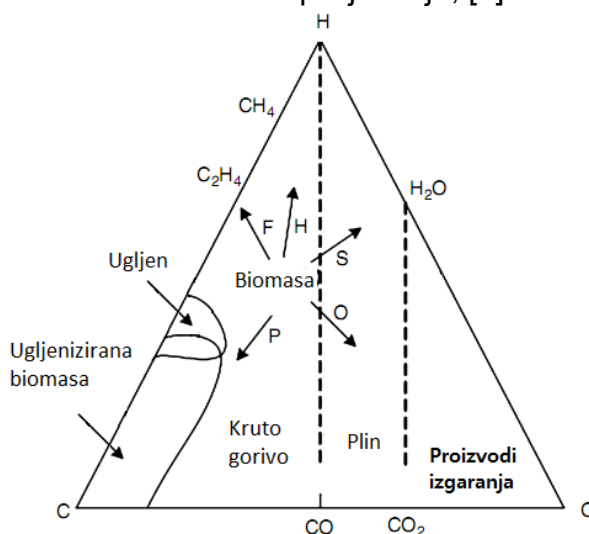
The design and operation of a gasifier require an understanding of the gasification process and design process of gasifier, primary energy source (biomass), and operating parameters influence on the performance of the plant. A good comprehension of the basic reactions is fundamental to the planning, design, operation, troubleshooting, and process improvement of a gasification plant. The design of a gasification plant includes the gasifier reactor as well as its auxiliary or support equipment. A typical biomass gasification plant design comprises gasifier reactor, biomass handling system, biomass feeding system, gas cleanup system and ash and solid residue removal system. As with most process plant equipment, the design of a gasifier may be divided into major phases such as process design and preliminary sizing, optimization of design and detailed mechanical design.

Ključne riječi: rasplinjavanje biomase, reaktor za rasplinjavanje, piroliza, izgaranje, modeliranje reaktora za rasplinjavanje.



1. Uvod – proces rasplinjavanja

Rasplinjavanje s energetskeg 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, CH₄ i H₂ i ima sljedeće prednosti 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. Trostruki dijagram (slika 1) ugljika, vodika i kisika zorno prikazuje pretvorbu i formiranje različitih plinova u reaktoru za rasplinjavanje, [1].



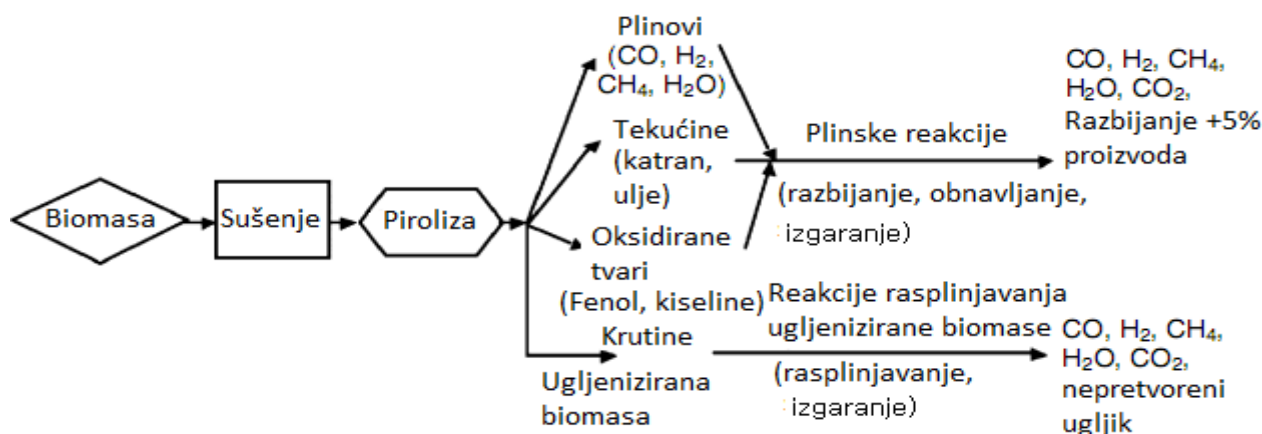
Slika 1. Trostruki (C-H-O) dijagram procesa rasplinjavanja, P spora i F brza piroliza

Uz odabir kisika kao medija pri rasplinjavanju, pretvorba se kreće prema vrhu O (kisik). Ovdje se pojavljuje nusproizvod CO za male količine kisika i CO₂ za velike količine kisika. Ako se količina kisika ne bi stehiometrijski podešavala, nastupilo bi izgaranje uz dobivanje dimnih plinova umjesto generatorskog plina. Krećući se prema vrhu O (kisik) sa slike 1., smanjuje se količina vodika, a povećava se udio spojeva ugljika kao što su CO i CO₂ u dobivenom plinu. Korištenjem pare kao medija za rasplinjavanje, dobiva se generatorski plin koji sadrži više vodika po jedinici ugljika, što rezultira većim H/C omjerom. Izbor medija za rasplinjavanje značajno utječe na ogrjevnju moć izraženu u MJ/m³ (u cijelom radu

jedinica se odnosi za normne uvjete) koja se može dobiti izgaranjem generatorskog plina. Iz tablice 1. može se vidjeti da se uz kisik kao radni medij dobiva generatorski plin najveće ogrjevne moći. Ukoliko se za istu namjenu koristi zrak umjesto kisika, povećava se udio dušika u generatorskom plinu što za posljedicu ima smanjenje ogrjevne moći.

Tablica 1. Ogrjevna moć plina proizvedenog pomoću različitih reagensa

Reagens	Ogrjevna moć [MJ/m ³]
Zrak	4-7
Para	10-18
Kisik	12-28



Slika 2. Putevi rasplinjavanja biomase

Uobičajeno proces rasplinjavanja biomase započinje zagrijavanjem, sušenjem i pirolizom nakon čega dolazi do kemijske reakcije između nusproizvoda pirolize biomase i radnog medija i dobiva se željeni rasplinjeni plin (generatorski plin). Toplinska energija nužna za zagrijavanje, sušenje i pirolizu biomase dobiva se iz egzotermičkih reakcija pri izgaranju biomase. Svježe posječeno drvo sadrži 30-60% vlage, dok druge vrste biomase mogu imati udio vlage i do 90%, tablica 2, [2].

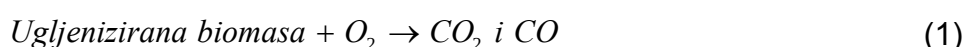
Tablica 2. Količina vlage izražene u % u nekim vrstama biomase

Biomasa	Kukuruzna stabljika	Pšenična slama	Rižina slama	Rižina ljuska	Stočni izmet	Kora drveta	Piljevina	Ostaci hrane	RDF peleti
Vlažnost [%]	40-60	8-20	50-80	7-10	88	30-60	25-55	70	25-35

Po svakom kilogramu vlage biomase dobivena energija je manja za minimalno 2260 kJ jer je to potrebna toplina za isparavanje vlage. Iz tog se razloga biomasa prethodno suši na suncu i na taj se način uklanja vlaga iz vanjskog sloja biomase (ostatak vlage u idealnom slučaju je 10-20%). Posljednja faza sušenja odvija se u reaktoru gdje povratna toplina

dobivena izgaranjem biomase dodatno isušuje biomasu. Pri temperaturama iznad 100 °C dolazi do nepovratnog izdvajanja vode iz biomase te se uz daljnje povećanje temperature voda iz biomase u potpunosti isparava (do 200 °C), [3].

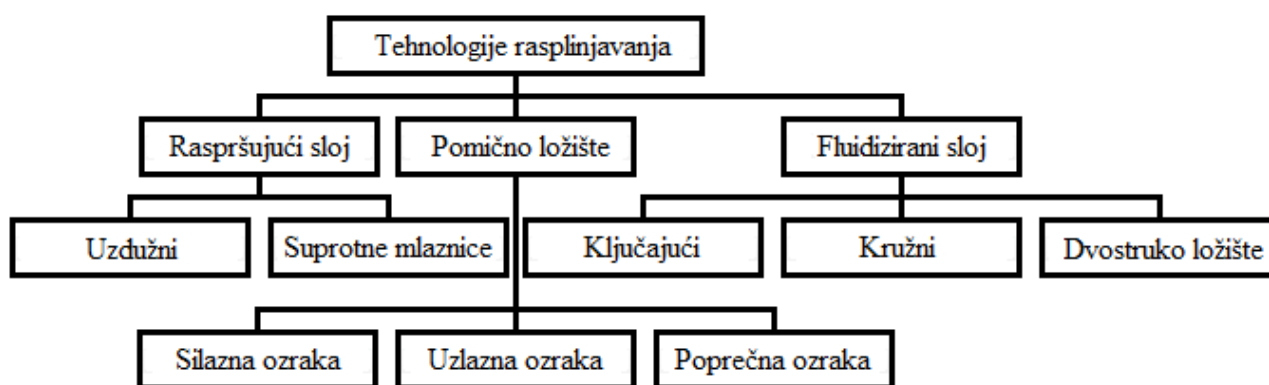
Nadalje nastupa proces pirolize. Tijekom spore pirolize, plin po svojem kemijskom sastavu ide prema vrhu C (ugljik), slika 1., pa se proizvodi više ugljenizirane biomase. Tijekom brze pirolize kemijski sastav plina se kreće prema C-H osi nasuprot vrha kisika. Udio kisika se tada lagano smanjuje i povećava udio ugljikovodika. Nakon pirolize slijedi rasplinjavanje a obuhvaća kemijske reakcije između ugljikovodika u primarnom energentu, pare, ugljičnog dioksida, kisika, i vodika u reaktoru, kao i kemijske reakcije između molekula nastalih plinova. Slijede kemijske jednačbe koje opisuju moguće kemijske reakcije:



2. Modeliranje reaktora za rasplinjavanje

Elektreane 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.

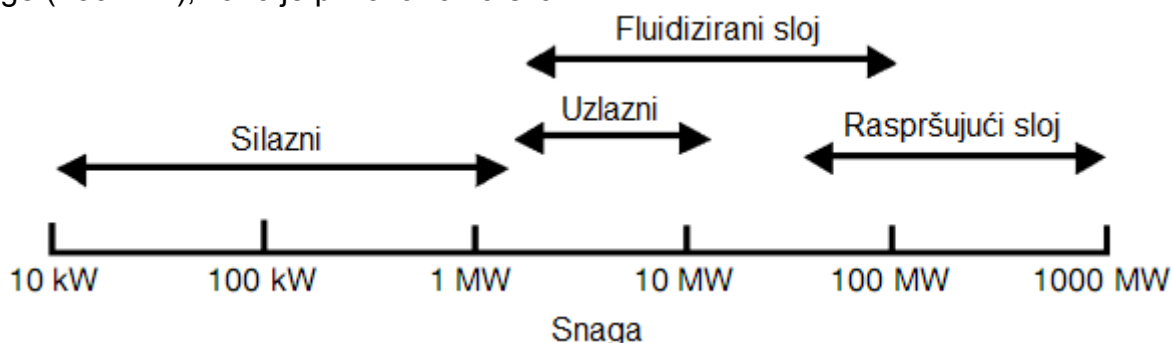
Reaktori za rasplinjavanje se mogu sistematizirati prema vezi između plina i primarnog energenta i prema radnom mediju za rasplinjavanje. Prema vezi između plina i primarnog energenta reaktori za rasplinjavanje se mogu podijeliti na reaktore sa fiksnim ili pomičnim ložištem, reaktore sa fluidiziranim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



Slika 3. Vrste tehnologija za rasplinjavanje

Važno je naglasiti da svaki reaktor za rasplinjavanje funkcioniра 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 4.



Slika 4. Tipovi reaktora za rasplinjavanje korišteni pri različitim opsezima snaga

Tablica 3. Usporedba nekih komercijalnih reaktora za rasplinjavanje

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 energetska 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). Iz proračuna slijedi:

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{Q}}{H_{d,g}} [\text{m}^3/\text{s}] \quad (5)$$

Ovdje je $\dot{Q}$ snaga reaktora za rasplinjavanje, a $H_{d,g}$ donja ogrjevna moć goriva (MJ/m^3). Za određivanje potrebnog masenog protoka goriva, $\dot{M}_f$ mora se znati snaga reaktora $\dot{Q}$, donja ogrjevna moć biomase $H_{d,bm}$ [MJ/kg] i stupanj korisnog djelovanja reaktora η_{gef} :

$$\dot{M}_f = \frac{\dot{Q}}{H_{d,bm} \cdot \eta_{gef}} [\text{kg}/\text{s}] \quad (6)$$

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 m_a za rasplinjavanje jedinice mase goriva računa se:

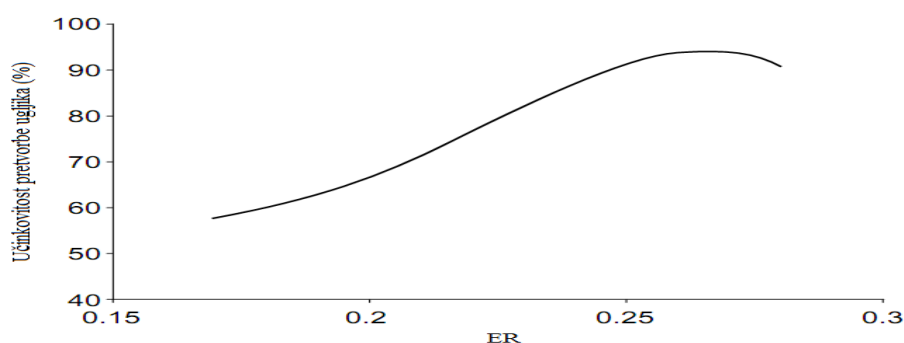
$$m_a = m_{th} \cdot ER \quad (7)$$

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:

$$\dot{M}_{fa} = m_{th} \cdot ER \cdot \dot{M}_f [\text{kg}/\text{s}] \quad (8)$$

$$ER(<1,0)_{\text{rasplinjavnja}} = \frac{\text{korištena količina zraka}}{\text{stehiometrijska količina zraka}} = EA(>1,0)_{\text{izgaranja}} \quad (9)$$

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.



Slika 5. Učinkovitost rasplinjavanja u ovisnosti o ER , reaktor sa fluidiziranim slojem

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:

(10)



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.

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/m³. Ako je pak radna tvar čisti kisik dobiven odvajanjem (separacijom) iz zraka, ogrjevna moć je puno veća i kreće se od 10 - 15 MJ/m³. Značajan nedostatak korištenja kisika je utrošak velike količine energije za odvajanje kisika iz zraka (~2,18 MJ/kg O₂). Za slučaj da se kao radna tvar koristi pregrijana para sama ili u kombinaciji sa zrakom, ili kisikom, dobiva se više vodika:



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

$$m_{fh} = 18 \cdot \frac{M_f \cdot C}{12} (S/C) [\text{kg}_h] \quad (13)$$

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. 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.

3. Proizvodnja električne energije rasplinjavanjem drvne biomase

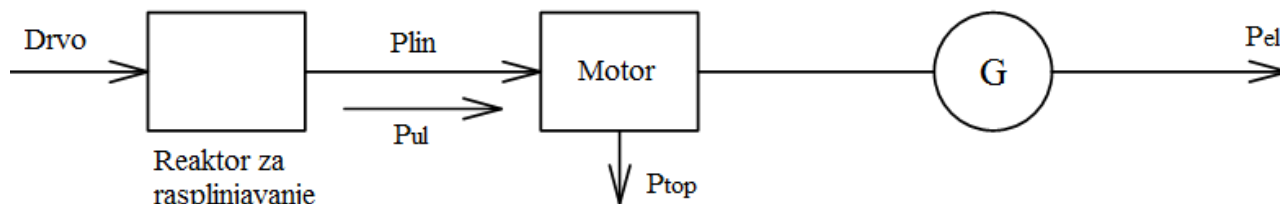
Krajnji proizvod rasplinjavanja drvne biomase je plin bogat metanom, koji se koristi pri proizvodnji električne energije uz pomoć plinskog motora. Izgaranjem rasplinjenog plina u motoru, na vratilu motora se dobiva okretni moment. Vratilo motora je čvrsto spojeno s rotorom generatora. Kao posljedica 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. 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. Pri modeliranju sustava koristio se reaktor učinkovitosti 80% i Jenbacherov modul za proizvodnju električne energije JMS 420 GS-N.L., [4].

Tablica 4. Tehničke karakteristike modula za proizvodnju električne energije

CO-GEN modul		
Izlazna snaga	kWe	1415
Izlazna toplinska snaga (120 °C)	kW	1492
Ulazna snaga	kW	3373
Potrošnja goriva bazirana na H_d od 9,5 kWh/m ³	m ³ /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/m ³ (5% O ₂)	

Na slici 6 prikazan je primjer sustava za proizvodnju električne energije rasplinjavanjem drvne biomase, [5].



Slika 6. Primjer sustava za proizvodnju električne energije rasplinjavanjem drvne biomase

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 ogrjevnice 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:

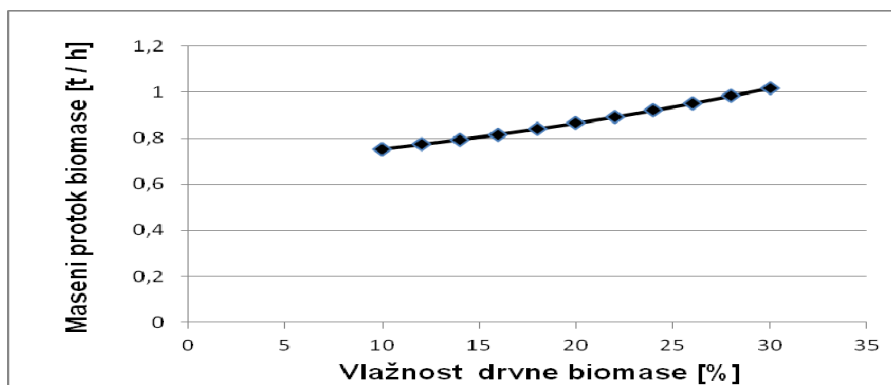
$$H_{d,bm} = H_{g,bm} \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 20300 \cdot \frac{h}{100} - 2260 \cdot \frac{w}{100} \quad (14)$$

gdje je w vlažnost izražena u postotcima, h udio vodika izražen u postotcima. Nakon uspješnog određivanja ogrjevnice moći drva, može se započeti izračunavanje mase goriva potrebnog za proizvodnju 355 m³/h volumnog protoka izlaznog plina donje ogrjevnice 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:

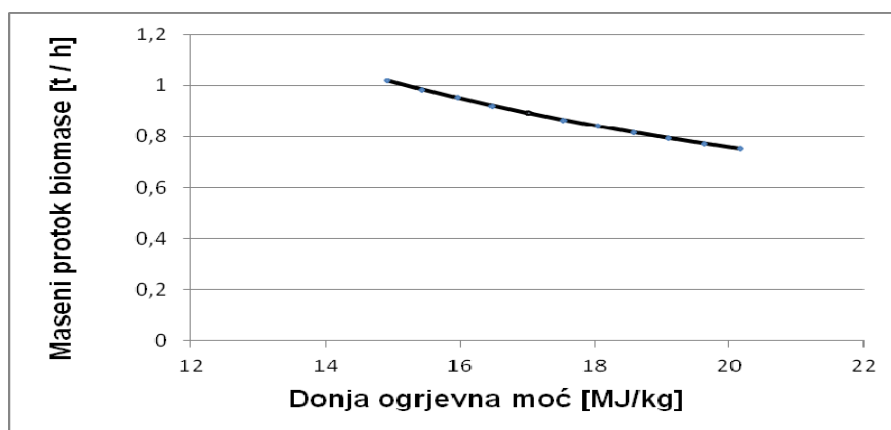
$$\dot{M}_{bm} = \frac{\dot{Q}}{H_{d,bm} \cdot \eta_{gef}} \quad (15)$$

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



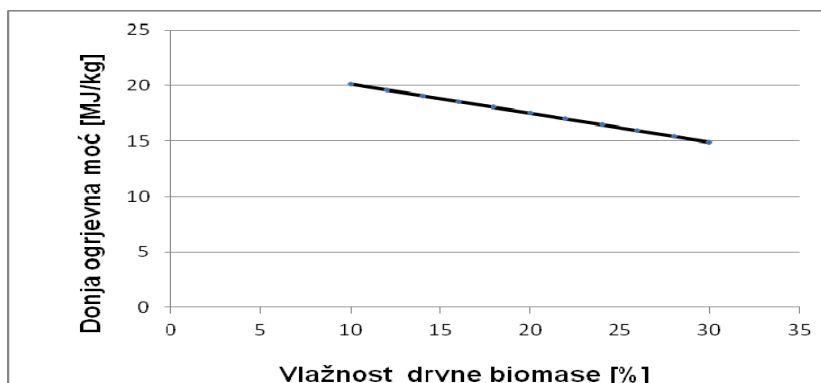
Slika 7. Ovisnost masenog protoka potrebne biomase za rasplinjavanje o vlažnosti

Slika 7 prikazuje ovisnost mase potrebnog goriva za rasplinjavanje o vlažnosti drva. Jasno je vidljivo da se sa povećanjem vlažnosti drva povećavaju i zahtjevi za masom drvene biomase koju koristimo kao gorivo. Pri najmanjoj vlažnosti koja se koristila u proračunu (10%), najmanja je i potrošnja drvene biomase (0,753 t/h). Kao što se može očekivati s povećanjem udjela vlage veća je i potrošnja drvene biomase.



Slika 8. Ovisnost masenog protoka potrebne biomase o donjoj ogrjevnjivosti

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



Slika 9. Ovisnost donje ogrjevnne moći drvene biomase o vlažnosti

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

4. Zaključak

Rasplinjavanje drvene biomase u proizvodnji električne energije je vrlo zanimljiva tehnologija. Mnoge su prednosti rasplinjavanja drvene biomase: lakša i bolja regulacija snage u termoenergetskim postrojenjima, osnovna tehnologija korištenja ugljena s ekološki prihvatljivim emisijama, povećanje energetske učinkovitosti termoenergetskih blokova na kruta goriva, vrlo dobar stupanj upravljivosti, velike ekonomske prednosti na prostorima gdje je drvna biomasa dostupna pri relativno niskim cijenama. Osim velikih prednosti rasplinjavanja drvene biomase, tehnologija rasplinjavanja ima i neke nedostatke: rasplinjavanje je poprilično složen i osjetljiv proces, drvna biomasa je poprilično glomazna i za konstantan rad sustava potrebno je često punjenje spremnika goriva, nemogućnost korištenja suhe drvene biomase, poprilično nezgodno čišćenje pepela i katranskih kondenzata, unatoč lakšem dobivanju plina, korištenje istog nije tako jednostavno.

Uz sve prednosti i manje nedostatke, proizvodnja električne energije rasplinjavanjem drvene biomase, uz ostale obnovljive izvore energije, predstavlja budućnost u energetici. Zbog porasta svijesti čovječanstva prema okolišu i njegovom očuvanju, ekonomska isplativost ovakvih postrojenja je sve manje bitna.

5. Literatura

- [1] P. Basu, Biomass gasification and pyrolysis practical design and theory, Elsevier inc., 2010.
- [2] A. K. Rajvanshi, Biomass gasification, Nimbkar Agricultural Research Institute, Maharashtra, India
- [3] <http://www.eecabusiness.govt.nz/>
- [4] FAO (Food and agriculture organization, United Nations), Wood gas as engine fuel
- [5] E. D. Larson, Small-scale gasification-based biomass power generation