

ISKORIŠTAVANJE RAŠPLINJENE BIOMASE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE

Vedran U r a n, Rijeka

UDK 621.9:62/843.3
STRUČNI ČLANAK

Tehnoekonomski su opisani osnovni sustavi za rasplinjavanje biomase te energetska postrojenja na plin proizveden iz biomase. Dva su osnovna sustava za rasplinjavanje biomase: visokotlačni i niskotlačni sustav čije su kvantitativne usporedbe prikazane u priloženim tablicama. Također su navedeni primjeri razvoja demonstracijskih sustava za rasplinjavanje biomase u svijetu kao i mogućnosti primjene takvih sustava u Hrvatskoj.

Ključne riječi: sustavi, rasplinjavanje biomase, energetska postrojenja, visokotlačni sustav, niskotlačni sustav, demonstracijski sustavi.

1. UVOD

Biomasa je potencijalni energetska izvor jer je u njoj uskladišten dio sunčeve energije koju je moguće iskoristiti. Biomasi najvećim dijelom čine različiti produkti iz biljnog svijeta (npr. šumski i drveni ostaci, ostaci iz poljoprivrede, brzorastuće drveće, biomasa dobivena uzgojem uljarica, algi i trava)¹. Od početka čovječanstva pa do danas ogrjevno drvo spada u najraširenije oblike korištenja biomase kao izvora toplinske energije. Spaljivanje biomase jest prvi tehnološki proces za proizvodnju toplinske i električne energije, bilo odvojeno, bilo u spojnem procesu. Energetska postrojenja ložena različitim tipovima biomase (najčešće ostacima iz šuma i drvnih industrija) tehnološki su slična energetska postrojenjima na ugljen, tako da se danas sve više razvija tehnologija zajedničkog izgaranja ovih obaju nosioca energije.

Proces rasplinjavanja biomase jest drugi noviji tehnološki proces za proizvodnju toplinske i električne energije. To je proces pretvorbe (krute) biomase u plin srednje ili niske ogrjevne moći uštrcavanjem pare i uspuhivanjem zraka u rasplinjač biomase. Takav se proizvedeni plin koristi u klasičnom plinskom procesu za proizvodnju električne energije dok se toplinske energije plinova izgaranja iz plinske turbine mogu putem generatora pare-utilizatora iskoristiti u parnom ciklusu za proizvodnju električne i toplinske energije. To su tzv. BIGCC sustavi (*BIGCC*, od engl. *Biomass-Based Gasification Combined-Cycle Power Systems*).

Nekoliko je tipova sustava za rasplinjavanje biomase. Takvi sustavi nisu još u potpunosti komercijalizirani

već se radi o eksperimentalnim i demonstracijskim sustavima. U radu će se opisati dva osnovna tipa sustava: visokotlačni sustav za rasplinjavanje biomase i niskotlačni sustav za rasplinjavanje biomase. Kvantitativne usporedbe ovih dvaju različitih sustava prikazane su u tablicama 2 – 5.

2. OSNOVNO O SUSTAVU ZA RASPLINJAVANJE BIOMASE

Svaki se sustav integriranog rasplinjavanja biomase i kombiniranog ciklusa za proizvodnju električne i toplinske energije sastoji od sljedećih podsustava:

- Doprema, mjerenje, priprema i sušenje biomase
 - iskrcavanje vlažne biomase iz kamiona
 - skladištenje vlažne biomase
 - sustav mjerenja i prenošenja vlažne biomase do sušare
 - sustav za sušenje biomase (do 11% od njegove ukupne težine)
 - skladište za osušenu biomasu.
- Sustav za rasplinjavanje biomase te čišćenje dobivenog plina
 - jedinica za dopremu osušene biomase u rasplinjač
 - rasplinjač
 - sustav za izgaranje drvenog ugljena i zagrijač zraka
 - sustav za otklanjanje pepela
 - sustav za spaljivanje katrana (ili drvnog ulja)
 - sustav za hlađenje dobivenog plina
 - sustav za otklanjanje letećih čestica.

¹ Manjim dijelom se odnosi i na biomasu životinjskog podrijetla (npr. iz životinjskog ekstremiteta) ali to će se u ovom radu izuzeti i govoriti o plinu dobivenom rasplinjavanjem biomase isključivo biljnog podrijetla.

- Kombinirani plinsko-parni sustav za proizvodnju električne i toplinske energije
 - plinska turbina i generator električne energije
 - generator pare-utilizator
 - parna turbina (kondenzacijska ili kondenzacijsko-oduzimana) i generator električne energije
 - kondenzator, rashladni toranj, crpka napojne vode.

Sustav dopreme, mjerenja, pripreme, sušenja te skladištenja biomase jedinstven je kod svih tipova sustava za rasplinjavanje biomase. Na osnovi potreba za električnom i toplinskom energijom određuje se količina plina koja diktira određivanje količine vlažne biomase za sušenje te zatim njeno rasplinjavanje. No, prije toga potrebno je izvršiti kemijsku analizu biomase koja će se izvršiti procesu rasplinjavanja. Tu se ubraja: kemijski sastav biomase, njena gornja ogrjevna moć, stupanj vlažnosti prije njenog podvrgavanja procesu sušenja, te njena donja ogrjevna moć. Rezultati jedne takve analize prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Primjer analize osušene biomase potrebne za rasplinjavanje

	javor	mješavina topole
Konačna analiza (težina %, suha baza)		
Ugljik	49,54	50,88
Kisik	43,73	41,90
Vodik	6,11	6,04
Dušik	0,10	0,17
Sumpor	0,02	0,09
Klor	0,00	0,00
Pepeo	0,50	0,92
Gornja ogrjevna moć osušene biomase, kJ/kg	19 715	20 287
Vlažnost biomase prije podvrgavanja procesu sušenja	38%	50%

Plinovi izgaranja iz generatora pare-utilizatora glavni su energetske izvori kod procesa sušenja vlažne biomase ako se radi o izravnom zagrijavanju biomase u rasplinjaču. Kod rasplinjača s neizravnim zagrijavanjem biomase za sušenje vlažne biomase kao energetske izvor koristi se mješavina okolnog zraka i plinovi do-

biveni nakon izgaranja drvenog ugljena. Kod oba slučaja dovoljna količina okolnog zraka miješa se s produktima izgaranja plinova kako bi se snizila temperatura plina na 204°C prije njegova ulaska u sustav za sušenje vlažne biomase. Takvo miješanje rezultira stvaranjem nove mješavine plinova s relativno visokim udjelom kisika (oko 16%), ali nedovoljnom temperaturom da dođe do samozapaljivanja biomase u sušari. Plin napušta sušaru s izlaznom temperaturom od 80°C ulazeći u vrećasti filter radi pročišćavanja tog plina od letećih čestica. Temperatura u takvom sustavu mora biti takva da ne prouzrokuje samozapaljivanje plina. Osušena biomasa izlazi iz sušare s temperaturom od 68°C i postupno se hladi do ulaza u rasplinjač.

2.1. Visokotlačni sustav za rasplinjavanje biomase

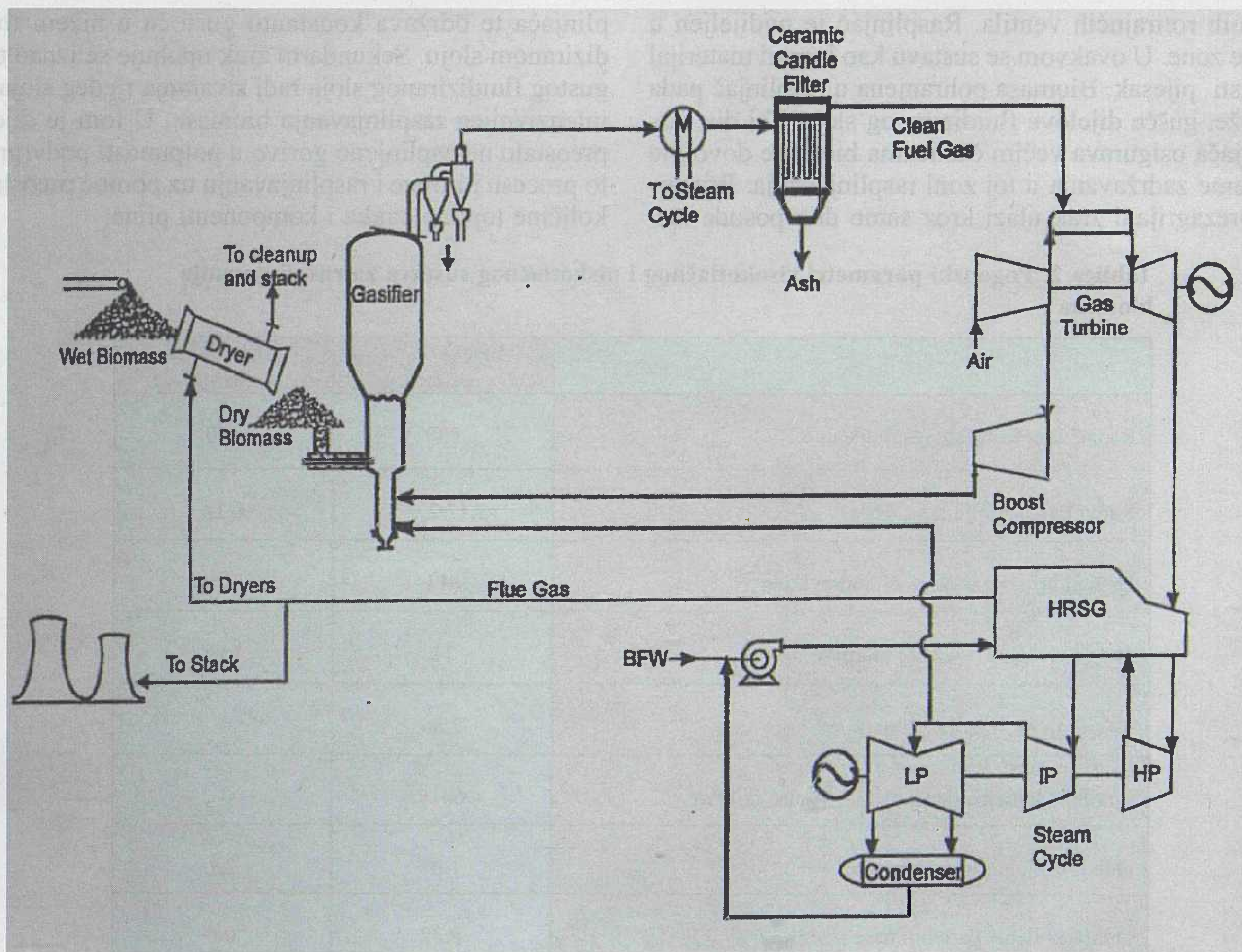
Osnovni princip rada ovog tipa sustava za rasplinjavanje biomase sastoji se od pretvaranja osušene biomase u plinovito stanje kroz jednostupanjski rasplinjač u fluidiziranom sloju. Inertni materijal za taj sloj jest glina (zemlja) koja s biomasom nastoji stvoriti što potpuniji površinski dodir u fluidiziranom sloju.

Rasplinjač biomase može funkcionirati pri različitim radnim temperaturama i tlakovima. U rasplinjač se upuhuje komprimirani zrak dovedenog iz kompresora-utilizatora i uštrcava manja količina pare oduzeta iz niskotlačnog bloka parne turbine (slika 1.). Miješanjem komprimiranog zraka i osušene biomase stvara se egzotermna reakcija radi pretvorbe osušene biomase u plin. Umjesto komprimiranog zraka također je moguće u rasplinjač upuhnuti i određeni sadržaj čistog kisika zbog učinkovitijeg miješanja s osušenom biomasom. No, proizvodnja kisika zahtijeva dodatne troškove što bi imalo za posljedicu skuplji sustav za rasplinjavanje biomase.

Rasplinjač biomase je oblika posude unutarnjeg promjera fluidiziranog sloja od 2,86 metara i vanjskog okvirnog dijela posude s vatrootpornim zidovima, promjera 4,26 metara.

Glavni faktori koji utječu na učinkovitost izgaranja jesu temperatura rasplinjavanja biomase u rasplinjaču, pretičak zraka te vrijeme zadržavanja u zoni rasplinjavanja. Rasplinjavanje biomase se pod visokim tlakom praktički posve završava u samom sloju, odnosno dogorijevanje je iznad njega zanemarivo.

Zagrijani plinovi na izlazu iz rasplinjača hlade se do temperature od 538°C radi kondenziranja alkalnih spojeva koji se skupljaju u keramičkom filteru oblika svijeće te se potom odstranjuju iz sustava. Emisija alkalnih spojeva koja se nalazi u sadržaju rasplinjene biomase vrlo je važna zbog njihova utjecaja na visokotemperaturnu koroziju na lopaticama plinske turbine. Pojava korozije takvog tipa nastaje kada alkalne soli reagiraju sa sumpor (IV)-oksidom (SO₂) i kisikom (O₂). Keramički filteri za pročišćavanje plina također su se pokazali učinkovitim i kod odstranjivanja letećih čestica.



Slika 1. Shema visokotlačnog sustava za rasplinjavanje biomase [1]

(*wet biomass* – vlažna biomasa, *dryer* – sušilo biomase (sušara), *dry biomass* – suha biomasa, *gasifier* – rasplinjač, *to steam cycle* – prema parnom ciklusu, *ceramic candle filter* – keramički filter oblika svijeće, *ash* – pepeo, *clean fuel gas* – očišćeni plin, *air* – zrak, *gas turbine* – plinska turbina, *boost compressor* – kompresor-utilizator, *HRSG* – generator pare-utilizator, *steam cycle* – parni ciklus, *HP* – visokotlačni blok parne turbine, *IP* – srednjotlačni blok parne turbine, *LP* – niskotlačni blok parne turbine, *condenser* – kondenzator, *BFW* – dodatna napojna voda, *flue gas* – dimni plinovi, *to dryers* – prema sušilu biomase, *to stack* – prema dimnjaku)

Prigodom rasplinjavanja osušene biomase u fluidiziranom sloju na dnu se posebne posude sustava taloži neizgorivi dio biomase ili drveni ugljen koji izgara kod temperature od 843°C i pretičkom zraka od 20%. Cijevi položene unutar sustava za izgaranje drvenog ugljena služe za cirkuliranje pare iz generatora pare-utilizatora koja se zbog izgaranja drvenog ugljena zagrijava te zatim tako zagrijava odводи do ulaska u parnu turbinu. Jasno je da sustav za izgaranje drvenog ugljena treba funkcionirati pod visokim tlakom. Sustav za izgaranje drvenog ugljena također treba biti zagrijan kontinuiranim upuhivanjem komprimiranog zraka. Stupanj potpunog izgaranja veća je od 99%. Što se povećava udio hlapivosti dobivenog plina iz biomase to je postotak ugljena u drvenom ugljenu veća (do 87% od ukupne težine drvenog ugljena) a samim time i njegova ogrjevna moć. Plin dobiven izgaranjem drvenog ugljena također podliježe proceduri postupnog hlađenja i čišćenja od štetnih emisija i partikularnih čestica.

Istraživanja su pokazala da tlak u fluidiziranom sloju iznad 1 MPa ne utječe više bitno na koeficijent izmjene

toplina. Zato je stupanj rasplinjavanja biomase veći jer je dodir između inertnog materijala i osušene biomase potpuniji.

2.2. Niskotlačni sustav za rasplinjavanje biomase

Značajka ovog tipa sustava jesu niži tlakovi pod kojima se vrši proces rasplinjavanja biomase (0,14 MPa). U rasplinjač se umjesto komprimiranog zraka upuhuje ekspanzirani zrak prethodno zagrijan putem plina u izmjenjivaču topline te se ne koristi toplina pare iz parnog ciklusa već uparene kapljice oslobođene iz biomase koja u rasplinjač ulazi s većim stupnjem vlažnosti (i do 20%). Te uparene kapljice predstavljaju izvor pare, ali s nižom toplinskom vrijednošću. Zbog postizanja učinkovitijeg izgaranja odnos između količine zraka i biomase iznosi 2,1. Niskotlačni sustav za rasplinjavanje biomase prikazan je na slici 2.

Kod ovog se sustava djelomično osušena biomasa doprema u rasplinjač putem dvaju vijčano-valjkastih dozatora izoliranih od uzvodnih komponenti pomoću

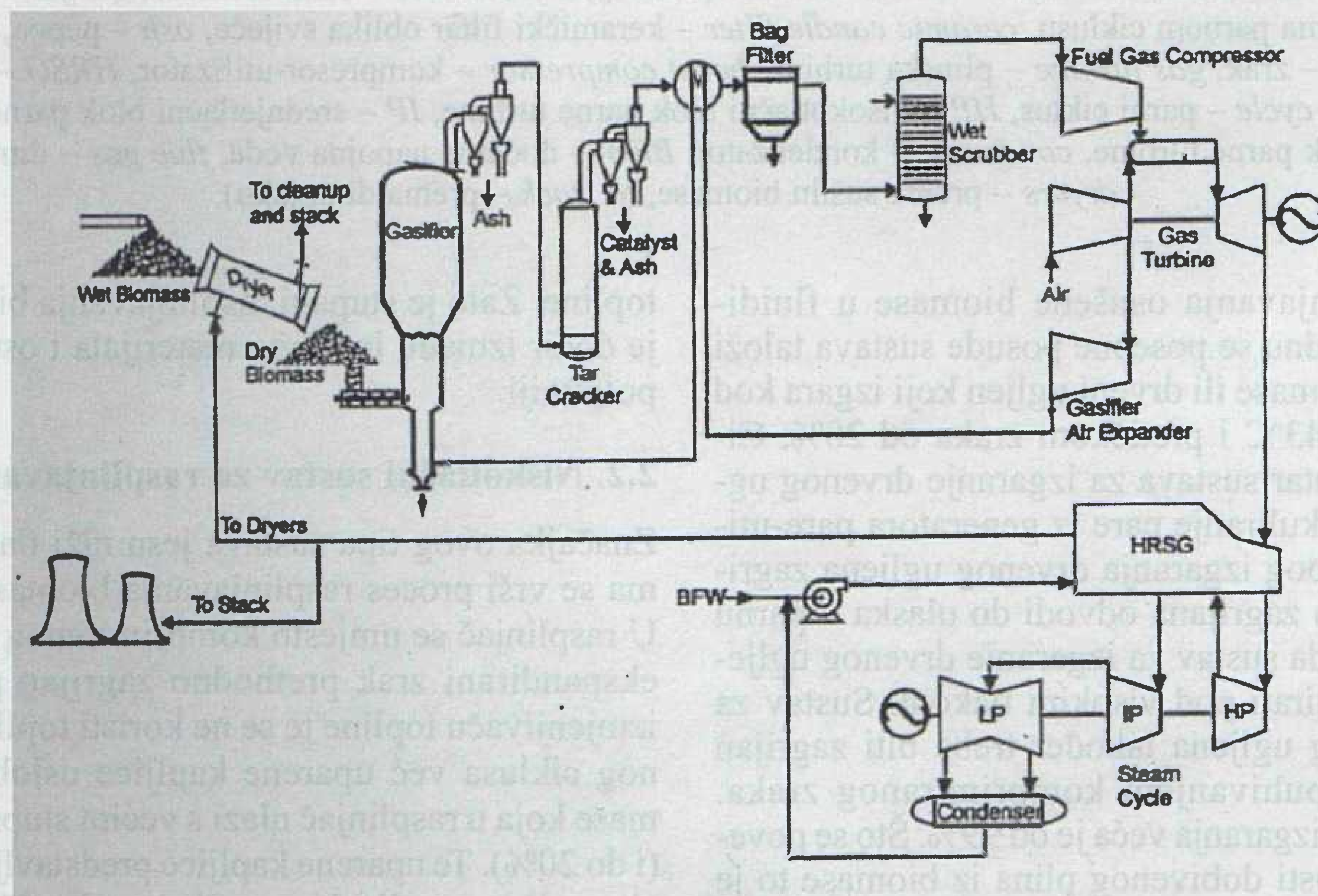
tlačnih rotirajućih ventila. Rasplinjač je podijeljen u dvije zone. U ovakvom se sustavu kao inertni materijal koristi pijesak. Biomasa pohranjena u rasplinjač pada u niže, gušće dijelove fluidiziranog sloja. Taj dio rasplinjača osigurava većim česticama biomase dovoljno vrijeme zadržavanja u toj zoni rasplinjavanja. Primarni prezagrijani zrak ulazi kroz samo dno posude ras-

plinjača te održava konstantu gustoću u nižem fluidiziranom sloju. Sekundarni zrak upuhuje se iznad tog gustog fluidiziranog sloja radi stvaranja rjeđeg sloja te intenzivnijeg rasplinjavanja biomase. U tom je dijelu preostalo nerasplinjeno gorivo u potpunosti podvrgnuto procesu pirolize i rasplinjavanju uz pomoć preostale količine topline, zraka i komponenti plina.

Tablica 2. Pogonski parametri visokotlačnog i niskotlačnog sustava za rasplinjavanje biomase

	Visokotlačni sustav	Niskotlačni sustav
Radna temperatura u rasplinjaču, °C	830	870
Radni tlak u rasplinjaču, MPa	3,17/2,07	0,14
Dnevni utrošak osušene biomase, t/dan	811	1460
Sadržaj vlage u osušenoj biomasi, %	11	15,8
Unutarnji promjer rasplinjača, m	2,86	-
Potrebna količina inertnog materijala, kg/h*m ²	6018	-
Odnos količine zraka/biomase	1,07	2,1
Odnos količine pare/biomase	0,32	0,0

Napomena: tlak na izlazu iz plinskog kompresora kod niskotlačnog sustava iznosi 1,89 MPa



Slika 2. Shema niskotlačnog sustava za rasplinjavanje biomase [1]

(*wet biomass* – vlažna biomasa, *dryer* – sušilo biomase (sušara), *dry biomass* – suha biomasa, *gasifier* – rasplinjač, *ash* – pepeo, *tar cracker* – spalionica katrana, *catalyst & ash* – katalizator i pepeo, *bag filter* – vrećasti filter, *wet scrubber* – vlažni skupljač štetnih čestica, *fuel gas compressor* – kompresor očišćenog plina, *air* – zrak, *gas turbine* – plinska turbina, *gasifier air expander* – zračni ekspander, *HRSG* – generator pare-utilizator, *steam cycle* – parni ciklus, *HP* – visokotlačni blok parne turbine, *IP* – srednjetačni blok parne turbine, *LP* – niskotlačni blok parne turbine, *condenser* – kondenzator, *BFW* – dodatna napojna voda, *to dryers* – prema sušilu biomase, *to stack* – prema dimnjaku)

Iz rasplinjača proizvedeni plin iz biomase izlazi s nečistoćama, kao što je npr. katran ili drveno ulje. Takav plin u sebi sadrži veliki udio ugljikovodika kojeg je moguće smanjiti u spalionici katrana. U toj se spalionici katran zadržava uz pomoć sorbentnih materijala kao što je dolomit. Temperatura koja je potrebna za spaljivanje katrana iznosi 920°C.

Djelomično pročišćeni plin iz spalionice katrana ulazi u hladnjak. Toplina takvog plina prenosi se na primarni zrak potreban za rasplinjavanje biomase. Nakon prezagrijavanja primarnog zraka, djelomično pročišćeni plin napušta hladnjak s temperaturom od 288°C.

Djelomično pročišćeni plin znači da su u njegovom sadržaju nalaze još čestice koje se učinkovito mogu izdvojiti putem vrećastog filtra. To se prvenstveno odnosi na kondenzirane alkalne spojeve. Iz vrećastog filtra plin se potpuno pročišćava u skupljaču vode, vodenih kapljica i tragova viših ugljikovodika. U skupljaču se također izdvajaju i značajne količine dušika (N₂). To se postiže pranjem plina s razrijeđenom sumpatnom kiselinom (H₂SO₄). Produkt pranja dušika se zatim iz skupljačkih tornjeva odvodi u naknadnu kemijsku obradu vodom.

Tablica 3. Kemijski sastav plina dobiven rasplinjavanjem biomase u visokotlačnom i niskotlačnom rasplinjaču

Komponente plina	Visokotlačni sustav	Niskotlačni sustav
	Volumni udio, %	Volumni udio, %
H ₂ (vodik)	8,91	18,87
CO (ugljik-monoksid)	6,71	23,66
CO ₂ (ugljik-dioksid)	13,45	8,29
H ₂ O (voda)	39,91	4,85
N ₂ (dušik)	24,18	44,22
CH ₄ (metan)	6,51	0,11
C ₂ H ₄ (etilen)	0,01	-
C ₆ H ₆ (benzol)	0,07	-
Katran ili drveno ulje	0,16	-
H ₂ S (sumpor-vodik)	0,005	-
NH ₃ (amonijak)	0,06	-
Donja ogrjevna moć plina, kJ/kg	4300	4800

Potpuno pročišćeni plin dovodi se kompresoru kako bi mu se tlak povećao na razinu potrebnu za uspješno izgaranje sa zrakom. Premda je kompresijski omjer relativno mali (14,9), tlak plina na ulazu u komoru izgaranja iznosi 1,89 MPa. Kompresija plina postiže se u više-stupanjskom centrifugalnom kompresoru sa međuhlađenjem.

3. OPIS ENERGETSKOG POSTROJENJA NA PLIN DOBIVENOG RASPLINJAVANJEM BIOMASE

Najveći stupanj iskoristivosti danas mogu ostvariti energetska postrojenja na bazi kombiniranog plinsko-parnog procesa (skraćeno *kombinirano postrojenje*). Naj-

zastupljeniji energent koji pokreće takvo postrojenje jest prirodni plin. Odgovarajućim tehničko-tehnološkim preinakama glavnih komponenti postrojenja moguće je koristiti i plin dobiven rasplinjavanjem biomase. Takav

plin je prema svojoj ogrjevnoj moći sedam puta slabiji od prirodnog plina. Prilagođene komponente kombiniranog postrojenja na plin dobiven rasplinjavanjem biomase su: plinske turbine, generator pare-utilizator i parne turbine.

Tablica 4. Pogonski parametri visokotlačnog i niskotlačnog energetskog sustava BIGCC

	Visokotlačni sustav	Niskotlačni sustav
Potrebne količine za pogon rasplinjača		
Maseni protok biomase, kg/s	8,9	16,9
Maseni protok zraka, kg/s	9,2	29,7
Maseni protok pare, kg/s	2,5	0,0
Karakteristike proizvedenog plina		
Maseni protok plina, kg/s	23,0	43,8
Donja ogrjevna moć plina, kJ/kg	4,3	4,8
Pogonski parametri energetskog postrojenja		
Tip plinske turbine (<i>General Electric</i>)	GE LM-5000PC	GE MS-6101FA
Ekspanzijski omjer plinske turbine (ulazni tlak/izlazni tlak plinova izgaranja)	24,8	14,9
Temperatura plina na ulazu u plinsku turbinu, °C	1154	1288
Pogonski parametri parnog ciklusa:		
Tlak svježe pare, MPa	5,3	10
Temperatura svježe pare, °C	395	538
Izlazne snage plinsko-parnog postrojenja		
Izlazna električna snaga plinske turbine, MW	50,3	72,9
Izlazna električna snaga parne turbine, MW	8,95	47,6
Potrebna snaga za pogon postrojenje, MW	3,79	15,1
Ukupna izlazna električna snaga postrojenja, MW	55,5	105,4
Ukupna učinkovitost plinsko-parnog postrojenja, % (na bazi gornje ogrjevne moći goriva)	36,7	37,9

Napomena: kod niskotlačnog sustava BIGCC u parnom se ciklusu para ponovno zagrijava na početnu temperaturu svježe pare od 538°C

a) plinske turbine

Plinske turbine prilagođene za rad s tako niskokaloričnim plinom trebaju imati sposobnost ekspaniranja velike količine plinova izgaranja. Ako se radi o visokotlačnom sustavu za rasplinjavanje biomase onda plinske turbine trebaju imati i sposobnost održavanja balansa snage s kompresorom kada se iz kompresora oduzima zrak koji se odvodi u rasplinjač. Ukoliko se radi pak o niskotlačnom sustavu za rasplinjavanje biomase, onda plinska turbina treba biti prilagođena za rad s mješavinom komprimiranog zraka i prethodno komprimiranim plinom.

b) generator pare-utilizator

Generator pare-utilizator sastoji se od niza određenih cjevovoda kao što su zagrijač vode, ekonomajzer, isparivač te prezagrijač pare s popratnim niskotlačnim i visokotlačnim parnim bubnjevima. Ti cjevovodi zagrijani su strujama plinova izgaranja nastalih ekspanzijom u plinskoj turbini određenog tlaka i temperature. Njihovom toplinom se voda koja cirkulira u cjevovodima generatora pare-utilizatora pretvara u paru određenog tlaka i temperature. Ovako opisani generator pare-utilizator predviđen je za visokotlačni sustav za rasplinjavanje biomase.

Kod niskotlačnog sustava za rasplinjavanje biomase generator pare-utilizator je isti kao i kod visokotlačnog sustava osim što pored niza spomenutih elemenata ima i mogućnost ponovnog zagrijavanja pare.

Kod oba sustava se u generatorima pare-utilizatorima napojna voda prethodno demineralizira, a zatim u otplinjaču rješava štetnih plinova (kisik, ugljik-dioksid). Izlazna temperatura plinova izgaranja iznosi 140°C, pri čemu je onemogućeno pojavljivanje niskotemperaturne korozije.

c) parne turbine

Parni ciklus je također prilagođen pogonskim parametrima plinskih turbina. U slučaju visokotlačnog sustava za rasplinjavanje biomase odabir je plinske turbine s većim ekspanzijski omjerom (24,8) pa su pogonski parametri parne turbine, tlak/temperatura, niži (5,3 MPa/394°C). Ekspanzirana para iz visokotlačnog bloka turbine miješa se s dodatnom parom iz niskotlačnog parnog bubnja. Takva mješavina pare ulazi u niskotlačni blok turbine i ekspankira do tlaka kondenzacije (6,9 kPa).

Kod niskotlačnog sustava za rasplinjavanje biomase plinska turbina je manjeg tlačnog ekspanzijskog omjera (14,9) dok su pogonski parametri parne turbine, tlak/temperatura, viši (10 MPa/538°C). U tom se slučaju jedan dio visokotlačne pare oduzima iz visokotlačnog bloka parne turbine i odvodi u rasplinjač biomase. Drugi se dio pare miješa s parom iz niskotlačnog parnog bubnja te nakon toga ulazi u srednjotlačni blok parne turbine. Iz tog bloka para izlazi s manjim tlakom te u konačnici ekspankira u niskotlačnom bloku parne turbine do tlaka kondenzacije (6,9 kPa).

4. EKONOMSKA ANALIZA SUSTAVA *BIGCC*

BIGCC ili integrirani sustav rasplinjavanja biomase i plinske turbine u zajedničkom procesu s parnim ciklusom i parnom turbinom za proizvodnju električne energije ekonomski još uvijek ne može konkurirati kombiniranom plinsko-parnom postrojenju na prirodni plin. Razlog tomu su dodatne investicije za sami sustav rasplinjavanja, čišćenje i hlađenje dobivenog plina. Različiti su troškovi investicija između tipova sustava *BIGCC*-a (tablica 5.).

Tablica 5. Sumirani troškovi i cijene koštanja visokotlačnog i niskotlačnog energetskeg sustava *BIGCC*

	Visokotlačni sustav	Niskotlačni sustav
Izlazna električna snaga postrojenja, MW	56	105
Učinkovitost postrojenja, % (na bazi gornje ogrjevne moći goriva)	36,01	37,9
Troškovi kapitala, USD/kW	1588	1350
Troškovi pogona i goriva, 1000*USD/god	13 433	23 442
Cijena električne energije, centi/kWh (prema tekućem dolaru)	7,91	7,03
Cijena električne energije, centi/kWh (prema konstantnom dolaru)	6,1	5,43

Napomena: energetske postrojenje na plin dobiven rasplinjavanjem ugljena postiže približnu jednaku cijenu električne energije kao i energetske sustav *BIGCC*; energetske postrojenje na prirodni plin postiže do dva puta nižu cijenu električne energije od energetskeg sustava *BIGCC*

Troškovi tipični za sustav *BIGCC* su:

1. troškovi opreme za pripremu vlažne biomase i njegovog sušenja obuhvaćaju – troškove iskrcaavanja i spremanja biomase u različita skladišta, upravljanje biomasom, silos za svakodnevnu uporabu, odmjeravanje i odvajanje različitih vrsti biomase (npr. sječki, piljevine, komadnih otpadaka) u posebnom spremištu, crpni podizač/konvejer biomase, magnetski separator za odvajanje metalnih čestica iz biomase, rotirajuće sušilo biomase u obliku bubnja, vrećasti filter i vijčani dozator biomase;
2. troškove opreme za rasplinjavanje biomase obuhvaćaju – rasplinjač, sustav za izgaranje drvenog ugljena (uključujući i ciklonalni sustav izgaranja), spremnik inertnog materijala u gibajućem stanju, ciklon pepela, lijevak za stvaranje inertnog materijala, gorionik te upuhivač zraka i parni ventil;
3. troškovi opreme sustava za čišćenje plina – spalionica katrana ili drvnog ulja, visokotemperaturni hladnjak plina, visokotemperaturni uređaj za odstranjivanje letećih čestica;
4. troškovi za komprimiranje plina kod niskotlačnog sustava za rasplinjavanje biomase obuhvaćaju troškove za kompresor koji se koristi za podizanje ili reguliranje tlaka zraka koji se potom upuhuje u rasplinjač radi kvalitetnije uspostave dodira između biomase i inertnog materijala (potrebo je naći optimum između fiksnih i varijabilnih troškova kompresora te njegovu potrebnu snagu za komprimiranje zraka);
5. troškovi za sustav izgaranja drvenog ugljena kod visokotlačnog sustava za rasplinjavanje biomase obuhvaćaju – troškove za doziranje drvenog ugljena, za upuhivanje primarnog zraka, za isparivanje i odstranjivanje letećih čestica (troškovi ovise o dimenzijama sustava za izgaranje drvenog ugljena i toplini koju taj sustav treba proizvesti);
6. troškovi za kombinirano plinsko-parno postrojenje obuhvaćaju – troškove za kompresor, plinsku turbinu, generator pare-utilizator te parnu turbinu, kondenzator, napojne crpke i ostalu opremu (troškovi bilo za plinsku bilo za parnu turbinu ovisi o tome da li je sustav za rasplinjavanje visokotlačni ili niskotlačni po kojem se biraju modeli plinske, tj. parne turbine i popratna oprema);
7. troškovi pogona i održavanja sustava *BIGCC* uključujući i troškove za gorivo (biomasu), vodu, kemikalije i dr.

5. PRIMJERI SUSTAVA *BIGCC* U SVIJETU

Demonstracijski projekti energetske sustava na bazi plina dobivenog rasplinjavanjem biomase otvoreni su od različitih međunarodnih i državnih institucija (SAD, Finska, Brazil, Švedska, konzultantske kuće, Svjetske Banke) iz razloga mogućnosti rješavanja što većeg biootpada iz poljoprivredne, šumske i drvne industrije

koji se ne može iskoristiti za ništa drugo osim za proizvodnju električne energije. Premda nekonkurentna naspram konvencionalnih energetske postrojenja, *BIGCC* postrojenja su jeftinija ako dnevno troše što više bio-otpada i ako su što većih izlaznih snaga. To je moguće ostvariti ako u okolini od najviše 100 km radijusa ima dovoljno biootpada za zadovoljavanje ekonomskih, ekoloških i energetske uvjeta za učinkoviti rad *BIGCC* energetske postrojenja. Sve se više razvija i plantažni uzgoj biomase (brzorastuće biljke!), no to zahtijeva goleme površine koje trebaju biti ili slobodne ili iznajmljene od vlasnika zemlje.

Primjer 1. IGT/Tampella

Američki institut za razvoj plinske tehnologije *IGT (Institute for Gas Technology)* razvio je visokotlačni sustav za rasplinjavanje biomase pod registriranim imenom *RENUGAS®*. Takav sustav već je opisan u poglavlju 2.1 ovog rada, a svoju je razvojnu i demonstracijsku primjenu našao u energetske sustavu jedne tvornice sladora na Havajima u SAD-u (*Sugar Company's Paia*) te u jednom pilot-postrojenju u Tamperi u Finskoj čiji je vlasnik *Tampella Power Corporation*.

Na Havajima je u prvoj fazi sustav funkcionirao s rasplinjačem biomase bez pročistača toplih plinova oko 100 sati za dnevnim doziranjem biomase od 50 tona pod tlakom od 1 MPa. U Tamperi u Finskoj pilot-postrojenje je već nekoliko godina u funkciji s dnevnim doziranjem biomase od preko 80 tona.

Primjer 2. Ahlstrom (Foster Wheeler)

Finski proizvođač generatora pare *Ahlstrom* razvio je visokotlačni sustav za rasplinjavanje biomase u cirkulirajućem fluidiziranom sloju. Prvi takav sustav primijenjen je na demonstracijskoj kombi-kogeneracijskoj elektrani *Värnamo* u Švedskoj. Sustav je opremljen keramičkim filtrom za čišćenje plina, a u rasplinjač dnevno ulazi 90 tona biomase. Pročišćeni plin ulazi u plinski ciklus u kojem se nalazi plinska turbina (*European Gas Turbine Typhoon*) izlazne snage od 4 MW a u parnom ciklusu parna turbina izlazne snage 2 MW. Jedan dio pare oduzima se iz parne turbine za potrebe područnog grijanja okolnih naselja. Toplinska snaga koja se dobiva iz tople vode za grijanje iznosi 9 MW. Rasplinjač je pušten u pogon 1993. godine, a energetske postrojenje s kombiniranim plinsko-parnim procesom 1995. godine.

Primjer 3. Thermiska processer TPS

Niskotlačni sustav za rasplinjavanje biomase s TPS rasplinjačem kakav je opisan u poglavlju 2.3. komercijalno je izgrađen u talijanskoj tvornici cementa *Ansaldo Aeroimpianti SpA* s dvoslojnim fluidiziranim slojem još 1992. godine. U rasplinjač se najvećim dijelom dovodi peletizirani otpad različitog podrijetla, uključujući drveni ostatak iz šuma, pilana te poljoprivredni ostatak. Toplinska snaga od 30 MW razvijena u rasplinjaču koristi se za proizvodnju plina koji je potreban za proizvodnju pare u generatoru pare. Ta se para zatim koristi za

proizvodnju električne energije te za potrebe sušenja vapna.

Sustav s TPS rasplinjačem ugrađen je i na demonstracijskom postrojenju s kombiniranim plinsko-parnim ciklusom za proizvodnju električne energije u Brazilu. Budući da je to zemlja koja obiluje velikim šumskim površinama tu je moguće računati na konkurentno korištenje biomase naspram korištenja fosilnih goriva. (Brazil inače ne raspolaže izvorima fosilnih goriva, pa npr. za potrebe transporta sve više iz šećerne trske proizvodi alkohol etanol.) TPS rasplinjač funkcionira na bazi eukaliptusa koji se dobiva s plantažnih nasada za potrebe energetskog postrojenja ukupne izlazne električne snage od 30 MW. Nositelji projekta su Svjetska Banka (*Global Environmental Facility*), Shell International Petroleum Co, te razne brazilske državne i znanstveno-stručne institucije. Koordinator projekta je brazilsko elektroprivredno poduzeće *Eletrobas*.

Demonstracijska postrojenja s TPS rasplinjačem nalaze se još u Yorkshiru, Ujedinjenom Kraljevstvu izlazne snage od 5 MW.

Primjer 4. Battelle Memorial Laboratory

Američki laboratorij u Ohio-ju *Battelle Memorial Laboratory* je kroz dugogodišnja istraživanja razvio niskotlačni sustav za rasplinjavanje biomase s neizravnim zagrijavanjem fluidiziranog sloja. Prvi rasplinjač takvog sustava u funkciji je još od 1980. godine. Dnevna potrošnja biomase iznosi oko 10 tona. Uloga rasplinjača jest da proizvodi srednje-kalorični plin bez dodatnog upuhivanja zraka ili kisika tijekom rasplinjavanja biomase. Sustav rasplinjavanja biomase sastoji iz dva odvojena reaktora. U prvom se reaktoru biomasa pretvara jednim dijelom u plin, a drugim dijelom u drveni ugljen koji u drugom reaktoru potpuno izgara. Toplina razvijena izgaranjem drvenog ugljena koristi se za zagrijavanje pijeska (inertnog materijala u rasplinjaču) za učinkovitiji dodir s biomasom u fluidiziranom sloju.

Proces rasplinjavanja biomase s neizravnim zagrijavanjem fluidiziranog sloja u rasplinjaču demonstracijski se primjenjuje u drvnim ostatkom loženoj elektrani u Vermontu u Americi (*McNeil Power Generating Station*). Nositelj tog projekta je agencija za energetiku američke vlade USDOE (*United States Department of Energy*). Izlazna snaga postojeće elektrane s parnim ciklusom bez procesa za rasplinjavanje iznosi 50 MW. Kasne 1997. godine toj je elektrani dodan integrirani sustav za rasplinjavanje drvnih sječki u količini od 200 tona po danu s plinskim ciklusom izlazne snage plinske turbine od 15 MW.

6. MOGUĆNOST PRIMJENE RASPLINJENE BIOMASE U ENERGETSKOM SUSTAVU HRVATSKE

Biomasa u ukupnoj opskrbi energijom u Hrvatskoj je zastupljena s oko 4%. To se najvećim dijelom odnosi na tradicionalno korištenje ogrjevnog drva u ruralnim, brdskim i planinskim dijelovima Hrvatske te na opskrbu toplinskom energijom u drvno-prerađivačkim tvrtka-

ma putem vlastitih kotlovnica (jedino DIK Đurđenovac ima vlastitu opskrbu, i toplinske, i električne energije putem spojnog procesa). Godišnja potrošnja biomase u Hrvatskoj iznosi oko 16 PJ, dok su potencijali korištenja procijenjeni na 40 PJ. U te potencijale uključuje se biootpad iz šuma, drvne industrije, poljoprivredni biootpad (ostaci žitarica, uljarica i leguminoza, koštice iz prerade voća) te bioplin iz stočarstva.

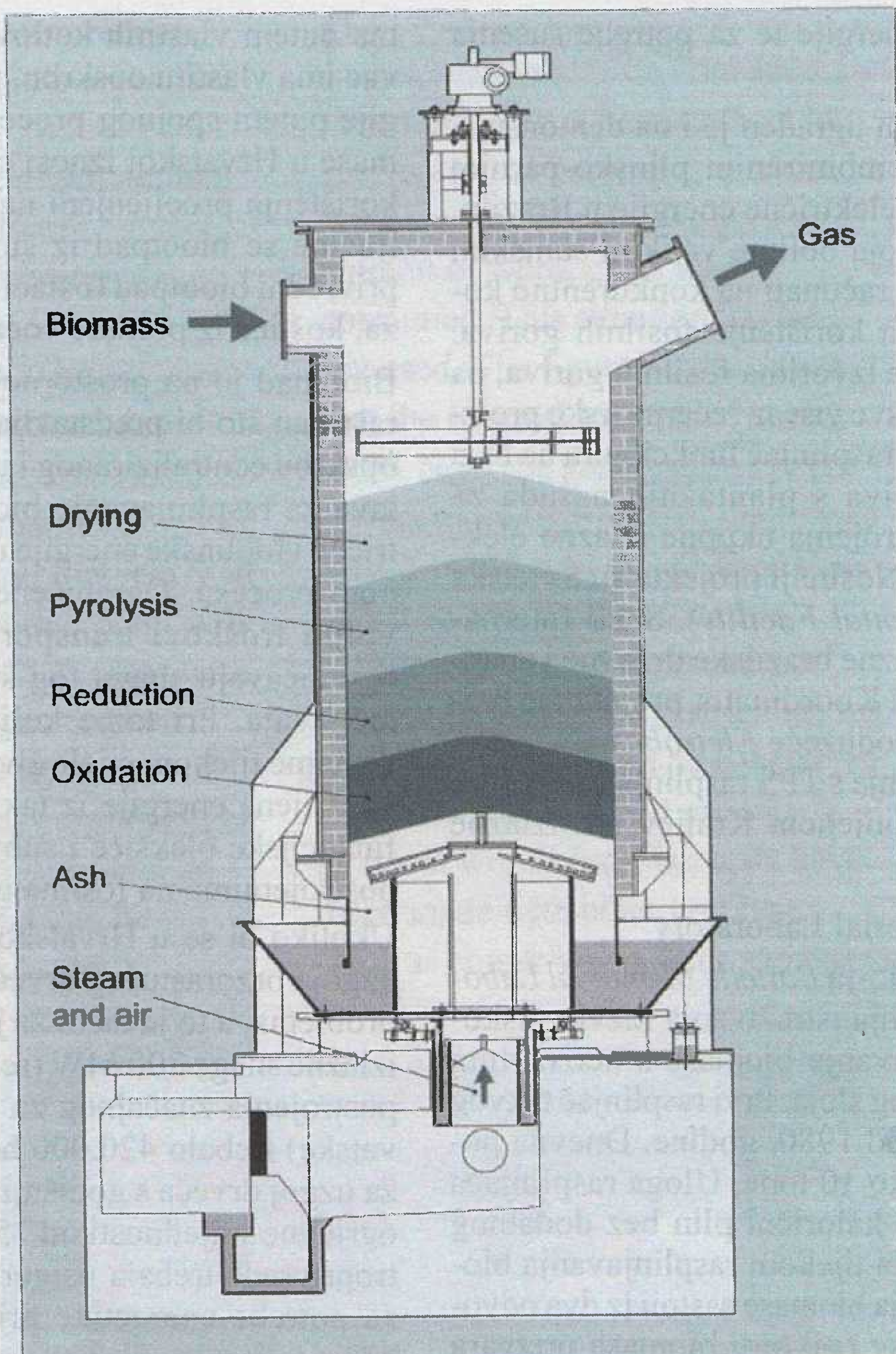
Biootpad je na prostornoj površini Hrvatske prilično raštrkan što bi predstavljalo problem za svakodnevnu opskrbu centraliziranog i integriranog energetskog sustava za rasplinjavanje biomase i suproizvodnju električne i toplinske energije u kombiniranom plinsko-parnom procesu. Ograničene količine biootpada i nepovoljni troškovi transporta do energetskog sustava ograničavaju snagu tog sustava na nekoliko desetina megavata. Pri tome količine biootpada trebaju biti dostatne tijekom cijele životne dobi energetskog sustava. Cijena energije iz takvih postrojenja ni uz znatne financijske olakšice i subvencije ne mogu konkurirati postrojenjima na fosilna goriva.

Ukoliko bi se u Hrvatskoj išlo na princip plantažnog uzgoja brzorastućeg drveća također bi se naišlo na niz problema, a to je da bi za jedno energetsko postrojenje izlazne snage 300 MW (red veličine snage energetskog postrojenja značajnog za elektroenergetski sustav Hrvatske) trebalo 420.000 hektara (4.200 km²) zemljišta za uzgoj drveća s godišnjim prirastom od 3 t/ha i donje ogrjevne vrijednosti od 15 GJ/t. U tom bi slučaju elektroprivreda trebala osigurati toliku obradivu površinu za potrebe energetike pri čemu bi joj trebala velika pomoć čitavog gospodarstva, posebice sektora poljoprivrede, šumarstva i transporta.

Zbog raštrkanosti biootpada, u Hrvatskoj bi bilo poželjno projektirati energetske sustave manjih izlaznih snaga za potrebe opskrbljivanja energijom industrije i okolna naselja, kao što je to učinjeno u malom danskom gradiću Harboøre. Projekt datira još od 1993. godine kada je na temelju pilotrasplinjača na slamu iz Kyndby-a u pogon pušten rasplinjač na drvenu sječku prikupljenu u okolnoj šumi. Drvena sječka je obično veće vlažnosti (i do 50%) od ostalih tipova drvnih ostataka. Ona se u rasplinjač dozira s gornje strane dok se s donje strane upuhuje zrak i para (slika 3.). U rasplinjaču se odvija nekoliko izravnih procesa, kao što je proces sušenja biomase, proces pirolize², redukcije i oksidacije. Na dnu se rasplinjača sakuplja pepeo.

Najveća prednost rasplinjača jest njegova jednostavnost, sposobnost rasplinjavanja relativno vlažnog goriva, visoka pretvorba drvenog ugljena i unutarnja izmjena topline, relativno niska izlazna temperatura plina te visoka učinkovitost rasplinjavanja biomase.

² Piroliza – proces pri kojem se drvo zagrijava do visokih temperatura uz ograničen pristup zraka pri čemu nastaje drveni ugljen (25%), drveni plin (15%), pirolignozna kiselina (45%) te katran ili drveno ulje (15%).



Slika 3. Sustav za rasplinjavanje biomase kao dio energetskeg sustava u danskom gradiću Harboøre [3]
biomass – biomasa (drvena sječka), *gas* – plin, *drying* – proces sušenja biomase, *pyrolysis* – proces pirolize biomase, *reduction* – proces redukcije, *oxidation* – proces oksidacije, *ash* – pepeo, *steam and air* – para i zrak)

Glavni nedostatak je relativno velika proizvodnja katarana ili drvnog ulja, ukoliko se dobiveni plin pored proizvodnje toplinske energije koristi i za proizvodnju električne energije putem plinskih turbina ili plinskih motora. Pri tome plin treba biti brižljivo pročišćen.

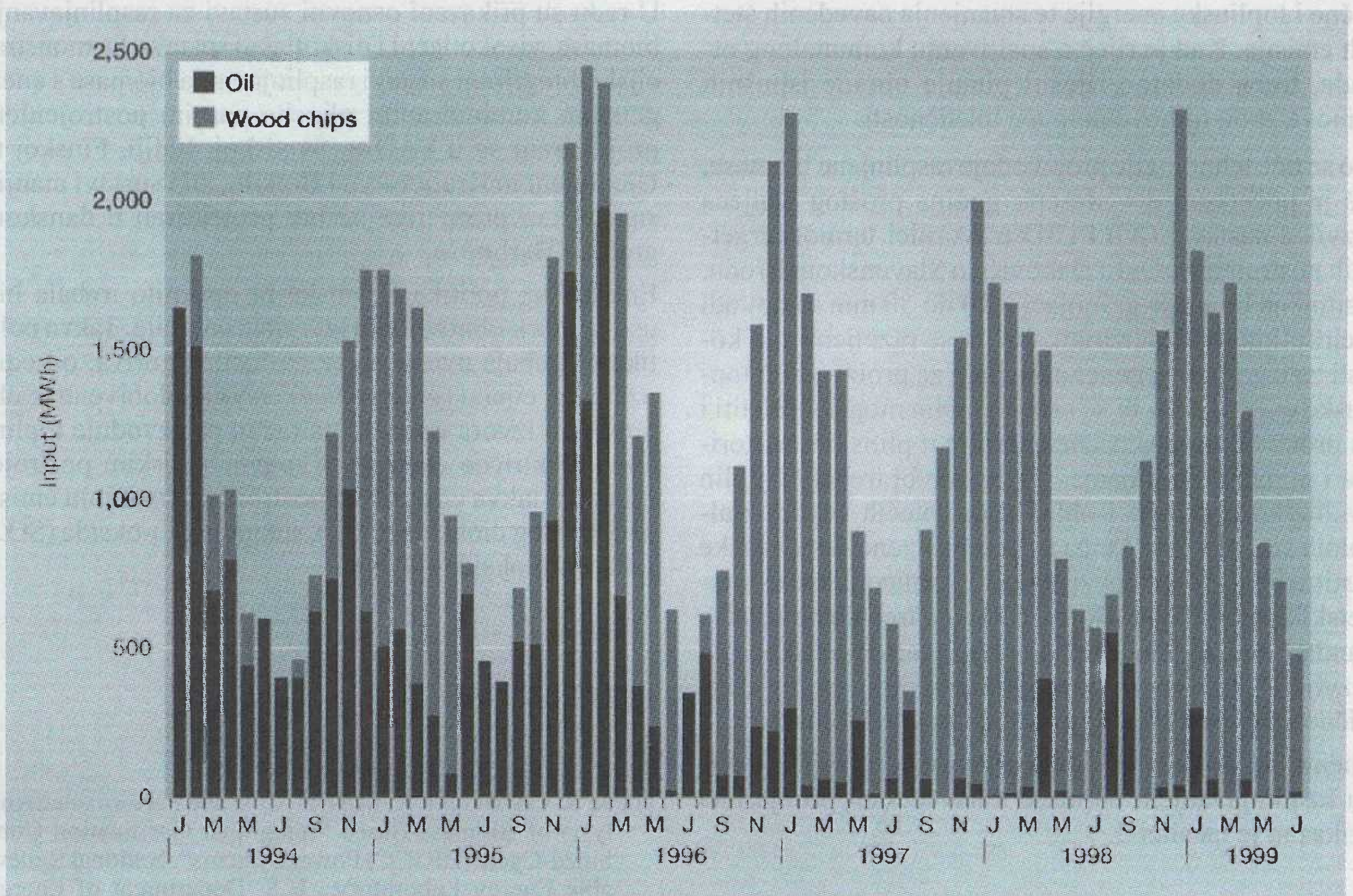
Za potrebe grijanja plin izgara u gorioniku i pri tome proizvodi toplu vodu izlazne toplinske snage od 4 MW. Ta snaga može varirati od 10 do 100% od njegove ukupne snage, ovisno o potrebama za toplinskom energijom. Ovo postrojenje s rasplinjačem opskrbljuje oko 560 kuća i javnih zgrada u spomenutom danskom gradiću.

Početkom 1997. godine danska energetska organizacija je pod programom *The Danish Energy Research Programme* razvila projekt kako postojeće energetske postrojenje obogatiti sustavom za čišćenje plina te sustavom za proizvodnju električne energije iz plinskih motora. Rezultat tog programa jest:

1. kompleksni sustav koji uključuje pročišćivač plina, toplinski izmjenjivač i elektrostatičke filtre;

2. rasplinjač je u potpunosti automatiziran i održava svjetski rekord sati rada u godini (8.000 sati godišnje u potpunosti automatiziran uz korištenje drvnog ostatka isključivo iz okolnih šuma);
3. za proizvodnju električne energije koriste se dva plinska motora, svaki izlazne snage po 648 kW;
4. izlazna toplinska snaga iz motora je 2,1 MW, a iz generatora pare loženog plinom 2 MW.

Alternativni biotpad za ovakvo energetske postrojenje može biti kora, komadno drvo te drvni ostatak iz drvno-prerađivačkih tvrtki. Generator pare na plin ima i svoju toplinsku rezervu, a to je dodatni generator pare na lož-ulje. Na slici 4. prikazan je odnos potrošnje drvene sječke i lož-ulja u razdoblju od 1994. do 1999. godine. Ukupne troškovi investicija za ovakvo postrojenje iznose oko 40 milijuna kuna s vremenskim povratom od oko osam godina. U ekološkom pogledu, ovakvo energetske postrojenje je CO₂ neutralno. U odnosu na postrojenje na fosilna goriva s istom izlaznom snagom, korištenjem postrojenja na biomasu godišnje se uštedi i do 4000 tona ugljičnog-dioksida (CO₂).

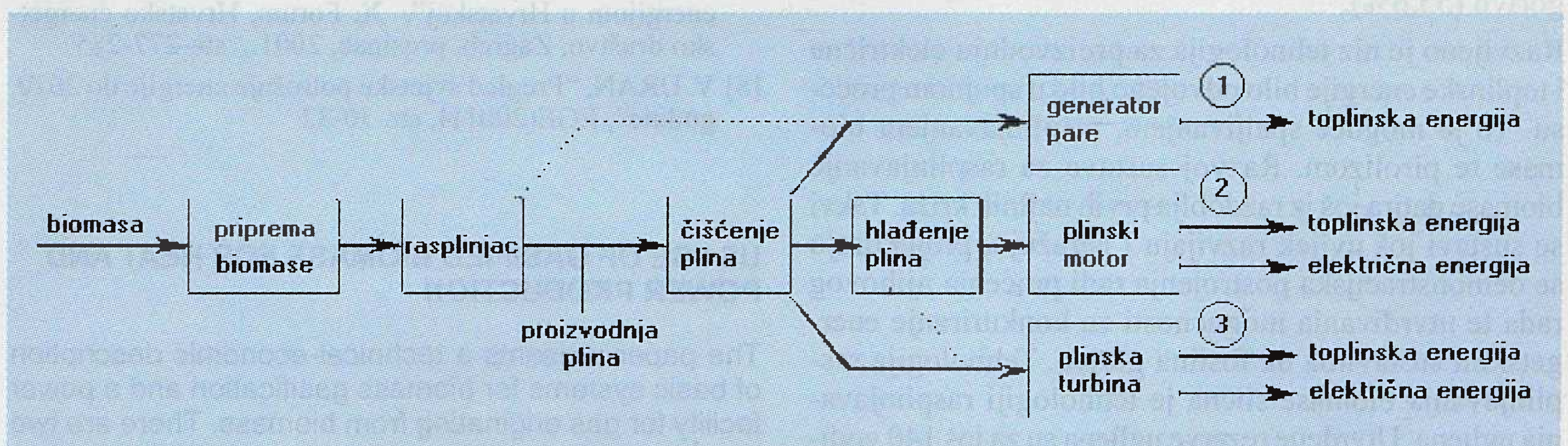


Slika 4. Odnos potrošnje drvene sječke (wood chips) i lož-ulja (oil) u razdoblju od 1994. do 1999. godine za energetski sustav u danskom gradiću Harboøre -u [3]

Opisano energetska postrojenje koje je smješteno u malom gradiću u Danskoj moglo bi poslužiti kao model za projektiranje sličnih postrojenja u Hrvatskoj. Premda je u Hrvatskoj izrađeno niz studija izvodljivosti po kojima bi se biomasa mogla učinkovito koristiti na različitim lokacijama za opskrbu toplinskom i električnom energijom, još nijedan glavni projekt nije ostvaren. Razlog su različiti interesi uskih krugova ljudi, nezainteresiranost i nedovoljna saznanja o prednosti-

ma (ali i nedostacima) iskorištavanja biomase kao izvora energije. Zatim se kroz državne institucije ne provodi ohrabrujući stimulans za olakšani put k projektiranju energetskih postrojenja na biomasu.

U Hrvatskoj bi od primarnog interesa trebalo biti rješavanje biootpada i komunalnog otpada kroz procese spaljivanja, rasplinjavanja i pirolize radi rasterećenja deponija otpadnog materijala, proizvodnje dodatne elek-



Slika 5. Shematski prikaz proizvodnje plina iz biomase u različitim sustavima

(1) – primjer sustava ECOFLUID “Đuro Đaković” u Slavonskom Brodu

(2) – primjer energetskog postrojenja u danskom gradiću Harboøre

(3) – primjeri sustava RENUGAS®, Ahlstrom, TPS, Battle

trične i toplinske energije te smanjenja navedenih štetnih emisija. Kad je riječ o spaljivanju komunalnog otpada, treba dodatno riješiti pitanje obrade ispušnih plinova zbog njihove moguće toksičnosti.

Što se tiče tehnologije proizvodnje rasplinjene biomase, još je početkom devedesetih godina prošlog stoljeća razvijen sustav ECOFLUID u tvornici termoenergetskih postrojenja »Đuro Đaković« u Slavonskom Brodu. Usitnjena biomasa granulacije 20 do 50 mm se dovodi u cirkulirajući fluidizirani sloj, te se razvijeni plin koristi za izgaranje u generatoru pare za proizvodnju toplinske energije. Da bi se razvijeni plin mogao koristiti i za proizvodnju električne energije u plinskim motorima i plinskim turbinama, prethodno bi trebalo taj plin kvalitetno pročistiti i ohladiti od letećih čestica i alkalnih spojeva. Zbog toga bi se znanstveno-istraživačke institucije u Hrvatskoj zajedno s tvornicom termoenergetskih postrojenja »Đuro Đaković« trebale povezati s pandan institucijama i tvrtkama izvan Hrvatske koje razvijaju i demonstriraju tehnologiju proizvodnje električne i toplinske energije iz rasplinjene biomase.

Shematski prikaz različitih sustava za proizvodnju plina rasplinjavanjem biomase s navedenim primjerima prikazan je na slici 5.

7. ZAKLJUČAK

Procijenjeno je da biomasa u različitim oblicima pokriva oko 14% svjetske potrošnje primarne energije, a u zemljama u razvoju i do 35%. U Europi biomasa je kao energent najviše zastupljena u Danskoj (7,9% ili 1,6 milijuna ekvivalentnog tekućeg goriva), Švedskoj (16,7% ili 8 milijuna ekvivalentnog tekućeg goriva), Austriji (11,3% ili 3 milijuna ekvivalentnog tekućeg goriva) i Finskoj (19,4% ili 7 milijuna ekvivalentnog tekućeg goriva). U SAD-u je instalirano 8,5 GW električne snage povezane na elektroenergetski sustav iz biomase u čijoj količini je najviše zastupljeno drvo kao gorivo (55,6%).

Razvijeno je niz tehnologija za proizvodnju električne i toplinske energije bilo odvojeno bilo u spojnom procesu. To je moguće spaljivanjem, rasplinjavanjem biomase te pirolizom. Razvoj sustava za rasplinjavanje biomase datira još iz razdoblja prvih naftnih kriza. Takvi se sustavi još uvijek razvijaju i istražuju, projektiraju se demonstracijska postrojenja radi praćenja njihovog rada te utvrđivanja mogućnosti za konkuriranje energetskim sustavima na fosilna goriva. Tehnologija rasplinjavanja biomase slična je tehnologiji rasplinjavanja ugljena. Utvrđene rezerve ugljena su za još 140 godina, a biomase mnogostruko više, ukoliko većina zemalja usvoji strože ekološke norme. Procijenjene rezerve plina su još za 60 godina, a i mnogim je zemljama u interesu biti što manje ovisnima o uvoznim fosilnim gorivima.

U radu su prikazani osnovni sustavi za rasplinjavanje biomase, visokotlačni i niskotlačni sustavi. Demonstracijski integrirani sustavi rasplinjavanja biomase s energetskim kombiniranim plinsko-parnim postrojenjem projektirani su u SAD-u, Švedskoj, Italiji, Finskoj te Ujedinjenom Kraljevstvu i Brazilu, ali i sustavi manjih snaga, kao primjerice sustav projektiran u danskom gradiću Harboøre.

Energetska politika Hrvatske bi općenito trebala biti usmjerena k obnovljivim izvorima energije. Takva politika bi trebala uvesti porez na fosilna goriva, odrediti «zelenu» cijenu (*green price*) energije dobivene iz obnovljivih izvora energije na račun proizvodnje toplinske i električne energije u kogeneracijskim postrojenjima jer takva energetska postrojenja smanjuju emisije ugljičnog dioksida (CO₂), sumpor (IV)-oksida (SO₂) i dušičnih oksida (NO_x).

LITERATURA

- [1] K. R. CRAIG, M. K. MANN, Cost and Performance Analysis of Biomass-Based "Integrated Gasification Combined-Cycle (BIGCC) Power Systems", National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, October 1996.
- [2] R. L. BAIN, R. P. OVEREND, K. R. CRAIG, "Biomass-fired Power Generation", Conference Center, Snowbird, UT, April 29 – May 3, 1996, pp 1-14
- [3] Wood Chip Gasifier Supplies Heat to Small Community, CADDET Renewable Energy, IEA/OECD, March 2001, Technical Brochure No. 116
- [4] L. SJUNNESSON, "IGCC Biomass Demonstration Plant in Värnamo, Sweden", World Energy Council, 16th Congress, Tokyo, 1995.
- [5] D. FERETIĆ et. al., "Elektrane i okoliš", Sveučilište u Zagrebu, 2000., str. 154-165
- [6] J. DOMAC et. al., "BIOEN – program korištenja biomase i otpada", Energetski institut «Hrvoje Požar», Zagreb, 1998.
- [7] V. POTOČNIK, "Liberalizacija tržišta i sigurnost opskrbe energijom u Hrvatskoj", X. Forum, Hrvatsko energetsko društvo, Zagreb, prosinac, 2001., str. 277-285
- [8] V. URAN, "Pregled svjetske potrošnje energije do 2020. godine", EGE(2001)4, str. 30-32

USAGE OF GASIFIED BIOMASS FOR HEAT AND POWER PRODUCTION

The paper presents a technical-economic description of basic systems for biomass gasification and a power facility for gas originating from biomass. There are two basic systems for biomass gasification: high pressure and low-pressure systems that are quantitatively compared and shown in enclosed tables. Examples of demonstration plants for biomass gasification in the world are also given as well as possibilities of its usage in Croatia.

DIE NUTZUNG VERGASTER ORGANISCHER RESTSTOFFE FÜR DIE ERZEUGUNG VON STROM UND WÄRME

Entwurfsbeispiele dementsprechender Musteranlagen, sowie die Anwendungsmöglichkeiten solcher Anlagen in Kroatien.

Vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkt werden Grundlagen der Vergasungssysteme organischer Reststoffe, sowie die mit dem aus entsprechenden Anlagen erzeugten Gas betriebenen Energieanlagen, beschrieben. Es bestehen zwei Vergasungssysteme organischer Reststoffe: das Hoch- und Niederdruckverfahren. Deren quantitative Vergleiche sind in den beigelegten Tafeln dargestellt. Ebenfalls angeführt sind

Naslov pisca:

Vedran Uran, dipl. ing.
CASE d.o.o.
Šetalište XIII divizije 28
51000 Rijeka, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
2002 – 10 – 11.