

# Rasplinjavanje biomase

---

**Cindrić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:384618>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-05**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Stručni studij Strojarsva*

Ivan Cindrić

**RASPLINJAVANJE BIOMASE**  
**ZAVRŠNI RAD**

Karlovac, 2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Stručni studij Strojарstva*

Ivan Cindrić

**RASPLINJAVANJE BIOMASE**  
**BIOMASS GASIFICATION**  
ZAVRŠNI RAD

Dr.sc. Tihomir Mihalić

Karlovac, 2016.



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

**Stručni studij: Strojарstva**

Usmjerenje: **Strojarske konstrukcije**

Karlovac, 20.11.2015.

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Ivan Cindrić**

Matični broj: 0110613108

Naslov: **RASPLINJAVANJE BIOMASE**

Opis zadatka:

Teorijske osnove o biomasi, njezine značajke, izvori, obnovljivost. Struktura, tipovi i termička svojstva biomase. Nastajanje i odstranjivanje katrana. Kemijske osnove rasplinjavanja biomase. Konstrukcija i tipovi rasplinjači biomase.

Student u radu treba objasniti.

- Nastajanje i primjenu biomase u svijetu
- Principe na kojima počiva rasplinjavanje biomase
- Vrste konstrukcija rasplinjača za biomasu

*Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.*

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

20.11.2015.

23.02.2016.

01.03.2016.

Mentor:

Predsjednik ispitnog povjerenstva:

Dr.sc. Tihomir Mihalić

Dipl.ing. Marijan Brozović

## **IZJAVA**

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

Zahvaljujem se svom mentoru za podršku i svu pruženu pomoć tokom izrade ovog završnog rada. Također se zahvaljujem roditeljima na pruženoj financijskoj pomoći tokom studija, sestri i djevojci koji su mi bili velika podrška i potpora, te im se ovim putem zahvaljujem na razumijevanju, toleranciji i strpljenju.

U Karlovcu, 20.02. 2016.

Ivan Cindrić

## SAŽETAK

Biomasa je obnovljivi izvor energije koji ima veliki potencijal. Tehnološki procesi pretvorbe kemijske energije pohranjene u biomasi u druge oblike energije prikladne za korištenje omogućavaju zamjenu fosilnih goriva puno prihvatljivijim izvorom energije te smanjuju ovisnost korisnika o fosilnim gorivima. Glavni element u procesu rasplinjavanja biomase su rasplinjači unutar reaktora koji omogućavaju stvaranje plina. Ovaj završni rad istražuje glavna svojstva biomase, karakteristike procesa rasplinjavanja, prednosti i nedostatke pojedinih vrsta rasplinjača te načina na koje je moguće dobiti energiju iz biomase.

Ključne riječi: rasplinjavanje biomase, rasplinjači, tehnološki proces rasplinjavanja

## SUMMARY

Biomass is a renewable energy source that has great potential. Technological processes of conversion of chemical energy stored in biomass to other energy forms suitable for use in order to replace fossil fuels is much more acceptable source of energy and reduces dependence on fossil fuels. The main element in the process of gasification of biomass are carburettors inside reactors that enable creation of gases. This final paper examines the main features of biomass gasification characteristics, advantages and disadvantages of particular types of gasifiers and ways to produce energy from biomass.

Key words: gasification of biomass, gasifiers, technological process of gasification

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA .....	II
POPIS OZNAKA.....	III
1. UVOD .....	1
2. OSNOVNA OBILJEŽJA BIOMASE .....	2
2.1. Izvori i primjena biomase .....	2
2.2. Struktura i sastav.....	5
2.3. Fizikalna i kemijska svojstva .....	7
3. RASPLINJAVANJE BIOMASE .....	15
3.1. Karakteristike rasplinjavanja .....	15
3.2. Procesi rasplinjavanja .....	22
3.3. Katran kao nusproizvod termičkog režima rasplinjavanja.....	32
3.4. Uklanjanje katrana .....	33
4. Tipovi rasplinjača.....	47
4.1. Istosmjerni rasplinjač .....	38
4.2. Protusmjerni rasplinjač .....	40
4.3. Unakrsni rasplinjač.....	41
4.4. Izvedbena podjela rasplinjača.....	42
5. ZAKLJUČAK .....	45
6. LITERATURA .....	46

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Kružni tok tvari pri izgaranju biomase .....	4
Slika 2. Briketi (lijevo) i peleti (desno) .....	5
Slika 3. Biodizel (lijevo) i katransko crno ulje (desno) .....	5
Slika 4. Udio biomase prema vrsti sirovine .....	6
Slika 5. Postrojenje za pripremu i rasplinjavanje biomase .....	16
Slika 6 . Nastanak različitih plinova tijekom rasplinjavanja biomase .....	18
Slika 7. Vrste tehnologija za rasplinjavanje .....	18
Slika 8. Osnovna shema postupka rasplinjavanja.....	21
Slika 9. Shema postrojenja za rasplinjavanje biomase .....	22
Slika 10 . Podjela rasplinjača .....	23
Slika 11. Shematski prikaz procesa izgaranja na nagnutoj rešetki .....	27
Slika 12. Nagnuta, vodom hladena, vibrirajuća rešetka za izgaranje biomase.....	28
Slika 13. Suvremeni kotao na biomasu s izgaranjem na nagnutoj rešetki .....	28
Slika 14. Rotirajuća konična rešetka s donjim dovodom goriva .....	29
Slika 15. Presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju: mjehurićasti (lijevo) i cirkulirajući (desno) .....	31
Slika 16. Količina nastalog katrana ovisno o temperaturi rasplinjavanja.....	34
Slika 17. Uklanjanje čestica katrana pomoću filtera .....	35
Slika 18. Shema uklanjanja katrana pomoću ubrizgane tekućine .....	36
Slika 19. Vrste reaktora ovisno o radnom kapacitetu .....	37
Slika 20. Karakteristike istosmjernog rasplinjača.....	38
Slika 21. Nastanak katrana u istosmjernom rasplinjaču.....	39
Slika 22.Karakteristike protusmjernog rasplinjača .....	40
Slika 23. Karakteristike unakrsnog izmjenjivača.....	41
Slika 24. Shema protustrujnog-uzlaznog (updraft) i istostrujnog – silaznog (downdraft) reaktora .....	42



**POPIS TABLICA**

Tablica 1 . Vrste goriva ovisno o sadržaju vode i ogrjevnoj vrijednosti .....	7
Tablica 2. Vrste goriva i energetska vrijednost .....	8
Tablica 3. Osnovne karakteristike različitih vrsta drva .....	11
Tablica 4 . Emisije štetnih plinova prilikom rasplinjavanja biomase.....	17
Tablica 5. Usporedba reaktora za rasplinjavanje.....	32

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$q_{1-2}$	J/KG	Specifična toplina
Wh	J/s	Količina energije koju troši uređaj od jednog vata u vremenu od jednog sata
$H_g$	J/kg	Ogrjevna vrijednost goriva po kilogramu
$H_g$	J/L	Ogrjevna vrijednost goriva po litri
We	J/s	Električni kapacitet
Wt	J/s	Termički kapacitet

## 1. UVOD

Tema ovog rada je rasplinjavanje biomase kao važnog alternativnog izvora energije. Dostupnost i niska cijena energetske izvora predstavlja primarni pokretač rasta ekonomije svake države i od primarnog je značaja za razvoj modernog gospodarstva. Ekonomski rast prvenstveno ovisi o dugoročnosti energije koja je ekološki prihvatljiva i kontinuirano se proizvodi. Čovjek se oduvijek služio energetskim izvorima biološkog podrijetla, koristeći proizvode fotosinteze biljaka kao hranu i kao gorivo. Do početka intenzivne upotrebe fosilnih goriva drvo je bilo prvi i gotovo jedini biološki izvor energije. Iz obnovljivih izvora poput biomase, energija se može proizvoditi dulje vrijeme nego energija koja se dobiva preradom fosilnih goriva, što je čini zanimljivom za prikupljanje i eksploataciju.

Svrha ovog rada je istražiti mogućnosti rasplinjavanja biomase primjenom različitih vrsta rasplinjača i reakcijskih procesa. Razmatraju se svi aspekti biomase s obzirom na porijeklo, dostupne izvore, obnovljivost i procese prerade temeljem kojih se energija dobivena iz biomase pretvara u druge korisne oblike energije. U drugom poglavlju opisana su osnovna obilježja biomase, porijeklo, sastav, fizikalna i termička svojstva te osnove izgaranja. Treći dio istražuje procese rasplinjavanja biomase kako bi se dobila korisna energija te objašnjava odlike tehnologije rasplinjavanja te načine uklanjanja neželjenih produkata rasplinjavanja kao što je katran. Četvrti dio opisuje različite vrste rasplinjača ovisno o njihovoj konstrukciji te karakteristike procesa koji se u njima odvijaju.

## 2. OSNOVNA OBILJEŽJA BIOMASE

### 2.1. Izvori i primjena biomase

Biomasa je prema Uredbi o graničnim vrijednostima emisija tvari koje onečišćuju okoliš (NN 140/97) definirana kao gorivo koje se dobiva od biljaka ili dijelova biljaka kao što su drvo, slama stabljike žitarica, ljuške ili ovojnice. Biomasa predstavlja biorazgradivi dio proizvoda, ostataka i poljoprivrednih otpadaka (biljnih i životinjskih tvari), šumarstva i drvne industrije, kao i biorazgradive dijelove komunalnog i industrijskog otpada čije je korištenje dopušteno u energetske svrhe. Kao gorivo, biomasa se klasificira kao obnovljivi izvor energije koji ima široku primjenu i pridonose zaštiti okoliša.

Biomasa je dostupna u nekoliko oblika kao što su: šumski ostaci (drvena kora, grane, grančice, lišće i šume), poljoprivredni ostaci (ljuške zrna riže, slama, slamke žitarica), ostaci od sadnje (kokosov orah, kava i čaj), životinjski otpad (goveđi i kokošji izmet), industrijski otpad (strugotine drveta, piljevina, otpaci nastali u preradi šećerne trske) i kruti komunalni otpad. Biomasa se može ciljano proizvoditi sadnjom plantaža (brzorastuće šume) ili kultura (energetski usjevi). Na korištenje biomase u energetske svrhe direktno utječe zakonodavni okvir (poljoprivreda, šumarstvo, gospodarenje otpadom) i pripadajući tržišni uvjeti. [2]

Kemijskim i biološkim procesima pretvorbe iz kemijske energije biomase se mogu dobiti kruta, tekuća i plinovita goriva. Ulaganja u tehnologije za proizvodnju energije iz biomase imaju veliki značaj za razvitak ruralnog i industrijskog gospodarstva.

Drvo je sigurno najstariji oblik energije koji je čovjek upotrijebio, prije svega za pripremanje hrane i grijanje. I nakon otkrića fosilnih goriva, drvo je u pojedinim krajevima svijeta ostalo glavni oblik energije. Zbog toga je potrošnja drveta bila vrlo velika i veća od prirodnog prirasta drvne mase. Tako su npr. u Indiji potpuno uništene šume, što je zemlju pretvorilo u pustinju. Ipak, drvo nije imalo značajniju ulogu u osiguranju toplinske energije u zadnjih nekoliko stoljeća. Iako je potencijal biomase kao goriva veoma veliki, njegovo značajnije korištenje javlja se tek nakon ozbiljnih upozorenja o ograničenosti rezervi fosilnih goriva i sve izraženijih ekoloških problema

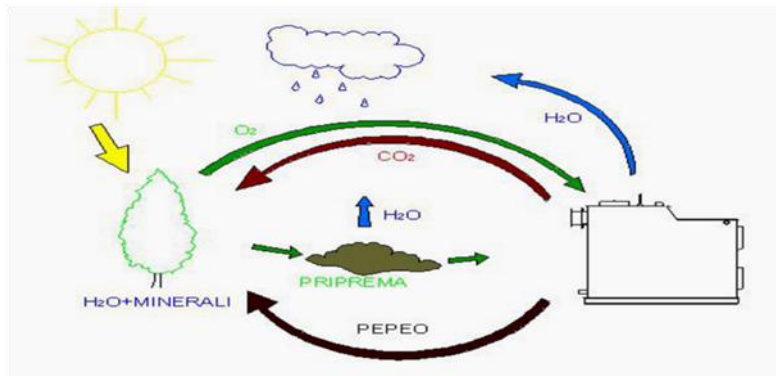
koji su posljedica korištenja fosilnih goriva. Ekološka vrijednost biomase dolazi do izražaja u usporedbi biomase kao goriva s klasičnim fosilnim gorivima, npr. ugljenom.

Korištenjem biomase moguća je i značajnija zamjena ugljena u posebnim ili zajedničkim sustavima za izgaranje. Ekonomska iskoristivost ovisi od postotka biomase u sustavu zajedničkog izgaranja. Biomasa se može pretvoriti u električnu ili toplinsku energiju na različite načine. Tehnologije za iskorištenje biomase za proizvodnju različitih vrsta upotrebni oblika energije i biogoriva zasnivaju se na dobro poznatim klasičnim tehnologijama, prije svega, termičke i kemijske pretvorbe, kao što su izgaranje, rasplinjavanje, piroliza i ukapljivanje (pretvaranje plina u tekućinu). Koriste se i kemijski procesi (esterifikacija) i bio-kemijski procesi (kiselinska hidroliza, enzimaska hidroliza i fermentacija). Najveći dio električne energije iz biomase dobiva se korištenjem parnog ciklusa. U postrojenjima s plinskom turbinom ili s plinskim motorom toplinska energija dimnih plinova može se iskoristi i za proizvodnju pare u kotlu na ispušne plinove, a ekspanzijom pare u parnoj turbini za dobivanje električne energije. Biomasa se može koristiti zajedno sa ugljenom za proizvodnju električne energije u postojećim elektranama. Zajedničko izgaranje je vrlo ekonomična opcija za povećanje proizvodnje električne energije iz biomase i za smanjenje štetnih emisija iz termoelektrana na ugljen.

Cijena električne energije dobivene iz biomase zavisi o tehnologiji, veličini elektrane i cijeni biomase kao goriva. U današnjim elektranama s direktnim izgaranjem biomase proizvodna cijena je oko 9\$/kWh. Očekuje se da će u budućnosti napredne tehnologije, kao što su sustavi zasnovani na rasplinjavanju, kogeneraciji i sl. sniziti cijenu na 5\$/kWh.

U budućnosti se očekuje povećani interes za upotrebu biomase zbog porasta potreba industrije za jeftinom energijom, potreba za redukcijom otpadnih materija, strožih propisa za očuvanje okoliša, kao i stalno rastućih zahtjeva za većim iskorištenjem obnovljivih izvora energije. Prednosti biomase kao izvora energije: značajan izvor energije, ima veliki potencijal za unapređivanje kvalitete života, doprinosi razvoju, očuvanju okoliša i održivosti, omogućava energetske sigurnost, niska cijena goriva i stalna obnovljivost izvora. Najvažnija prednosti je da nema opterećenja atmosfere ugljičnim dioksidom CO<sub>2</sub> pri korištenju biomase kao goriva tj. biomasa je CO<sub>2</sub> neutralno gorivo. Budući da je količina nastalog CO<sub>2</sub> pri izgaranju biomase koja dospije

u atmosferu jednaka količini apsorbiranog  $\text{CO}_2$  prilikom rasta biljke koju ona uzme iz atmosfere prilikom rasta. Nastaje kružni tok kojim se sve tvari iznova koriste što je prikazano na slici 1. Pepeo koji nastaje sagorijevanjem drveta ostaje u ovom kružnom toku, jer se koristi kao gnojivo (povratak minerala). [2]



**Slika 1. Kružni tok tvari pri izgaranju biomase**

Ovaj zatvoreni kružni tok postoji i kada se biomasa ne koristi za stvaranje energije izgaranjem. To je prirodni zatvoreni tok. Drvo koje trune oslobađa  $\text{CO}_2$ , minerale, vodu i energiju, samo što je ovaj proces mnogo sporiji nego proces izgaranja.

Iako su na polju korištenja biomase postignuti značajni rezultati, i dalje se ulažu znatna sredstva s ciljem povećanja efikasnosti tehnologija za korištenje biomase i optimizaciju postojećih tehničko-tehnoloških sustava. Osim značajnih prednosti korištenja biomase kao izvora energije, potrebno je ukazati i na određene nedostatke kao što su: niska gustoća, heterogenost sastava, vremenska promjenljivost sastava i količinska raspoloživost, problemi prikupljanja, prijevoza i skladištenje biomase, niži kapaciteti zbog ovisnosti o izvoru, skupo korištenje jer zahtijeva poticaje i može dovesti do neravnoteže u proizvodnji hrane, održivost je upitne ukoliko nema stalne prisutnosti tehnologije i organizacije proizvodnje.

Vodeće zemlje na području iskorištavanja biomase za proizvodnju energije su Švedska, Finska, Austrija i Njemačka. Proizvođači šećerne trske na Floridi i Havajima na proizvode energiju iz vlaknastih ostataka šećerne trske za svoje i za potrebe drugih potrošača. Danska ima elektrane na ostatke žitarica snage 450 MW.

## 2.2. Struktura i sastav

Biomasa po strukturi može poprimiti sva tri agregatna stanja:

- Kruta biomasa, koju čine drvo, kruti dio komunalnog otpada, peleti, briketi, što je prikazano na slici 2. npr. uzgajanje topola i vrba na energetske plantažama ima prinos od 25 t suhe tvari po hektaru.
- Tekuća biomasa, tj. biogoriva (biodizel, bioetanol), katransko crno ulje ili drveno ulje, prikazano na slici 3.
- Plinovita biomasa, tj. bioplina i sintetički plin



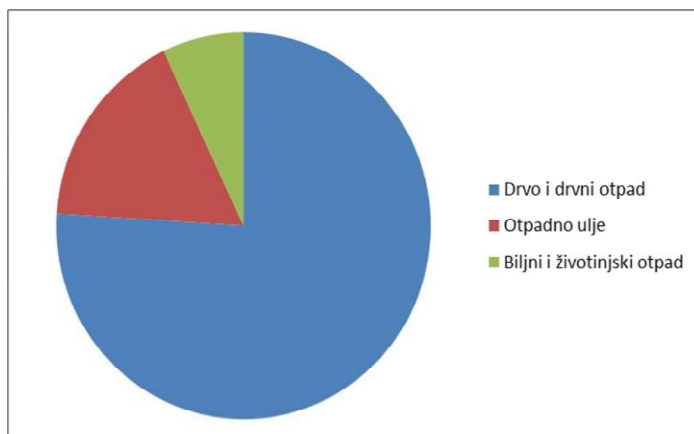
Slika 2. Briketi (lijevo) i peleti (desno)



Slika 3. Biodizel (lijevo) i katransko crno ulje (desno)

Pri iskorištavanju šuma i protupožarnoj zaštiti nastaju velike količine šumske biomase koja se može upotrijebiti za proizvodnju energije. U energetske se svrhe može koristiti i drvo oboljelih stabala, s opožarenih površina i uz šumske ceste. Pri klasičnom se iskorištavanju šuma koristi drvo debla, krošnja i grana čiji je promjer s korom na tanjem kraju veći od 7 cm jer u tom dijelu ima kore, minerala i pepela. Njihovim nestankom bi se izgubile vrijedne tvari koje održavaju plodnost tla. Ostatak pri sječi i izradi te vuči drva od panja do šumske ceste čini drvni otpad. Udio ostataka i otpada ovisi o brojnim faktorima. Prosječno se za sve vrste drveća pri sječi i izradi te vuči može računati s nešto više od 20% ostatka. Na slici 4. je prikazan udio biomase prema vrsti sirovine pri čemu na drvo i drvni otpad ide 76%, otpadno ulje 17% te ostale kategorije biljnog i životinjskog otpada (slama, žetveni ostaci, kruti ostatak u prehrambenoj industriji) 7%.

[2]



**Slika 4. Udio biomase prema vrsti sirovine**

U drvno-prerađivačkoj industriji nastaju velike količine različitog drvnog ostatka. Taj se ostatak može koristiti za podmirenje osnovnih toplinskih potreba pogona (grijanje i tehnološke potrebe). Dio drvnog ostatka koji se ne koristi može koristiti za proizvodnju biogoriva u vidu peleta, briketa, sječke i sl. Drvni ostatak u drvnoj industriji može nastati u primarnoj i finalnoj proizvodnji. Ostaci koji nastaju u primarnoj proizvodnji su: piljevina, komadni otpad, kora. Ova vrsta otpada je vlažna (35-45% vlage), te njegovo daljnje, ekonomski isplativo, korištenje zavisi od adekvatnog skladištenja i sušenja. Pod otpadom koji nastaje u finalnoj proizvodnji podrazumijeva se piljevina, strugotina,



komadni otpad, te drvena prašina koji nastaju pri proizvodnji parketa, stolarije, namještaja i sl.

### 2.3. Fizikalna i kemijska svojstva

Biomasa je veoma heterogen i kemijski kompleksan materijal. Razumijevanje njene prirodne raznolikosti i opsega kemijskog sastava je ključno za inženjere koji su vezani za istraživanja ili razvoj tehnologija koje koriste biomasu kao izvor. Postoje značajne razlike u strukturi mekog i tvrdog drveta, koje definiraju njihovo ponašanje tijekom izgaranja ili nekog termokemijskog tretmana. Kemijski sastav drveta se razlikuje ovisno od vrste, međutim generalno se može reći da celuloza, hemiceluloze i lignin generalno čine 95 do 98% kemijskog sastava drveta. Tri gore navedene komponente ponašaju se različito tokom procesa termičke razgradnje i sagorijevanja, što je također bitan faktor koji ima utjecaja na koncepciju sustava za sagorijevanje ovakvih goriva. Toplinska energija drveta ovisi od sadržaja vlage i približna je toplinskoj energiji lignita, toplinska moć suhog drveta ide i do 17 kJ/kg. Tablica 1. prikazuje usporedbu različitih vrsta goriva ovisno o njihovom sadržaju vode te o ogrjevnoj vrijednosti.

**Tablica 1. Vrste goriva ovisno o sadržaju vode i ogrjevnoj vrijednosti**

Gorivo	Sadržaj vode %	MJ/kg
Hrast	20	14,1
Bor	20	13,8
Slama	15	14,0
Sjemenje	15	14,2
Repičino ulje	-	37,1
Kameni ugljen	4	30-35
Smeđu ugljen	20	10-20
Lož ulje	-	42,7

Bioetanol	-	25,5
-----------	---	------

Sadržaj vlage u drvu može ići i do 60%, ali je u tom slučaju veoma teško omogućiti stabilno sagorijevanje. Drvo u odnosu na suhu masu sadrži oko 80% gorivih isparljivih tvari, koje predstavljaju mješavinu raznih ugljikovodika, ugljičnih monoksida, dioksida i dr. To je i osnovni razlog zbog kojeg je biomasa interesantno gorivo za rasplinjavanje ili neku drugu vrstu termokemijskog tretmana. Pepeo drveta je naročito bogat kalcijem, koji preračunat na CaO čini 50% do 75% njegove ukupne količine. Količina kalcija kreće se od 10% do 30%, dok je sadržaj magnezija od 5% do 10%. Ostatak uglavnom čine željezo, aluminij i natrij. Natrijevi i kalcijevi oksidi definiraju nisku točku topljenja pepela, što kod velikih ložišta stvara uvjete za pojavu šljake. Međutim, poslije sagorijevanja drveta ostaje mali udio pepela (u odnosu na ukupnu masu) koji se kreće oko 1 do 2%. [4]

U slučaju tehnologije zajedničkog izgaranja, biomasa kao gorivo (naročito ako se koristi jeftina biomasa) može koštati manje nego ugljen. Radi usporedbe, u Tablici 2. su prikane energetske vrijednosti pojedinih goriva pa tako biljni ostaci koji čine biomasu i predstavljaju obnovljivi izvor energije imaju vrijednosti između 6 i 17 MJ/kg dok nafta kao konvencionalni izvor energije ima vrijednost 42 MJ/L.

**Tablica 2. Vrste goriva i energetska vrijednost**

Gorivo	Energetska vrijednosti
Biljni ostaci	6-17 MJ/kg
Drvo	8-19 MJ/kg
Etanol	26,8 MJ/L
Biodizel	37,2 MJ/L
Nafta	42 MJ/L

Kemijski sastav biomase zavisi od vrste, klimatske zone u kojoj raste, zemljišnih uvjeta i drugih faktora. U sastav biomase ulaze organske i neorganske tvari. Od organskih tvari to su: celuloza, hemiceluloza, lignin, masti, škrob, vosak, proteini i dr. Neorganske tvari koje ulaze u sastav biomase su: voda, mineralne materije, soli i dr.. Celuloza je najrasprostranjenije biljno vlakno u prirodi. Glavna je komponenta stjenke stanica viših biljaka, spada u ugljikohidrate, sastoji se od jedinica glukoze međusobno povezanih kemijskim vezama. Jedna molekula celuloze može imati čak do 10 000 jedinica glukoze. Celuloza zato ima izgled finih tankih niti. Kemijski je vrlo slabo reaktivna, što je posljedica njezinih fizikalnih svojstava. Kemiceluloza je također sastavljena od mnogih jedinica heksoza, pentoza i uronskih kiselina, dakle i ona je polimer glukoze i drugih tvari koje se nalaze u stjenkama gotovo svake biljne stanice. Ipak joj je lanac mnogo kraći pa obično nema više od 20 do najviše 2000 molekula.

Lignin je sastojak koji spaja celulozu i hemicelulozu u stanicama biljke. To je polimer aromatičnih ugljikovodika nastao kondenzacijom fenilpropana i/ili vanilina i etilvanilina, veoma je složene strukture. Karakterizira ga manja sposobnost hidratacije što utiče na ukupnu sposobnost vezivanja vlakana. Drvo ima veći postotni sastav lignina uglavnom na račun ostalih tvari koje čine: škrob, masti, šećeri, vosak, proteini i dr. Udio ovih tvari ovisi od zemljišta na kome je biomasa rasla i od doba godine. Apsolutno suha masa raznih vrsta drveta ima skoro isti elementarni sastav, gdje su uzorci sušeni na 105 °C. U sastavu drveta se nalaze i neznatne količine natrija (N) koje potječu od bjelančevina koje su nastale u prvoj fazi razvoja stanica. Poljoprivredni ostaci imaju elementarni sastav sličan sastavu drveta, pšenična slama i stabljike kukuruza imaju oko 40% ugljika, oko 6-7% vodika, kisika 45% natrija 0,7%, a ostatak su mineralne tvari. Ljuske riže imaju nešto drugačiji sastav jer imaju veliki udi mineralnih tvari oko 24%, te je samim tim postotak ostalih tvari manji u odnosu na pšeničnu slamu i stabljike kukuruza.

Postotni udio **ugljika (C)** u biomasi je najveći kao i kod svih vrsta goriva, kreće se od 37-46 % kod poljoprivrednih ostataka, i oko 50 % kod drveta. On se u biomasi nalazi u slobodnom i u vezanom stanju, gdje ulazi u sastav organskih tvari sa vodikom, kisikom

i dušikom. Ogrjevna moć čistog ugljika iznosi 33,829 MJ/kg, a maksimalna temperatura izgaranja bez toplinskih gubitaka je 2240 °C.

**Vodika (H)** u biomasi ima relativno malo (5-6%), međutim, imajući u vidu da je njegova ogrjevna moć 142,014 MJ/kg, on zauzima značajno mjesto u energetske vrijednosti. U biomasi vodik se nalazi samo u vezanom stanju. Temperatura sagorijevanja čistog vodika je približna temperaturi sagorijevanja ugljika i iznosi 2235 °C.

**Kisik (O)** predstavlja unutrašnji balast, jer on ne sagorijeva, već pomaže gorenju, a osim toga zauzima mjesto drugim gorivim tvarima. U usporedbi sa ugljikom u biomasi, kisika ima mnogo više (od 33-45%), što dovodi do niže temperature sagorijevanja.

**Natrij (N)** se u biomasi nalazi u malim količinama do 2% i kao kisik predstavlja balast, ponaša se inertno.

**Sumpor (S)** je u svim oblicima goriva nepoželjan element. Prilikom njegovog sagorijevanja stvara se sumporov dioksid ( $\text{SO}_2$ ) i oslobađa se 9,295 MJ/kg topline. Na nižim temperaturama se vodena para, nastala sagorijevanjem vodika ili isparavanjem vlage iz goriva, kondenzira i sa sumporovim dioksidom gradi veoma agresivnu sumporastu kiselinu  $\text{H}_2\text{SO}_3$  i sumpornu  $\text{H}_2\text{SO}_4$  koja nagriza dimne kanale. Osim toga sumporov dioksid je u atmosferi nepovoljan i sa ekološkog stajališta. U svim vrstama biomase sumpora ima u tragovima što je čini jako povoljnom za korištenje u energetske svrhe.

**Mineralne tvari** u biomasi također predstavljaju balast, jer ne sagorijevaju i zauzimaju mjesto drugim gorivim elementima. U procesu sagorijevanja mineralne tvari su podložne promjena koje dovode do njihovog razlaganja i oksidacije, a tvar nastala nakon toga je pepeo.

**Pepeo** stvara problem zaprljanja izmjenjivačkih i drugih površina, kao i problem uklanjanja.

Količina pepela kod poljoprivrednih ostataka se kreće u granicama od 2,3-23% dok je kod drveta daleko manja i iznosi ispod 0,55%, što čini biomasu povoljnim gorivom. U sastav pepela ulazi niz oksida: kalcija, magnezija, natrija, kalija, fosfora, silicija, aluminijska i titana. Prilikom sagorijevanja ili nekih drugih procesa, na temperaturama iznad 750 °C dolazi do omekšavanja pepela i njegovog topljenja. Tom prilikom se

tekuća faza pepela lijepi za zidove ložišta čime ometa prijenos topline na izmjenjivačkim površinama.

Ogrjevna vrijednost goriva je ona količina topline u kJ koja se oslobodi pri potpunom izgaranju jedinice količine goriva. Donja ogrjevna vrijednost goriva se razlikuje od gornje ogrjevne vrijednosti po tome što se voda u produktima izgaranja nalazi u stanju pare. Prema tome donja ogrjevna vrijednost goriva je manja od gornje upravo za vrijednost topline dobivene kondenzacijom vodene pare (koja je nastala pri sagorijevanju goriva). Ogrjevna vrijednost goriva se određuje laboratorijski, a ogrjevna vrijednosti biomase je niža u odnosu na kameni ugljen. Ogrjevna vrijednost drvene mase je približno ista za sve vrste drveta. Na ogrjevna vrijednost drveta u velikoj mjeri utječe prisutnost vlage i šupljina u drvetu. Sa opadanjem količine vlage u drvetu, raste ogrjevna vrijednost drveta. Prisutnost vlage u drvetu znatno smanjuje njegovu ogrjevnu vrijednost, te sa povećavanjem postotka vlage u drvetu smanjuje ogrjevna vrijednost. Razlika ogrjevna vrijednosti za potpuno suho drvo i drvo sa prisutnost vlage od 15% je u približno 4 MJ/kg. Dakle, ako potpuno suho drvo ima ogrjevnu vrijednost 18 MJ/kg, za drvo sa prisutnost vlage od 15% ta vrijednost će biti oko 14 MJ/kg. U tablici 3. su prikazane osnovne karakteristike različitih vrsta drveta i njihova ogrjevna moć kada je udio vlage u drvu 0% i 15%.

**Tablica 3. Osnovne karakteristike različitih vrsta drveta**

Vrsta drveta	Gustoća, $\text{kg/m}_n^3$	Ogrjevna vrijednost pri 0% vlage, MJ/kg	Ogrjevna vrijednost pri 15% vlage, MJ/kg
grab	830	17,01	13,31
bukva	720	18,82	14,84
jasen	690	17,81	13,98
brijest	680	-	14,70
javor	630	17,51	13,73
bagrem	770	18,95	14,97
breza	650	19,49	15,43
kesten	570	-	13,29

vrba bijela	560	17,85	13,65
vrba siva	560	17,54	13,73
joha crna	550	18,07	14,21
joha bijela	550	17,26	13,52
topola crna	450	17,26	13,15
smreka	470	19,66	15,60
jela	450	19,49	15,45
bor obični	520	21,21	16,96
ariš	590	16,98	14,86
hrast	690	18,38	14,44

Da bi se biomasa zapalila, izvor topline je mora zagrijati do temperature na kojoj se zapali (temperatura samozapaljenja), i na kojoj nastavlja gorjeti i kada se izvor topline ukloni. Toplinska energija se od izvora topline prenosi na biomasu kontaktom sa toplim izvorom, konvekcijom ili posredstvom drugog tijela ili fluida (plina, tekućine) i zračenjem. Točka zapaljivosti ili samozapaljenja je temperatura na kojoj drvo počinje gorjeti pod utjecajem izvora paljenja. Za drvo u raznim stanjima to su temperature od 200 do 290°C. Temperatura gorenja je temperatura pri kojoj zapaljena masa nastavlja gorenje postojanim plamenom. Točka gorenja je uvijek na nešto višoj temperaturi od temperature zapaljivosti. Temperatura gorenja drveta je od 260 do 320°C. Još neke od bitnih veličina u procesu sagorijevanja su: dužina paljenja (vrijeme od početka djelovanja izvora topline do paljenja mase), faktor zapaljivosti (recipročna vrijednost dužine paljenja), specifični toplinski kapacitet (količina topline u (J) koja je potrebna da se 1 kg mase (drveta) zagrije za jedan stupanj kelvina).

Kemijski procesi se koriste da bi se omogućila pretvorba biomase u neki korisniji oblik – najčešće za proizvodnju goriva koje se najviše koristi, ili čak za iskorištavanja svojstava samog procesa. U većini slučajeva prvi korak u kemijskim procesima sa biomasom jest plinifikacija ili rasplinjavanje, a taj korak je ujedno i najskuplji te predstavlja najveći tehnički rizik. [4] Rasplinjavanje se odvija pri atmosferskom tlaku, jer za razliku od kapljevina i plinova, biomasu je puno teže pohraniti u nekakvu posudu

pod tlakom. Posljedica odvijanja procesa rasplinjavanja pri atmosferskom tlaku jest nepotpuno izgaranje biomase zbog čega u dimnim plinovima postoje udjeli gorivih plinova poput ugljikovog monoksida, vodika i tragova metana. Tako procesuirana biomasa može služiti kao gorivo u motorima s unutarnjim izgaranjem ili kao zamjena za loživo ulje. Proces rasplinjavanja biomase je jako koristan jer se sve vrste biomase mogu podvrgnuti tom procesu, te zbog lakoće pretvorbe čvrstog otpada u korisno gorivo. Također, pretvorba biomase u biogorivo može se izvesti i selektivnom pretvorbom individualnih komponenti. Na primjer, celuloza se može razgraditi na sorbitol, glukozu itd. Ti sastojci se onda naknadno podvrgavaju raznim procesima čime se dobivaju vodikova i ugljikovodična goriva. Kako je biomasa prirodni materijal, mnoštvo visoko efikasnih biokemijskih procesa je nastalo s ciljem da se razgradi struktura samog materijala biomase. U procesima biokemijske pretvorbe se koriste različiti mikroorganizmi, bakterije i enzimi s ciljem razgradnje biomase. Mikroorganizmi se koriste u procesima fermentacije, kompostiranja i anaerobne digestije otpada.

Električna energija se može generirati iz svih vrsta biomase korištenjem različitih tehnologija. Proizvodnja električne energije zahtjeva složenije sustave, uzme li se u obzir toplinska vrijednost biomase, visok postotak vlage i visok udio hlapljive tvari. Potrebna su posebna toplinska postrojenja veće zapremine, s velikim kotlovima u odnosu na one koja koriste tradicionalna goriva što implicira visoka ulaganja i lošije karakteristike. Efikasnost proizvodnje električne energije iz biomase je u većini slučajeva niža u odnosu na onu u tradicionalnim postrojenjima, što implicira smanjenje ekonomske isplativosti ulaganja. Veličina postrojenja također sprječava razvoj primjene električne energije dobivene iz biomase: manja postrojenja mogla bi ostvariti razinu isplativosti samo kada bi biomasa bila besplatna ili kada bi efikasnost proizvodnje električne energije dosegla mnogo višu razinu od trenutne, dok veća postrojenja imaju problem zajamčene opskrbe biomase. Navedenim aspektima treba dodati i poteškoće pri korištenju biomase. Ova vrsta postrojenja zahtijeva veliku količinu goriva, što dalje zahtijeva stalnu zajamčenu opskrbu. S jedne strane to utječe na rast cijena zbog udaljenosti koju treba prijeći u potrazi za materijalom opskrbe, no, s druge strane, trošak se može smanjiti nabavom veće količine. Veća postrojenja su većinom smještena unutar industrija koje gorivo osiguravaju iz vlastite proizvodnje, primjerice u šumarstvu i

poljoprivredno – prehrambenim industrijama, koje koriste proizvedeni otpad kao gorivo.  
[4]

Cijena goriva je jedan od najznačajnijih aspekata koji idu u prilog drvnog otpada kao gorivo. Pogotovo ako se uzmu cijene tekućih goriva koje su izuzetno visoke i u stalnom porastu.

Prosječna cijena postrojenja za sagorijevanje biomase je skuplja od postrojenja za tekuća goriva, ali se ta investicija vraća u izuzetno kratkom roku, upravo zahvaljujući cijeni biomase. Kada je drvna industrija u pitanju, radi se o skoro besplatnom gorivu, a čak i u slučaju neophodnosti nabavki biomase sa druge strane, cijena tako dobivene toplinske ili električne energije je ekonomski prihvatljiva u sadašnjim okolnostima.



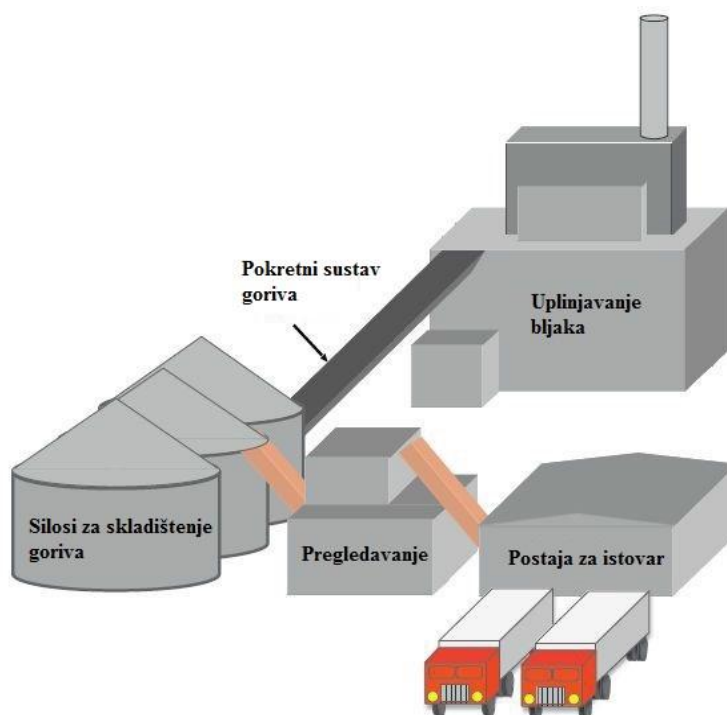
### 3. RASPLINJAVANJE BIOMASE

#### 3.1. Karakteristike rasplinjavanja

Rasplinjavanje je s energetskeg gledišta kemijski proces pretvaranja neke čvrste ili tekuće tvari na primjer ugljena, biomase i sličnih tvari u plin. [6] Ovim se procesom dobiva smjesa plinova poznata kao generatorski plin, koji u svom sastavu sadrži CO, CH<sub>4</sub> i H<sub>2</sub> 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. Rasplinjavanje ili uplinjavanje je jedan oblik nepotpunog sagorijevanja krutog goriva (ugljen, biomasa, drveni ugljen, gradski otpad ili slično) kojim nastaje sintetski plin. Uslijed zagrijavanja na visokoj temperaturi, kruto gorivo počinje ispuštati zapaljive plinove, koji ne sagorijevaju zbog nedostatka kisika. Dakle, pomoću ovog postupka moguće je od drveta ili nekog drugog oblika biomase, proizvesti drveni plin, koji se može koristiti kao pogonsko gorivo za motore s unutarnjim izgaranjem, najčešće za pogon vozila ili za proizvodnju električne energije pomoću agregata. Rasplinjavanjem drveta nastaje mješavina sljedećih zapaljivih plinova: vodik (20%), ugljikov monoksid (20%) i metan (3%). Osim ova tri plina nastaju i dušik i ugljikov dioksid koji nisu zapaljivi.

Rasplinjavanje (plinifikacija) je termokemijski postupak koji se ostvaruje kada se biomasa zagrijava u sredini sa smanjenim udjelom kisika i tada dolazi do proizvodnje sintetskog plina, niske ili srednje ogrjevne vrijednosti i koji sadrži ugljikov monoksid CO i vodik H<sub>2</sub>. U ovisnosti od sadržaja ugljika i vodika biomase, te svojstava rasplinjača, ogrjevna vrijednost proizvedenog sintetskog plina može se mijenjati od 10 do 50% od ogrjevne vrijednosti prirodnog plina. Ogrjevna vrijednost nastalog plina uvjetovana je udjelom ugljikovog monoksida i vodika koji nastaju tokom postupka rasplinjavanja. Preostali sastojci plina su prije svega ugljikov dioksid CO<sub>2</sub>, mala količina metana CH<sub>4</sub> i drugih nesagorivih plinova. [2] Rasplinjavanje biomase nudi određene prednosti u odnosu na direktno sagorijevanje biomase, jer je plin bez pepela i drugih kemijskih spojeva u produktima sagorijevanja, a posebno je pogodan za primjene kao što su visokoučinkoviti kotlovi i peći. Proizvedeni plin može se dalje preraditi (očistiti), što bi omogućilo korištenje za pogon strojeva, kao što su brzohodni klipni

motori i turbine ili za mala postrojenja za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije (< 5 MW). Vrlo čist plin se također može koristiti kao sirovina za kemijske procese. Katalitički i biološki procesi su u fazi razvoja i svrha im je pretvorba sintetskog plina u alkohol (bioetanol), biodizel, sintetski prirodni plin i vodik. Svaka prihvatljivo suha biomasa se može pretvarati u sintetski plin, koji se također može koristiti kao gorivo ili kemijska sirovina. Proizvodnja bioplina ima širok spektar mogućih primjena, uključujući odlagališta otpada, postrojenja za preradu gradske otpadne vode, poljoprivredne farme, industriju celuloze i papira, te industriju hrane i pića. Na slici 5. je prikazan prostorni raspored glavnih objekata u postrojenju za rasplinjavanje biomase. Biomasa se dovozi kamionima do stanice za istovar. Odatle se transportnim trakama šalje u dio postrojenja za pročišćavanje a potom u spremnike za taloženje. Sustav transportnih traka potom otprema pripremljenu biomasu u postrojenje za rasplinjavanje.



**Slika 5. Postrojenje za pripremu i rasplinjavanje biomase**

Rasplinjavanje se ostvaruje preko nepotpunog sagorijevanja goriva. Sagorijevanje se odvija s nedovoljnim dovodjenjem zraka, kod čega se ostvaruje nepotpuno izgaranje. U proces se dovodi samo toliko zraka da se proizvede onoliko topline koliko je potrebno za početak procesa, za stvaranja plinova koji sadrže gorivu tvar. Ima više tehnoloških rješenja manipulacije gorivom u ložištu rasplinjača. [7] Ložište za rasplinjavanje je u

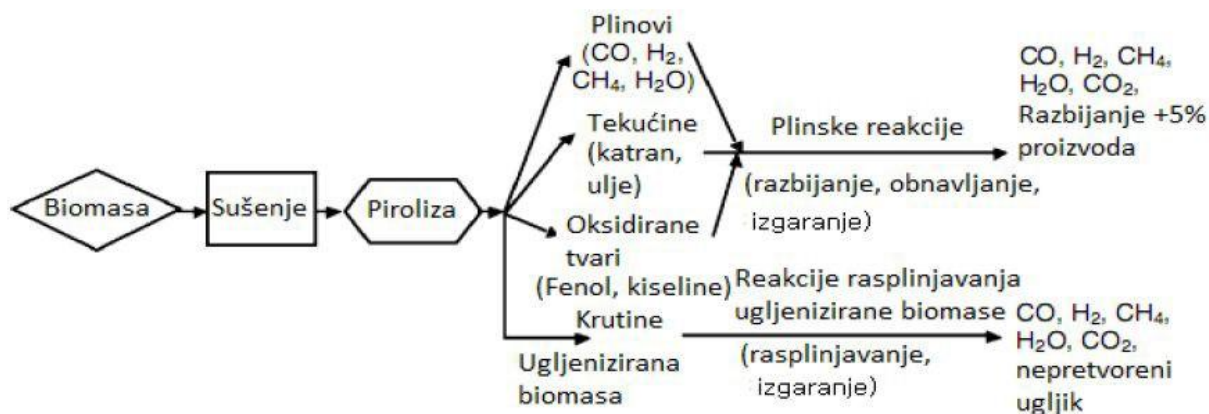
principu isto, odnosno slično, kao i kod ložišta kotlova na kruta goriva. Postoje fiksna ložišta s čvrstim slojem goriva, sa istosmjernim i protusmjernim strujanjem zraka i plinova prema kretanju goriva, ložišta s lebdećim slojem, ložišta s cirkulirajućem lebdećim slojem i ložište s kontinuiranim kretanjem goriva.

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. Tablica 4. prikazuje emisije štetnih plinova prilikom rasplinjavanja biomase.

**Tablica 4. Emisije štetnih plinova prilikom rasplinjavanja biomase**

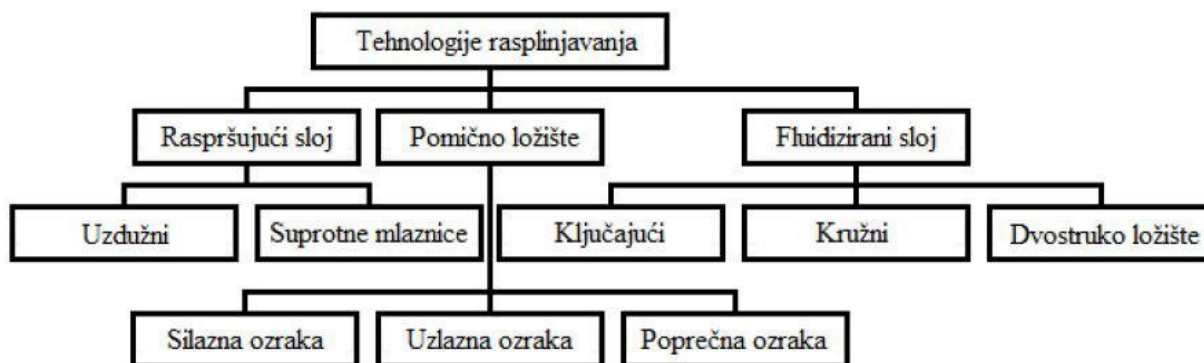
<b>Tehnologija</b>	<b>C</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>
Rasplinjavanje biomase	5-10	0,05-0,10	0,5-0,6
Ugljen – IGCC	190-220	11,00-12,00	4,0-4,5
Prirodni plin - CCGT	90-120	0	0,5-0,6
Vjetroelektrane	10-15	1,05-0,10	0,01-0,03
Solarni fotovoltaići	150-170	1,6-1,9	0,5-0,6

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. Dijagram na slici 6. prikazuje pretvorbu i formiranje različitih plinova u reaktoru za rasplinjavanje.



Slika 6 . Nastanak različitih plinova tijekom rasplinjavanja biomase [6]

Reaktori za rasplinjavanje ili rasplinjači 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 ovisno o tipu tehnologije, što je prikazano na slici 7.



Slika 7. Vrste tehnologija za rasplinjavanje

Plin dobiven u rasplinjačima se može koristiti u toplinske svrhe, odnosno za direktno izgaranje, u motorima s unutrašnjim izgaranjem i u plinskim turbinama, što bi zbog mogućnosti korištenja plina visoke temperature bilo veoma efikasno. No

zbog nemogućnosti dobivanja potpuno čistog plina, a izrazito velikih troškova čišćenja plina, te kad se doda osjetljivost plinske turbine na nečistoće pri visokim temperaturama, ta se tehnologija nije još dovoljno istražila. Zbog ovih razloga, većina aplikacija tehnologije rasplinjavanja je u toplinske svrhe i u korištenju dobivenog plina u motorima s unutrašnjim izgaranjem. Velika većina današnjih rasplinjača radi u svrhu dobivanja plina koji se koristi za izravno izgaranje. Razlog tomu su manji zahtjevi na čistoću plina, kao i na ogrjevnu vrijednost plina. Prednost korištenja rasplinjavanja i naknadnog spaljivanja dobivenog plina, u odnosu na direktno spaljivanje korištenog goriva u rasplinjačima, je u mogućnosti povećanja temperature izgaranja, boljem miješanju sa zrakom, te isto tako manjim potrebnim pretičkom zraka, što dovodi do povećanja efikasnosti izgaranja. Svi tipovi rasplinjača se mogu koristiti za proizvodnju plina za potrebe direktnog spaljivanja, no radi jednostavnije konstrukcije najčešće se koriste protusmjerni rasplinjači za manje sustave (ispod 1 MW toplinske snage), a iznad te snage najčešće se koriste rasplinjači s fluidiziranim slojem. Većina sustava za spaljivanje konvencionalnih goriva može biti prenamijenjeno za korištenje plina dobivenog rasplinjavanjem. Plin dobiven rasplinjavanjem se može koristiti i u toplinske svrhe. [8]

Prvotnim korištenjem rasplinjavanja krutog goriva i naknadnog spaljivanja dobivenog plina može se dosta povisiti efikasnost procesa dobivanja topline iz krutog goriva (bolja mogućnost regulacije, moguća viša temperatura izgaranja), nego samo s klasičnim spaljivanjem tog krutog goriva.

Snaga koju će motor razvijati direktno ovisi o ogrjevnoj vrijednosti i kemijskom sastavu plina koji se dobiva u rasplinjaču. Uglavnom, zbog manje ogrjevne moći dobivenog plina, dolazi do smanjenja snage kod korištenja plina iz rasplinjača. Također uslijed strujanja plina kroz različite slojeve goriva u rasplinjaču, dolazi do pada tlaka što isto doprinosi padu ukupne snage (troši se snaga ventilatora, ili usisna snaga klipa kod motora). Procjena je da pri radu motora s unutarnjim izgaranjem koji koristi plin dobiven iz rasplinjavanja dolazi do smanjenja snage motora od 15 % u odnosu na rad na naftno gorivo. Nadalje, u usporedbi s motorima pogonjenim s fosilnim gorivima, goriva korištena u rasplinjavanju obično ne sadrže sumpor tako da nema emisija štetnih sumpornih oksida.

Zadatak rasplinjača je da potpuno rasplini zadano gorivo, pri čemu se teži što većem udjelu gorivog vodika ( $H_2$ ) i ugljikovog monoksida ( $CO$ ). Zahtjevi koji se postavljaju na proizvedeni plin su različiti ovisno o tome kojoj je svrsi plin namijenjen, dok je za potrebe ovog razmatranja cilj proizvesti plin za upotrebu u strojevima za proizvodnju energije. Glavni zahtjev koji se postavlja pred plin proizveden za takvu upotrebu je što veća ogrjevna vrijednost. Tvari koje sudjeluju u slučaju rasplinjavanja su gorivo, zrak ili čisti kisik, voda i troska (pepeo).

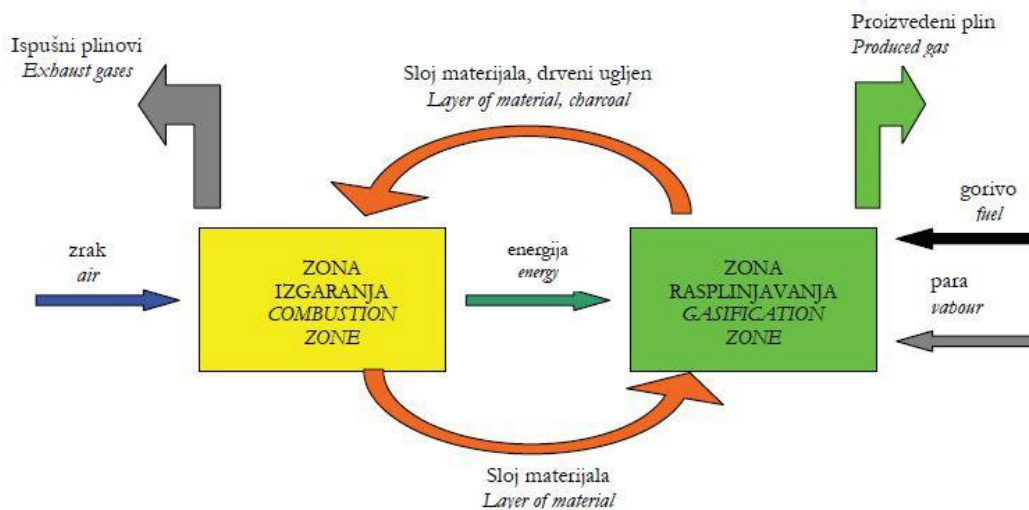
Premda je troškovno najpovoljniji način korištenja biomase u proizvodnji električne energije suspaljivanje u ugljenom loženim termoelektranama, poticajno zakonodavno okruženje u mnogim razvijenim zemljama omogućilo je ekspanziju postrojenja koja kao gorivo koriste isključivo biomasu. Kapacitet postrojenja za samostalno izgaranje biomase (na rešetki ili u fluidiziranom sloju) određen je prije svega količinom goriva koje se na ekonomičan način može prikupiti i transportirati na lokaciju elektrane. Ograničena raspoloživost goriva i visoki transportni troškovi uvjetuju izgradnju postrojenja manjeg kapaciteta koja tek u rijetkim slučajevima premašuju 30 MWe. U usporedbi s ugljenom loženim elektranama postrojenja ložena biomasom su skuplja i manje efikasna. Električna iskoristivost postrojenja loženih samo krutom biomasom, određena kao omjer proizvedene električne energije i energije dovedene gorivom, u pravilu je niža od 20 % za postrojenja kapaciteta do 5 MWe, a rijetko kada premašuje 30 % kod većih postrojenja. Tek novija postrojenja kapaciteta većeg od 20 MWe, koja su izgrađena nakon 2000. godine postižu iskoristivost veću od 30 % zahvaljujući primjeni usavršenih tehnologija izgaranja, korištenju suhog goriva i podizanju parametara svježe pare (iznad 100 bar i 500 °C).

Ukratko, faze rada postrojenja za rasplinjavanje goriva su slijedeće:

- a) Priprema goriva: prikupljanje biomase, Usitnjavanje biomase na zadanu granulaciju, Sušenje biomase na zadanu vlažnost ( $W = 10$  do  $20$  %), Prosijavanje ili peletiranje biomase za postizavanje određenog granuliteta
- b) Proizvodnja plina: Rasplinjavanje goriva, Čišćenje i filtriranje plina na traženu čistoću,

- c) Proizvodnja energije: Proizvodnja električne energije u elektroenergetski sustav, Proizvodnja toplinske energije za grijanje i/ili apsorpcijsko hlađenje, Faze rada postrojenja za rasplinjavanje goriva
- d) Prijenos i korištenje energije: prijenos električne energije u elektroenergetski sustav, Korištenje toplinske energije za grijanje, proizvodnja rashladnog medija za hlađenje preko apsorpcijskih uređaja

Osnovna ideja koncepta rasplinjavanja sastoji se u tome da se fluidizirani sloj podijeli u dvije zone, zona rasplinjavanja i zona izgaranja. Između te dvije zone, formira se cirkulacijska petlja sloja materijala, ali pri tome plinovi trebaju ostati odvojeni. Cirkulacijski sloj materijala djeluje kao prijenosnik topline od zone izgaranja do zone rasplinjavanja. Postupak ja shematski prikazan na slici 8.



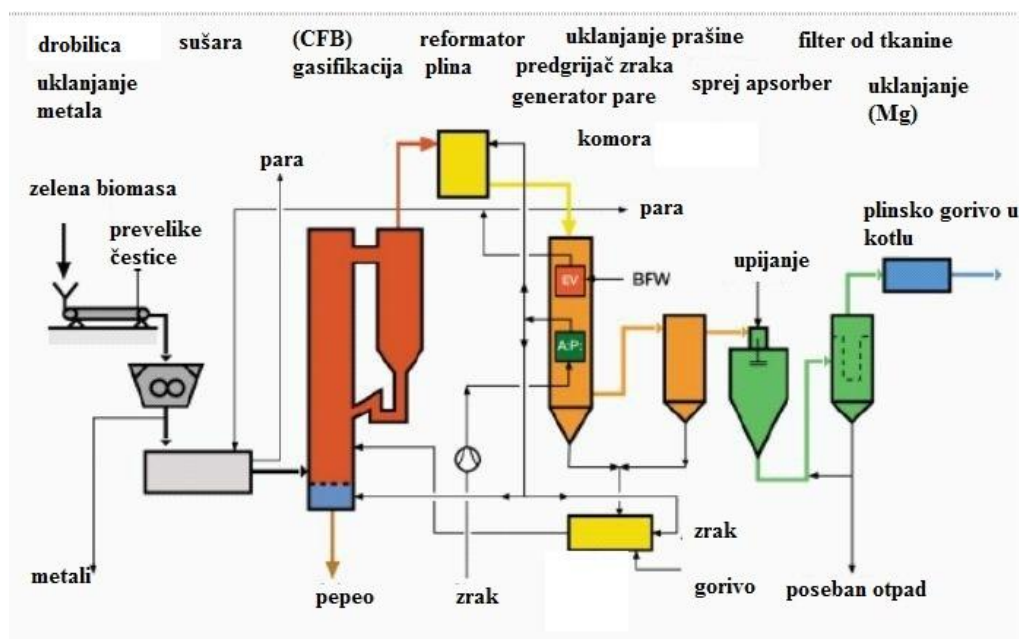
**Slika 8. Osnovna shema postupka rasplinjavanja**

Gorivo se dobavlja do zone rasplinjavanja gdje se sam postupak odvija uz prisutnost pare, pri čemu je plin koji nastaje u ovoj zoni skoro oslobođen prisutnosti dušika. Sloj materijala, zajedno s nešto drvenog ugljena, struji prema zoni izgaranja. Ova zona je fluidizirana zrakom i drveni ugljen djelomično izgara. Egzotermna reakcija u zoni izgaranja osigurava potrebnu energiju za postupak endotermičkog rasplinjavanja s

pomoću pare. Međutim, sloj materijala na izlasku iz zone izgaranja ima višu temperaturu od one na ulasku. Dimni plinovi se odvođe kako ne bi bili u kontaktu s proizvedenim plinom. Primjenom ovoga koncepta, moguće je proizvesti plin visoke gradacije bez korištenja čistog kisika. U praksi ovaj postupak se može realizirati s dva fluidizirana sloja [5] povezana “transportnom linijom” ili s unutarnjom cirkulacijom fluidiziranog sloja.

### 3.2. Procesi rasplinjavanja

Osnovni dio pogona u procesu rasplinjavanja je reaktor u kojem se odvijaju složeni kemijski i fizikalni procesi koji uključuju sušenje, grijanje, pirolizu (*pyrolysing*), djelomičnu oksidaciju i naposljetku, redukciju, Shema na slici 9. pokazuje osnovne dijelove postrojenja za rasplinjavanje biomase.

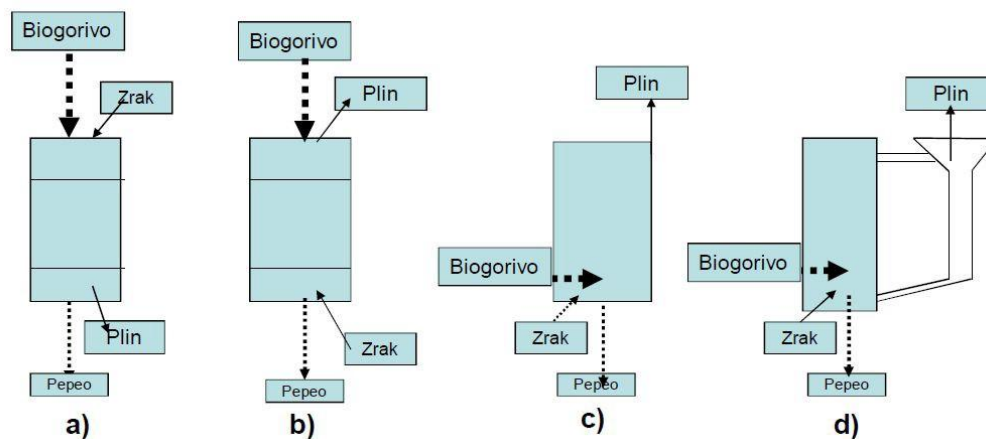


**Slika 9. Shema postrojenja za rasplinjavanje biomase**

Biomasa se dovozi transportnim trakama i prolazi mehaničko čišćenje gdje se odvajaju dijelovi otpada, metali i druge tvari koje nisu organskog porijekla. Potom slijedi sušenje, rasplinjavanje, pročišćavanje nastalog plina i njegova upotreba kao energenta.



Sušenje goriva se odvija na temperaturi do približno 200 °C, piroliza obuhvaća zagrijavanje bez kisika do temperature od približno 500 °C, oksidacija se odvija na temperaturama sloja do 900 °C a redukcija pri temperaturi do približno 1200 °C). Piroliza je toplinski postupak kojim se proizvodi drveni ugljen i katran i čijim se izgaranjem postiže potpuna oksidacija goriva. Postupak rasplinjavanja se nalazi između pirolize i izgaranja. Uređaji za rasplinjavanje ili rasplinjači se mogu u širem smislu podijeliti u tri grupe prema smjeru protjecanja plina kod rasplinjavanja: protusmjerni (usponski) generator (*up draft gasifier*), istosmjerni (oborinski) generator (*down draft gasifier*) i uređaj za rasplinjavanje u fluidnom sloju koji može biti ključajući ili cirkulirajući (*cross draft gasifier*). Na slici 10. je prikazana navedena podjela.



**Slika 10 . Podjela rasplinjača**

a) Čvrsti sloj s istosmjernim strujanjem zraka i plinova, b) Čvrsti sloj s protusmjernim strujanjem, zraka i plinova, c) Fluidni sloj, d) Fluidni sloj, cirkulirajući

U procesu rasplinjavanja biomasa se najprije zagrijava i suši. Potrebna toplina osigurana je izgaranjem manje količine sirovine. Tijekom procesa pirolize, koji započinje na temperaturi od približno 200 °C hlapivi sastojci goriva isparavaju. U parnoj smjesi nalaze se ugljični monoksid, vodik, metan, ugljični dioksid, hlapivi katran i voda. Kruti ostatak goriva je drveni ugljen koji se transformira u reaktorski plin s pomoću sredstva za rasplinjavanje (najčešće se koriste zrak, kisik, ugljični dioksid ili vodena para).

Drveni ugljen reagira s kisikom sadržanim u sredstvu za rasplinjavanje i proizvodi reaktorski plin koji se sastoji od ugljičnog monoksida, vodika i metana. Ako se kao sredstvo za rasplinjavanje koristi zrak, gorivi plinovi zauzimaju približno 40% ukupnog volumena reaktorskog plina dok ostatak čine dušik i ugljični dioksid.

Gorive komponente reaktorskog plina uključuju ugljični monoksid, vodik, metan, te male količine etana i propana. Reaktorski plin može sadržavati i određene količine ugljičnog dioksida i vodene pare. Točan sastav reaktorskog plina ovisi o temperaturama i tlakovima na kojima se proces odvija kao i o sastavu biomase. [3] Načelno viši tlakovi pospješuju efikasnost pretvorbe ugljika, a proizvodi se i više metana i vodene pare. Više temperature potiču proizvodnju ugljičnog monoksida i vodika. Reaktorski plin na izlazu iz rasplinjača sadrži različite količine štetnih tvari kao što su spojevi dušika i sumpora, ugljikovodike (katran), te čestice pepela, te se prije daljnjeg korištenja u pravilu mora očistiti. Čišćenje nije nužno ukoliko je reaktorski plin predviđen za izravno izgaranje u ložištu.

Rasplinjavanje odozgo (*protusmjerni usponski generator*) – Ovaj sustav rasplinjavanja prikazan na slici je ujedno najjednostavniji sustav pri kojem zrak ulazi pri dnu, a izlazi na vrhu. U blizini rešetke na dnu odvija se reakcija izgaranja, koja je praćena reakcijom redukcije u gornjem dijelu uređaja. U gornjem dijelu uređaja, javlja se grijanje i piroliza sirovine kao rezultat prijenosa topline i radijacije iz donjih zona. Katran i isparljive tvari koje nastaju za vrijeme ovoga procesa se odstranjuju pod utjecajem protoka plina. Pepeo se ispušta na donjem dijelu uređaja. Osnovne prednosti ovoga sustava čine njegova jednostavnost, potpuno izgaranje drvenog ugljena i unutarnja izmjena topline koja pridonosi niskoj temperaturi ispušnih plinova i visokoj učinkovitosti uređaja, koji može raditi s više vrsta sirovina (piljevina, trupovi stabljika žitarica itd.). Kao osnovni nedostaci mogu se navesti mogućnosti “kanaliziranja” opreme što može dovesti do loma kisika i opasne, eksplozivne situacije i potrebe ugradnje pokretne rešetke, kao i do problema vezanih s raspolaganjem kondenzata sadržanog u katranu koje je rezultat pročišćavanja plina. Ovo posljednje je od manjeg značaja ako se plin koristi za direktne toplinske primjene, kod kojih će katran u potpunosti sagorjeti.

Rasplinjavanje odozdo (*istosmjerni oborinski generator*) – Problem prisutnosti katrana u struji plina može se izbjeći konstrukcijom sustava za rasplinjavanje odozdo, gdje se zrak uvodi na/ili iznad zone oksidacije. Proizvodni plin se izdvaja pri dnu uređaja, tako

da se gorivo i plin pomiču u istom smjeru. Na svojoj putanji prema dolje, kiseline i zakašnjeli produkti destilacije goriva moraju proći kroz užarenu jezgru drvenog ugljena pretvarajući se u postojeće plinove vodika, ugljičnog dioksida, ugljičnog monoksida i metana. Ovisno o temperaturama u vrućoj zoni i vremenu zadržavanja zaostalih para, postiže se manje ili više potpuno uklanjanje sadržaja katrana. Osnovna prednost ovakve vrste rasplinjavanja je u mogućnosti proizvodnje plina bez sadržaja katrana, a takav plin ima brojne mogućnosti upotrebe u motorima s unutarnjim izgaranjem. [4]

U praksi, plin bez sadržaja katrana je rijetkost, ako je uopće i moguće proizvesti takav plin u cijelom postupku rasplinjavanja. Poradi niže razine sadržaja organskih komponenti u kondenzatu, ovakve vrste uređaja za rasplinjavanje su pogodnije za korištenje s aspekta sprječavanja onečišćenja i očuvanja prirodnog okoliša. Osnovni nedostatak ovakvog sustava za rasplinjavanje je u njegovoj nestabilnosti rada s brojnim neobrađenim gorivima. U osnovi, paperjasti, materijali niske gustoće dovode do problema u protoku i prekomjernog pada tlaka, tako da se kruta goriva moraju “briketirati” (proces proizvodnje komada pravilnih oblika, jednakih po veličini i sastavu, a proizvedenih od sitnog rasutog materijala putem prešanja) prije upotrebe. Ovakve vrste uređaja nisu pogodne za korištenja za goriva koja imaju visoki sadržaj pepela. Manji nedostaci sustava za rasplinjavanje odozdo, kada se uspoređi s rasplinjavanjem odozgo, je nešto niža učinkovitost koja je rezultat nedostatka unutarnje izmjene topline kao i niža ogrjevna vrijednost plina. Osim toga, potreba za održavanjem konstantnih visokih temperatura u području poprečnog presjeka uređaja čini ovaj sustav rasplinjavanja nepraktičnim za upotrebu u područjima iznad 350 kW.

Rasplinjavanje u križnom generatoru (*cross-draught gasifier*) – Sustav rasplinjavanja u sloju je prilagođen za upotrebu s drvenim ugljenom. Postupak rasplinjavanja drvenog ugljena rezultira stvaranjem vrlo visokih temperatura u području oksidacije koje dosežu i do 1.500 °C i više što nepovoljno djeluju na konstrukciju uređaja. Kod ove vrste sustava za rasplinjavanje toplinsku izolaciju protiv ovako visokih temperatura čini samo gorivo, u ovom slučaju drveni ugljen. Prednosti ovoga sustava rasplinjavanja su u činjenici da ovaj sustav može raditi s vrlo malom količinom sirovine za proces. Postrojenja s najvišom snagom od 10 kW mogu u određenim okolnostima biti

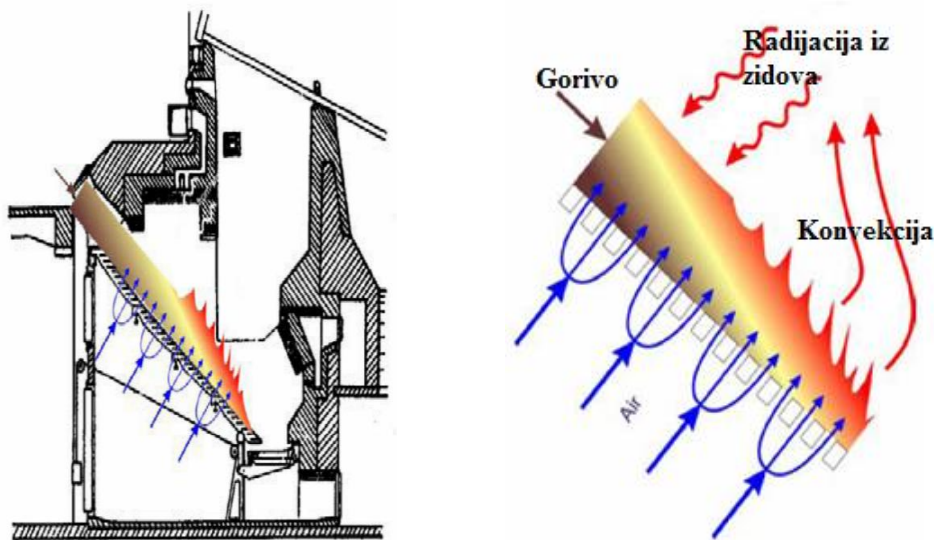
ekonomski vrlo opravdana. Razlog tome je mogućnost upotrebe vrlo jednostavnog postupka pročišćavanja plina, koji se sastoji od ciklonskih i vrućih filtara, kod ovog sustava rasplinjavanja u sprezi s korištenjem manjih motora. Nedostatak ovoga sustava je taj da sustav ima malu mogućnost pretvorbe katrana, što predstavlja vrlo važnu značajku za visoku kvalitetu (vrlo niski sadržaj isparljivih tvari) drvenog ugljena. [4]

U postrojenjima za samostalno izgaranje biomase uglavnom se koriste sljedeće tehnologije izgaranja: izgaranje u nepokretnom sloju u ložištima s rešetkom, izgaranje u mjhuričastom fluidiziranom sloju, te izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju.

Ložišta s izgaranjem na rešetki predstavljaju razvijenu, tržišno zrelu i dugo vremena standardnu tehnologiju izgaranja biomase koja se u različitim izvedbama nalazi u ponudi brojnih proizvođača energetske opreme. Rešetka omogućava izgaranje sječke, piljevine, krupne i komadne biomase. Prikladna je i za izgaranje vlažnih goriva, različite kvalitete, kao i goriva s visokim udjelom pepela. Kvalitetno vođenje procesa izgaranja na rešetki podrazumijeva homogenu distribuciju goriva po čitavoj površini i ravnomjerno dovodenje primarnog zraka koji se upuhuje ispod rešetke. Nehomogenosti u dovodu primarnog zraka mogu izazvati stvaranje šljake, povećati količinu letećeg pepela i povećati pretižak zraka potreban za osiguravanje potpunog izgaranja.

S obzirom na način dovodenja goriva u ložište razlikuju se rešetke s donjim i rešetke s gornjim dovodom goriva. Rešetke s donjim dovodom goriva prikladne su za postrojenja manjih snaga i za izgaranje biomase koja sadrži malo pepela kao što su drvena sječka i piljevina. Biomasa koja sadrži veće količine pepela, kao što je kora drveta, slama žitarica ili trava, zahtijeva efikasniji sustav uklanjanja pepela. U ložištima s donjim dovodom goriva sinterirane ili rastaljene čestice pepela prekrivaju gorivi sloj. Kroz pokrov od pepela povremeno izbija mješavina goriva i zraka što može nepovoljno djelovati na stabilnost procesa izgaranja. Kod većih sustava koristi se gornji dovod goriva na rešetku koja može biti izvedena u različitim varijantama: horizontalna, nagnuta, lančasta, stepenasta, stacionarna, pomična u jednom smjeru, rotirajuća ili vibrirajuća. Na slici 11. shematski je prikazan proces izgaranja na nagnutoj rešetki.

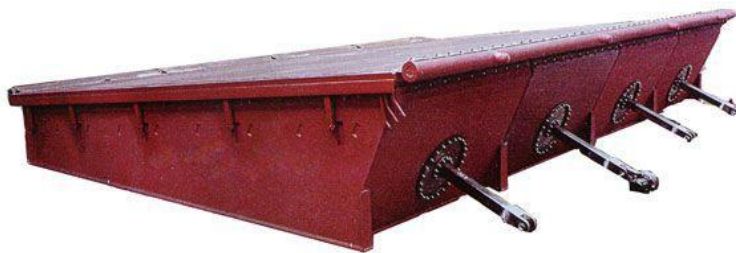
Proces se odvija u sljedećim fazama: sušenje (smeđi dio gorivog sloja), piroliza i izgaranje hlapivih tvari (žuti dio gorivog sloja), te izgaranje drvenog ugljena (crveni dio). Svaka pojedina čestica goriva prolazi kroz sve tri faze procesa izgaranja. [3]



**Slika 11. Shematski prikaz procesa izgaranja na nagnutoj rešetki**

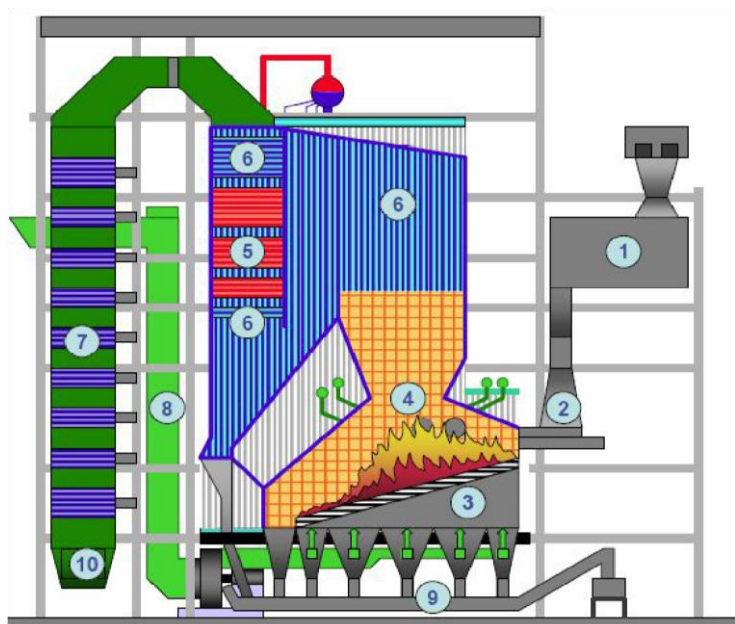
Suvremena rješenja sustava izgaranja uključuju kontinuirano pomičnu i vodom hladenu rešetku, automatski nadzor i regulaciju visine sloja, te regulaciju brzine vrtnje ventilatora primarnog zraka. Primarni zrak dovodi se ispod rešetke i sekcijski kako bi se osigurala točno određena količina potrebna za pokrivanje potreba za primarnim zrakom u zoni sušenja, zoni rasplinjavanja i zoni izgaranja. Sekcijska regulacija protoka primarnog zraka osigurava stabilan proces izgaranja i na nižim opterećenjima, kao i regulaciju potrebnog omjera primarnog i sekundarnog zraka u cilju minimiziranja produkcije dušikovih oksida. Različite izvedbe nagnutih i vibrirajućih rešetki, s gornjim dovodom goriva koriste se za izgaranje biomase u postrojenjima u relativno širokom rasponu kapaciteta od 5 MWt do 120 MWt.

Ilustracija nagnute, vodom hladene vibrirajuće rešetke prikazana je na slici 12.



**Slika 12. Nagnuta, vodom hladena, vibrirajuća rešetka za izgaranje biomase**

Kod suvremenih izvedbi velikih kotlova za izgaranje biomase na rešetki primjena naprednih tehničkih rješenja omogućava stabilno i efikasno izgaranje, smanjenje emisije ugljičnog monoksida kao i količine neizgorenih čestica u dimnim plinovima. Shema suvremenog kotla s izgaranjem biomase na nagnutoj rešetki prikazana je na slici 13.



**Slika 13. Suvremeni kotao na biomasu s izgaranjem na nagnutoj rešetki**

1. međuspremnik goriva, 2. dobava goriva, 3. rešetka, 4. ložište, 5. pregrijač pare, 6. isparivač, 7. ekonomajzer, 8. zrak za izgaranje, 9. vlažno otpeljavanje, 10. odvod dimnih plinova

Za postrojenja čiji proizvodni kapacitet ne premašuju 7 MW i 20 MW razvijena su rješenja s rotirajućom konusnom rešetkom s donjim dovodom goriva, što je prikazano na slici 14. Sustav je instaliran na više od 100 lokacija toplana ili kogeneracijskih postrojenja u Europi, Kanadi i Rusiji.



**Slika 14. Rotirajuća konična rešetka s donjim dovodom goriva**

Ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju razvijena su u prvom redu zbog boljeg izgaranja ugljena i s ciljem smanjenja emisija sumpornih i dušikovih oksida. S vremenom je primjena ove tehnologije proširena na biomasu kao i na druga niskoenergetska goriva koja nisu pogodna ili su nepraktična za konvencionalno izgaranje.

Ložišta s izgaranjem u mjehuričastom sloju (engl. *bubbling fluidised bed* - BFB) prikladna su za postrojenja čija je snaga veća od 10 MWt. Na dnu BFB ložišta nalazi se sloj pijeska ispod kojeg se kroz distribucijsku ploču upuhuje primarni zrak. Promjer zrnaca slikatnog pijeska obično je 1 mm dok brzina zraka fluidizacije varira između 1 i 2,5 m/s. Temperatura sloja održava se u rasponu između 800 i 900 °C posredstvom ugrađenog izmjenjivača topline kroz koji protječe pregrijana vodena para. Sekundarni zrak uvodi se kroz nekoliko ulaza smještenih u gornjem dijelu ložišta. Zrak za izgaranje upuhuje se stupnjevano što omogućuje smanjenje emisija NO<sub>x</sub>. Porastom brzine primarnog zraka na 5 do 10 m/s i smanjivanjem promjera zrnaca pijeska na 0,2 do 0,4 nastaju preduvjeti za stvaranje cirkulirajućeg sloja (engl. *circulating fluidised bed* – CFB). Zrnca pijeska se podižu i zajedno s dimnim plinovima transportiraju do ciklona

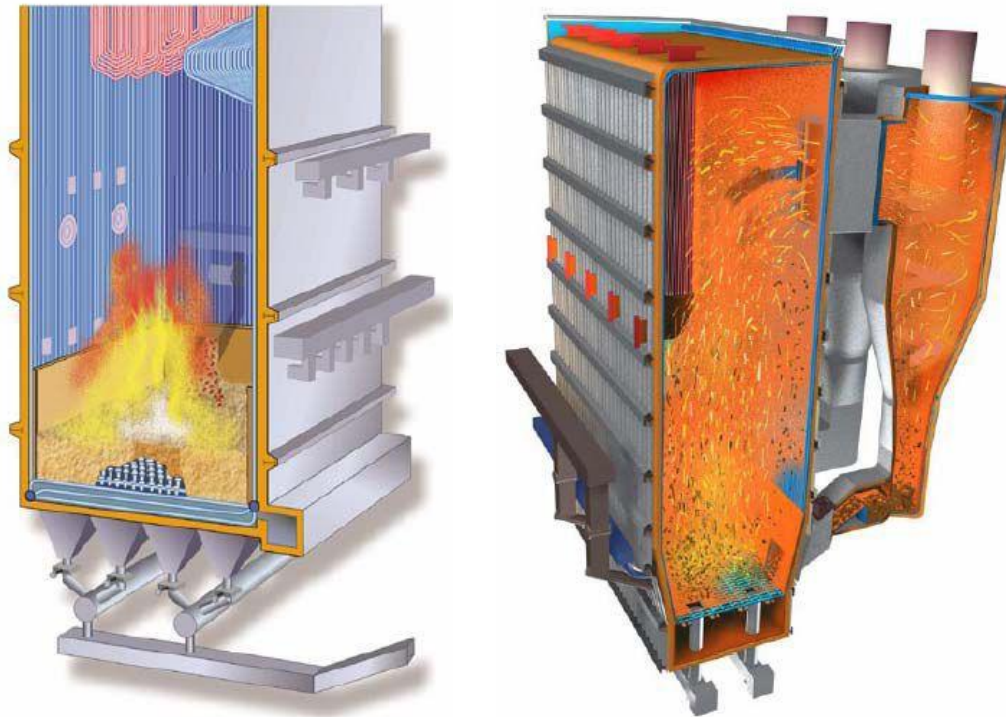
gdje se odvajaju i vraćaju u sloj. Regulacija temperature sloja osigurana je ili ugradnjom izmjenjivača u sloj ili putem hlađenja cijevnih stijena ložišta. Izražena turbulencija cirkulirajućeg sloja u usporedbi s mjehuričastim omogućava bolji prijelaz topline s dimnih plinova na stjenke ložišta. CFB omogućava bolju raspodjelu zraka i povoljniji razmještaj ogrjevnih površina. Najveći nedostaci CFB tehnologije su razmjerno veliko ložište (što za posljedicu ima povećanje nabavne cijene), relativno velik udjel krutih čestica i pepela u dimnim plinovima (u usporedbi s BFB), veliki gubici inertnog materijala (s pepelom lete i zrnca pijeska), te zahtjevniji proces pripreme goriva (mogu izgarati samo čestice ograničene veličine 0,1 do 40 mm).

U tipičnom fluidiziranom sloju (mjehurići ili kružni sloj), medij za rasplinjavanje ulazi odozdo, ali gorivo se dovodi sa strane ili sa vrha. U bilo kojem slučaju, gorivo se odmah miješa u cijelom sustavu, zbog njegovog izuzetno visokog stupanja miješanja. Tako medij za rasplinjavanje ulazi kroz rešetku, te dolazi u neposredni kontakt sa svježim česticama biomase, koja prolazi pirolizu, kao i sa utrošenim česticama katrana iz biomase, koji je bio u tom sloju određeno vrijeme. Kada je prisutan u zraku ili kisiku rasplinjavajući medij ili kisik u dodiru sa smjesom otpušta katran, dok njegov kontakt s utrošenim česticama katrana uzrokuje rasplinjavanje. Iako su krute tvari izmiješane, plinovi teku prema gore u tzv. „plug-flow načinu“. To znači da svježije čestice biomase u pirolizi ne dolaze u dodir s kisikom. Iz tog razloga generacija katrana u fluidizirajućem dijelu rasplinjača je između dvije krajnosti koje su predstavljene „updraft“ i „downdraft“ plinifikatorima, u prosjeku oko  $10 \text{ mg/Nm}^3$ .

Tehnologije izgaranja u mjehuričastom ili cirkulirajućem fluidiziranom sloju omogućavaju stvaranje homogenijih uvjeta izgaranja te smanjenje udjela ugljičnog monoksida i dušikovih oksida u dimnim plinovima, te su u tom smislu bolja u usporedbi sa starijim izvedbama ložišta s izgaranjem na rešetki. Presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju prikazan je na slici 15. Na izbor tehnologije izgaranja utječu veličina postrojenja, značajke biomase, dopuštena razina emisije štetnih tvari, količina i opseg održavanja koje je investitor/vlasnik spreman prihvatiti. Izbor tehnologije izgaranja nema prevelik utjecaj na specifični potrošak topline u postrojenju. Na specifičnu potrošnju topline više utječe konfiguracija parno turbinskog procesa. Suvremena postrojenja s izgaranjem na rešetki uobičajeno su jeftinija od postrojenja s izgaranjem u



fluidiziranom sloju. Fluidizacija sloja povećava efikasnost izgaranja ali i zahtijeva dodatnu energiju za pogon ventilatora zraka što povećava vlastitu potrošnju električne energije kogeneracijskog postrojenja.



**Slika 15. Presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju: mješurica (lijevo) i cirkulirajući (desno)**

Radi usporedbe, u tablici 5. je prikazan pregled parametara komercijalnih reaktora za rasplinjavanje i prednosti i nedostaci za svaki od navedenih reaktora.

**Tablica 5. Usporedba reaktora za rasplinjavanje[4]**

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

### 3.3. Katran kao nusproizvod termičkog režima oksidacije (rasplinjavanja)

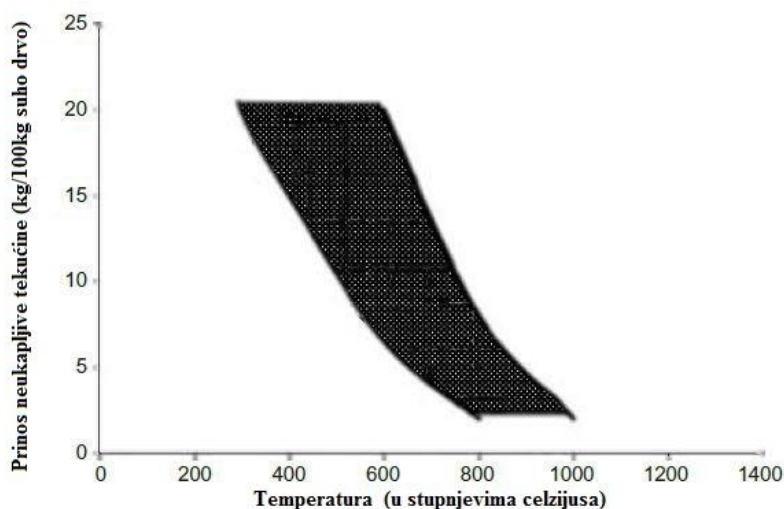
Katran predstavlja glavnu smetnju u rasplinjavanju i pirolizi. To je gusta, crna, vrlo viskozna tekućina koja se kondenzira u nisko temperaturnim zonama rasplinjavanja, on dovodi do začepjenja prolaza plina i dovodi do poremećaja u sustavu. On je vrlo nepoželjan sa tehničkih aspekata, jer može stvoriti mnoge probleme, uključujući:

- Kondenzaciju i naknadno začepljenje nishodne opreme,
- Formuliranje aerosola (katranski aerosoli),
- Polimerizacija katrana u složenije strukture.

Ipak, katran je nezaobilazni nusprodukt postupka toplinske pretvorbe i predstavlja kompleksnu smjesu kondenzirajućih ugljikovodika, koji i sadrži kisik i neke složene poliaromatske ugljikovodike (Devi et al., 2003.). Organske tvari, proizvedene pod termičkim ili djelomičnim režimom oksidacije (rasplinjavanja) od strane svakog organskog materijala, nazivaju se katranom. Uobičajena predodžba o katranu je da je proizvod rasplinjavanja i pirolize koji potencijalno može kondenzirati jedinice u njihovim hladnijim donjim tokovima.

### 3.4. Uklanjanje katrana

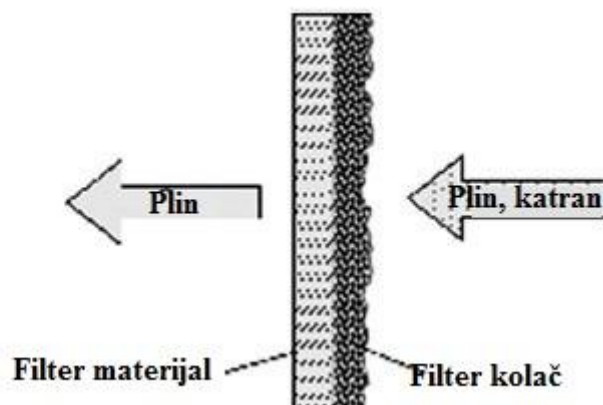
Katran je mješavina kondenziranih ugljikovodika, poliaromata i različitih neizgorelih organskih i anorganskih čestica. Zbog nemogućnosti daljnje prerade, katran predstavlja najveću zapreku u procesu rasplinjavanja biomase, pa ga je potrebno ukloniti iz procesa. Udio negorivih tvari u gorivu određuje koji je sustav potreban za pročišćavanje dobivenog plina. U praksi jedino gorivo koje ne sadrži negorive sastojke je visokokvalitetni drveni ugljen. Kao pravilo se uzima da se goriva s udjelom negorivih elemenata većim od 10 % trebaju koristiti u istosmjernim rasplinjačima, jer bi u protusmjernom veliki dio pepela ostao u dobivenom plinu. Pepeo može uzrokovati niz problema u korištenju rasplinjača. Stvaranje šljake i začepljenje rasplinjača, zbog topljenja i okrupnjavanja pepela dovodi do dodatne količine utrošenog rada (povećani gubici tlaka), i ako se mjere čišćenja ne poduzmu, može doći do prekomjernog taloženja katrana i do potpunog začepjivanja reaktora. U najgorem slučaju to može dovesti do prodora zraka i eksplozije, pogotovo kod protusmjernih rasplinjača. Hoće li doći do prekomjernog taloženja pepela ovisi o kemijskom sastavu pepela, odnosno temperaturi topljenja pepela. U pravilu taloženje se ne događa kod upotrebe goriva s udjelom pepela do 6 %, dok se s gorivom koje ima udio pepela iznad 12 % može očekivati znatnije taloženje. Za goriva s udjelima pepela od 6 – 12 % važno je poznavati temperature koje se postižu u reaktoru unutar rasplinjača. Ako su one više od temperature topljenja pepela dolazi do taloženja. [8] Dijagram na slici 16. prikazuje količine nastalog katrana tijekom procesa rasplinjavanja ovisno o temperaturi.



**Slika 16. Količina nastalog katrana ovisno o temperaturi rasplinjavanja**

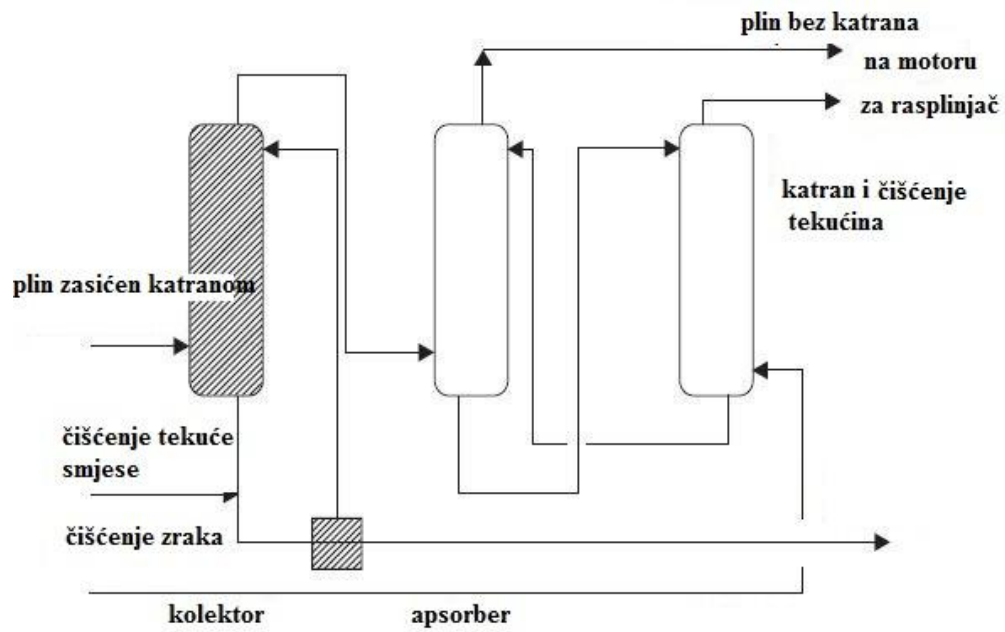
Pri temperaturi od 500°C neizgoreni dio biomase se pretvara u tzv. primarni katran, naziva se još drveno ulje ili katransko crno ulje. Tada nastaje i ugljen. Na višoj temperaturi nastaje sekundarni katran i plinovi koji se ne kondenziraju. Prema svom kemijskom sastavu, katran se sastoji od spojeva kao što su benzeni, toluen, naftalen, fenoli, aromati i sl. koje nije moguće dalje preraditi i iskoristiti tijekom rasplinjavanja. Stoga katran treba ukloniti ili reducirati, što je moguće:

- a) dodatnim rasplinjavanjem ili sekundarnom redukcijom kada se uklanjaju plinovi iz nastalog katrana. To se postiže prilagodbom radnih uvjeta rasplinjača, dodavanjem katalizatora ili alternativnih materijala u fluidiziranom sloju te prilagodbom konstrukcije rasplinjača
- b) primarnom redukcijom katrana čime se sprečava nastajanje katrana, na način da se čestice fizički uklone i da se smanji njihova koncentracija. Uklanjanje se postiže primjenom uređaja koji rade na principu ciklona, pomoću filtra što je prikazano na slici , pomoću elektrostatskih zaustavljača, uređaja za apsorpiranje čestica ili procesima kreiranja.



**Slika 17. Uklanjanje čestica katrana pomoću filtra**

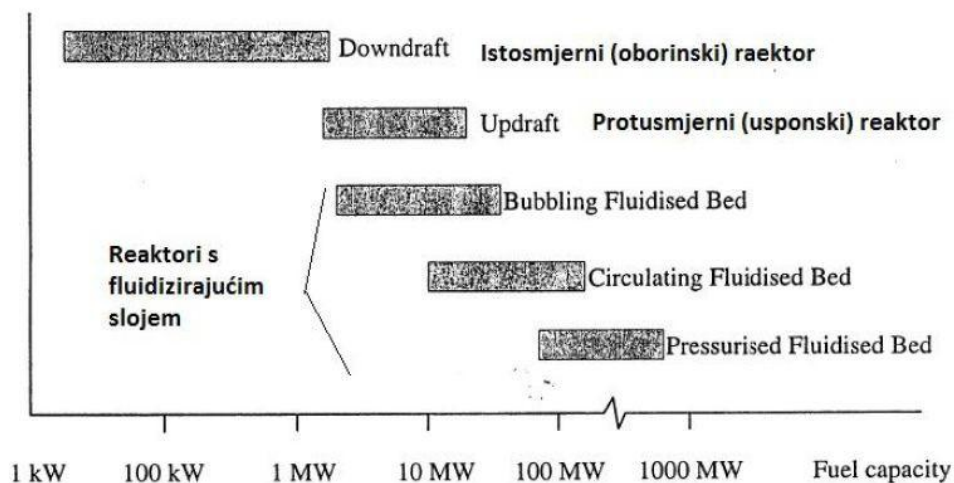
Proces krekiranja katrana može biti termički i katalitički. Termičko krekiranje bez prisutnosti katalizatora je moguće na višim temperaturama oko 1200°C. Potrebno je dodati kisik kako bi se poboljšao proces i uklonile čestice. Katalitičko krekiranje se koristi u brojnim postrojenjima za uklanjanje katrana i drugih nepoželjnih tvari iz nastalog plina. Proces se temelji na prolasku plina koji sadrži čestice nečistoće preko katalizatora. Reakcije su endotermičke. Izbor odgovarajućeg procesa krekiranja ovisi o brojnim faktorima poput ekonomske isplativosti, vrste biomase i njenim fizikalnim i kemijskim karakteristikama, tehnološkom procesu, konstrukciji rasplinjača i sl. Jedan od komercijalno primjenjivih načina uklanjanja katrana je metoda ubrizgavanja posebne skruberske tekućine na plin. Na slici 18 je prikazana navedena tehnologije, gdje se čestice nečistoće i katrana sudaraju sa raspršenim kapljicama i formiraju velike kapi. Tako nastale kapi je jednostavno ukloniti pomoću uređaja koji vrše odvajanje primjenom efekta ciklona. Plin nastao iz biomase mora biti ohlađen na temperaturu nižu od 100°C prije uklanjanja katranskih čestica. Tekućina za uklanjanje katrana se može ponovo ubrizgati u proces ili ići na izgaranje. Ovakav način uklanjanja katrana ima učinkovitost veću od 90%, međutim, ukoliko veličina katranskih čestica padne ispod 1µm, proces više nije toliko učinkovit.



Slika 18. Shema uklanjanja katrana pomoću ubrizgane tekućine

#### 4. TIPOVI RASPLINJAČA

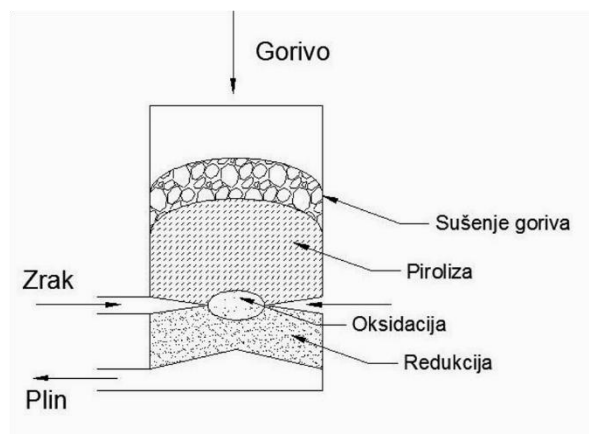
Postoji na stotine različitih vrsta rasplinjača. Oni se mogu podijeliti u nekoliko skupina. U navedenim tipovima reaktora, biomasa se puni na vrhu reaktora i polako se gravitacijski spušta. Tijekom kretanja prema dolje, gorivo reagira sa dovedenim zrakom, te se proizvodi gorivi generatorski plin pomoću složenih procesa oksidacije, redukcije i pirolize. Pepeo se na kraju ukloni s dna reaktora. Treba naglasiti da svaki reaktor za rasplinjavanje funkcionira isključivo za uzak radni kapacitet. Primjerice, reaktori za rasplinjavanje s pomičnim ložištem koriste se za manje snage, reaktori sa fluidiziranim slojem su prikladni za srednje i veće snage. Na Slici 19. su prikazani tipovi reaktora za rasplinjavanje ovisno o radnim kapacitetima koje pokrivaju pa istosmjerni reaktori pokrivaju područja do 1MW snage, protusmjerni reaktori su namijenjeni za kapacitete do 50 MW snage i tako redom. Radni kapacitet treba uzeti u obzir kada se projektira postrojenje za rasplinjavanje i posebice kod izbora reaktora i prateće opreme. [5]



**Slika 19. Vrste reaktora ovisno o radnom kapacitetu**

#### 4.1. Istosmjerni rasplinjač

Istosmjerni rasplinjača dobio je takav naziv jer u generatoru gorivo i plin imaju isti smjer strujanja, što je prikazano na slici 20. Razvijen je radi potrebe za dobivanjem čisteg plina u odnosu na protusmjernu vrstu rasplinjača. Kod ovog tipa rasplinjača zrak za rasplinjavanje se uvodi iznad ili u zoni oksidacije goriva, dok se plin ispušta na dnu generatora. Gorivo se uvodi u gornje hladnije dijelove generatora te se polako i ne reagirajući zagrijava. Paljenje goriva počinje tek u području pregrijane površine goriva, gdje je temperatura dovoljno visoka za početak reakcije. Temperatura zapaljenja postiže se zračenjem donjih užarenih slojeva.

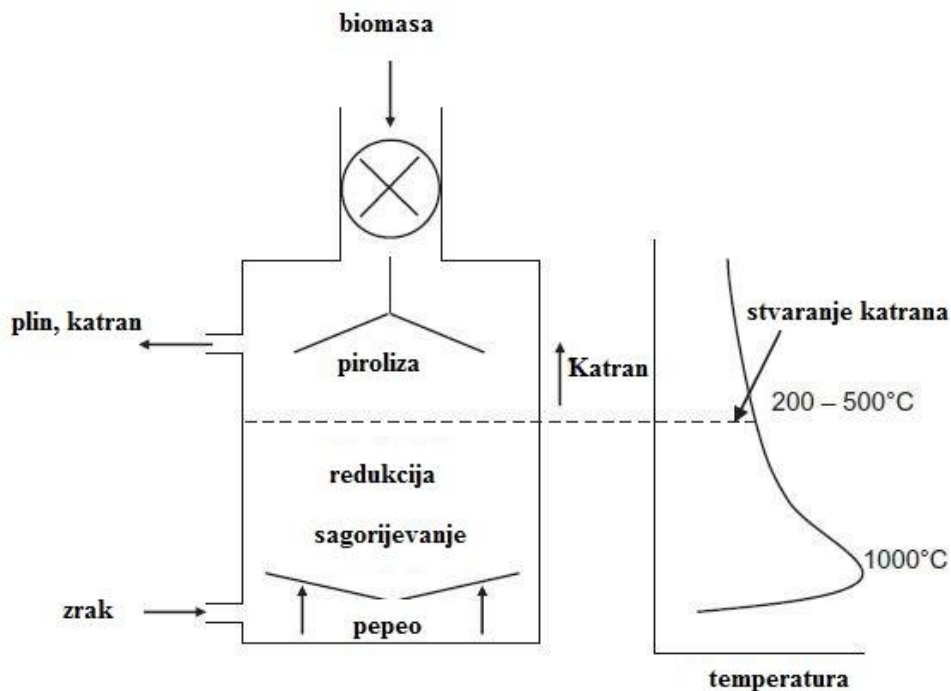


**Slika 20. Karakteristike istosmjernog rasplinjača**

Katran i kiseline, produkti pirolize goriva, moraju proći kroz užareni sloj otpada gdje se prevode u vodik, ugljikov dioksid, ugljikov monoksid i metan. Ovisno o temperaturi u tom sloju i o vremenu provedenom u oksidacijskom sloju može se postići potpuni raspad katrana u plin, što je prikazano na slici 21. Mogućnost dobivanja gotovo potpuno čistog plina od katrana je najveća prednost istosmjernog tipa rasplinjača. Dobiveni plin se može koristiti bez naknadnog pročišćavanja u motorima s unutrašnjim izgaranjem.

[1]





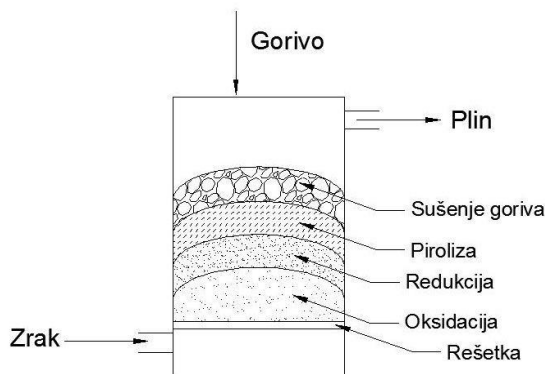
**Slika 21. Nastanak katrana u istosmjernom rasplinjaču**

Najveća mana ovog tipa rasplinjača leži u nemogućnosti korištenja niza vrsta goriva bez prijašnje obrade. Goriva s malom nasipnom gustoćom dovode do problema s protokom i do povećanog pada tlaka, zbog toga što plin prolazi kroz gorivo, tako da ta goriva moraju biti peletizirana ili briketizirana prije upotrebe. Također, istosmjerni rasplinjači imaju više problema s gorivima s velikim udjelom pepela nego protusmjerni, što dovodi do taloženja pepela. Istosmjerni rasplinjači imaju nešto slabiju toplinsku efikasnost budući da nema unutarnje izmjene topline između plina i goriva, pa zbog toga plin izlazi iz rasplinjača s relativno visokom temperaturom dok dobiveni plin ima obično nižu ogrjevnu vrijednost. Kod istosmjernih se rasplinjača postižu niže temperature nego što je to moguće kod drugih generatora, te se treba obratiti pažnju na nepovoljan utjecaj nižih temperatura na brzinu reakcije, a time i na kvalitetu plina, pogotovo, ako se temperatura kreće oko granice reaktivnosti goriva. Slika prikazuje smjer kojim izlaze produkti izgaranja i katran te temperature pri kojima nastaje katran u procesu rasplinjavanja. [5]

## 4.2. Protusmjerni rasplinjač

Najstariji i najjednostavniji tip rasplinjača je protusmjerni rasplinjač prikazan na slici 22.

Gorivo se dodaje na vrhu rasplinjača, dok se zrak uvodi na dnu. Generirani plin tako mijenja temperaturu od niske na ulazu-temperature zraka, koji se tada zagrijava prema najvišoj temperaturi na granici zone izgaranja i rasplinjavanja, da bi se prema izlazu ponovo smanjivala, budući se toplina plina odvodi hladnim gorivom.



### Slika 22. Karakteristike protusmjernog rasplinjača

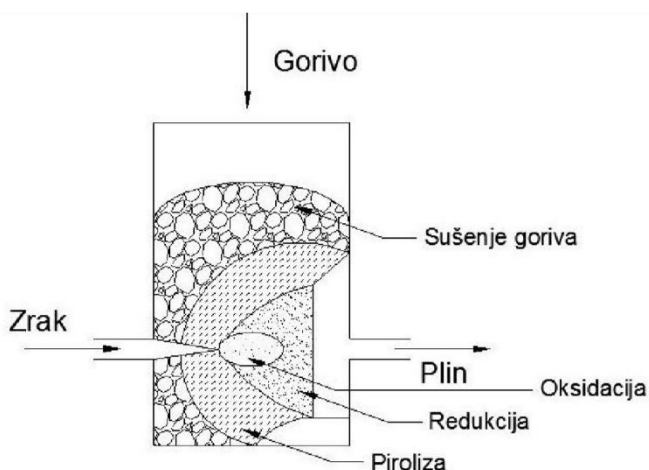
Na dnu, kod rešetke, nalazi se zona izgaranja, a iznad nje zona redukcije. U gornjem dijelu rasplinjača odvija se zagrijavanje i piroliza goriva, kao rezultat prijenosa topline prisilnom konvekcijom i zračenjem iz donjih slojeva. Katran i hlapljivi spojevi nastali u ovom dijelu bivaju odnošeni strujom plina, dok se pepeo nakuplja na dnu. Najveća prednost protusmjernog rasplinjača je njegova jednostavnost i unutarnja izmjena topline između plina i goriva, što dovodi do relativno niske izlazne temperature dobivenog plina, pa nije potrebno njegovo dodatno hlađenje izvan generatora.

To doprinosi visokoj toplinskoj efikasnosti ovakvog tipa rasplinjača, koji ujedno može koristiti širok raspon kvalitete goriva. Najveći nedostaci ovog tipa su mogućnost pojave kanala u slojevima, što može dovesti do prolaska kisika kroz različite slojeve, te posljedično, i eksplozije. Zbog ovih nedostataka postoji potreba za ugradnjom mehanizma za trešnju rešetke radi sprečavanja stvaranja kanala kroz slojeve. Također,

zbog visokog udjela katrana u dobivenom plinu potreban je složeniji sustav za čišćenje plina u slučaju korištenja plina u motorima s unutrašnjim izgaranjem. Temperatura reakcije kod protusmjernih rasplinjača znatno je veća od temperature kod istosmjernih, te razlika može biti i do 300°C, što treba imati u vidu zbog teškoća koje se znaju javljati u stvarnom pogonu s troškom, zbog niskog tališta.

### 4.3. Unakrsni rasplinjač

Unakrsni tip rasplinjača je razvijen za korištenje s drvenim ugljenom kao gorivom. Korištenje drvenog ugljena kao goriva rezultira visokom temperaturom (1500°C) u oksidacijskoj zoni, što može dovesti do problema s materijalom stjenke kod ostalih tipova rasplinjača.



**Slika 23. Karakteristike unakrsnog izmjenjivača**

U unakrsnom tipu rasplinjača kao toplinski izolator od visokih temperatura služi samo gorivo tj. drveni ugljen. Princip rada rasplinjača prikazan je na slici 23. gdje gorivo dolazi sa gornje strane rasplinjača a zrak sa bočne strane. Prednost ovog tipa rasplinjača leži u mogućnosti konvekcijom i zračenjem iz donjih slojeva. Katran i hlapljivi spojevi nastali u ovom dijelu bivaju odnošeni strujom plina, dok se pepeo nakuplja na dnu. Najveća prednost protusmjernog rasplinjača je njegova jednostavnost i unutarnja

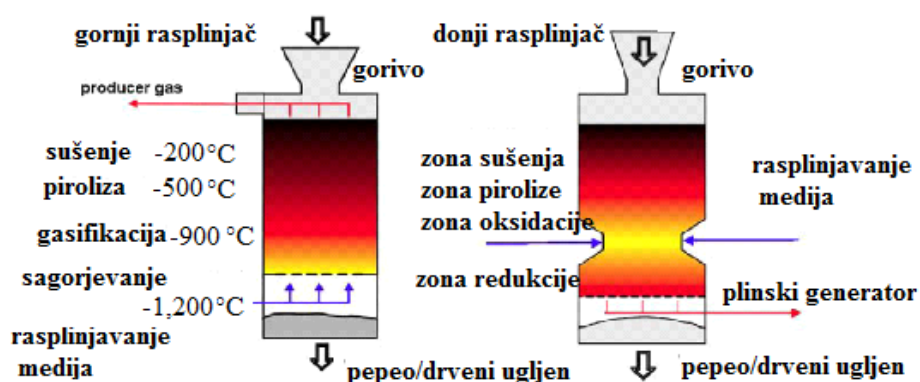
izmjena topline između plina i goriva, što dovodi do relativno niske izlazne temperature dobivenog plina, pa nije potrebno njegovo dodatno hlađenje izvan generatora.

To doprinosi visokoj toplinskoj efikasnosti ovakvog tipa rasplinjača, koji ujedno može koristiti širok raspon kvalitete goriva. Najveći nedostaci ovog tipa su mogućnost pojave kanala u slojevima, što može dovesti do prolaska kisika kroz različite slojeve, te posljedično, i eksplozije. Zbog ovih nedostataka postoji potreba za ugradnjom mehanizma za trešnju rešetke radi sprečavanja stvaranja kanala kroz slojeve. Također, zbog visokog udjela katrana u dobivenom plinu potreban je složeniji sustav za čišćenje plina u slučaju korištenja plina u motorima s unutrašnjim izgaranjem. Temperatura reakcije kod protusmjernih rasplinjača znatno je veća od temperature kod istosmjernih, te razlika može biti i do 300°C, što treba imati u vidu zbog teškoća koje se znaju javljati u stvarnom pogonu s troškom, zbog niskog tališta.

#### 4.4. Izvedbena podjela rasplinjača

##### a) Rasplinjavanje u fiksnom sloju

Vertikalni rasplinjači u kojima se odvija rasplinjavanje u fiksnom sloju (eng. VFB) imaju rasplinjavanje u fiksnom sloju. Dijele se na protusmjerne (eng. updraft) i istosmjerne (eng. downdraft), što prikazuje slika 24.



Slika 24. Shema protustrujnog-uzlaznog (updraft) i istostrujnog – silaznog (downdraft) reaktora

Kod protusmjernih rasplinjača, materijal koji se rasplinjava se dodaje na vrhu rasplinjača, dok zrak ulazi s dna. Materijal se rasplinjava u kretanju prema donjem dijelu rasplinjača. Faze odvijanja procesa kreću se od sušenja, pirolize, redukcije do oksidacije. Najviša temperatura je u zoni oksidacije i kreće se oko i iznad 1200 °C. Posljedica kretanja materijala koji se rasplinjava i sintetskog plina, katran iz faze pirolize odlazi s plinom, te se dobiva sintetski plin s velikim sadržajem katrana. Dobra strana protusmjernog rasplinjača je jako dobra izmjena topline unutar reaktora, budući se sintetski plin hladi u kretanju prema vrhu rasplinjača, a predaje toplinu hladnom materijalu koji tek ulazi u rasplinjač. Kod istosmjernih rasplinjača, materijal se dodaje na vrhu rasplinjača, dok zrak ulazi sa strane, iznad rešetke, a dobiveni sintetski plin izlazi iz rasplinjača ispod rešetke. Zbog ovakve konfiguracije, pare nastale procesom pirolize omogućavaju učinkovit termički krekning katrana. Unutarnja izmjena topline nije tako dobra kao kod protusmjernih rasplinjača.

Za kogeneracijska postrojenja na biomasu najčešće se koriste istostrujni i protustrujni reaktori s rasplinjavanjem na nepokretnoj rešetki koji su shematski prikazani na slici. U pogonu je i više demonstracijskih postrojenja s rasplinjavanjem u fluidiziranom sloju. Glavna značajka uzlaznog (updraft) rasplinjača je mogućnost korištenja relativno vlažnih goriva (s masenim udjelom vlage i do 50 %) kao i sječke različite veličine (5 - 100 mm). Pogodni su za primjenu u postrojenjima u rasponu kapaciteta od 10 kWt do 20 MWt. Postoji mogućnosti i serijske proizvodnje.

Kod silaznih ili nizstrujnih (downdraft) rasplinjača produkti pirolize prolaze kroz vruću zonu rasplinjavanja drvenog ugljena što u znatnoj mjeri snižava udio katrana u reaktorskom plinu.

Niži udjeli katrana omogućavaju primjenu jednostavnijeg, a time i jeftinijeg sustava čišćenja reaktorskog plina koji je nužan na postrojenjima koja reaktorski plin koriste za pogon motora s unutarnjim izgaranjem. Silazni rasplinjači osjetljiviji su na veličinu čestica (20 -100 mm) i na vlažnost goriva koja je ograničena na 20 %. Postrojenja se mogu izvesti u rasponu kapaciteta 10 kWt do 10 MWt. Glavna prepreka

komercijalizaciji je osjetljivost na kvalitetu goriva, jer samo visokokvalitetno gorivo jamči nizak sadržaj katrana u reaktorskom plinu. Kod silaznih rasplinjača uočen je i problem održavanja pogonskih parametara na opterećenjima nižim od nazivnih.

## 5. ZAKLJUČAK

Biomasa predstavlja veliki potencijal za dobivanje korisne energije u svrhu neovisnosti o fosilnim gorivima, uvoznj energiji i očuvanju okoliša. Hrvatska se kao potpisnica Kyoto protokola i članica Europske Unije obavezala na smanjenje štetnih emisija plinova i zaštitu okoliša, koje je jednim dijelom moguće ostvariti okretanju obnovljivim izvorima energije, pogotovo biomase koja ima veliki potencijal u Hrvatskoj. Države Europske unije i svijeta razvijaju pomažu projekte korištenja energije biomase. U svrhu korištenja biomase, potrebno je poznavati njene prednosti i karakteristike te procese pretvorbe kemijske energije pohranjene u biomasi u druge oblike energije.

Tema ovog završnog rada istražila je rasplinjavanje biomase kao jedan od procesa pretvorbe energije sa posebnim osvrtom na karakteristike rasplinjavanja i tipove postojećih rasplinjača. Ovisno o tehnološkom procesu rasplinjavanja zavisi konstrukcija i izbor rasplinjača koji mogu doprinijeti efikasnosti procesa. Pri tome je važno smanjiti ili u potpunosti ukloniti nepoželjne produkte izgaranja poput katrana i pepela kako bi plin nastao izgaranjem imao što manji postotak čestica. Uklanjanje katrana moguće je provesti mehaničkim putem pomoću filtracije ili primjenom katalizatora u kemijskom procesu krekiranja. Time se povećava količina plina dobivenog rasplinjavanjem a time i bolje iskorištava prikupljena biomasa. S obzirom na daljnji razvoj tehnologije u ovom području te nestabilne uvjete na tržištu fosilnih goriva i sve veću potrebu za energijom u svijetu, biomasa postaje sve više isplativ obnovljivi izvor energije.

## 6. LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Basu, P.: Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction, Elsevier International, USA, 2013
- [3] [http://oie.mingorp.hr/UserDocsImages/BIOCHP\\_HR.pdf](http://oie.mingorp.hr/UserDocsImages/BIOCHP_HR.pdf)  
(11. veljače 2016.)
- [4] Damić, D.: Upotrebljivost *dual fuemotora* pogonjenih proizvodnim plinom s aspekta smanjenja onečišćenja zraka – moguća alternativa klasičnim dizelskim motorima, *Scientific Journal of Maritime Research*, 26/1(2012), str. 3-25
- [5] <http://energy.kruger.com/en/biomass/>(21. veljače 2016.)
- [6] Šljivac, Stojkov, Markanović, Topić, Janković, Hnatko, „Energetska učinkovitost rasplinjavanja drvene biomase u proizvodnji električne energije“
- [7] <http://www.sumari.hr/biomasa/osijek2009/2-4.pdf>(17. siječnja 2016.)
- [8] Bogdan, Bruno, „Energetska uporaba komunalnog otpada postupkom rasplinjavanja“, 2010.