



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Tijana Kosanić

UTICAJ PROCESNIH PARAMETARA NA PIROLIZU DRVNE BIOMASE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2015.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



UTICAJ PROCESNIH PARAMETARA NA PIROLIZU DRVNE BIOMASE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor

Dr Slavko Đurić, vanredni profesor

Kandidat

MSc Tijana Kosanić

Novi Sad, 2015.



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, RBR :		
Identifikacioni broj, IBR :		
Tip dokumentacije, TD :	Monografska dokumentacija	
Tip zapisa, TZ :	Tekstualni štampani materijal	
Vrsta rada, VR :	Doktorski rad	
Autor, AU :	Tijana Kosanić, dipl. inž. zaštite životne sredine - master	
Mentor, MN :	Dr Slavko Đurić, vanredni profesor	
Naslov rada, NR :	Uticao procesnih parametara na pirolizu drvne biomase	
Jezik publikacije, JP :	Srpski	
Jezik izvoda, JL :	Srpski/Engleski	
Zemlja publikovanja, ZP :	Srbija	
Uže geografsko područje, UGP :	Vojvodina	
Godina, GO :	2015.	
Izdavač, IZ :	Autorski reprint	
Mesto i adresa, MA :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Fizički opis rada, FO : <small>(poglavlja/strana/ citata/tabela/slika/grafika/priloga)</small>	6/205/120/38/52/-/13	
Naučna oblast, NO :	Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu	
Naučna disciplina, ND :	Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu	
Predmetna odrednica/Ključne reči, PO :	Drvena biomasa, piroliza, prinos gasa, prinos čvrstog (koksno) ostatka, prinos bio-ulja	
UDK		
Čuva se, ČU :	U biblioteci Fakulteta tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad	
Važna napomena, VN :		
Izvod, IZ :	U doktorskoj disertaciji vršeno je istraživanje mogućnosti konverzije energije različitih vrsta drvne biomase procesom pirolize. Ispitivano drvenu biomasu predstavljale su strugotina hrasta, bukve, trešnje, oraha, jele, lipe, kao i mešavina navedenih vrsta. Dobijeni eksperimentalni rezultati ukazuju da prinos gasa, tečne i čvrste faze tokom odvijanja procesa pirolize zavise od reakcionog vremena, temperature i brzine zagrevanja.	
Datum prihvatanja teme, DP :		
Datum odbrane, DO :		
Članovi komisije, KO :	Predsednik: Dr Vojin Grković, redovni profesor	
	Član: Dr Aleksandar Jovović, redovni profesor	
	Član: Dr Branka Nakomčić - Smaragdakis, vanredni profesor	Potpis mentora
	Član: Dr Dragana Štrbac, docent	
	Član, mentor: Dr Slavko Đurić, vanredni profesor	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph documentation
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Ph.D. thesis
Author, AU :	Tijana Kosanić, Master of Environmental Engineering
Mentor, MN :	Ph.D. Slavko Đurić, associate professor
Title, TI :	Influence of process parameters on the pyrolysis of woody biomass
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2015
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	6/205/120/38/52/-/13
Scientific field, SF :	Environmental Engineering and Safety at Work
Scientific discipline, SD :	Environmental Engineering and Safety at Work
Subject/Key words, S/KW :	Woody biomass, pyrolysis, gas yield, char yield, bio-oil yield
UC	
Holding data, HD :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Note, N :	
Abstract, AB :	Doctoral dissertation investigates possibilities for energy conversion of different woody biomass types through pyrolysis process. Investigated woody biomass included oak, beech, cherry, walnut, fir, lime wood chips and their mixture. Obtained experimental results imply that gas, liquid and solid phase yields during pyrolysis process depend on reaction time, temperature and heating rate.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Ph.D. Vojin Grković, full professor
	Member: Ph. D. Aleksandar Jovović, full professor
	Member: Ph.D. Branka Nakomčić - Smaragdakis, associate professor
	Member: Ph.D. Dragana Štrbac, assistant professor
	Member, Mentor: Ph.D. Slavko Đurić, associate professor
	Mentor's sign

SADRŽAJ

Popis slika	i
Popis tabela	iv
Popis oznaka i simbola	vi
1. Uvod	1
1.1. Pregled vladajućih stavova i shvatanja u literaturi u području istraživanja	2
1.2. Predmet i cilj istraživanja	5
1.3. Polazne hipoteze	6
1.4. Naučne metode istraživanja	6
1.5. Struktura rada	6
Literatura	8
2. Zakonska regulativa o obnovljivim izvorima energije	11
2.1. Zakonodavstvo Evropske unije	11
2.2. Zakonodavstvo Republike Srbije	13
2.3. Usklađivanje zakonske regulative Srbije sa EU	18
Literatura	20
3. Karakteristike drvene biomase kao goriva	21
3.1. Sastav drvene biomase kao goriva	21
3.2. Toplotna moć drvene biomase	28
3.3. Poređenje rezultata elementarne i tehničke analize sa literaturnim podacima	31
3.4. Kvalitativna ocena karakteristika drvene biomase	32
Literatura	36
4. Termohemijski procesi prerade biomase	37
4.1. Piroliza	38
4.1.1. Sastav produkata pirolize i njihova primena	38
4.1.2. Procesi pirolize	39
4.1.2.1. Brza piroliza	40
4.1.2.2. Spora piroliza	44
4.1.2.3. Fleš piroliza	45
4.1.5. Prednosti korišćenja procesa pirolize sa stanovišta životne sredine	45
4.2. Gasifikacija	46
4.2.1. Gasifikator sa pokretnim ili fiksnim slojem	48
4.2.1.1. Gasifikator sa uzlaznom strujom oksidanta	48
4.2.1.2. Gasifikator sa silaznom strujom oksidanta	49
4.2.1.3. Unakrsni gasifikator	50
4.2.2. Gasifikator sa fluidizovanim slojem	50

4.2.3. Istosmerni protočni gasifikator	51
4.3. Sagorevanje	52
4.3.1. Ložišta kotlova koja koriste drvenu biomasu kao gorivo	53
4.3.2. Stehiometrijske jednačine sagorevanja drvene biomase	58
4.3.2.1. Brojčani primer proračuna materijalnog bilansa procesa sagorevanja drvene biomase	61
4.3.3. Određivanje adijabatske temperature sagorevanja drvene biomase	64
4.3.3.1. Brojčani primer proračuna entalpije dimnih gasova	66
4.4. Emisija zagađujućih materija iz procesa sagorevanja biomase	69
Literatura	71
5. Eksperimentalno ispitivanje pirolize drvene biomase	73
5.1. Priprema uzorka	73
5.2. Postavka eksperimentalnog postrojenja i postupak merenja	75
5.3. Rezultati i diskusija eksperimentalnog ispitivanja	80
5.3.1. Uticaj temperature na proces pirolize	80
5.3.2. Promena mase uzorka drvene biomase u zavisnosti od reakcionog vremena	82
5.3.3. Uticaj brzine zagrevanja na prinos produkata pirolize	83
5.3.4. Uticaj vrste drvene biomase na prinos produkata pirolize	84
5.3.5. Poređenje prinosa produkata pirolize sa podacima iz literature	86
5.3.6. Sastav produkata pirolize	86
5.3.6.1. Sastav pirolitičkog gasa	86
5.3.6.2. Sastav bio-ulja	91
5.3.6.3. Sastav čvrstog ostatka	93
5.4. Obrada rezultata ispitivanja procesa pirolize mešavine drvene biomase	94
5.4.1. Karakteristike proizvedenog gasa	94
5.4.2. Materijalni bilans	96
5.4.3. Toplotni bilans	100
5.4.4. Stepenn korisnosti pirolitičkog reaktora	102
5.5. Analiza greške pri eksperimentalnom ispitivanju	102
Literatura	112
6. Zaključak	115
Prilozi	118
Prilog 1. Mase i zapremine produkata sagorevanja mešavine drvene biomase u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	118
Prilog 2. Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu	119

Prilog 3. Srednje specifične toplote	120
Prilog 4. i-t dijagram procesa sagorevanja drvne biomase	121
Prilog 5. Piroliza strugotine hrasta (ispitivanje 1)	122
Prilog 6. Piroliza strugotine bukve (ispitivanje 2)	132
Prilog 7. Piroliza strugotine trešnje (ispitivanje 3)	142
Prilog 8. Piroliza strugotine oraha (ispitivanje 4)	152
Prilog 9. Piroliza strugotine jele (ispitivanje 5)	162
Prilog 10. Piroliza strugotine lipe (ispitivanje 6)	172
Prilog 11. Piroliza mešavine drvne biomase (ispitivanje 7)	182
Prilog 12. Piroliza mešavine drvne biomase pri brzini zagrevanja od 32 °C/min	192
Prilog 13. Piroliza mešavine drvne biomase pri brzini zagrevanja od 55 °C/min	194

Popis slika

Naziv slike	Broj stranice
Slika 3.1. D ksiloza	22
Slika 3.2. Celuloza	22
Slika 3.3. Lignin	23
Slika 3.4. Grafi ki prikaz analize sastava drvene biomase	25
Slika 3.5. Uticaj sadržaja vlage na toplotnu mo drvene biomase	27
Slika 3.6. Zavisnost donje toplotne mo i goriva od masenog udela vlage i pepela	30
Slika 3.7. Zavisnost donje toplotne mo i drvene biomase i ugljenika, svedeno na sagorljivu masu	34
Slika 3.8. Zavisnost donje toplotne mo i drvene biomase i isparljivih materija, svedeno na sagorljivu masu	34
Slika 3.9. Zavisnost fiksnog ugljenika i koeficijenta M, svedeno na sagorljivu masu	35
Slika 3.10. Zavisnost isparljivih materija i koeficijenta M, svedeno na sagorljivu masu	35
Slika 4.1. Termohemijski procesi prerade biomase	37
Slika 4.2. Postupak ablativne pirolize	41
Slika 4.3. Proces brze pirolize u reaktoru sa barbotажnim fluidizovanim slojem	42
Slika 4.4. Proces brze pirolize u reaktoru sa cirkulacionim fluidizovanim slojem	43
Slika 4.5. Vakuum piroliti ki proces	44
Slika 4.6. Procesna šema spore pirolize	45
Slika 4.7. Tok reakcija pirolize i gasifikacije	47
Slika 4.8. Šematski prikaz gasifikatora sa uzlaznom strujom oksidanta	49
Slika 4.9. Šematski prikaz gasifikatora sa silaznom strujom oksidanta	49
Slika 4.10. Šematski prikaz unakrsnog gasifikatora	50
Slika 4.11. Šematski prikaz gasifikatora sa fluidizovanim slojem	51
Slika 4.12. Istosmerni proto ni gasifikator	52
Slika 4.13. Šema procesa potpunog i nepotpunog sagorevanja	52
Slika 4.14. Podela ložišta za biomasu prema vrsti i brzini strujanja	54
Slika 4.15. Ložišta sa sagorevanjem u sloju	55
Slika 4.16. Šematski prikaz procesa u ložištu sa pokretnom rešetkom	56

Slika 4.17.	Šematski prikaz ložišta sa zakošenom rešetkom	56
Slika 4.18.	Ložišta se sagorevanjem u fluidizovanom sloju	57
Slika 4.19.	Ložište sa sistemom za uduvavanje biomase u komoru za sagorevanje	57
Slika 4.20.	Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja drvene biomase	63
Slika 4.21.	Zapremina dimnih gasova u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	64
Slika 4.22.	Sastav vlažnih dimnih gasova u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	64
Slika 4.23.	Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja drvene biomase i koeficijenta viška vazduha	68
Slika 5.1.	Mlin za drvni otpad i biomasu TFS-420, proizvođač Termis MKM doo, Knjaževac	73
Slika 5.2.	Metoda uzorkovanja pomoću četvrtina	74
Slika 5.3.	Fotografski prikaz uzoraka različitih vrsta drvene biomase korišćenih za eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize	74
Slika 5.4.	Šema eksperimentalnog postrojenja i mernih mesta za pirolizu drvene biomase	75
Slika 5.5.	Šema električne peći	77
Slika 5.6.	Šema reaktorske posude	78
Slika 5.7.	Fotografski izgled električne peći i reaktorske posude	78
Slika 5.8.	Fotografski izgled laboratorijskog postrojenja za pirolizu drvene biomase	79
Slika 5.9.	Promena masenog udela uzoraka drvene biomase u zavisnosti od temperature pirolize	81
Slika 5.10.	Kriva promene masenog udela uzorka drvene biomase u zavisnosti od reakcionog vremena	82
Slika 5.11.	Kriva gubitka mase uzorka mešavine drvene biomase u zavisnosti od reakcionog vremena i brzine zagrevanja uzorka	84
Slika 5.12.	Prikaz uzoraka drvene biomase pre procesa pirolize, vrstog ostatka i tečne faze	84
Slika 5.13.	Maseni udeo produkata pirolize drvene biomase pri temperaturi 650 °C	85
Slika 5.14.	Promene zapreminskih udela CO ₂ tokom procesa pirolize različitih vrsta drvene biomase u zavisnosti od reakcione temperature	87
Slika 5.15.	Promene zapreminskih udela CH ₄ tokom procesa pirolize različitih vrsta drvene biomase u zavisnosti od reakcione temperature	88

Slika 5.16.	Pore enje zapreminskih udela CO ₂ i CH ₄ u gasu dobijenom pirolizom hrasta sa podacima iz literature	90
Slika 5.17.	Pore enje zapreminskih udela CO ₂ , CH ₄ i H ₂ u gasu dobijenom pirolizom bukve sa podacima iz literature	90
Slika 5.18.	Šema bilansa materije u piroliti kom reaktoru	100
Slika 5.19.	Šema bilansa toplote u piroliti kom reaktoru	102

Popis tabela

Naziv tabele	Broj stranice
Tabela 3.1. Elementarni hemijski sastav nekih vrsta drveta	23
Tabela 3.2. Faktori konverzije za elementarne analize	25
Tabela 3.3. Maseni udeo mineralnih materija u apsolutno suvom drvetu	27
Tabela 3.4. Vlažnost različitih vrsta drvene mase	28
Tabela 3.5. Gornje toplotne moći ksilema i kore nekih domaćih vrsta drveća	28
Tabela 3.6. Toplotne moći različitih vrsta goriva	30
Tabela 3.7. Gustina različitih vrsta drveta	30
Tabela 3.8. Elementarna i tehnička analiza različitih vrsta drvene biomase	31
Tabela 3.9. Elementarna i tehnička analiza mešavine drvene biomase korišćene pri eksperimentalnom ispitivanju	31
Tabela 3.10. Kvalitativne karakteristike drvene biomase	33
Tabela 4.1. Karakteristike bio-ulja dobijene pirolizom drvene biomase	39
Tabela 4.2. Zavisnost konstanti ravnoteža hemijskih reakcija od temperature	68
Tabela 4.3. Specifične emisije gasovitih zagađujućih materija nastalih pri sagorevanju goriva	69
Tabela 4.4. Udeo teških metala i organskih jedinjenja u kompostu (suva osnova)	70
Tabela 5.1. Elementarna i tehnička analiza mešavine drvene biomase korišćene pri eksperimentalnom ispitivanju	75
Tabela 5.2. Opis mernih instrumenata korišćenih tokom eksperimentalnog ispitivanja	76
Tabela 5.3. Promena masenog udela uzoraka drvene biomase u zavisnosti od temperature pirolize	81
Tabela 5.4. Elementarna i tehnička analiza različitih vrsta drvene biomase	85
Tabela 5.5. Poređenje prinosa produkata pirolize drvene biomase sa podacima iz literature	86
Tabela 5.6. Poređenje sastava gasa dobijenog pirolizom drvene biomase sa podacima iz literature	89
Tabela 5.7. Karakteristike bio-ulja dobijenog pirolizom drvene biomase	92
Tabela 5.8. Osnovne karakteristike bio-ulja dobijenog pirolizom drvene biomase	93
Tabela 5.9. Osobine vrstog ostatka dobijenog pirolizom različitih vrsti drvene biomase	94

Tabela 5.10.	Greške merenja prinosa produkata strugotine hrasta na kraju procesa pirolize (ispitivanje 1)	104
Tabela 5.11.	Greške merenja zapreminskih udela CO ₂ , O ₂ i CH ₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine hrasta na 650 °C (ispitivanje 1)	105
Tabela 5.12.	Greške merenja prinosa produkata strugotine bukve na kraju procesa pirolize (ispitivanje 2)	105
Tabela 5.13.	Greške merenja zapreminskih udela CO ₂ , O ₂ i CH ₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine bukve na 650 °C (ispitivanje 2)	106
Tabela 5.14.	Greške merenja prinosa produkata strugotine trešnje na kraju procesa pirolize (ispitivanje 3)	106
Tabela 5.15.	Greške merenja zapreminskih udela CO ₂ , O ₂ i CH ₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine trešnje na 650 °C (ispitivanje 3)	107
Tabela 5.16.	Greške merenja prinosa produkata strugotine oraha na kraju procesa pirolize (ispitivanje 4)	107
Tabela 5.17.	Greške merenja zapreminskih udela CO ₂ , O ₂ i CH ₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine oraha na 650 °C (ispitivanje 4)	108
Tabela 5.18.	Greške merenja prinosa produkata strugotine jele na kraju procesa pirolize (ispitivanje 5)	108
Tabela 5.19.	Greške merenja zapreminskih udela CO ₂ , O ₂ i CH ₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine jele na 650 °C (ispitivanje 5)	109
Tabela 5.20.	Greške merenja prinosa produkata strugotine lipe na kraju procesa pirolize (ispitivanje 6)	109
Tabela 5.21.	Greške merenja zapreminskih udela CO ₂ , O ₂ i CH ₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine lipe na 650 °C (ispitivanje 6)	110
Tabela 5.22.	Greške merenja prinosa produkata mešavine drvene biomase na kraju procesa pirolize (ispitivanje 7)	110
Tabela 5.23.	Greške merenja zapreminskih udela CO ₂ , O ₂ i CH ₄ u gasu dobijenom pirolizom mešavine drvene biomase na 650 °C (ispitivanje 7)	111
Tabela 5.24.	Rezultati eksperimentalnog ispitivanja procesa pirolize sa greškama merenja	111

Popis oznaka i simbola

A	maseni udeo pepela u gorivu, kg/kg ili %
A_p	poprečni presek reaktora, m^2
C	maseni udeo ugljenika u gorivu, kg/kg ili %
C_{fix}	maseni udeo fiksnog ugljenika u gorivu, kg/kg ili %
C_v	koeficijent varijacije, %
c_p	specifični toplotni kapacitet, kJ/kg
d	unutrašnji prečnik reaktora, m
D	broj ponovljenih direktnih merenja
E_G	toplota (energija) grejača, kJ/kg
g_i	maseni udeo komponente i u dimnim gasovima, kg/kg
H	maseni udeo vodonika u gorivu, kg/kg ili %
H_d	donja toplotna moć goriva, kJ/kg
H_g	gornja toplotna moć goriva, kJ/kg
H	entalpija reakcije, kmol
i	entalpija, kJ/kg
i_f	fizička toplota, kJ/kg
K_p	konstanta ravnoteže hemijske reakcije
L	količina vazduha, kg/kg
M	molarna masa, kg/kmol
m	masa uzorka koja se menja tokom vremena, g
m_0	početna masa uzorka, g
m_i	masa komponente i u dimnim gasovima, kg/kg
m_{vl}	masa vlažnog drveta, kg
m_s	masa apsolutno suvog drveta, kg
N	maseni udeo azota u gorivu, kg/kg ili %
n	broj uzoraka
O	maseni udeo kiseonika u gorivu, kg/kg ili %
R	raspon
S	maseni udeo sumpora u gorivu, kg/kg ili %
t	temperatura, °C
T	apsolutna temperatura, K
V_i	zapremina komponente i u dimnim gasovima, m^3/kg
VM	maseni udeo isparljivih materija u gorivu, kg/kg ili %
x_i	relativna greška merenja
η_c	stepen korisnosti pirolitičkog reaktora, %
η_c	stepen konverzije ugljenika, %
η_{N_2}	stepen konverzije azota, %
η_{O_2}	stepen konverzije kiseonika, %

s	stepen konverzije sumpora, %
	koeficijent viška vazduha
	gustina, kg/m ³
	standardno odstupanje
x	srednja kvadratna greška merenja
	vreme, min ili h
i	zapreminski udeo komponente i u dimnim gasovima
\bar{x}	srednja vrednost merenja
\bar{X}	aritmetička sredina
X_i	vrednosti razmatranih (obeležja) karakteristika drvene biomase
x_D	izmerena vrednost
$ x_i $	apsolutna greška merenja
Q	toplotno opterećenje, kJ/m ³
W	maseni udeo vlage u gorivu, kg/kg ili %

1. UVOD

Procesi konverzije energije prisutni su već hiljadama godina. Može se reći da su stari koliko i vegetacija. Plamen koji nastaje pri šumskom požaru jedan je od prvih primera pirolize. Međutim, prošlo je mnogo vremena dok je ljudski rod stekao znanje kako da iskoristi pomenute procese. Korišćenje biomase za dobijanje energije nije se razvijalo istom brzinom kao i proces industrijalizacije usled tada velikih zaliha i niskih cena nafte i prirodnog gasa. Tek nedavno je došlo do porasta interesovanja za konverziju energije iz biomase, usled sve veće zagađenosti vazduha “gasovima staklene bašte”, sve manjih zaliha i većih cena nafte i gasa i okretanja obnovljivim i lokalno dostupnim izvorima energije.

Uprkos dugoj tradiciji u korišćenju drveta kao energenta (najviše za ogrev), u Srbiji se i dalje koriste fosilna goriva, koja se uvoze u velikim količinama i po visokim cenama. Iskustva iz razvijenih zemalja pokazuju da su dobro organizovane i praktično utemeljene promotivne aktivnosti imale masovne tržišne efekte koji su rezultirali naglim rastom korišćenja drvene biomase koji traje duži niz godina, a prema prognozama, taj trend će se nastaviti i u budućnosti. Zbog toga je danas u razvijenim zemljama drvena biomasa postala jedan od veoma zastupljenih energenata u ukupnoj proizvodnji i potrošnji energije.

Mnoge zemlje širom sveta su uključene u projekte osavremenjavanja energetske tehnologije za konverziju hemijski vezane energije drveta i druge biomase u toplotnu energiju. To su savremeni multidisciplinarni projekti kojima se omogućava korišćenje energetske šuma ili poljoprivredne biomase u energetskim postrojenjima visoke efikasnosti za proizvodnju toplote ili toplote i električne energije. Navedeni projekti dokazuju da energija iz biomase može biti tehnički efikasna, ekonomski isplativa i alternativa fosilnim gorivima. Stvaranje pozitivnog okruženja za upotrebu drvene biomase nosi sa sobom održivo rešenje za buduću energetske potrebe.

Prema podacima JP “Srbijašume”, ukupna površina šuma i šumskog zemljišta u Srbiji iznosi 2252000 ha. Šumovitost Srbije iznosi 29.1%, a razlikuje se po pojedinim regionima: Vojvodina 7.1%, a Centralna Srbija 37.6% (prema Nacionalnoj inventuri šuma Republike Srbije, 2009.). Na osnovu toga, može se zaključiti da je šumovitost bliska svetskoj, koja iznosi 30%, ali je znatno niža od evropske, koja dostiže 46% (2000.). Uvećanje šumovitosti u odnosu na referentnu 1979. godinu iznosi 5.2%, što je imalo pozitivan uticaj na stanje i kvalitet životne sredine. U odnosu na broj stanovnika, šumovitost iznosi 0.3 ha po stanovniku. Od ukupne površine šuma i šumskog zemljišta u državnom i društvenom vlasništvu se nalazi 53% , a u privatnom 47% [1].

Srbija ima veliki potencijal neiskorišćenih drvnih izvora energije. Procenjena količina drvene biomase u Srbiji, koja se može koristiti kao gorivo, iznosi približno 1.65 miliona m³ godišnje,

dok se energetska potencijala šumske biomase, ostavljene da se razlaže posle proizvodnje drvnih sortimenata, procenjuje na 15.6 miliona GJ godišnje. Međutim, uprkos ovom potencijalu, drvo zauzima još uvek niske pozicije u zadovoljenju energetskih potreba. Glavni razlog za to je veliko nerazumevanje da domaća snabdevanje drvnom biomasom može da obezbedi istu energiju iz obnovljivog izvora, kao i dodatne koristi koje drvo pruža. Za Srbiju, neke od ovih koristi uključuju povećanje investicija u razvoj šuma koje će rezultirati povećanim ekonomskim aktivnostima u šumarstvu, povećanim održivim gazdovanjem šuma, značajnim smanjenjem troškova fosilnih goriva koja se uvoze kao i smanjenjem efekta staklene bašte, koji će nastati upotrebom efikasnih i nisko emisivnih uređaja i tehnologija na bazi drvene biomase. Sa više od 12 miliona tona proizvodnje drvnog otpada godišnje, Srbija ima u budućnosti potencijal da razvija svoj bioenergetski sektor, naročito za proizvodnju električne i toplotne energije [2].

1.1. Pregled vladajućih stavova i shvatanja u literaturi u području istraživanja

Drvo se smatra jednim od najznačajnijih obnovljivih izvora energije [3]. Drvena biomasa može se dobiti od zasada koji su namenjeni upravo za proizvodnju drvene biomase, ali i od šumskog otpada ili separacijom komunalnog vrstog otpada [4]. Kao izvor energije, drvena biomasa može da se koristi direktno, primenom procesa sagorevanja, ali i drugih termičkih procesa, kao što su piroliza i gasifikacija, koji omogućavaju pretvaranje drvene biomase u vredne gasovite i tečne proizvode [5]. Piroliza predstavlja prvu fazu svakog termohemijskog procesa prerade biomase [6], zbog čega proizvodi i kinetika pirolize imaju značajan uticaj na procese gasifikacije i insineracije. Gasovite proizvode pirolize uglavnom čine CO, H₂, CO₂, CH₄ i drugi laki ugljovodonici [7-10]. Katran čine ugljovodonici sa visokim udelom ugljenika i druga organska jedinjenja koji isparavaju na temperaturi pirolize a kondenzuju se pri niskoj temperaturi [3]. Vrste ostatak pirolize sastoji se od vrstih jedinjenja ugljenika sa visokim odnosom C/H [3].

Mnogi istraživači u oblasti pirolize drvene biomase [11-15] bavili su se ispitivanjem kinetike procesa pirolize. Najjednostavniji modeli bili su zasnovani na jednoj reakciji razlaganja, što nije omogućilo predviđanje uticaja parametara procesa pirolize na prinos produkata [16]. Drugi modeli su bili zasnovani na reakcijama koje se odvijaju paralelno i predviđaju kinetiku proizvodnje gasa, katrana i vrstog ostatka [17-19]. Razvijeni su i složeniji sistemi reakcija, koji razmatraju dalje razlaganje katrana [20, 21] ili nastanak mešovitog uproduka primarnog razlaganja biomase [14, 22-24]. Takođe, pri procesu pirolize biomase korišćen je i model raspodele energije aktivacije [25, 26]. Većina pomenutih modela razvijena je na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijenih ispitivanjem procesa pirolize biomase. Grieco i Baldi [3] su u svom radu poredili eksperimentalne rezultate pirolize drvene biomase sa predloženim kinetičkim modelom, bazirajućim se pri tome na pronađenu gubitka mase, proizvodnje gasa i bio-ulja. Eksperimentalni rezultati koje su dobili pri manjoj brzini zagrevanja (0.05 - 1 K/s) i pri većoj brzini zagrevanja (na površini uzorka do 100 K/s; u središtu uzorka približno 10 K/s) bili su u saglasnosti sa rezultatima dobijenim modelom. Dupont i ostali [27] su analizirali i razmatrali osnovne karakteristike pirolize drvene biomase, na osnovu niza eksperimenata, kao i korišćenjem detaljnog kinetičkog modela devolatilizacije koji obuhvata i uzastopne reakcije gasovite faze i može da predvidi osnovni sastav gasova. Uticaj veličine čestica i temperature ispitivan je u odnosu na vreme boravka u reaktoru. Zaključili su da je veličina čestica najznačajniji parametar.

Većina ranih istraživanja u oblasti pirolize drvene biomase bila je usmerena na pirolizu pri niskim temperaturama i sporom zagrevanju radi pospešivanja produkcije vrstog (koksno)

ostatka. Nasuprot tome, interes za proizvodnju lepkova i vodonika podstakao je istraživanja pri visokim temperaturama i brzom zagrevanju. Pomenuti uslovi pospešuju proizvodnju te nih i gasovitih produkata uz minimizovanje proizvodnje vrstog ostatka.

Sastav i količina produkata pirolize biomase zavise od niza faktora, koje predstavljaju radni uslovi (brzina zagrevanja, temperatura, vreme reakcije, pritisak i sl.), tip i kvalitet sirovine, konfiguracija reakcionog sistema i drugo, što otežava poređenje rezultata. Mnogi istraživači su u svojim radovima analizirali promenu mase vrstog ostatka u zavisnosti od temperature i došli do zaključka da se sa porastom temperature pirolize smanjuje prinos vrstog ostatka kao i da su najveće promene zabeležene u intervalu od 200 do 400 °C. Müller-Hagedorn i ostali [28] ispitivali su pirolizu tri različite vrste drveta: graba, oraha i škotskog bora i pokazali da za hemijski tretirano drvo graba dolazi do najznačajnije promene masenog udela u opsegu temperature od 200 do 400 °C. Park i ostali [29] razmatrali su pirolizu belog hrasta iz Koreje. Režim gubitka mase kod belog hrasta je takav da je između 250 i 400 °C došlo do kompletne razgradnje. Ispitivanjem pirolize hrasta i bora, Braadbart i ostali [30] došli su do podatka da se u opsegu temperature od 220 do 310 °C izgubi oko 60% od početne mase uzorka.

Horne i Williams [31] ispitivali su pirolizu mešavine drvnog otpada u reaktoru sa fluidizovanim slojem pri temperaturama od 400, 450, 500 i 550 °C. Došli su do zaključka da se prinos ovog proizvoda pirolize biomase može povećati korišćenjem reaktora sa fluidizovanim slojem pri umerenim temperaturama od 400 do 550 °C i pri kratkom vremenu boravka. Pri temperaturama u opsegu od 500 do 550 °C, dobijeni termalni proizvod pirolize bio je homogen i male viskoznosti.

Samolada i ostali [32] proučavali su pirolizu uzoraka drveta granke jele u reaktoru sa fluidizovanim slojem. Ispitivali su sledeće parametre: temperaturu pirolize, srednju veličinu čestica, pritisak, vreme boravka volatila, sadržaj lignina u biomasi i sadržaj vlage. Statistička analiza podataka pokazala je da je temperatura pirolize jedini parametar koji značajno utiče na prinos proizvoda pirolize. Prinos pirolitičkih gasova rastao je proporcionalno sa porastom temperature.

Parametri procesa pirolize kao što su temperatura i brzina zagrevanja utiču na prinos i sastav dobijenih produkata [33]. Brza piroliza pri velikim brzinama zagrevanja (do 1000 °C) i temperaturama ispod 650 °C sa brzim rashlađivanjem izaziva kondenzovanje termalnih proizvoda pirolize pre nego što sekundarne hemijske reakcije razbiju jedinjenja sa velikom molekulskom masom na gasovite produkte [10]. Prinos vrstog ostatka smanjuju velike brzine reakcija. Velike brzine zagrevanja i visoke temperature utiču na povećanje prinosa gasovitih proizvoda. Male brzine zagrevanja i niska temperatura na kraju procesa (do 500 °C), kao i dugo vreme boravka gasa i vrstog ostatka, povećavaju prinos vrstog ostatka usled sekundarnih reakcija koksovanja i repolimerizacije. Međutim, ukoliko se brzina zagrevanja povećava na 20 do 100 °C/min sa maksimalnom temperaturom 600 °C, dolazi do značajnog povećanja prinosa termalne faze i gasa [33]. Bridgwater i Bridge [34] razmatrali su širok opseg pirolitičkih reaktora za sporu i brzu pirolizu i osobine proizvoda pirolize koji nastaju korišćenjem različitih tehnologija. Na primer, za brzu pirolizu se koriste reaktori sa fluidizovanim slojem, ciklonski, istosmerni protok i ablativni reaktori. Spora piroliza izvodi se u reaktorima sa fiksnim slojem i rotacionim pećima.

Williams i Besler [10] su u svom radu eksperimentalno istraživali sporu pirolizu drveta bora u šaržnom reaktoru sa fiksnim slojem u opsegu temperature od 300 do 720 °C i pri brzinama zagrevanja od 5 do 80 K/min. Sastav i karakteristike dobijenih gasova, pirolitičkog ulja i

vrstog ostatka određeni su u zavisnosti od temperature pirolize i brzine zagrevanja. U statičkom šaržnom reaktoru, razlaganjem pri nižoj temperaturi nastaju u najvećoj meri voda, CO i CO₂, a pri visokoj temperaturi, osnovni produkti razlaganja su ulje, voda, H₂, ugljovodoni i gasovi i CO i CO₂ u manjim udelima. Šaržni reaktor sa fiksnim slojem koristili su i Beaumont i Schwob [35] za sporu pirolizu drveta. Potvrdili su da temperatura i brzina zagrevanja imaju najznačajniji uticaj na proizvode pirolize. Zaključili su i da veličina površine utiče na prinos vrstog ostatka, bio-ulja i gasa, ali ne i na sastav bio-ulja. Rezultati koje su dobili pokazali su i da vrsta reaktora utiče na reakcije pirolize.

Prema nekim istraživačima, čak 45-70% suve biomase može se prevesti u kondenzibilne pare (bio-ulje), 10-25% prelazi u nekondenzibilne gasove i oko 10-30% prelazi u vrstog ostatka [36]. Rezultati istraživanja procesa spore pirolize biomase u obliku bukove piljevine, u šaržnom reaktoru na temperaturama od 350 do 450 °C i vremenu reakcije od 95 min, prikazao je u svom radu Bajus [37], i ustanovio da je odnos masenih udela krajnjih produkata pirolize sledeći: 25.1% pirolitičkog gasa, 44.3% tečnog i 30.6% vrstog (koksog) ostatka. Raspodela prinosa produkata pirolize umnogome zavisi od vrste goriva, reaktora i uslova odvijanja procesa, koje se može objasniti različitošću podataka prikazanih u literaturi.

Brza piroliza biomase predstavlja jednu od tehnologija od koje se najviše očekuje u pogledu pretvaranja biomase u tečno gorivo. Tečnost dobijena pirolizom, poznatija kao pirolitičko ulje ili bio-ulje, može da predstavlja alternativu naftnim gorivima u mnogim terminalnim aplikacijama [38]. Međutim, bio-ulje je u potpunosti različito od naftnih goriva, usled čega korišćenje bio-ulja zahteva i razumevanje njegovih karakteristika kao goriva i uvođenje određenih standarda. U toku je izgradnja prvih komercijalnih postrojenja za proizvodnju bio-ulja u Finskoj (Fortum) i Holandiji (Empyro) i projektovanje još jednog komercijalnog postrojenja, od strane brazilske kompanije Ensyn [39]. Ispitivanjem sagorevanja bio-ulja u industrijskim postrojenjima, došlo se do zaključka da je bio-ulje dobijeno pirolizom u terminalnom pogledu odgovarajuća alternativa teškim loživim uljima u sistemima daljinskog grejanja. Trenutno postoje dva ASTM standarda za upotrebu bio-ulja dobijenog brzo pirolizom kao goriva u ložištima, a u toku je i izrada evropskog standarda za ocenu kvaliteta bio-ulja kao goriva.

Istraživanja procesa pirolize biomase najčešće imaju za cilj modifikovanje uslova odvijanja procesa kako bi se povećao prinos bio-ulja, zato što bio-ulje predstavlja neperena tečno biogorivo koje se bez dalje obrade može koristiti u stacionarnim terminalnim jedinicama za dobijanje toplotne ili električne energije ili se može preraditi kako bi se koristilo kao "drop-in" biogorivo. Nasuprot tome, vrstog ostatka dobijen pirolizom smatran je otpadnim proizvodom koji se najčešće sagoreva kako bi obezbedio toplotu potrebnu za odvijanje procesa pirolize. Međutim, skorija istraživanja ukazuju da se vrstog ostatka dobijen pirolizom može koristiti kao gorivo koje značajno utiče na plodnost zemljišta [40-45]. Kako bi se proizveo vrstog ostatka visokog kvaliteta namenjen za upotrebu u poljoprivredi, uglavnom se primenjuje proces spore pirolize [46]. Direktno korišćenje biomase kao goriva podrazumeva suočavanje sa poteškoćama kao što su mala nasipna gustina, mala gustina energije i teško usitnjavanje. Abdullah i Wu [47] pokazali su u svom radu da vrstog ostatka proizveden pirolizom biomase može predstavljati kvalitetno gorivo. Vrstog ostatka ima veći u nasipnu gustinu u odnosu na biomasu i veoma lako se usitnjava, koje se može postići da njegova zapreminska gustina energije bude približno jednaka zapreminskoj gustini energije uglja. Pregledom literature iz oblasti pirolize drvene biomase može se zaključiti da većina istraživača najveću pažnju pridaje optimizaciji parametara procesa pirolize u cilju dobijanja većeg prinosa željenog proizvoda, kao i da su temperatura i brzina zagrevanja parametri za koje se smatra da u najvećoj meri utiču na sastav i prinos proizvoda pirolize.

1.2. Predmet i cilj istraživanja

Istraživanje i izrada doktorske disertacije započeti su u okviru projekta Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, pod nazivom „Tehnologije korišćenja biomase za proizvodnju električne energije i za kogeneraciju“ i nastavljeni u okviru projekta Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije pod nazivom „Razvoj i izgradnja demonstracionog postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije sa gasifikacijom biomase“.

Predmet istraživanja doktorske disertacije predstavljaju mogućnosti konverzije energije procesom pirolize različitih vrsta drvene biomase, i to: hrasta, bukve, trešnje, oraha, jele, lipe, kao i mešavine navedenih vrsta drveta u jednakoj razmeri. Tokom pomenutog procesa pirolize ispitivani su prinos gasa, te ne i vrste faze, kao i promena mase uzorka i sastav gasa u zavisnosti od vremena i temperature.

Literaturni podaci [3-5, 9, 12, 15-20, 22, 24-29] o modelovanju i kinetici pirolize biomase ne mogu dovoljno precizno da predvide prinos i distribuciju proizvoda pirolize. U razmatranoj literaturi nema dovoljno podataka o gasnoj hromatografiji i termogravimetrijskoj analizi mešavine drvene biomase. U tom pogledu, cilj doktorske disertacije je eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize različitih vrsta drvene biomase (strugotina drveta hrasta, bukve, oraha, trešnje, jele, lipe i mešavine navedenih vrsta biomase) kao potencijalnih izvora energije i eksperimentalno ispitivanje sastava mešavine drvene biomase, koje podrazumeva tehničku i elementarnu analizu. Poznavanje sastava goriva definiše potrebne uslove za određivanje materijalnog i toplotnog bilansa procesa pirolize, i može predstavljati polaznu osnovu u fazi projektovanja i dimenzionisanja pirolitičkih reaktora. Dalja istraživanja prikazana u disertaciji definišu uticaj procesnih parametara (pirolitička temperatura, reakcionog vremena i brzine zagrevanja) na prinos vrstog (koksog) ostatka i pirolitičkog gasa. Kondenzacijom pirolitičkog gasa dobijene su i određene mase te ne faze različitih uzoraka biomase. Zbog zadovoljavanja materijalnog bilansa procesa pirolize, eksperimentalno je određen sastav vrstog (koksog) ostatka.

Težišne oblasti istraživanja je na primeni produkata pirolize u energetske svrhe, s obzirom na rastuće zahteve u pogledu smanjenja emisije gasova staklene bašte, jer se radi o obnovljivom izvoru i CO₂ neutralnom izvoru energije. Međutim, pored korišćenja produkata pirolize kao goriva, isti se mogu koristiti i za druge namene. Te ni produkti sadrže niz hemijskih jedinjenja koja se mogu koristiti kao sirovine za sintezu drugih jedinjenja, adheziva, ubriva, smola, za proizvodnju vodonika, dodatka hrani, hidroksiacetat aldehyda, levoglukozana, itd. Koksni ostatak ima široku primenu kao gorivo, aktivni ugljen, sirovina za proizvodnju baruta, sastojak gasne maske, u metalurgiji kao bio-ugljen, kao ubrivo. Proizvedeni gas iz procesa pirolize može se koristiti za dobijanje toplotne energije u procesu sagorevanja.

Rezultati dobijeni u okviru izrade doktorske disertacije trebalo bi da koriste u daljem razvoju sistema za termohemijsku konverziju biomase.

1.3. Polazne hipoteze

Potreba za projektovanjem efikasnih sistema za korišćenje energije drvene biomase i smanjenjem troškova uvoza energenata, kao i pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti pirolize drvene biomase predstavljali su osnovu za definisanje polaznih hipoteza doktorske disertacije:

- Razvojem laboratorijskog postrojenja za pirolizu drvene biomase mogu e je dati novi uvid u prirodu složenog procesa pirolize koji se odvija u realnim uslovima rada laboratorijskog postrojenja
- Pirolizom drvene biomase u reaktoru mogu e je dobiti vredne produkte koji se dalje mogu koristiti kao energent ili kao polazna sirovina za druge procese
- Temperatura, vreme proticanja i brzina zagrevanja uti u na proces pirolize drvene biomase
- Pove anje temperature pirolize uti e na smanjenje prinosa vrstog ostatka i pove anje prinosa piroliti kog gasa
- Sa porastom temperature pirolize prinos metana raste, dok prinos ugljen dioksida opada,
- Do najve ih promena mase uzorka dolazi u opsegu temperature 200 400 °C
- Sa porastom brzine zagrevanja tokom procesa pirolize pove ava se prinos volatila (isparljivih materija), dok prinos vrstog ostatka opada
- Koriš enje razli itih vrsta drvene biomase uti e na produkte pirolize.

1.4. Nau ne metode istraživanja

Kako bi se istraživanja u okviru doktorske disertacije uspešno realizovala, primenjeni su savremeni istraživa ki postupci i izvršeno je eksperimentalno ispitivanje na laboratorijskom postrojenju konstruisanom za pirolizu vrstih goriva u laboratoriji Departmana za zaštitu životne sredine i zaštite na radu i Departmana za energetiku i procesnu tehniku Fakulteta tehni kih nauka u Novom Sadu. Koriš ene su slede e metode:

- Metode prikupljanja podataka:
 - analiza podataka iz objavljenih relevantnih nau nih publikacija
 - elementarna i tehni ka analiza uzorka mešavine drvene biomase i vrstog (koksno)g ostatka procesa pirolize
 - gravimetrijska metoda odre ivanja mase uzorka
 - eksperimentalna ispitivanja procesa pirolize pomo u termogravimetrijske analize
- Metode obrade podataka:
 - statisti ke metode obrade eksperimentalnih podataka
 - komparativna metoda analize (pore enje dobijenih rezultata sa teorijskim i eksperimentalnim rezultatima drugih istraživa a).

1.5. Struktura rada

Doktorska disertacija podeljena je na šest celina. U uvodnom delu dat je pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti pirolize, predmet i cilj rada, postavljene su polazne hipoteze i razmotrene koriš ene nau ne metode.

U drugom poglavlju prikazana je zakonska regulativa o obnovljivim izvorima energije u Evropskoj Uniji (EU) i Republici Srbiji, kao i prilago avanje doma eg prava pravnim okvirima Evropske Unije u oblasti energetike.

Tre e poglavlje opisuje karakteristike drvene biomase kao goriva. Prikazana je tehni ka i elementarna analiza mešavine drvene biomase, koja je bila predmet istraživanja u ovoj disertaciji, kao i pore enje sa podacima sastava drvene biomase iz literature. Razmatran je

uticaj sastava drvene biomase na toplotnu moć, što je posebno značajno za termičku preradu drvene biomase, i prikazana je kvalitativna ocena drvene biomase kao goriva.

U četvrtom poglavlju razmatrani su termohemijski postupci prerade drvene biomase: piroliza, gasifikacija i sagorevanje. Izvršena je analiza postojećih rešenja za termohemijsku preradu biomase. Osim toga, prikazana je stehiometrija sagorevanja mešavine drvene biomase, sa brojem primerom proračuna materijalnog bilansa i određivanjem teorijske temperature sagorevanja mešavine drvene biomase. Razmatrana je i emisija zagađujućih materija iz postrojenja za sagorevanje biomase.

U petom poglavlju prikazano je eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize različitih vrsta drvene biomase, i to: hrasta, bukve, trešnje, oraha, jele, lipe, kao i mešavine navedenih vrsta drveta. Promena mase uzorka u zavisnosti od temperature i reakcionog vremena prikazana je tabelarno i grafički. Uticaj brzine zagrevanja (21, 32 i 55 °C/s) na promenu masenog udela objašnjen je i prikazan grafički, kao i prinos proizvoda pirolize (gasa, tečne faze i vrstog ostatka). Ispitan je sastav dobijenog pirolitičkog gasa (CO₂, CH₄, O₂), kao i sastav vrstog ostatka i bio-ulja. Takođe, u okviru navedenog poglavlja prikazan je materijalni i toplotni bilans pirolitičkog reaktora.

U zaključku se navodi doprinos koji doktorska disertacija daje istraživanju u razmatranoj oblasti, objašnjava da li su polazne hipoteze potvrđene ili opovrgnute i razmatra u kom pravcu bi trebalo da idu dalja istraživanja u oblasti pirolize drvene biomase.

LITERATURA

- [1] www.srbijasume.rs (10.01.2015.)
- [2] Jovanovi B, Parovi M. 2009. Stanje i razvoj biomase u Srbiji, Beograd.
- [3] Grieco E, Baldi G. 2011. Analysis and modelling of wood pyrolysis. *Chemical Engineering Science* 66(4): 650–660.
- [4] Orfao J. J. M, Antunes F. J. A, Figueiredo J. L. 1999. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reaction model. *Fuel* 78(3): 349–358.
- [5] Janse A. M. C, Westerhout R. W. J, Prins W. 2000. Modelling of flash pyrolysis of a single wood particle. *Chemical Engineering and Processing* 39(3): 239–252.
- [6] Rajeswara R. T, Sharma A. 1998. Pyrolysis rate of biomass materials. *Energy* 23(11): 973–978.
- [7] Fagbemi L, Khezami L, Carpat L. 2001. Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar. *Applied Energy* 69(4): 293–306.
- [8] Sharypov V. I, Marin N, Beregovtsova N. G, Baryshnikov S. V, Kuznetsov B. N, Cebolla, V. N, Weber J. W. 2002. Co-pyrolysis of wood biomass and synthetic polymer mixtures. Part I: influence of the experimental conditions on the evolution of solids, liquids and gases. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 64(1): 15–28.
- [9] Boroson M. L, Howard J. B, Longwell J. P, Peters W. A. 1989. Products yields and kinetics from the vapour phase cracking of wood pyrolysis tars. *AIChE Journal* 35(1): 120–128.
- [10] Williams P. T, Besler S. 1996. Influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy* 7(3): 233–250.
- [11] Müller-Hagedorn M, Bockhorn H. 2007. Pyrolytic behaviour of different biomasses (angiosperms) (maize plants, straws, and wood) in low temperature pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 79(1-2): 136–146.
- [12] Di Blasi C. 2008. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science* 34(1): 47–90.
- [13] Bridgwater A. V, Meier D, Radlein D. 1999. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry* 30(12): 1479–1493.
- [14] Park W. C, Atreya A, Baum H. 2010. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. *Combustion and Flame* 157(3): 481–494.
- [15] Helsen L. E, den Bulck V. 2000. Kinetics of the low-temperature pyrolysis of chromated copper arsenate-treated wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 53(1): 51–79.
- [16] Di Blasi C. 1998. Comparison of semi-global mechanisms for primary pyrolysis of lignocellulosic fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 47(1): 43–64.
- [17] Thurner F, Mann U. 1981. Kinetic investigation of wood pyrolysis. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development* 20(3): 482–488.
- [18] Chan W. R, Kelbon M, Krieger B. B. 1985. Modelling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large biomass particle. *Fuel* 64(11): 1505–1513.
- [19] Font R, Marcilla A, Verdu E, Devesa J. 1990. Kinetics of the pyrolysis of almond shells and almond shells impregnated with CoCl_2 in a fluidized bed reactor and in a Pyroprobe 100. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 29: 1846–1855.
- [20] Liden A. G, Berruti F, Scott D. S. 1988. A kinetic model for the production of liquids from the flash pyrolysis of biomass. *Chemical Engineering Communications* 65(1): 207–221.

- [21] Di Blasi C. 1993. Analysis of convection and secondary reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis. *Combustion Science and Technology* 90(5-6): 315–340.
- [22] Koufopoulos C. A, Maschio G, Lucchesi A. 1989. Kinetic modelling of the pyrolysis of biomass and biomass components. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 67(1): 75–84.
- [23] Shafizadeh F, Bradbury A. G. 1979. Thermal degradation of cellulose in air and nitrogen at low temperatures. *Journal of Applied Polymer Science* 23(5): 1431–1442.
- [24] Bradbury A. G, Sakai Y, Shafizadeh F. 1979. A kinetic model for pyrolysis of cellulose. *Journal of Applied Polymer Science* 23(11): 3271–3280.
- [25] Rostami A. A, Hajaligol M. R, Wrenn S. E. 2004. A biomass pyrolysis sub-model for CFD applications. *Fuel* 83(11-12): 1519–1525.
- [26] Wojtowicz M. A, Bassilakis R, Smith W, Chen Y, Carangelo R. M. 2003. Modeling the evolution of volatile species during tobacco pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 66(1): 235–261.
- [27] Dupont C, Chen L, Cances J, Commandre J. M, Cuoci A, Pierucci S, Ranzi E. 2009. Biomass pyrolysis: Kinetic modelling and experimental validation under high temperature and flash heating rate conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 85(1-2): 260–267.
- [28] Müller Hagedorn M, Bockhorn H, Krebs L, Müller U. 2003. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 68-69: 231–249.
- [29] Park H. J, Park Y. K, Dong J. I, Kim J. S, Jeon J. K, Kim S. S, Kim J, Song B, Park J, Lee K. J. 2009. Pyrolysis characteristics of Oriental white oak: Kinetic study and fast pyrolysis in a fluidized bed with an improved reaction system. *Fuel Processing Technology* 90(2): 186–195.
- [30] Braadbaart F, Poole I, 2008. Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contents. *Journal of Archaeological Science* 35(9): 2434–2445.
- [31] Horne P. A, Williams P. T. 1996. Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass *Fuel* 75(9): 1051–1059.
- [32] Samolada M. C, Stoicos T, Vasalos I. A. 1990. An investigation of the factors controlling the pyrolysis product yield of greek wood biomass in a fluidized bed. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 18: 127–141.
- [33] Bridgwater A. V. 1990. Biomass pyrolysis technologies. In *Biomass for Energy and Industry*, eds. Grassi G, Gosse G, dos Santos G. Elsevier, London.
- [34] Bridgwater A. V, Bridge S. A. 1991. A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technologies. In *Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilisation*, eds. Bridgwater A. V, Grassi G. Elsevier Applied Science, London.
- [35] Beaumont O, Schwob Y. 1984. Influence of physical and chemical parameters on wood pyrolysis. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development* 23(4): 637–641.
- [36] Bridgwater, A. V, Peacocke G. V. C. 2000. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4(1): 1–73.
- [37] Bajus M. 2010. Pyrolysis of woody material. *Petroleum & Coal* 52(3): 207–214.
- [38] Lu Q, Li W. Z, Zhu X. F. 2009. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. *Energy Conversion and Management* 50(5): 1376–1383.
- [39] Oasmaa A, van de Beld B, Saari P, Elliott D, Solantausta Y. Norms, Standards & Legislation for Fast Pyrolysis Bio-Oils from Lignocellulosic Biomass. *Energy and Fuels*, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b00026.

- [40] Chan K. Y, Van Zwieten L, Meszaros I, Downie A, Joseph S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45(8): 629–634.
- [41] Laird D. A, Brown R. C, Amonette J. E, Lehmann J. 2009. Review of the pyrolysis platform for co-producing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefineries* 3(5): 547–562.
- [42] Novak J. M, Busscher W. J, Laird D. A, Ahmedna M, Watts D. M, Niandou M. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal Plain soil. *Soil Science* 174(2): 105–112.
- [43] Major J, Rondon M, Molina D, Riha S. J, Lehmann J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil* 333(1-2): 117–128.
- [44] Jeffery S, Verheijen F. G. A, van der Velde M, Bastos A. C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 144(1): 175–187.
- [45] Song W, Guo M. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 94: 138–145.
- [46] Abdullah H, Wu H. 2009. Biochar as a Fuel: 1. Properties and Grindability of Biochars Produced from the Pyrolysis of Mallee Wood under Slow-Heating Conditions. *Energy and Fuels* 23(8): 4174–4181.

2. ZAKONSKA REGULATIVA O OBNOVLJIVIM IZVORIMA ENERGIJE

Veće korišćenje obnovljivih izvora energije je prihvaćeno kao jedno od rešenja u pogledu usporavanja klimatskih promena. Većina zemalja je prihvatila dugoročne energetske programe koji uključuju ove ciljeve. Dok nekoliko razvijenih zemalja već ima u bilansu značajne udele obnovljivih izvora, neke druge čine prve korake ka povećanju doprinosa obnovljivih izvora. Niz međunarodnih ugovora na putu integracije Republike Srbije u Evropsku Uniju, otvara mogućnost i obaveze izgradnje i uključivanja obnovljivih izvora energije. Proces pridruživanja Evropskoj uniji zahteva usklađivanje energetske politike Srbije. Preuzete obaveze definišu ciljeve smanjivanja emisije gasova sa efektom „staklene bašte“. Planove izgradnje i uvođenja obnovljivih izvora energije podupire velik broj dokumenata iz domena legislative, a dinamika je okvirno definisana dugoročnim planskim dokumentima u oblasti energetike. Određene su podsticajne mere i model preuzimanja energije iz obnovljivih izvora.

2.1. Zakonodavstvo Evropske unije

Težnja Evropske unije jeste da 20% od ukupne energije potiče iz obnovljivih izvora. Obnovljivi izvori energije uključuju vetar, solarnu energiju, hidroenergiju, energiju plime i oseke, kao i geotermalnu energiju i biomasu. Više energije iz obnovljivih izvora omogućuje Evropskoj uniji da postigne smanjenje emisije gasova staklene bašte i da u manjoj mjeri zavisi od uvozne energije. Unapređivanje industrije obnovljive energije povećava tehnološke inovacije i zaposlenost u Evropi.

Sve značajniji pokazatelji klimatskih promena i rastuća zavisnost od energije doprinose odluci Evropske unije da ostvari koncept male potrošnje energije i da energija koja se koristi bude sigurna, bezbedna, konkurentna, lokalno proizvedena i održiva.

Još jedan korak u omogućevanju efikasnog funkcionisanja energetskog tržišta Evropske unije jeste energetska politika koja promovira međusobnu povezanost energetskih mreža i energetska efikasnost. Energetska politika obuhvata širok opseg izvora energije, od fosilnih goriva, preko nuklearne energije, do obnovljivih izvora.

Zakonska regulativa Evropske unije u oblasti energetike podeljena je na sledeće oblasti:

- Evropska energetska politika
- Unutrašnje energetske tržište
- Energetska efikasnost
- Obnovljiva energija
- Nuklearna energija
- Obezbeđenje snabdevanja, spoljna dimenzija i proširenje.

Zakonski okvir Evropske unije koji se odnosi na obnovljivu energiju obuhvata sledećih pet oblasti: osnovne smernice, električnu energiju, grejanje i hlađenje, biogoriva i energiju vetra [1].

- **Osnovne smernice**

- *Promovisanje korišćenja energije iz obnovljivih izvora*

Direktiva 2009/28/EC Evropskog parlamenta i saveta o promovisanju upotrebe energije iz obnovljivih izvora, kojom se menjaju i dopunjavaju i na osnovu koje prestaju da važe direktive 2001/77/EC i 2003/30/EC, određuje osnovni okvir korišćenja energije iz obnovljivih izvora kako bi se ograničile emisije gasova staklene bašte i promovisao istiji transport. U tom cilju, definisani su nacionalni akcioni planovi kao i procedure za upotrebu biogoriva. Direktiva 2009/28/EC je deo regulative koja se odnosi na energiju i klimatske promene i koja predstavlja zakonski okvir za predviđene ciljeve Evropske zajednice u pogledu smanjenja emisije gasova staklene bašte [2].

- *Mapa puta obnovljive energije*

Mapa puta obnovljive energije prikazuje dugoročnu strategiju Evropske komisije u pogledu korišćenja obnovljive energije u Evropskoj uniji. Cilj pomenute strategije jeste da Evropska unija postigne istovremeno povećanje sigurnosti pri snabdevanju energijom i smanjenje emisije gasova staklene bašte. Pomenuti dokument objavljen je kao prepiska Evropske komisije 10. januara 2007. godine pod nazivom „Mapa puta obnovljive energije. Obnovljive energije u 21. veku: izgradnja održivije budućnosti” koji nije dat u okviru Službenog glasnika Evropske unije.

- *Globalna energetska efikasnost i fond obnovljive energije (GEEREF - The Global Energy Efficiency and Renewable Energy Fund)*

GEEREF inicijativa je sastavni deo pristupa predstavljenog u Zelenoj knjizi „Evropska strategija za održivu, konkurentnu i sigurnu energiju”. GEEREF bi trebalo da podstakne partnerstva privatnog i javnog sektora nude i mogućnost raspodele rizika i zajedničkog finansiranja projekata kojima će se investirati u obnovljivu energiju i energetske efikasnost [1].

- **Električna energija**

- *Podržavanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije*

„Podržavanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije” (COM(2005) 627 final - Službeni glasnik C 49) analizira napredak u oblasti obnovljivih izvora energije, izveštava o porastu proizvodnje i opticanja obnovljive energije na unutrašnjem tržištu [3].

- **Grejanje i hlađenje**

- *Akcioni plan za biomasu*

Akcioni plan za biomasu (COM(2005) 628 final - Službeni glasnik C 49) postavlja niz akcija Evropske zajednice posebno u cilju povećanja potražnje za biomasom, poboljšavanja snabdevanja, prevazilaženja tehničkih prepreka i razvoja istraživanja. Biomasa, odnosno svi organski, biljni i životinjski proizvodi koji se koriste za proizvodnju energije ili u poljoprivredi, trenutno zauzima približno polovinu (44 do 65%) od ukupne obnovljive energije koja se koristi u EU [3].

- **Biogoriva**

- *EU strategija za biogoriva*

EU strategija za biogoriva (COM(2006)34 final - Službeni glasnik C 67) prikazuje sedam strateških oblasti za razvoj proizvodnje i upotrebe biogoriva od strane država članica i zemalja u razvoju. Evropska komisija ovom strategijom definiše ulogu koju biogoriva proizvedena iz biomase mogu imati u budućnosti kao obnovljivi izvor energije i alternativa fosilnim gorivima (pre svega nafti) korišćenim u saobraćaju [4].

- **Energija vetra**

- *Promovisanje energije vetra sa puštinama*

“Energija vetra sa puštinama: akcija koju bi trebalo sprovesti kroz ciljeve energetske politike za 2020. godinu i kasnije” (COM(2008) 768 final - nije objavljena u Službenom glasniku) promovira razvoj morske i priobalne energije vetra u Evropskoj uniji. Navedena vrsta energije predstavlja čist i obnovljiv izvor, a može da doprinese i zaštiti određenih morskih ekosistema [1].

2.2. Zakonodavstvo Republike Srbije

Energetski sektor je ključan, kako sa stanovišta ekonomskog razvoja tako i u odnosu na rešavanje mnogih važnih problema životne sredine. Novi Zakon o energetici Republike Srbije, koji ima za cilj usaglašavanje domaćeg zakonodavstva u toj oblasti sa evropskim, pripremljen je i trebalo bi da bude usvojen u skorijoj budućnosti. Jedan od najvažnijih ciljeva novog zakona o energetici je primena Trećeg energetskeg paketa, direktiva Evropskog parlamenta i saveta o jedinstvenim pravilima internog evropskog tržišta električne energije. Takođe, namera je i da se stvori osnova za primenu uredbi o uslovima za pristup mrežama radi prekogranične razmene električne energije, da se primeni direktiva o promovisanju korišćenja energije iz obnovljivih izvora, da se pospeši razvoj energetskeg tržišta, odnosno da efikasnije funkcioniše tržište električne energije i prirodnog gasa.

Nacrt novog Zakona o energetici je veoma obiman i kompleksan i sastoji se od 25 poglavlja i 333 članova. Poglavlje VI novog Zakona odnosi se na energiju iz obnovljivih izvora energije i podsticajne mere. Nacionalni ciljevi i plan korišćenja obnovljivih izvora uređeni su sledećim članovima, prikazanim u skraćenom obliku:

- **Član 56**

Korišćenje energije iz obnovljivih izvora je u interesu Republike Srbije. Vlada, na predlog Ministarstva, donosi Nacionalni akcioni plan kojim se utvrđuju ciljevi za korišćenje

obnovljivih izvora energije za period od najmanje 10 godina. Nacionalni akcioni plan za korišćenje obnovljivih izvora energije iz stava 2. ovog člana posebno sadrži:

- 1) udeo energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj bruto finalnoj potrošnji energije
- 2) udeo energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji električne energije
- 3) udeo energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji za grejanje i hlađenje
- 4) udeo energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj energiji utrošenoj u svim oblicima saobraćaja
- 5) dinamiku za ostvarenje udela iz tačaka 1), 2), 3) i 4) ovog člana po godinama
- 6) mere i procenjena finansijska sredstva za ostvarenje planiranih udela energije iz obnovljivih izvora
- 7) nosioce aktivnosti i rokove za ostvarenje planiranih aktivnosti.

- **član 57**

Izgradnja objekata ili korišćenje postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije za proizvodnju električne energije u okviru mehanizama saradnje realizuje se u skladu sa potvrđenim međunarodnim ugovorima.

Garancija porekla obuhvaćena je sledećim članovima novog Zakona:

- **član 58**

Garanciju porekla izdaje operator prenosnog sistema na zahtev proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora energije i proizvođača električne i toplotne energije iz kombinovane proizvodnje sa visokim stepenom iskorišćenja primarne energije, na osnovu podataka operatora na čiji sistem je objekat proizvođača priključen, javnog snabdevača i izjave podnosioca zahteva o korišćenju investicione podrške.

- **član 59**

Garancija porekla za energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora energije sadrži:

- 1) naziv, lokaciju, vrstu i snagu proizvodnog kapaciteta
- 2) datum puštanja objekta u rad
- 3) podatak da li se garancija porekla odnosi na električnu energiju ili na energiju za grejanje ili hlađenje
- 4) datum početka i kraja proizvodnje energije za koju se izdaje garancija porekla
- 5) podatak iz pismene izjave podnosioca zahteva da li je za izgradnju proizvodnog kapaciteta bila korišćena investiciona podrška iz nacionalnih sredstava i vrsta te podrške
- 6) podatak da li je korišćena podsticajna otkupna cena energije
- 7) datum i zemlju izdavanja i jedinstveni identifikacioni broj.

- **član 60**

Garancija porekla izdata u drugim državama važi pod uslovima reciprociteta i u Republici Srbiji i u skladu sa potvrđenim međunarodnim ugovorom.

Status povlašćenog proizvođača električne energije objašnjen je u članovima 61 do 66:

- **član 61**

Proizvođač električne energije može steći status povlašćenog proizvođača za elektranu koja:

- 1) u procesu proizvodnje električne energije koristi obnovljive izvore energije i/ili separisanu frakciju komunalnog otpada, osim za hidroelektrane instalisane snage veće od 30 MW
- 2) je priključen na prenosni, odnosno distributivni sistem električne energije
- 3) ima posebno merno mesto za merenje ukupno proizvedene električne energije u elektrani

4) koristi energiju vetra ili energiju sunca u procesu proizvodnje elektri ne energije, ako je instalisana snaga elektrane manja ili jednaka slobodnom kapacitetu.

- **lan 62**

Ministarstvo o zahtevu za sticanje statusa, odnosno privremenog statusa povlaš enog proizvo a a elektri ne energije odlu uje rešenjem, u roku od 30 dana od dana podnošenja urednog zahteva.

- **lan 63**

Status povlaš enog proizvo a a elektri ne energije ili elektri ne i toplotne energije može se preneti na drugo lice.

- **lan 64**

Podsticajne mere za koriš enje obnovljivih izvora energije za proizvodnju elektri ne energije obuhvataju obavezu otkupa elektri ne energije od povlaš enog proizvo a a, cene po kojima se ta energija otkupljuje, period važenja obaveze otkupa elektri ne energije, preuzimanje balansne odgovornosti kao i druge podsticajne mere propisane ovim zakonom i propisima donetim na osnovu njega.

- **lan 65**

Povlaš eni proizvo a ima pravo na:

- 1) skup podsticajnih mera koje važe u trenutku sticanja privremenog statusa povlaš enog proizvo a a
- 2) prvenstvo pri preuzimanju ukupno proizvedene elektri ne energije u prenosni ili distributivni sistem, osim u slu aju kada je ugrožena sigurnost rada tih sistema
- 3) druga prava u skladu sa ovim zakonom, propisom iz lana 61. stav 9. ovog zakona, drugim zakonima i propisima kojima se ure uju porezi, carine i druge dažbine, odnosno subvencije i druge mere podsticaja, zaštita životne sredine i energetska efikasnost.

- **lan 66**

Povlaš eni proizvo a elektri ne energije gubi status povlaš enog proizvo a a u slede im slu ajevima:

- 1) ako je rešenje o sticanju statusa doneto na osnovu neistinitih podataka
- 2) ako se utvrdi da su se svojstva postrojenja promenila zbog neodržavanja tehni ko-tehnoloških karakteristika
- 3) ako povlaš eni proizvo a ne izvršava svoje obaveze prema javnom snabdeva u
- 4) ako je proizvo a u istekla licenca u slu ajevima propisanim ovim zakonom
- 5) ako proizvodi elektri nu energiju suprotno uslovima pod kojima je stekao status povlaš enog proizvo a a [5].

Pored Zakona o energetici, kao osnovnog zakonskog okvira, koriš enje obnovljivih izvora energije definisano je brojnim drugim zakonima, propisima i uredbama, me u kojima su najzna ajniji:

- **Ugovor o osnivanju energetske zajednice jugoisto ne Evrope** („Službeni glasnik RS”, broj 62/2006), kojim Srbija preuzima obavezu reformi usmerenih ka pripremi energetskog tržišta za punu primenu evropskih pravila primenom direktiva EU, i u eš e na jedinstvenom evropskom energetsom tržištu
- **Strategija razvoja energetike Republike Srbije od 2006. do 2015. godine** („Službeni glasnik RS”, broj 44/2005), propisana Zakonom o energetici, sadrži dugoro ne ciljeve

razvoja pojedinih energetske delatnosti, prioritete razvojnih aktivnosti, mere i instrumente za ostvarivanje ciljeva energetske politike, odnosno same Strategije, prioritetne programe i drugo

- **Program ostvarivanja Strategije razvoja energetike Republike Srbije** detaljno obrađuje sadržaj pojedinih programa i dinamiku njihove realizacije za sve sektore energetike po modulima za svaki pojedini sektor energetike
- **Energetski bilans Republike Srbije** izrađuje se svake godine. Bilansom su obuhvaćeni energetske tokovi za tri godine: realizacija bilansa prethodne godine, procena stanja za tekuću godinu i plan za narednu godinu
- **Drugi nacionalni plan za energetske efikasnost Republike Srbije od 2013. do 2015. godine** ima za cilj postizanje kvantifikovanih ušteda energije primenom mera energetske efikasnosti u sektorima domaćinstva, javne i komercijalne delatnosti, industrije i saobraćaja
- **Nacionalni akcioni plan za obnovljive izvore energije Republike Srbije**, izrađen u skladu sa obrascem predviđenim Direktivom 2009/28/EC, prikazuje okvirnu politiku Republike Srbije i utvrđuje putanju u oblasti obnovljivih izvora energije do 2020. godine
- **Uredba o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije** („Službeni glasnik RS”, broj 8/2013 i 70/2014)
- **Uredba o merama podsticaja za povlašćenog proizvođača električne energije** („Službeni glasnik RS”, broj 8/2013)
- **Uredba o načinu obračuna i načinu raspodele prikupljenih sredstava po osnovu naknade za podsticaj povlašćenih proizvođača električne energije** („Službeni glasnik RS”, broj 8/2013)
- **Uredba o visini posebne naknade za podsticaj u 2014. godini** („Službeni glasnik RS”, broj 3/2014)
- **Nacionalna strategija održivog razvoja od 2009. do 2017. godine** („Službeni glasnik RS”, broj 57/2008) je multisektorski dokument koji posredno utiče i na energetiku, kroz osnovno načelo da ekonomski rast mora biti u saglasnosti sa investiranjem u istu proizvodnju, energetske efikasnost, smanjenje emisija i zaštitu životne sredine
- **Akcionni plan za sprovođenje Nacionalne strategije održivog razvoja** („Službeni glasnik RS”, broj 22/2009), sadrži mere za ostvarivanje Nacionalne strategije; deo Akcionog plana čini i **Strategija uvođenja istije proizvodnje u Republici Srbiji** („Službeni glasnik RS”, broj 17/2009).

Nacionalni zakoni koji su indirektno povezani sa oblastima energetike su:

- **Zakon o zaštiti vazduha** („Službeni glasnik RS”, broj 36/2009 i 10/2013)
- **Zakon o integrisanom spremanju i kontroli zagađivanja životne sredine** („Službeni glasnik RS”, broj 135/2004)
- **Zakon o zaštiti prirode** („Službeni glasnik RS”, broj 36/2009 i 88/2010)
- **Zakon o nacionalnim parkovima** („Službeni glasnik RS”, broj 39/1993 i 44/1993, prestao da važi osim odredaba čl. 6. i 7. i opisa područja nacionalnih parkova, a do donošenja posebnih zakona)
- **Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini** („Službeni glasnik RS”, broj 36/2009 i 88/2010)
- **Zakon o planiranju i izgradnji** („Službeni glasnik RS”, broj 72/2009, 81/2009, 64/2010, 24/2011, 121/2012, 42/2013, 50/2013 i 98/2013)
- **Zakon o upravljanju otpadom** („Službeni glasnik RS”, broj 36/2009 i 88/2010)
- **Zakon o vodama** („Službeni glasnik RS”, broj 30/2010 i 93/2012)

- **Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti** („Službeni glasnik RS”, broj 36/2009 i 88/2010)
- **Uredba o metodologiji prikupljanja podataka za nacionalni inventar gasova sa efektom staklene bašte** („Službeni glasnik RS”, broj 81/2010)
- **Uredba o kriterijumima za odabiranje najboljih dostupnih tehnika, za primenu standarda kvaliteta, kao i za odabiranje graničnih vrednosti emisija u integrisanoj dozvoli** („Službeni glasnik RS”, broj 84/2005).

U 2006. godini, Republika Srbija je ratifikovala Ugovor o osnivanju energetske zajednice, tako je poznat kao Ugovor o energetskoj zajednici jugoistočne Evrope ili ECSEE (potpisan između EU i zemalja jugoistočne Evrope). Zakonom o energetici predviđene su mere za stvaranje uslova za stimulisanje korišćenja obnovljivih izvora energije. Takođe, Strategijom razvoja energetike Srbije do 2015. za jedan od prioriteta u srpskoj energetici je postavljeno i veće korišćenje obnovljivih izvora energije, što takođe predstavlja prioritet Strategije za održivi razvoj u kontekstu unapređenja zaštite životne sredine i racionalnog korišćenja prirodnih resursa. Krajem 2009. godine usvojene su uredbe kojima su uvedene podsticajne mere za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora energije – uredbe o uslovima za sticanje statusa povlašćenog proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora i uredbe kojom se uvode garantovane otkupne cene (fid-in tarife) za tako proizvedenu struju i garantovani period otkupa od 12 godina.

Na putu značajnijeg korišćenja energije iz obnovljivih izvora postoji više prepreka, jer su procedure za investiranje duge i složene, propisi nedovoljni, a standardi tek delimično definisani. Značajnu prepreku predstavlja cena električne energije koja nije ekonomska, odnosno energija iz obnovljivih izvora ne bi bila konkurentna zbog niske regulisane cene struje. Otvoreno je i pitanje koliko bi distributivna mreža mogla da podrži priključivanje kapaciteta iz obnovljivih izvora energije bez ulaganja i kako bi se to odrazilo na cenu struje. Kada se govori o obnovljivim izvorima energije, uvek se postavlja i pitanje stabilnosti snabdevanja iz takvih izvora energije, jer neki od njih, ta nije vetar i sunce, ne mogu obezbediti ravnomerno snabdevanje tokom cele godine. Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije je skuplja od proizvodnje energije iz fosilnih goriva i zbog toga se uvode mere podsticaja za investiranje u postrojenja.

U januaru 2009. godine Srbija je postala članica i osnivačica Međunarodne agencije za obnovljivu energiju (IRENA), prve međunarodne organizacije koja se bavi isključivo obnovljivom energijom i čiji je cilj da podstakne upotrebu tih izvora energije u svetu.

Radi očuvanja životne sredine, tendencija globalne energetike je da se sve više oslanja na obnovljive izvore, a sve manje na iscrpive resurse. Na osnovu statistike „zelenog“ energetskog sistema Srbije, obnovljivi energetske potencijali su najviše korišćeni u hidrotokovima dok su preostali obnovljivi izvori još uvek u fazi razvoja. Uvođenjem principa „istije“ i štedljivije proizvodnje energenata, razvija se i koristi sve efikasnija oprema i tehnologija, podstiču se projekti širokog spektra primene, od malih domaćinstava koji se priključuju na distributivnu mrežu do kapaciteta industrijskih razmera. Strateški nacionalni ciljevi su da se raspoloživi obnovljivi resursi koriste u proizvodnji električne energije, u toplanama i finalnoj potrošnji, kao i u saobraćaju.

2.3 Usklađivanje zakonske regulative Srbije sa EU

Pristupanje Evropskoj uniji može se posmatrati kao proces usklađivanja domaće propise i njihove primene sa pravnim tekovinama EU, odnosno kao prilagođavanje unutrašnjih odnosa domaće infrastrukture standardima koji su usvojeni u EU. Stoga su potrebne promene u domaćem pravnom okviru, u određenim modelima ponašanja komercijalnih i društvenih odnosa kao i promene u fizičkoj infrastrukturi.

EU propisuje odgovarajuće promene u pravnom okviru u oblasti energetike. Prilagođavanje domaće prava pravnom okviru EU može se smatrati harmonizacijom domaće prava u odnosu na pravo energetike Evropske unije. Međutim, pored neposrednih propisa koje je donela EU postoje i propisi koji su šireg međunarodnog karaktera, koji se takođe smatraju sastavnim delom evropskog pravnog okvira. Drugim rečima, očekuje se da država kandidat za članstvo u EU sagleda i primeni i pomenute međunarodne standarde, da ih uvede u svoj unutrašnji pravni sistem i obezbedi njihovu primenu.

Veliki značaj imaju odgovarajući propisi i konvencije Ujedinjenih nacija kao i evropske organizacije koje imaju šire članstvo od neposrednog članstva EU. Bitno je pomenuti Ugovor o energetskej povelji (The Energy Charter Treaty), Organizaciju za ekonomsku saradnju i razvoj (Organization for Economic Co-operation and Development – OECD) i Međunarodnu agenciju za energiju (International Energy Agency – IEA). Tokom godina delovanja Komisije Ujedinjenih nacija za Evropu (United Nation Economic Commission for Europe – UNECE), nastali su brojni standardi i konvencije koji su suštinski prihvaćeni od svih država članica EU i transponovani u njene propise.

Ratifikacijom Ugovora o osnivanju energetske zajednice 2006., Srbija je prihvatila obavezu da primeni evropske direktive u oblasti obnovljivih izvora energije. Direktivom EU o obnovljivoj energiji iz 2009. postavljeni su obavezujući ciljevi za članice EU kako bi se obezbedilo da do 2020. godine obnovljiva energija čini 20% ukupne potrošnje energije u Evropskoj uniji. To ne znači da sve članice moraju ostvariti taj udeo već se obračun vrši na osnovu podataka o udelu u 2005. godini uz koeficijent uvećanja od 5%, ali se pritom uzima u obzir i bruto domaći proizvod (BDP), što znači da sve ekonomski najjače zemlje imaju i zahtevnije ciljeve. Ciljevi za zemlje Energetske zajednice se utvrđuju na osnovu podataka iz 2008. godine.

Utvrdjivanje po istoj metodi cilja udelu obnovljivih izvora energije u potrošnji za 2020. i njegovo ostvarivanje predstavlja poseban izazov za Srbiju, jer je, prema prvobitnom izveštaju grupe Centra za obnovljive izvore energije i uštedu (CRES), udeo obnovljivih izvora energije u Srbiji iznosio čak 25%. Prema ranijim statističkim podacima srpskih institucija, taj udeo je bio 14%, ali istraživanja nisu obuhvatala sve aspekte potrošnje biomase zbog čega su podaci bili nepotpuni. Nacrt završnog izveštaja CRES-a koji je na jesen 2011. dostavljen nadležnim vlastima u Srbiji je, međutim, bio više u skladu sa procenama srpskih vlasti o udelu obnovljivih izvora energije, odnosno nešto niži u odnosu na prvobitni izveštaj [7].

Radna grupa Energetske zajednice jugoistočne Evrope prihvatila je 6. decembra 2011. da udeo energije iz obnovljivih izvora iznosi 21.2% u ukupnoj potrošnji energije u Srbiji, odnosno da to bude osnovica za utvrđivanje obaveze Srbije za povećanje udelu obnovljivih izvora energije u potrošnji do 2020. Na osnovu toga, Srbija je preuzela obavezu da do 2020. godine poveća udeo energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji sa sadašnjih 21.2 na 27% [8].

Direktiva EU tako e predvi a da do 2020. godine koriš enje obnovljive energije u transportu iznosi najmanje 10% od ukupne potrošnje goriva u Evropskoj uniji. Kako je najavljeno, Srbija e u okviru Energetske zajednice zahtevati da se ta obaveza smanji sa 10 na 6.5% zbog kra eg vremenskog perioda za ostvarivanje cilja u odnosu na lanice EU [7].

Nova direktiva EU predvi a mere za saradnju sa potpisnicima Ugovora o energetske zajednici nakon primene direktive, ali su i pre toga predvi eni odre eni podsticaji. Direktiva omogu ava saradnju lanica EU u zajedni kim projektima sa zemljama koje nisu u EU i pruža mog nost da se uvezena obnovljiva energija uklju i u dostizanje nacionalnih obavezuju ih ciljeva.

Prema Nacionalnom akcionom planu za obnovljive izvore energije u Srbiji, da bi se do 2020. godine ostvario cilj od 27% udela obnovljivih izvora energije potrebno je izgraditi 1.092 megavata novih kapaciteta za proizvodnju elektri ne energije, što zahteva ulaganje od dve milijarde evra u narednih sedam godina [5].

Akcioni plan, koji je predstavljen u februaru 2013., predvi a da do 2020. u pogonu budu objekti snage 500 megavata za proizvodnju struje iz vetra, 438 megavata mini hidroelektrana, 100 megavata elektrana na biomasu, 30 megavata na biogas, po 10 megavata na deponijski gas i sun evu energiju, tri megavata za elektrane na otpad i jedan megavat na geotermalnu energiju. Prema planu, u eš e obnovljivih izvora u sektoru elektri ne energije trebalo bi da se pove a sa sadašnjih 29% na 37% do 2020. godine, u energiji za grejanje i hla enje sa 26 na 30%, i u sektoru saobra aja kroz upotrebu biogoriva sa sadašnjih nula na 10% [5].

U cilju uskla ivanja sa ciljevima EU do 2020. u oblasti obnovljivih izvora energije i energetske efikasnosti Elektroprivreda Srbije (EPS) je u maju 2011. objavila strateški dokument, Belu knjigu, koja sadrži pregled obaveza i planiranih aktivnosti. Procenjuje se da e za realizaciju tih planova biti potrebno približno etiri milijarde evra. U oblasti obnovljivih izvora energije EPS planira izgradnju i revitalizaciju 35 malih hidroelektrana i u tom cilju je sa Ministarstvom poljoprivrede potpisan Protokol o saradnji u realizaciji projekata energetske efikasnosti i koriš enja obnovljivih izvora energije. EPS planira i ulaganje u vetroparkove i solarne elektrane [9].

Vlada Srbije je 2010. godine usvojila Akcioni plan za biomasu kojim su obuhva ene procedure za investicije, utvr eni problemi i predložena rešenja i rokovi, kao i nadležne ustanove. Me utim, za bilo kakvo delovanje i preduzimanje koraka bilo je klju no utvr ivanje stvarne potrošnje biomase i utvr ivanje obaveze o udelu obnovljivih izvora energije prema propisima EU. U Srbiji, kao i u Evropi, osnovni problem pri koriš enju biomase jeste dugoro no snabdevanje.

Pridruživanje EU u sektoru energije, uklju uju i realizaciju zacrtanih ciljeva evropske energetske politike je verovatno najsloženije, kako finansijski i pravno, tako i u smislu infrastrukture i drugih neophodnih resursa. Srbija je donošenjem novih zakonskih i podzakonskih akata u oblasti energetike napravila zna ajan iskorak u pogledu približavanja zakonodavstva normama Evropske unije, ali je i dalje prisutan visok nivo zavisnosti Srbije od uvoza energenata kao i neracionalno i neplansko koriš enje svih prirodnih resursa i vidova energije. Raznolikost mera podsticaja govori u prilog injenici o motivisanosti zemalja Evrope da u bliskoj budu nosti obezbede konkurentnost obnovljivih izvora energije i na taj na in podstaknu energetske efikasnost i obim koriš enja obnovljivih izvora.

LITERATURA

- [1] <http://eur-lex.europa.eu> (21.11.2015.)
- [2] ***, 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (1). Official Journal of the European Union 52(L 140): 16–62.
- [3] ***, 2006. COM documents other than legislative proposals adopted by the Commission. Official Journal of the European Union 49 (C 49): 23–34.
- [4] ***, 2006. COM documents other than legislative proposals adopted by the Commission. Official Journal of the European Union 49 (C 67): 32–33.
- [5] www.merz.gov.rs (23.11.2015.)
- [6] ***, 2011. Vodi za u e e javnosti u oblastima energetike i klimatskih promena, Projekat Evropske Unije „Uklju ivanje organizacija civilnog društva u proces donošenja energetske i klimatske politike na lokalnom nivou“.
- [7] Karakosta C, Doukas H, Flouri M, Dimopoulou S, Papadopoulou A. G, Psarras J. 2011. Review and analysis of renewable energy perspectives in Serbia. International Journal of Energy and Environment 2(1): 71–84.
- [8] Ministarstvo infrastrukture i energetike Republike Srbije. 2012. Izveštaj o realizaciji prvog Nacionalnog akcionog plana energetske efikasnosti u periodu od 2010. do 2011. godine
- [9] Markovi D, eperkovi B, Vlaj i A, Resl S. 2011. Bela knjiga Elektroprivrede Srbije. JP „Elektroprivreda Srbije“, Beograd.

3. KARAKTERISTIKE DRVNE BIOMASE KAO GORIVA

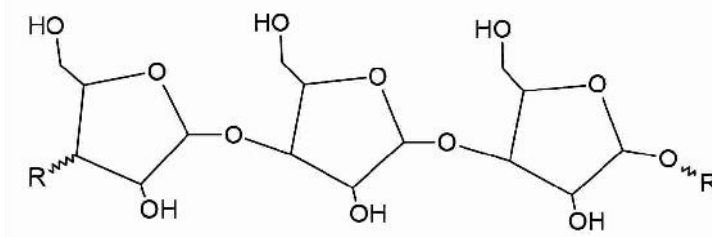
Osnovne karakteristike pri upotrebi drvne biomase kao energenta iste su kao kod svakog goriva i podrazumevaju: hemijski sastav, rezultate tehnike i elementarne analize, sadržaj isparljivih materija, toplotnu moć, sadržaj vlage, gustinu, raspodelu veličine čestica, sadržaj i karakteristike pepela, temperature paljenja, samozapaljenja i sagorevanja.

3.1. Sastav drvne biomase kao goriva

Osnovne strukturne komponente drvne biomase su celuloza, hemiceluloza i lignin, koji čine 99% drvne materije. Celulozu i hemicelulozu čine duga lanci ugljenih hidrata, dok je lignin veoma složena komponenta sačinjena od fenolnih polimera [1]. Lignin je bogat ugljenikom i vodonikom, koji predstavljaju osnovne elemente za proizvodnju toplote. Stoga, toplotna moć lignina je veća u odnosu na toplotnu moć celuloze i hemiceluloze. Drvna biomasa sadrži i ekstraktivne materije, kao što su terpeni, lipidi i fenoli. Količina ekstraktivnih materija je znatno veća u lišću i kori drveta, dok je u samom drvetu veoma mala [1].

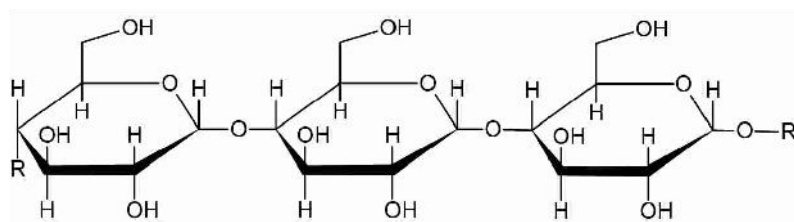
Hemiceluloza obuhvata kompleksne polimere čiji osnovni lanac čine ksilani, glukomanani i galaktani, a bočni lanci su galaktoza, arabinoza i razne uronske kiseline. Ksilani su linearni polimeri koji se sastoje od D-ksiloze, odnosno pentoze, dok su glukomanani linearni polimeri koji se sastoje od dve heksoze i to D-glukoze i D-manoze. Galaktani su linearni polimeri koji se sastoje od heksoze, odnosno D-galaktoze. U osnovnim molekulskim lancima šećeri su vezani β-1,4 vezama, kao i kod celuloze, te se lanci ne uvijaju, nego ostaju linearni. Bočni lanci su vezani na svaki drugi ili treći molekul šećera u polimeru. Sastav šećera u makromolekulu hemiceluloze zavisi od njenog porekla.

Smatra se da je hemijska formula hemiceluloze $C_5H_{10}O_5$. Slika 3.1. prikazuje D-ksilozu ($C_5H_{10}O_4$) koja je prisutna u lancima hemiceluloze [2]. Hemiceluloza čini 15-25% drvne biomase, rastvorljiva je u bazama i lakše hidrolizuje u odnosu na celulozu. Rastvorljivost hemiceluloze često se koristi za izolovanje iz uzorka biomase, kako bi se odredio udeo ostalih komponenata. Sa stanovišta kinetike, hemiceluloza je manje stabilna od celuloze, prema Frassoldati et al. [3], stoga se razlaže ranije, odnosno pri nižoj temperaturi u porećenju sa celulozom.



Slika 3.1. D ksiloza [2]

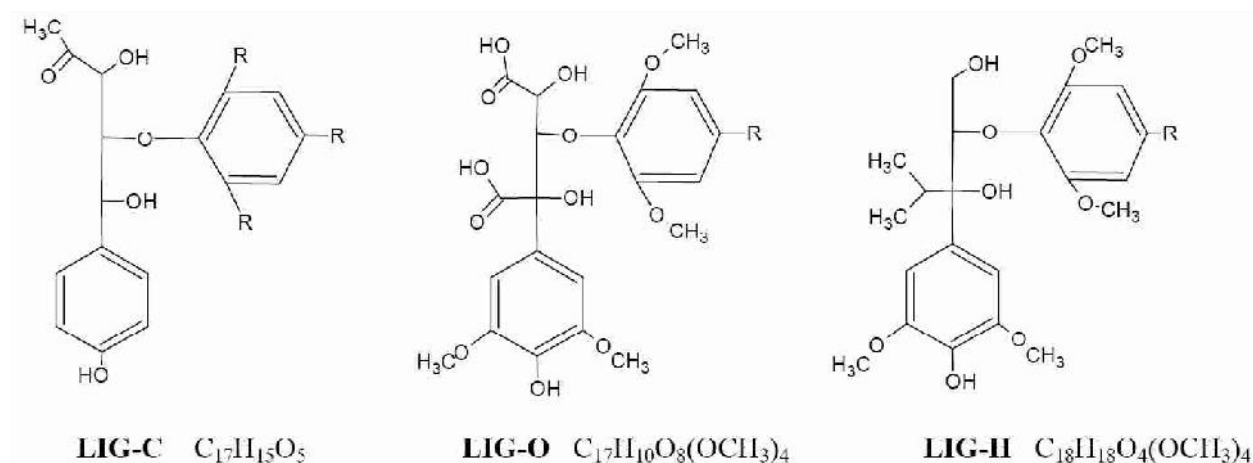
Hemijska formula celuloze (slika 3.2.) je $C_6H_{10}O_5$. Po hemijskom sastavu je poliglukan razliite dužine lanaca kod koga su molekuli glukoze vezani β -1,4 glikozidnom vezom. Makromolekul celuloze je linearan i ne obrazuje spiralne oblike, već fibrile i kristale nerastvorljive u vodi i u skoro svim vodenim rastvorima. β -glukozni lanci su postavljeni paralelno jedan prema drugom. Iako svaki lanac može biti nekoliko hiljada jedinica dug, oni počinju i završavaju se na različitim mestima tako da su mikrofibrili veoma dugi i mogu da se obmotaju oko svake ćelije.



Slika 3.2. Celuloza [2]

Celuloza čini 40-50% drvene biomase. Karakteriše je nerastvorljivost u vodi i rastvara se, što se ponekad koristi pri odvajanju različitih komponenata biomase. Lanci celuloze povezani su na isti način kao i kod hemiceluloze, ali zbog različite strukture, potrebna je veća sila za kidanje veza lanaca celuloze. Usled toga se transformacija celuloze dešava pri većim temperaturama, približno pri $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4].

Lignin se sastoji iz više različitih jedinjenja ugljenika. Ima veću energetska vrednost u odnosu na ostale komponente drvene biomase. Ugljenik čini 60% mase lignina, dok kiseonik čini približno 30%. Hemiceluloza i celuloza imaju udeo ugljenika manji od 50%, dok udeo kiseonika dostiže skoro 50%. U drvnjoj biomasi, 15-30% mase čini lignin. Lignin karakteriše amorfna struktura i visok stepen unakrsne povezanosti, bez jasno definisanog uređenja i ponavljanja jedinica. U amorfnoj strukturi lanci nisu paralelni već se obavijaju jedni oko drugih. Usled velikih razlika između lanaca lignina, temperaturni opseg termičkog razlaganja je veći i u odnosu na druge komponente. Postoje tri različita modela koji karakterišu strukturu lignina, što je prikazano na slici 3.3. Struktura lignina zavisi od vrste biomase. Termičko razlaganje lignina odvija se pri temperaturama od približno $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Celulozna vlakna obavijena su ligninom, koji je otporan na hidrolizu zbog svoje nepravilne hemijske strukture.



Slika 3.3. Lignin [2]

Elementarni hemijski sastav drveta zavisi od vrste drveta, starosti drveta, dela drveta odakle se uzima uzorak. U pore enju sa mnogim drugim gorivima, drvo ima relativno nizak sadržaj ugljenika (približno 50% suve drvene biomase) i visok sadržaj kiseonika (esto više od 40%) što dovodi do relativno male toplotne mo i po jedinici suve mase [5]. U tabeli 3.1. dati su podaci za masene udele ugljenika, kiseonika i vodonika za najzastupljenije vrste drveta u Vojvodini.

Tabela 3.1. Elementarni hemijski sastav nekih vrsta drveta [6]

Vrsta drveta	Ugljenik, C (maseni udeo, %)	Kiseonik, O (maseni udeo, %)	Vodonik, H (maseni udeo, %)
Bukva	48.5	45.2	6.4
Hrast	49.4	44.5	6.1
Topola	49.7	44.0	6.3
Jela	50.0	43.6	6.4
Smr a	49.6	44.0	6.4

Pored elementarne analize biogoriva, koja je važna za sagledavanje hemijskog sastava, da bi se ocenila mogu nost primene goriva, neophodno je izvršiti i tehni ku analizu. Pod tehni kom analizom se prevashodno podrazumeva odre ivanje: koli ine isparljivih delova biogoriva, gornje i donje toplotne mo i goriva, sadržaja vlage i pepela.

Drvena biomasa, kao i svako prirodno gorivo, sastoji se od ugljenika (C), vodonika (H), azota (N), sumpora (S), kiseonika (O), mineralnih materija (A) i vlage (W). Mineralne materije u procesu sagorevanja stvaraju pepeo, pa se esto i pre sagorevanja nazivaju pepelom, što nije sasvim precizno, jer se sastav mineralnih materija pre i posle sagorevanja znatno razlikuje.

U sastav goriva ulaze organska masa i takozvani balast. Pod organskom masom se podrazumeva deo goriva stvoren od organskih materija koje ine njegovu osnovu. Organsku masu goriva ine ugljenik, vodonik, azot i kiseonik. Balast je deo goriva unet u materiju pretežno u procesu njene transformacije i ine ga sumpor, mineralne primese i vlaga.

Gorivo koje sagoreva u kotlovima ili pe ima naziva se radnim gorivom. Ako se odredi njegova elementarna analiza dobija se [7]:

$$C + H + O + N + S + A + W = 100\% , \quad (3.1)$$

gde su:

C, H, O, N, S, A i W maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, azota, sumpora, pepela i vlage u radnoj masi goriva, izraženi u %.

Elementarna analiza suvog goriva ($W = 0$) definisana je izrazom [7]:

$$C^s + H^s + O^s + N^s + S^s + A^s = 100\% , \quad (3.2)$$

gde su:

C^s, H^s, O^s, N^s, S^s i A^s maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, azota, sumpora i pepela u suvoj masi goriva, izraženi u %.

Elementarna analiza sagorljive mase goriva određena je izrazom [7]:

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g = 100\% , \quad (3.3)$$

gde su:

C^g, H^g, O^g, N^g i S^g maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, azota i sumpora u sagorljivoj masi goriva, izraženi u %.

Elementarna analiza organske mase goriva data je izrazom [8]:

$$C^o + H^o + O^o + N^o = 100\% , \quad (3.4)$$

gde su:

C^o, H^o, O^o i N^o maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika i azota u organskoj masi goriva, izraženi u %.

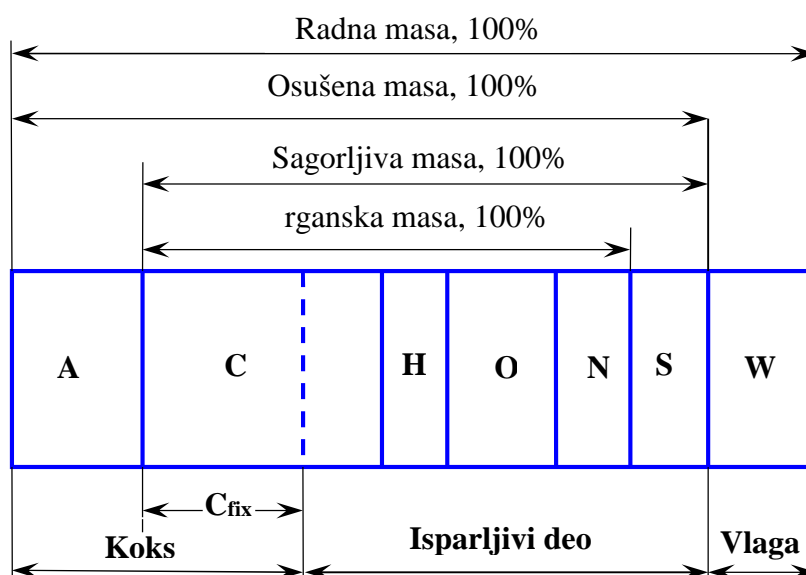
Prera unavanje pojedinih elemenata sa jedne mase na drugu vrši se pomoću u obrazaca prikazanih u tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Faktori konverzije za elementarne analize

Zadata masa goriva	Tražena masa goriva			
	Organska	Sagorljiva	Osušena	Radna
Organska	1	$\frac{100 - S^g}{100}$	$\frac{100 - (S^s - A^s)}{100}$	$\frac{100 - (S + A + W)}{100}$
Sagorljiva	$\frac{100 - S^g}{100}$	1	$\frac{100 - A^s}{100}$	$\frac{100 - (A + W)}{100}$
Osušena	$\frac{100}{100 - (S^s + A^s)}$	$\frac{100}{100 - A^s}$	1	$\frac{100 - W}{100}$
Radna	$\frac{100}{100 - (S + A + W)}$	$\frac{100}{100 - (A + W)}$	$\frac{100}{100 - W}$	1

Sadržaj isparljivih materija ili volatila (VM) ima veliki značaj pri oceni kvaliteta goriva. Ako se gorivo zagreva bez prisustva vazduha, pri visokim temperaturama (u granicama od 200 do 800 °C) doći će do izdvajanja gasova kao što su vodonik, metan, teški ugljovodonici, oksidi ugljenika, malo sumpora, ugljene kiseline, katran i drugo. Navedene materije se zovu isparljive materije i raunavaju se u sagorljivoj masi. Sadržaj volatila, kao i temperatura pri kojoj se izdvajaju zavisi od geološkog porekla goriva. Što je gorivo starije, to je sadržaj volatila manji i viša je temperatura pri kojoj se izdvajaju. Isparljive materije u drvetu su uglavnom lakši ugljovodonici. Maseni udeo volatila u drvetu određuje se merenjem vrstog ostatka nakon sedmominutnog zagrevanja uzorka drveta u peći, na temperaturi od 900 °C bez prisustva kiseonika. Srednji maseni udeo volatila u domaćim vrstama drveta je oko 75%, vrstog (koksog) ostatka od 15% do 20%, a pepela do 0.6% [6]. Navedene vrednosti se razlikuju u zavisnosti od vrste drveta i dela stabla odakle se uzima uzorak. Ostatak vrste mase posle isparavanja volatila naziva se koks i sastoji se od takozvanog fiksnog ugljenika (C_{fix}) i mineralnih primesa – pepela.

Na slici 3.4. je radi preglednosti, grafički prikazan sastav goriva sa svim navedenim masama.



Slika 3.4. Grafički prikaz analize sastava drvene biomase

Ugljenik (C) je osnovni element organske i sagorljive mase vrstog i te nog goriva. Udeo ugljenika u organskoj masi goriva kre e se od 50 do ak 94% u zavisnosti od vrste goriva. Pri potpunom sagorevanju ugljenika nastaje ugljen dioksid (CO_2) pri emu se osloba a toplota od približno 33900 kJ/kg. Pri nepotpunom sagorevanju ugljenika stvara se ugljen monoksid (CO) pri emu se osloba a znatno manja koli ina toplote (približno 10200 kJ/kg). Ugljenik se u gorivu nalazi u složenim organskim jedinjenjima sa kiseonikom, azotom, vodonikom i sumporom [7].

Vodonik (H) je sastavni deo svakog goriva i predstavlja korisnu komponentu ukoliko se pojavljuje u sklopu ugljovodonika (C_mH_n) ili kao slobodan (H_2). Ako se vodonik pojavljuje sjedinjen sa kiseonikom u vodi (H_2O), onda predstavlja balast u gorivu, pošto se za isparavanje 1 kg vode pri atmosferskom pritisku troši približno 2500 kJ/kg. Pri potpunom sagorevanju 1 kg vodonika osloba a se koli ina toplote od 143200 kJ/kg ako se produkt sagorevanja (voda) nalazi u te noj fazi, odnosno 119600 kJ/kg ako se nalazi u parnoj fazi [7].

Kiseonik (O) je nepoželjan sastojak goriva. Pošto nije sagorljiv, a vezuje se za ugljenik i vodonik iz goriva, kiseonik smanjuje koli inu toplote oslobo enu pri sagorevanju.

Azot (N) je element koji predstavlja unutrašnji balast goriva, jer svojim prisustvom smanjuje procenat sagorljivih elemenata. Pri sagorevanju goriva azot se izdvaja u slobodnom stanju i udaljava se sa gasovitim produktima sagorevanja. Me utim, pri visokim temperaturama sagorevanja azot se jedini sa kiseonikom u azotne okside (NO_x) koji su veoma toksi ni.

Sumpor (S) se u gorivu nalazi u dva oblika: organskom i neorganskom. Neorganski sumpor može da bude piritni ili sulfatni, pa je ukupan sumpor zapravo zbir organskog, piritnog i sulfatnog sumpora. Organski sumpor ulazi u sastav složenih visokomolekularnih organskih jedinjenja goriva. Piritni sumpor se nalazi u jedinjenjima sa metalima, pre svega sa gvož em (FeS_2) i spada u mineralni deo goriva. Organski i piritni sumpor sagorevaju i ine sagorljivi deo ukupnog sadržaja sumpora. Sulfatni sumpor ulazi u mineralni deo goriva u vidu sulfata CaSO_4 i FeSO_4 i zato u procesu dalje ne oksidiše. Sulfatna jedinjenja pri sagorevanju prelaze u pepeo. Sagorljivi sumpor pri oksidaciji stvara SO_2 uz osloba anje toplote od približno 10500 kJ/kg, a ako oksidiše u SO_3 , osloba a toplotu od približno 13800 kJ/kg. Sumpor trioksid (SO_3) predstavlja anhidrid sumporne kiseline, koja, u odre enoj koncentraciji, vrlo agresivno deluje na metal. Zbog toga sumpor predstavlja nepoželjan sastojak goriva, bez obzira na to što je sagorljiv [7].

Mineralne materije (A) predstavljaju balast goriva. Prisustvo mineralnih materija smanjuje sadržaj sagorljivih sastojaka goriva, smanjuju i na taj na in i njegovu toplotnu mo . Sastojci pepela, tj. mineralnih materija posle sagorevanja su silikati (pesak, kvarc) - SiO_2 , oksidi metala (Al_2O_3 - glina, Fe_2O_3), sulfidi (FeS_2), karbonati (CaCO_3 , MgCO_3), sulfati (CaSO_4 , MgSO_4), kalcijumovi, magnezijumovi, natrijumovi, kalijumovi i titanovi oksidi (CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2), sumpor trioksid (SO_3) i drugi.

Naj eš i elementi koji ostaju u pepelu su: kalijum, natrijum i magnezijum koji ine od 0.5 do 4% mase drveta [6]. U kori ima više mineralnih materija nego u samom drvetu. Razlike od uzorka do uzorka su velike, jer na koli inu i sastav mineralnih materija zna ajno uti e stanište, odnosno sastav zemljišta na kome je drvo raslo. U tabeli 3.3. dati su okvirni maseni udeli mineralnih materija u drvnoj biomasi. Navedeni podaci su važni pri izboru ložišta kotla namenjenog za termohemijsku konverziju drvene biomase.

Tabela 3.3. Maseni udeo mineralnih materija u apsolutno suvom drvetu [6]

Vrsta drveta	Maseni udeo, %						
	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂
Bukva	0.09	0.02	0.06	0.31	0.03	0.01	0.03
Hrast	0.05	0.02	0.02	0.37	0.03	0.02	0.01
Bor	0.04	0.04	0.03	0.14	0.02	0.01	0.04

Vlaga predstavlja štetnu komponentu goriva. Pored toga što smanjuje sadržaj sagorljivih materija, vlaga ima značajan uticaj na donju toplotnu moć koja se postiže pri procesima termohemijske konverzije. Naime, voda koja isparava troši energiju iz termohemijskog procesa (približno 2500 kJ/kg), smanjuju i tako donju toplotnu moć goriva (slika 3.5.). Sadržaj vlage izražava se u vidu masenog udela u vlažnoj osnovi.

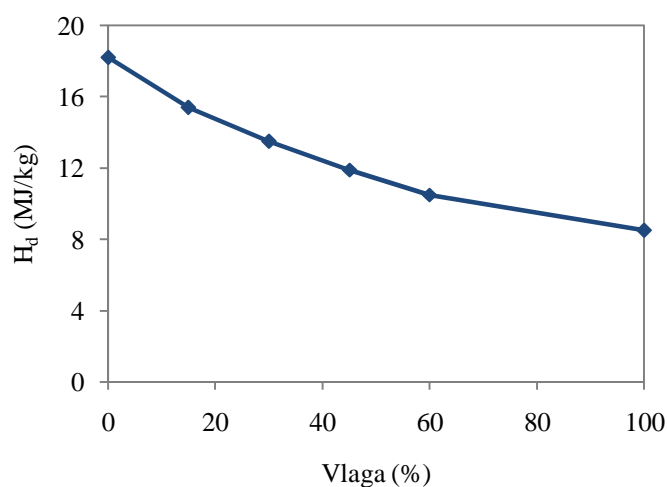
Relativno učešće vlage u drvetu se računa u odnosu na apsolutno suhu materiju [5]:

$$W = \frac{(m_{vl} - m_s)}{m_s} \cdot 100 \quad (\%), \quad (3.5)$$

gde su:

m_{vl} masa vlažnog drveta, (kg)

m_s masa apsolutno suvog drveta osušenog na temperaturi od 103 °C, (kg).



Slika 3.5. Uticaj sadržaja vlage na toplotnu moć drvene biomase [9]

Sadržaj vlage u drvenoj biomasi značajno varira i na njega utiču, između ostalih i sledeći parametri:

- klimatski uslovi
- godišnje doba
- vrsta drveta
- deo stabla
- faza skladištenja [1].

Prema sadržaju vlage u drvetu postoji podela na: suvo drvo sa 10-20% vlažnosti, polusuvo drvo sa 20-35% vlažnosti i sirovo ili vlažno drvo sa vlažnošću od preko 35% [6]. Tokom termohemijskih procesa konverzije, za isparavanje vlage se troši značajan deo oslobođene toplote usled čega se smanjuje toplotna moć drveta, smanjuje energetska efikasnost postrojenja za termohemijske procese konverzije i povećava emisija štetnih gasova u atmosferu.

Ukoliko maseni udeo vlage iznosi 70 do 80% , energetska vrednost drvene biomase ne može da podrži procese termohemijske konverzije. U tabeli 3.4. prikazana je vlažnost različitih vrsta drvene mase, na osnovu podataka koje su prikazali Brkić i ostali [6].

Tabela 3.4. Vlažnost različitih vrsta drvene mase [6]

Vrsta drvene biomase		Vlažnost (maseni udeo, %)
Šumski ostaci		40-60
Ostaci u pilani		40-50
Furnirski ostaci	Mokri tretman	60-70
	Suvi tretman	8-10
Ostaci pri izradi ploče i iverica		7-9
Ostaci u finalnoj preradi	Proizvodnja nameštaja	6-9
	Proizvodnja građevinske stolarije	~12

3.2. Toplotna moć drvene biomase

Osnovna veličina za proračun energije iz određene količine drveta jeste njegova toplotna moć. Najveći uticaj na toplotnu moć ima vlaga (vlažnost, sadržaj ili udeo vlage), potom hemijski sastav, gustina i zdravost drveta. Trebalo bi uvrstiti i vrstu drveta, radi određivanja njegove toplotne vrednosti, da li je listopadno ili četinarsko, odnosno tvrdo ili meko, jer je udeo pojedinih sastojaka pri tome različit, kao i materija koja se može koristiti kao gorivo.

Upotrebna vrednost drveta kao goriva može se dobro proceniti ukoliko se zna ili može izračunati njegova gornja toplotna moć. U tabeli 3.5. prikazane su gornje toplotne moći i ksilema domaćih vrsta drveća.

Tabela 3.5. Gornje toplotne moći i ksilema i kore nekih domaćih vrsta drveća [6]

Vrsta drveta	Gornja toplotna moć (MJ/kg)	
	Drvo	Kora
Bukva	18.82	18.00
Hrast	18.36	19.70
Crna topola	17.26	18.00
Smrčina	19.66	21.20
Jela	19.46	21.00
Bor	21.21	20.62

Iz tabele 3.5. može se primetiti da se gornja toplotna moć različitih vrsta drveta razlikuje, što je i očekivano, usled razlika u udelu osnovnih komponenata i ekstraktivnih materija. Opšte gledano, četinari imaju veću toplotnu moć od listopadnog drveća, što se može objasniti većom količinom smolastih materija i lignina u drvetu.

Donja i gornja toplotna moć goriva mogu se izraziti kada je poznat elementarni hemijski sastav. Donja toplotna moć goriva, H_d realnije odražava energetski potencijal goriva u odnosu na gornju toplotnu moć i izražava se uz pomoć posebno prilagođenog obrasca [8]:

$$H_d = 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W \quad (\text{kJ/kg}), \quad (3.6)$$

gde su:

C, H, O, S i W – maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, sumpora i vlage u drvetu, (kg/kg).

Veza između gornje i donje toplotne moći kod vrstih goriva može se predstaviti sledećim izrazom [8]:

$$H_g = H_d + 2500 \cdot (9 \cdot H + W) \quad (\text{kJ/kg}), \quad (3.7)$$

gde su W i H maseni udeli vlage i vodonika u gorivu (kg/kg).

Uticaj balasta (masenih udela pepela i vlage) na donju toplotnu moć vlažnog goriva može se proceniti pomoću izraza:

$$H_d = H_d^g \cdot (1 - A - W) - 2500 \cdot W \quad (\text{kJ/kg}), \quad (3.8)$$

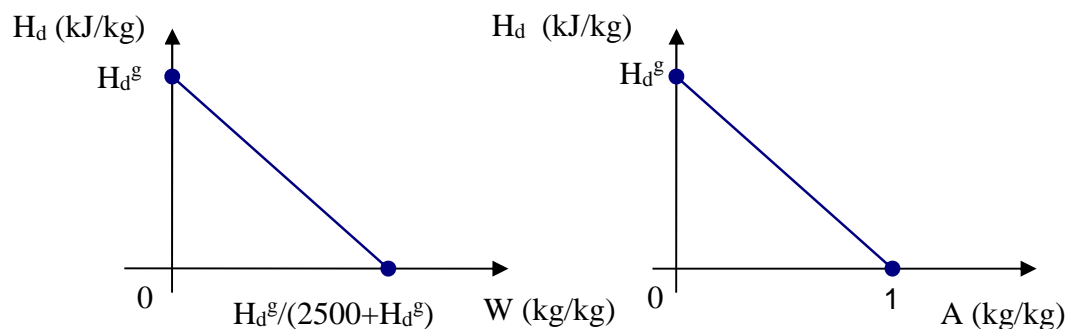
gde je H_d^g donja toplotna moć sagorljive mase goriva.

Definisanjem graničnih uslova $A = 0$ i $W = 0$ pri $H_d^g = \text{const.}$ jednačina (3.8) transformiše se u jednačinu:

$$\frac{W}{\frac{H_d^g}{2500 + H_d^g}} + \frac{H_d}{H_d^g} = 1, \quad (3.9)$$

$$\frac{A}{1} + \frac{H_d}{H_d^g} = 1, \quad (3.10)$$

Oba grafikona predstavljaju opadajuću linearnu funkciju, kao što je prikazano na slici 3.6. Može se uočiti smanjenje donje toplotne moći goriva sa povećanjem masenih udela vlage i pepela.



Slika 3.6. Zavisnost donje toplotne mo i goriva od masenog udela vlage i pepela

Tabela 3.6. prikazuje uobi ajene vrednosti donje toplotne mo i razli itih vrsta goriva.

Tabela 3.6. Toplotne mo i razli itih vrsta goriva [5]

Vrsta goriva	Donja toplotna mo (kJ/kg)
Slama	15827
Drvo	18600
Drveni ugalj	30100
Mrki ugalj	22500
Kameni ugalj	32500
Koks	28800
Ulje za loženje	
lako	42080
teško	41780
Benzin	42040

Na tehni ke karakteristike (toplotnu mo i brzinu sagorevanja) drveta uti e i njegova gustina. Sa pove anjem gustine drveta pove ava se toplotna mo , dok se brzina sagorevanja smanjuje. Na gustinu drveta uti e: vrsta i starost drveta, deo drveta (stablo, grane, koren, liš e itd.) i vreme se e (period vegetacije, zima ili leto). Gustina drveta se kre e u granicama od 550 do 900 kg/m³, što se može videti u tabeli 3.7.

Tabela 3.7. Gustina razli itih vrsta drveta [9]

Vrsta drveta	Prose na donja toplotna mo (kJ/kg)	Prose na gustina drveta (kg/m ³)
Bukva	18820	720
Hrast	18360	690
Crna topola	17260	450
Smr a	19660	470
Jela	19460	450
Bor	21210	520

3.3. Pore enje rezultata elementarne i tehni ke analize sa literaturnim podacima

Drvena biomasa predmet je istraživanja u mnogim nau nim publikacijama. Rezultati elementarne i tehni ke analize drvene biomase razli itih autora prikazani su u tabeli 3.8.

Tabela 3.8. Elementarna i tehni ka analiza razli itih vrsta drvene biomase

Literatura	Elementarna analiza					Tehni ka analiza				
	C	H	N	S	O	W	VM	A	C _{fix}	H _d
	(maseni udeo, %)					(maseni udeo, %)				
Drvena piljevina [10]	46.20	5.10	1.50	0.06	35.40	10.40	70.40	1.30	17.90	16226.49
Iverica [11]	45.01	6.25	0.09	0.01*	40.94	7.45	75.08	0.25	17.22	16447.30
Drvo eukaliptusa [12]	38.49	4.86	0.25	0.00	37.19	16.40	62.99	2.81	17.81	12982.93
Šumski ostaci [13]	49.27	5.72	0.28	0.08	37.15	7.32	73.96	0.18	18.54	17833.73
Strugotina bora [14]	44.05	6.20	0.16	0.00	42.65	6.69	80.23	0.25	12.84	15819.69
Drvni ostatak [15]	43.53	5.71	0.39	0.00	40.80	7.94	75.65	1.63	14.79	15297.92
Drvena strugotina [15]	30.79	3.97	0.13	0.00	29.95*	34.90	51.60	0.26	13.30	9836.49
Kora bora [16]	48.02	5.17	0.43	0.00	42.12*	3.00	69.84	1.26	25.87	16098.40
Hrast [16]	47.06	5.67	0.28	0.09	39.90	6.50	73.00	0.50	20.00	16628.16
Piljevina hrasta [17]	44.19	5.20	0.09	0.01	38.72	11.5	76.30	0.30	11.90	15129.85
Piljevina bora [17]	43.15	5.08	0.08	0.01	36.28	15.30	70.40	0.10	14.20	14906.50
Jela [17]	48.53	5.66	0.28	0.09	38.24	6.70	75.70	0.50	17.10	17361.23
Topola [17]	47.06	5.56	0.55	0.02	38.01	6.80	79.70	2.00	11.50	16766.57
Vrba [17]	44.07	5.40	0.53	0.05	38.45	10.10	74.20	1.40	14.30	15412.26
Vrba [18]	44.82	5.56	3.34	0.00	41.24	2.27	78.91	2.77	16.05	15628.67

*dobijeno prora unom

Elementarna i tehni ka analiza mešavine drvene biomase koja je bila predmet istraživanja u doktorskoj disertaciji, izvršena je od strane Rudarskog Instituta u Beogradu i prikazana u tabeli 3.9.

Tabela 3.9. Elementarna i tehni ka analiza mešavine drvene biomase koriš ene pri eksperimentalnom ispitivanju [19]

Elementarna analiza					Tehni ka analiza					
C	H	N	S	O	W	VM	A	C _{fix}	H _d	
(maseni udeo, %)					(maseni udeo, %)					(kJ/kg)
42.00	4.96	1.05	0.28	40.86	8.90	76.40	1.99	12.71	16299.99	

Maseni udeli ugljenika, vodonika, azota i kiseonika u drvnoj biomasi u pregledanoj literaturi kretali su se u opsegu 30.79 49.27%, 3.97 6.25%, 0.09 1.50% i 29.95 42.65%, respektivno. Vrednosti masenih udela ugljenika, vodonika, azota i kiseonika u ispitivanoj mešavini drvene biomase bile su u okviru navedenog opsega za razmatrani element. Maseni udeo sumpora u mešavini drvene biomase iznosi 0.28%, što je van opsega masenog udela sumpora drugih istraživa a, koji se kretao od 0 do 0.09%.

Najzna ajnije razlike u ene su za maseni udeo vlage u drvnoj biomasi, ija je vrednost u opsegu od 3.00 do ak 34.90%. Maseni udeo vlage u ispitivanoj mešavini drvene biomase iznosio je 8.90%. Maseni udeli isparljivih materija, pepela, fiksnog ugljenika i donja toplotna

mo prikazani u rezultatima drugih autora iznosili su: 51.60 80.23%, 0.10 2.81%, 11.50 25.87% i 9836.49 17833.73 kJ/kg, respektivno. Rezultati tehni ke analize mešavine drvene biomase bili su u navedenim opsezima.

3.4. Kvalitativna ocena karakteristika drvene biomase

Poznavanje karakteristika drvene biomase zna ajno je u mnogim procesima: sagorevanju, pirolizi, gasifikaciji, pre iš avanju dimnih gasova. Tehni ka i elementarna analiza drvene biomase predstavlja polaznu osnovu u raznim tehni kim prora unima. Kvalitativnom analizom obuhva ene su slede e karakteristike drvene biomase: maseni udeli vlage (W), isparljivih materija (VM), pepela (A), kao i donja toplotna mo (H_d). Uzorci ije se karakteristike analiziraju su dostupni rezultati tehni kih i elementarnih analiza za petnaest razli itih vrsti drvene biomase i rezultati tehni ke i elementarne analize ispitivane mešavine drvene biomase (tabele 3.8. i 3.9.). Odre eni su slede i statisti ki parametri [20]:

1. apsolutni raspon

$$R = \max X_i - \min X_i, (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3.11)$$

2. aritmeti ka sredina

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3.12)$$

3. standardno odstupanje

$$= \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.13)$$

4. koeficijent varijacije

$$C_v = \frac{s}{\bar{X}}, \quad (3.14)$$

gde su:

n broj uzoraka,

X_i vrednosti razmatranih (obeležja) karakteristika drvene biomase.

Koriš enjem broj anih vrednosti karakteristika drvene biomase iz tabela 3.8. i 3.9, kao i izraza 3.11 do 3.14, vrednosti pojedinih statisti kih parametara za karakteristiku drvene biomase „maseni udeo vlage“ iznose:

$$R = \max X_i - \min X_i = 34.90 - 2.27 = 32.63 \frac{\text{kgW}}{\text{kgB}}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{10.40 + 7.45 + 16.40 + 7.32 + \dots + 2.27 + 8.90}{16} = 10.14 \frac{\text{kgW}}{\text{kgB}}$$

$$= \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \left(\frac{(10.40 - 10.14)^2 + (7.45 - 10.14)^2 + \dots + (2.27 - 10.14)^2 + (8.90 - 10.14)^2}{15} \right)^{\frac{1}{2}} = 7.59 \frac{\text{kgW}}{\text{kgB}}$$

$$C_v = \frac{7.59}{10.14} = 0.7485 = 74.85\%$$

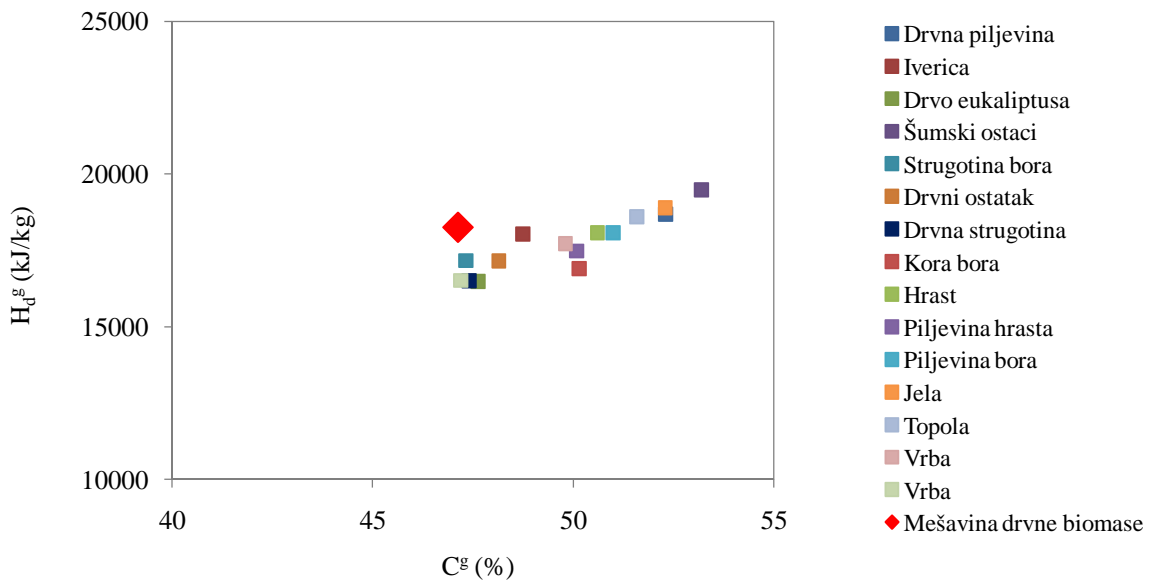
Na isti način su izraženi statistički parametri za maseni udeo isparljivih materija, pepela i donju toplotnu moć drvne biomase i prikazani u tabeli 3.10.

Tabela 3.10. Kvalitativne karakteristike drvne biomase

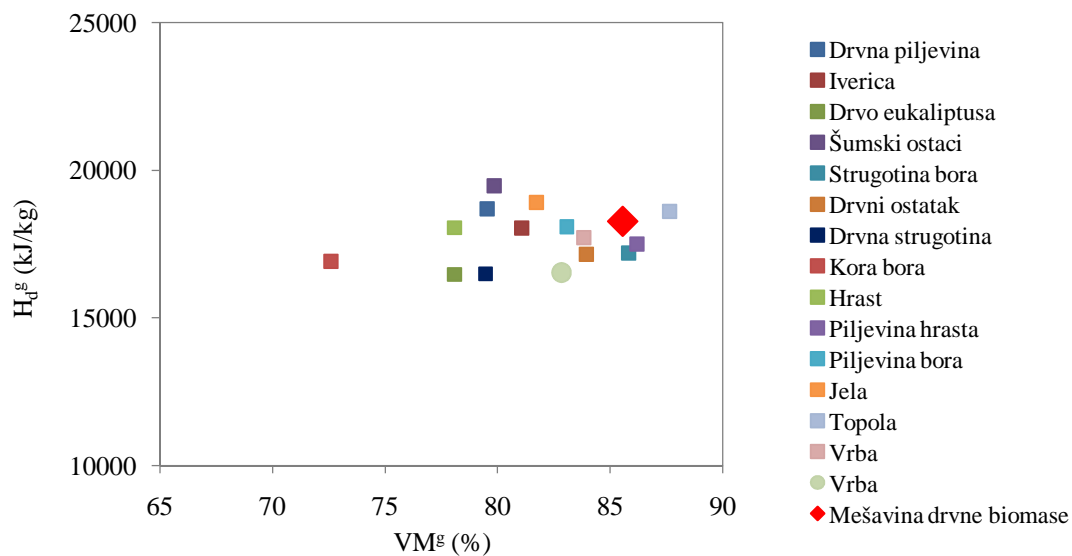
Karakteristike drvne biomase	Statistički parametri drvne biomase			
	R	\bar{X}	C_v (%)	
$W \left(\frac{\text{kgW}}{\text{kgB}} \right)$	32.63	10.14	7.59	74.85
$VM \left(\frac{\text{kgVM}}{\text{kgB}} \right)$	28.63	72.77	7.10	9.76
$A \left(\frac{\text{kgA}}{\text{kgB}} \right)$	2.71	1.09	0.93	85.32
$H_d \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	7997.24	15542.26	1884.14	12.12

Analiza kvalitativnih karakteristika drvne biomase pokazuje da postoje određena odstupanja razmatranih karakteristika: 74.85% (vlaga), 9.76% (isparljive materije), 85.32% (pepeo) i 12.12% (toplotna moć) od srednjih vrednosti, na šta ukazuje koeficijent varijacije C_v (tabela 3.10.). Značajna odstupanja karakteristika pepela od srednje vrednosti (85.32%) mogu nepovoljno da utiču na primenu i rad postrojenja za suvo odsumporavanje dimnih gasova pri procesima sagorevanja zbog dodatne količine praha.

U cilju poređenja karakteristika različitih vrsta drvne biomase sa drvnom biomasom iz Srbije korišćenom za eksperimentalno ispitivanje, na slikama 3.7. i 3.8. prikazana je zavisnost donje toplotne moći od masenog udela i ugljenika i isparljivih komponenata, svedeno na sagorljivu masu (masu bez vlage i pepela). Ukoliko se uzme u obzir da se radi o različitim vrstama drvne biomase, sa razlikama u raspodeli veličine estica, kao i da su sa različitim podnebljima, može se reći da odstupanja nisu značajna.



Slika 3.7. Zavisnost donje toplotne mo i drvene biomase i ugljenika, svedeno na sagorljivu masu

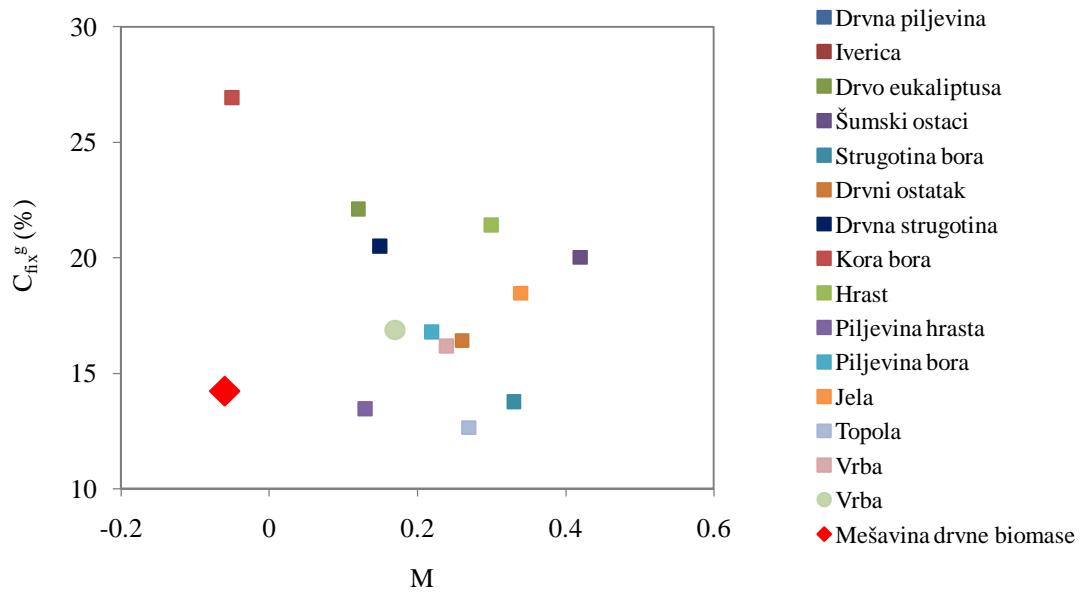


Slika 3.8. Zavisnost donje toplotne mo i drvene biomase i isparljivih materija, svedeno na sagorljivu masu

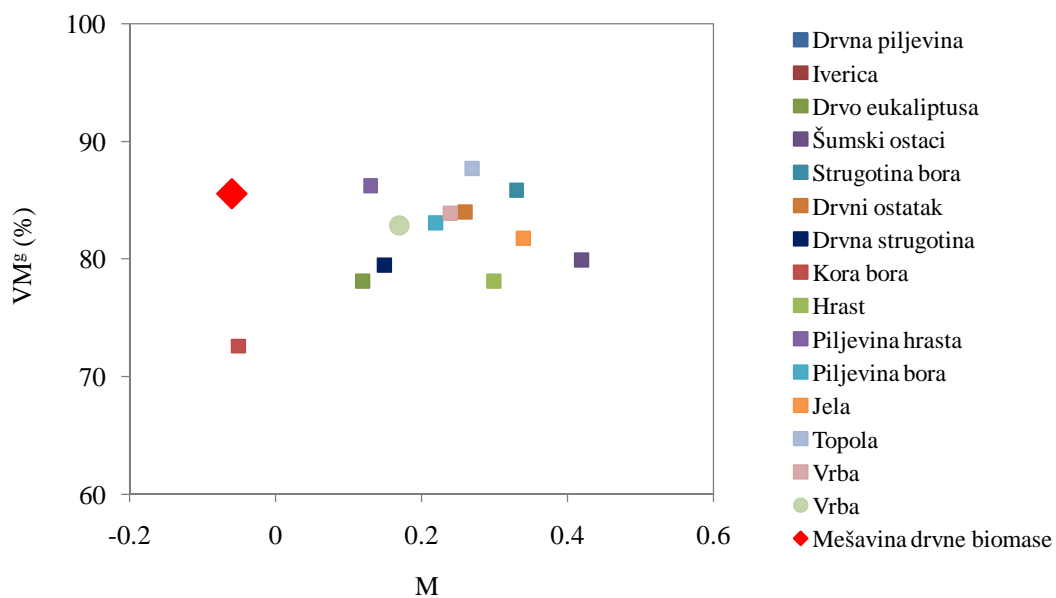
Jedan od na ina kategorizacije vrstih goriva jeste zavisnost masenog udela fiksnog ugljenika i isparljivih materija svedenih na sagorljivu masu od veli ine M odre ene slede im izrazom:

$$M = \frac{\left(H^g - \frac{O^g}{8} \right) \cdot 12}{C_{isp}^g} \quad (3.12)$$

Promena veli ine M ukazuje na rasutost vrednosti C_{fix}^g (slika 3.9), a zavisnost VM^g od veli ine M ukazuje na korelacionu vezu karakteristika drvene biomase (slika 3.10.).



Slika 3.9. Zavisnost fiksnog ugljenika i koeficijenta M , svedeno na sagorljivu masu



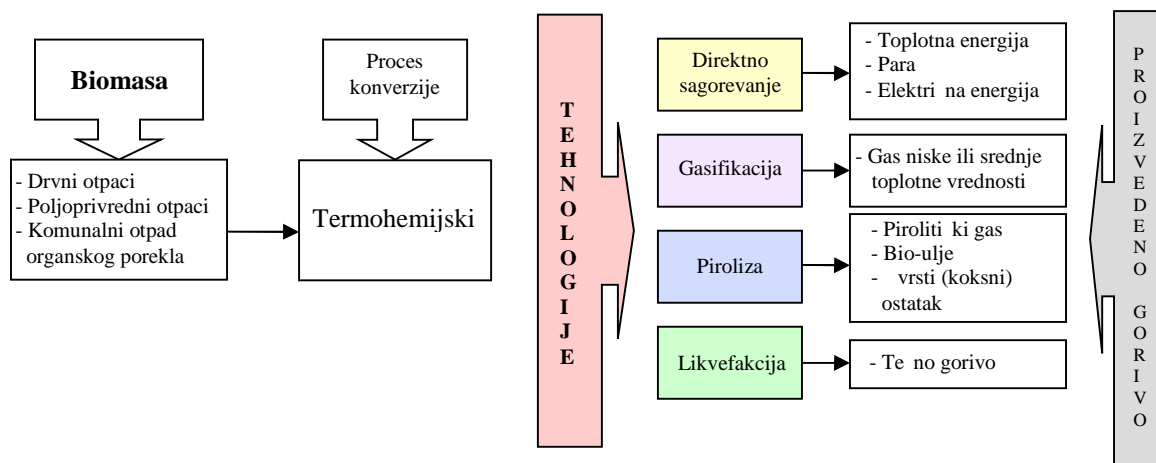
Slika 3.10. Zavisnost isparljivih materija i koeficijenta M , svedeno na sagorljivu masu

LITERATURA

- [1] ***, Material for 5EURES Training sessions. Page compiled by Markus Huhtinen. 2006. Wood properties as a fuel. Intelligent Energy - Europe Programme by European Commission.
- [2] Belderok H. J. M. 2007. Experimental investigation and modeling of the pyrolysis of biomass. MSc Thesis. Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven.
- [3] Frassoldati A, Migliavacca G, Crippa T, Velata F, Faravelli T, Ranzi E. 2006. Detailed kinetic modeling of thermal degradation of biomasses. Technical report.
- [4] Rajeswara T. R, Sharma A. 1988. Pyrolysis rates of biomass materials. *Energy* 23: 973–978.
- [5] Martinov M. 1980. Toplotna moć slame žita uzgajanih na području SAP Vojvodine. *Savremena poljoprivredna tehnika* 6(3): 95–101.
- [6] Brki M, Teši M, Furman T, Martinov M, Jani T. 2007. Studija: Potencijali i mogućnosti briketiranja i peletiranja otpadne biomase na teritoriji Pokrajine Vojvodine. Pokrajinski sekretarijat za energetiku i mineralne sirovine, Republika Srbija, Autonomna Pokrajina Vojvodina, Novi Sad.
- [7] Guli M, Brki Lj, Perunovi P. 1991. Parni kotlovi. Mašinski fakultet, Beograd.
- [8] Borović B, Valent V, Šerbanovi S. 1987. Termodinamika i termotehnika. Građevinska knjiga, Beograd.
- [9] Danon G. 2011. Energetika u drvoju industriji, skripta. Šumarski fakultet, Beograd.
- [10] Cao Y, Wang Y, Riley J. T, Pan W. P. 2006. A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas. *Fuel Processing Technology* 87: 343–353.
- [11] Chen W. H, Hsu H. C, Lu K. M, Lee W. J, Lin T.C. 2011. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. *Energy* 36: 3012–3021.
- [12] Channiwala S. A, Parikh P. P. 2002. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel* 81(8): 1051–1063.
- [13] Vamvuka D, Kakaras E, Kastanaki E, Grammelis P. 2003. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite. *Fuel* 82(15–17): 1949–1960.
- [14] Phanphanich M, Mani S. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology* 102: 1246–1253.
- [15] Senneca O. 2007. Kinetics of pyrolysis, combustion and gasification of three biomass fuels. *Fuel Processing Technology*: 87–97.
- [16] İnsöz S. 2003. Slow pyrolysis of wood barks from *Pinus brutia* Ten. and product compositions. *Bioresource Technology* 89: 307–311.
- [17] Vassilev S. V, Baxter D, Andersen L.K, Vassileva C. G. 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89: 913–933.
- [18] Chen W. H, Kuo P. C. 2010. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy* 35(6): 2580–2586.
- [19] ***, Izveštaj o ispitivanju br. 72/14, Laboratorija za vrsta goriva, Rudarski institut Beograd.
- [20] Ćurić S. N, Stanojević P., Ćuranović D. B, Branković S. B, Milašinović S. M. 2012. Qualitative Analysis of Coal Combusted in Boilers of the Thermal Power Plants in Bosnia and Herzegovina. *Thermal Science* 16(2): 605–612.

4. TERMOHEMIJSKI PROCESI PRERADE BIOMASE

Drvo i ostala biomasa mogu se tretirati na više različitih načina da bi se obezbedilo odgovarajuće gorivo. Metode prerade biomase dele se na termohemijske, biohemijske i hemijske. Termohemijski procesi prerade biomase prikazani su na slici 4.1.



Slika 4.1. Termohemijski procesi prerade biomase

Direktno sagorevanje proizvodi toplotu za proizvodnju pare i usled toga proizvodnju električne energije. Gasifikacija takođe proizvodi gorivi gas koji može da sagoreva, proizvode i toplotu, ili se može koristiti u motoru ili turbini za proizvodnju električne energije. Proizvedeni gas se može dalje obraditi do metanola ili te nih ugljenih hidrata pomoću Fisher – Tropsch sinteze. Proces brze pirolize obezbeđuje tečno gorivo koje može da zameni lož ulje pri bilo kakvom statičkom zagrevanju ili primeni u proizvodnji električne energije. Spora piroliza je dobro poznat i definisan proces, dok se brza piroliza još uvek razvija. Pretvaranje organskih komponenata u tečno proizvode likvefakcijom je katalitički proces na relativno niskoj temperaturi (250 °C – 500 °C) i visokom pritisku (5 – 35 MPa) koji se vrši u redukcijnoj atmosferi (vodonik ili ugljen monoksid) ili korišćenjem sistema sa davaocem kiseonika.

4.1. Piroliza

Piroliza je termohemijski proces konverzije biomase koji se odvija na temperaturi od 300 do 650 °C u odsustvu vazduha, a dobijeni proizvodi su: tečnost (bio-ulje), gasovi i vrsti (koksni) ostatak. Piroliza predstavlja prvi stepen pri sagorevanju i gasifikaciji biomase pri kojima se odvija potpuna ili parcijalna oksidacija primarnih produkata [1]. Prinos pojedinih proizvoda pirolize zavisi od hemijskog sastava biomase i uslova vođenja procesa pirolize. Komponente biomase termički se razlažu različitim brzinom. Najstabilniji je lignin [2], a razlaganje se odvija sledećim redosledom:

hemiceluloza → celuloza → lignin

Ako je cilj pirolize biomase dobijanje maksimalnog prinosa tečnosti i gasovih proizvoda, tada se proces vodi na niskim temperaturama, pri velikim brzinama zagrevanja i kratkim vremenom boravka isparene biomase u reakcionoj zoni.

Da bi se ostvario veliki prinos vrstog ostatka (koks), proces se vodi pri niskim temperaturama i malim brzinama zagrevanja, a za veliki prinos gasovitog produkta (pirolitički gas), proces se vodi pri visokim temperaturama, malim brzinama zagrevanja i dugim vremenom boravka gasovite faze u reaktoru [2, 3].

4.1.1. Sastav produkata pirolize i njihova primena

Bio-ulje, odnosno tečni proizvod, predstavlja homogenu mešavinu organske komponente i vode (15-30%, maseni udeo). Voda potiče od prisutne vode u polaznoj sirovini i tako nastaje tokom reakcije pirolize. Prisutna voda utiče na smanjenje toplotne vrednosti i temperature paljenja bio-ulja, kao i na smanjenje viskoznosti [4]. Prisutna voda se ne može ukloniti postupkom destilacije [5].

Bio-ulje ima široku primenu i može se koristiti kao:

- gorivo za sagorevanje u bojlerima, pećima i za proizvodnju energije
- gorivo ili komponenta za namešavanje sa fosilnim dizelom za dizel motore i
- sirovina za dobijanje hemijskih komponenata, adhezivnih sredstava, anhidrovanih šećera.

Karakteristike bio-ulja date su u tabeli 4.1. [1, 4]. Veliki sadržaj kiseonika u bio-ulju (tabela 4.1.) ukazuje na prisustvo brojnih polarnih grupa u jedinjenjima prisutnim u bio-ulju, koja uslovljavaju veliku viskoznost, termičku nestabilnost i korozivno dejstvo. Pomenute osobine se mogu poboljšati različitim postupcima obrade bio-ulja [4] kao što su:

- hidroleoksidacija u prisustvu katalizatora Co-Mo, Ni-Mo i njihovih oksida na nosa u Al_2O_3 , u atmosferi H_2 ili CO; prisutan kiseonik se uklanja kao H_2O i CO_2 i
- katalitički krekning piroliznih para u prisustvu različitih katalizatora pri čemu se kiseonik uklanja kao H_2O , CO_2 ili CO.

Tabela 4.1. Karakteristike bio-ulja dobijene pirolizom drvene biomase [1, 4]

Karakteristika	Raspon vrednosti
Sadržaj vlage (maseni udeo, %)	15 30
Gustina (kg/l)	1.2
Viskoznost na 40 °C sa 25% vode (Pa·s)	0.04 0.10
Ostatak posle destilacije (maseni udeo, %)	50
pH vrednost	2.5
Pepeo (maseni udeo, %)	0 0.2
Gornja toplotna moć, (MJ/kg)	16 19
Elementarni sastav (maseni udeo, %):	
C	55 58
O	35 40
H	5.5 7
N	0 0.2

Gasovita komponenta – se uglavnom sastoji od CO, CO₂ i CH₄. U manjem sadržaju su prisutni H₂, etan, propan, propilen, butan, buten, pentan i dr. U pore enju sa gasom dobijenim procesom gasifikacije piroliti ki gas ima ve u toplotnu vrednost i može se koristiti kao gorivo za sagorevanje u gasnim turbinama u industrijske svrhe i kao gorivo u doma instvima [6].

vrsti ostatak (koks) – se sastoji od elementarnog ugljenika sa vodonikom i njegov prinos u procesu pirolize naj eš e iznosi od 20 do 26% [7]. Može se koristiti:

- kao vrsto gorivo u boilerima, samostalno ili u mešavini sa biomasom
- za dobijanje aktivnog ugljenika i
- u gasifikacionim procesima za dobijanje gasa bogatog vodonikom koji se koristi u termi kom krekingu.

4.1.2. Procesi pirolize

U zavisnosti od brzine zagrevanja kao i drugih parametara procesa razlikuju se slede i procesi pirolize biomase:

- spora piroliza
- brza piroliza
- fleš piroliza i
- kataliti ka piroliza.

Navedeni procesi se razlikuju po hemizmu, prinosu i kvalitetu dobijenih proizvoda kao što su: piroliti ki gas, bio-ulje i vrsti (koksni) ostatak [6].

Sporna piroliza je proces sporog zagrevanja biomase brzinom 5 7 °C/min pri temperaturi procesa od 300 650 °C. Najzastupljeniji produkti su vrsti ostatak i bio-ulje dok je prinos piroliti kog gasa znatno smanjen [8].

Fleš piroliza je proces pri kom se veoma male estice biomase (105 250 µm) zagrevaju velikom brzinom u kratkom vremenu boravka od nekoliko sekundi u proto nom reaktoru ili reaktoru sa fluidizovanim slojem, sa ciljem da se dobije maksimalan prinos te nog proizvoda. Ispitivanja su pokazala da se može ostvariti prinos te nog proizvoda do 68% [8].

Kataliti ka piroliza – bio-ulje dobijeno procesima spore, brze i fleš pirolize po svojim karakteristikama ne zadovoljava uslove za direktno namešavanje sa fosilnim dizelom pa su potrebni dodatni procesi kojima bi se smanjio sadržaj kiseonika i vlage da bi se postiglo smanjenje viskoznosti, povećala oksidaciona stabilnost i smanjila korozivna delovanja. Međutim, dodatni procesi kod navedenih procesa pirolize, uticali su na povećanje cene dobijanja bio-ulja. Kataliti kom pirolizom biomase sa različitim tipovima zeolitnih katalizatora može se dobiti bio-ulje sa karakteristikama koje zadovoljavaju uslove za namešavanje sa dizelom što omogućava direktno korišćenje u motorima.

Najveći prinos bio-ulja, koje se koristi kao komponenta za namešavanje sa fosilnim dizelom ili kao gorivo, dobija se postupkom *brze pirolize*.

4.1.2.1. Brza piroliza

Brza piroliza je visokotemperaturni proces pri kome se biomasa zagreva velikom brzinom, oko 300 °C/min [8] u odsustvu kiseonika. Proizvodi brze pirolize su gasovita faza i aerosol u velikoj količini i koks u neznatnoj količini. Posle hlađenja i kondenzacije gasne faze dobija se tečna faza tamno braon boje koja se naziva uljem. Istraživanja su pokazala da se maksimalan prinos bio-ulja dobija pri reakcionoj temperaturi od približno 500 °C i kratkom vremenu boravka gasne faze, uglavnom 1 s, kako bi se izbegle sekundarne reakcije. Glavne karakteristike brze pirolize [1] su:

- velika brzina prenosa toplote i velika količina toplote koja se razmenjuje
- kontrolisana temperatura reakcije oko 500 °C i temperature gasne faze od 400–450 °C
- kratko vreme boravka gasne faze u reakcionoj sredini (manje od 2 s), kako bi se sprečile sekundarne reakcije i
- brzo hlađenje gasovite faze dobijene piroliznim reakcijama biomase, kako bi se dobio veći prinos tečnog produkta bio-ulja.

Faze brze pirolize su: sušenje sirovine do sadržaja vlage manje od 10%, sitnjenje (za fluidizovan postupak do 2 mm), odvajanje koksa od tečne faze i prikupljanje tečne faze. Faze procesa brze pirolize najčešće se odigravaju u reaktoru sa fluidizovanim slojem.

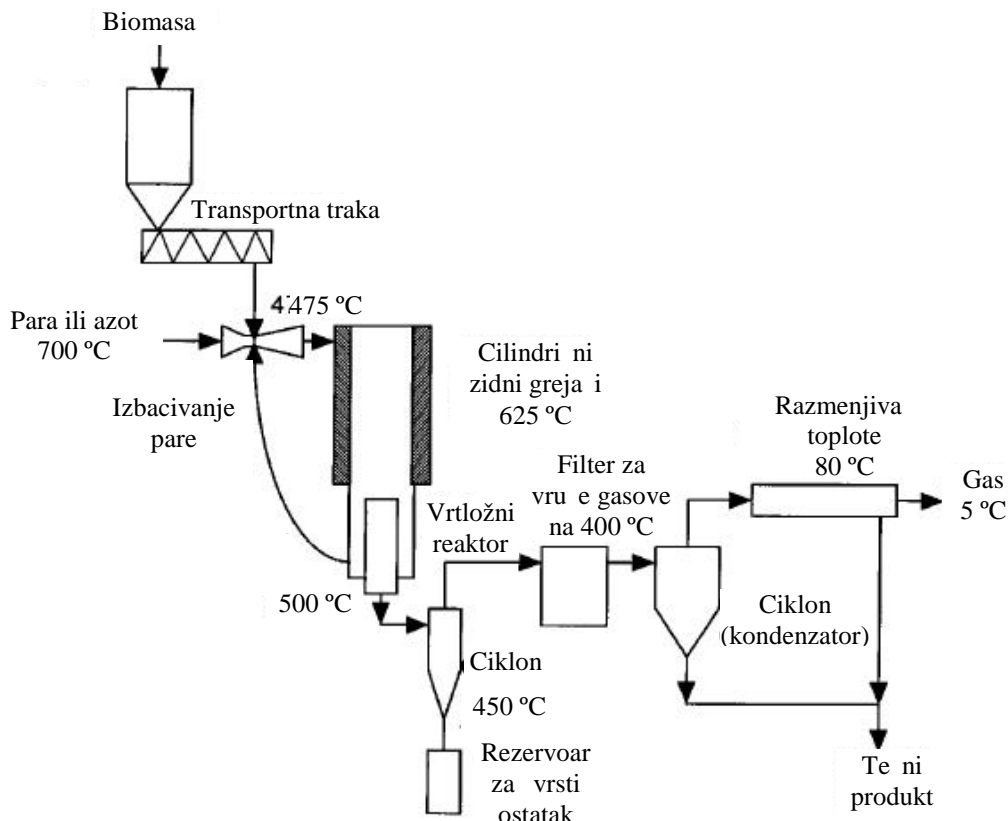
Glavni deo procesnog postrojenja je reaktor, u kome treba ostvariti brz prenos toplote i mase uz kontrolisanu temperaturu reakcije i kratko vreme zadržavanja gasovitih produkata pirolize. U toku procesa neophodno je istovremeno postići i optimalnu procesnu temperaturu destilata biomase uz minimalno izlaganje temperaturama koje doprinose izdvajanju koksa. Navedeni parametri zavise od mehanizma usobnog kontakta biomase i izvora toplote.

Posmatrano sa stanovišta mehanizma usobnog kontakta biomase i izvora toplote razlikuju se četiri postupka brze pirolize [4]:

- ablativna piroliza (*lat.* ablativ odnositi, odvajati)
- piroliza u reaktoru sa barbotажnim fluidizovanim slojem
- piroliza u fluidizovanom i cirkulirajućem sloju i
- vakuum piroliza.

Ablativna piroliza

Proces u vrtložnom reaktoru prikazan na slici 4.2., sastoji se u slede em: estice biomase veli ine oko 5 mm, mešaju se sa recikliraju om parom i uvode u reaktor tangencijalno brzinom ve om od 400 m/s tako da estice vrše pritisak na zidove reaktora velikom centrifugalnom silom.



Slika 4.2. Postupak ablativne pirolize [9]

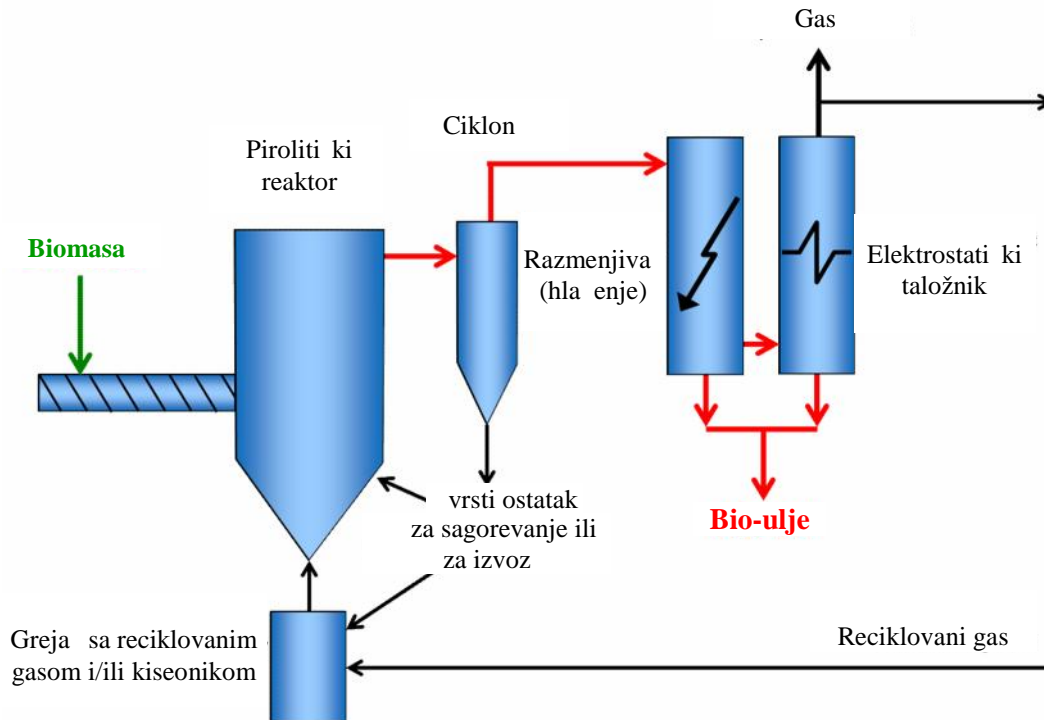
Na ra un toplote zidova reaktora (približno 600 °C) estice biomase prelaze u te an film koji isparava. Dobijeni gasoviti proizvodi napuštaju reaktor i odvode se u ciklon sa ijeg vrha se izdvajaju vrela gasovi, a sa dna koks. Gasovi se dalje odvode na filtraciju na povišenoj temperaturi (približno 400 °C) kako bi se izdvojile i najfinije estice koksa i alkalni metali. Posle filtracije topli gasovi se uvode u toplotni razmenjiva iz koga se izdvaja kondenzovana te nost i gasna faza.

Postupkom ablativne pirolize se ostvaruje prinos bio-ulja u obliku smeše organske faze i vode do 67% (maseni udeo) i koksa do 13% (maseni udeo) u odnosu na suhu materiju sirovine [7].

Brza piroliza u reaktoru sa barbotажnim fluidizovanim slojem

Uproš ena šema procesa brze pirolize u reaktoru sa barbotажnim fluidizovanim slojem data je na slici 4.3. Biomasa posle sitnjenja (veli ine estica 2 3 mm) i sušenja se pomo u zatvorenog pužnog transportera uvodi u reaktor. Fluidizacija estica u reaktoru postiže se recirkuliranim gasom koji se pre uvo enja u reaktor zagreva u razmenjiva u toplote.

Vreme boravka proizvoda pirolize, parne faze i estica koksa u reaktoru reguliše se brzinom proticanja reciklovanog gasa. Produkti pirolize iz reaktora se odvede u ciklon iz koga se izdvojene estice koksa odvede u prihvatni rezervoar, a pare u dva serijski povezana razmenjiva a toplote kod kojih se voda koristi kao rashladni fluid [1].

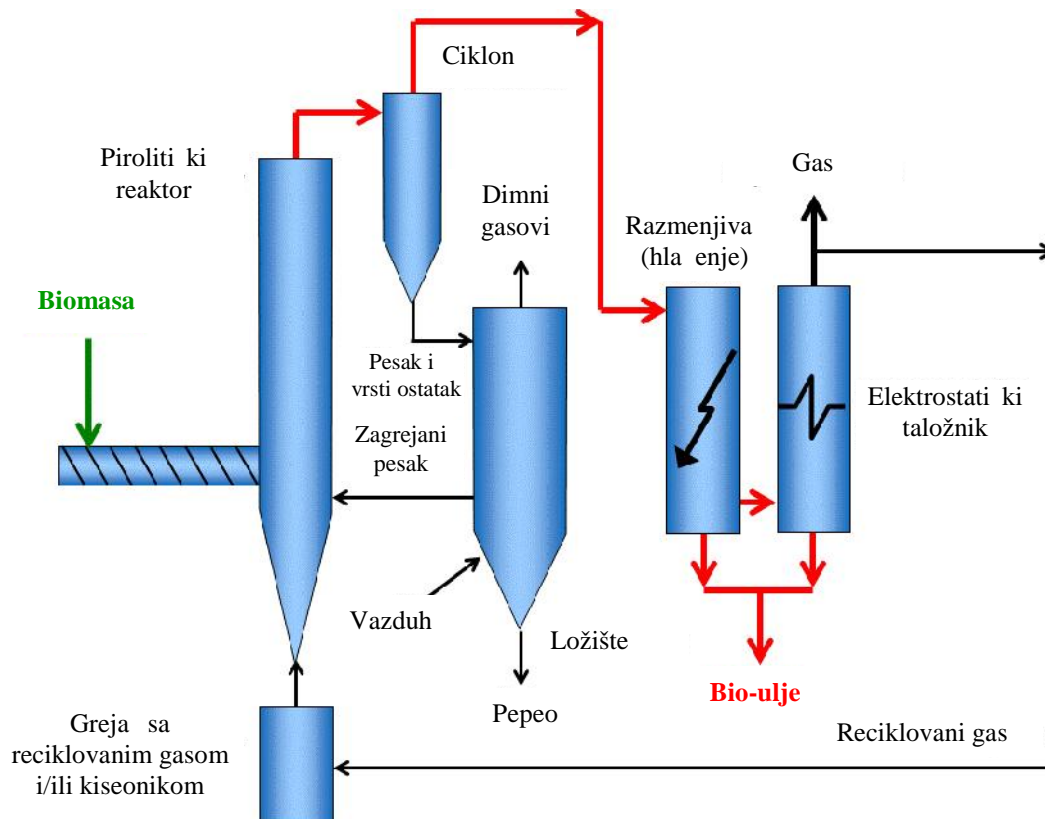


Slika 4.3. Proces brze pirolize u reaktoru sa barbotaznim fluidizovanim slojem [1]

Prinosi proizvoda, u odnosu na suhu materiju sirovine su: bio-ulja približno 70-75% (maseni udeo), a vrstog ostatka (koksa) približno 20% (maseni udeo) [7].

Brza piroliza u reaktoru sa cirkulacionim fluidizovanim slojem

Postrojenje brze pirolize u reaktoru sa cirkulacionim fluidizovanim slojem prikazano je na slici 4.4. Sastoji se iz dva reaktora, piroliti kog i barbotaznog reaktora. U piroliti ki reaktor uvodi se biomasa koja pirolizuje u fluidizovanom sloju koji se postiže uvo enjem zagrejanog peska na dno piroliti kog reaktora i fluidizuje toplim recirkuliranim gasom. Proizvodi pirolize (gasovi i sporedni proizvod - vrsti ostatak (koks)) iz reaktora se odvede u ciklon sa ijeg vrha se gasoviti proizvodi odvede u dva serijski povezana razmenjiva a toplote. Sa dna ciklona izdvaja se koks i odvođa u barbotazni reaktor gde sagoreva [1]. Na ra un toplote dobijene sagorevanjem koksa zagreva se pesak koji se iz ovog reaktora odvođa u piroliti ki reaktor. Gasoviti produkti iz ciklona se u serijski povezanim razmenjiva ima toplote kondenzuju u bio-ulje. Prinos bio-ulja iznosi iznad 60% (maseni udeo) u odnosu na suhu materiju sirovine [7].

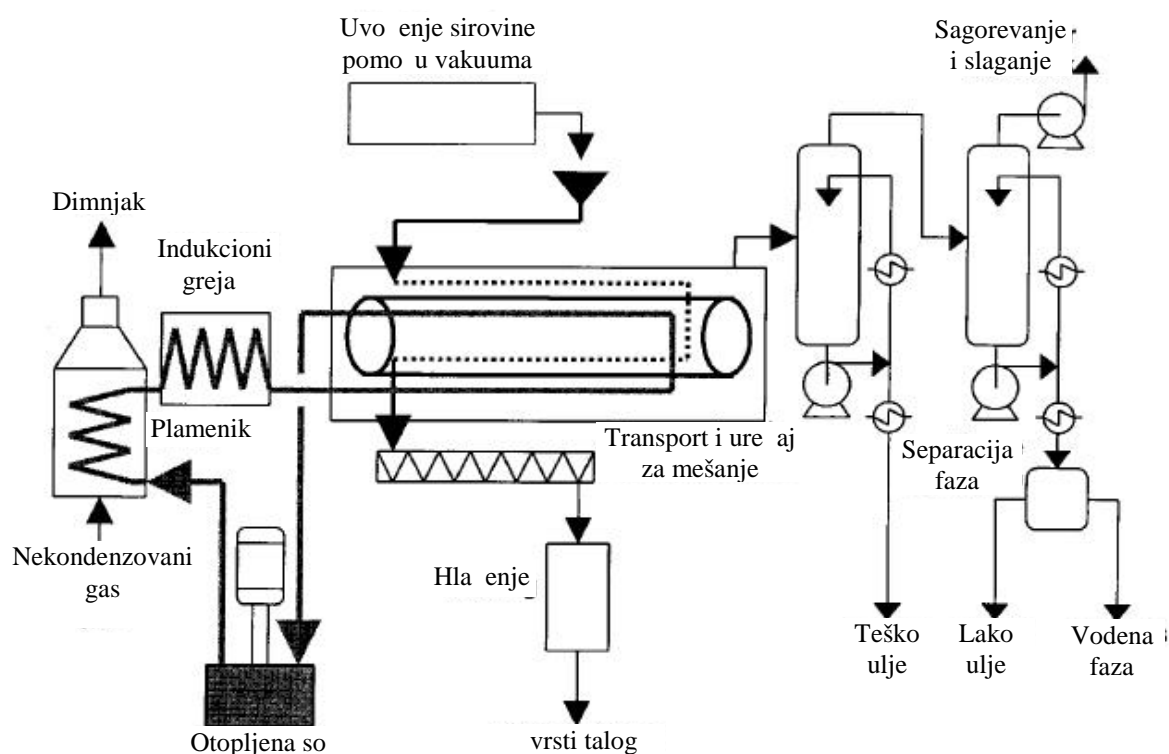


Slika 4.4. Proces brze pirolize u reaktoru sa cirkulacionim fluidizovanim slojem [1]

Vakuum piroliza

Vakuum piroliza [1, 9] je proces termičke razgradnje biomase na temperaturi 450 °C i pritisku 15 kPa. Šema procesa prikazana je na slici 4.5. Gorivo, prethodno osušeno i usitnjeno, uvodi se u reaktor pomoću vakuuma. Zagrevanje goriva i prevođenje u gasovitu fazu se postiže pomoću dve paralelne ploče koje se zagrevaju pomoću smeše mineralnih soli zagrejanih do temperature od 530 °C. Zagrevanje smeše mineralnih soli se postiže na račun toplote sagorevanja otpadnog gasa koji se izdvaja u toku procesa pirolize. Za održavanje konstantne temperature u reaktoru koristi se indukcioni električni grejač. Pare konvertovane biomase odvođuju se iz reaktora u dva kondenzatora pomoću vakuumpumpe. Iz prvog kondenzatora se sa dna izdvaja teška tečna faza a sa vrha frakcija koja se odvođuje u drugi kondenzator. Sa vrha drugog kondenzatora se izdvajaju otpadni gasovi koji se koriste za sagorevanje u samom procesu, a sa dna se izdvaja smeša vode i lake tečne faze. Nastala smeša se razdvaja u separatoru na vodenu fazu i laku fazu, bio-ulje.

Pri procesu vakuum pirolize ne koristi se gas nosač. Biomasa kao gorivo može imati veću veličinu estera u odnosu na druge procese brze pirolize. Prinos proizvoda procesa pri preradi goriva drvenaste osnove u odnosu na suhu materiju je: 35-47% (maseni udeo) bio-ulja, 17-20% (maseni udeo) pirolitičke vode, 24-34% (maseni udeo) koksa i približno 12% (maseni udeo) gasa [7].



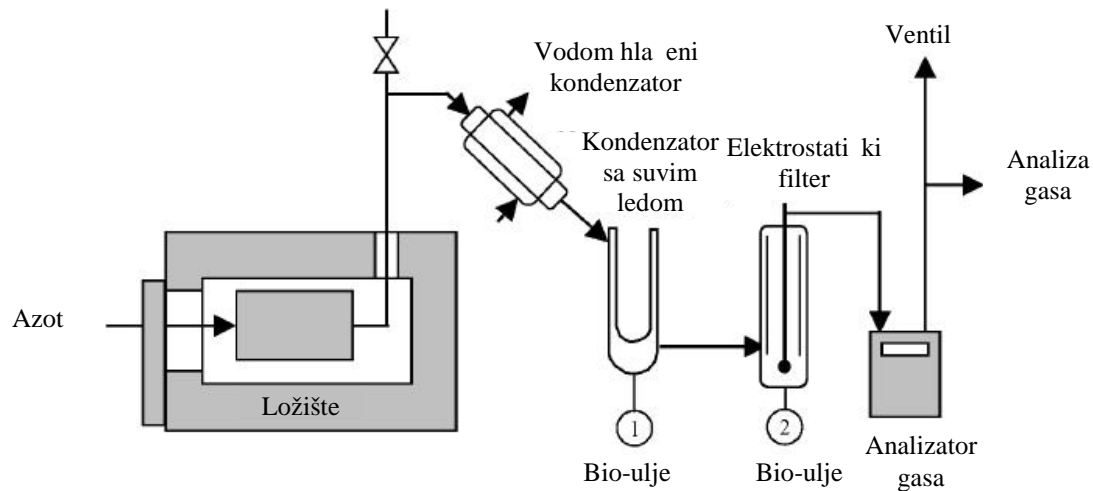
Slika 4.5. Vakuum pirolitički proces [9]

Razmatrani proces ima komercijalnu primenu pri recikliranju automobilskih guma i otpadnih muljeva. Tako se istražuje mogućnost primene za recikliranje drugih otpadnih materijala organskog porekla (medicinski otpad, plastični otpad, komunalni vršni otpad, naftni muljevi i drugi industrijski otpad).

4.1.2.2. Spora piroliza

Sporna piroliza odvija se pri temperaturama većim od $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ i pri dugom vremenu boravka gasne faze (4-8 minuta). Brzina zagrevanja kreće se od 1 do $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Pri navedenim uslovima, gasovita komponenta proizvoda ima visok prinos usled završenih sekundarnih reakcija.

Krajnji prinos vrstog ostatka smanjuje se povećanjem temperature procesa od 400 do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tečni proizvod dostiže maksimalnu vrednost pri temperaturi od $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ i smanjuje na temperaturi od $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Smanjeni prinos vrstog ostatka pri višim temperaturama javlja se usled porasta prinosa isparljivih materija iz tera (katrana). Dolazi do sekundarnih reakcija, što podrazumeva manju proizvodnju tečne faze i veću prinos gasa [10]. Na slici 4.6. dat je šematski prikaz procesa spore pirolize.



Slika 4.6. Procesna šema spore pirolize [11]

Šaržni reaktor sa fiksnim slojem

Proces spore pirolize esto se odvija u šaržnom reaktoru sa fiksnim slojem, koji predstavlja najstariji tip reaktora. Toplota potrebna za termi ko razlaganje biomase dovodi se iz spoljnog izvora, ili se dozvoljava i kontroliše sagorevanje kako bi se obezbedila neophodna toplota.

vrsti ostatak dobijen nakon pirolize ostaje u reaktoru, dok gasoviti produkti mogu da napuste reaktor usled pove anja zapremine. U nekim slu ajevima koristi se inertni gas, bez kiseonika, za uklanjanje proizvedenog piroliti kog gasa. Šaržni reaktor sa fiksnim slojem uglavnom se koristi za male brzine zagrevanja, pri emu je vrsti ostatak osnovni proizvod usled dugog vremena boravka u zoni pirolize.

Pomenuti reaktor koriš en je za eksperimentalno ispitivanje pirolize drvene biomase u doktorskoj disertaciji. Šema i fotografski izgled reaktora prikazani su u petom poglavlju.

4.1.2.3. Fleš piroliza

Fleš pirolizu karakteriše velika brzina zagrevanja ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C/s}$), kratko vreme boravka (0.1 1 s) vrstih i isparljivih materija i razli it temperaturski opseg u zavisnosti od željenog proizvoda. Pri temperaturama izme u 450 i 750 $^\circ\text{C}$, postiže se približno 80% od ukupne mase te ne faze i istovremeno, usled velike brzine reakcije, nastaje manje tera, a toplotna mo gasa je pove ana za 5 10% [10].

4.1.5. Prednosti koriš enja procesa pirolize sa stanovišta životne sredine

Konverzija biomase u vredne produkte pomo u procesa pirolize pruža brojne prednosti:

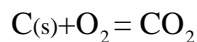
- spre ava odlaganje šumskog, poljoprivrednog, komunalnog otpada na deponije što bi dovelo do potencijalnih opasnosti po životnu sredinu, kao što je zaga enje zemljišta i podzemnih voda, hazarda, neprijatnih mirisa i štetnih gasova, razlaganja pod uslovima koji dovode do ispuštanja metana
- spre ava direktno sagorevanje na otvorenom bez kontrole zaga enja i estica
- proizvodi obnovljive i održive alternative iscrpljenim rezervama fosilnih goriva koje podrazumevaju manje emisije u odnosu na fosilna goriva pri sagorevanju. Koriš enje

biomase kao goriva gotovo ne dovodi do emisija sumpora. Emisije NO_x su tako e zna ajno niže u ve ini slu ajeva. Osim toga, koriš enje biomase kao goriva ne doprinosi postoje em nivou ugljenika u atmosferi.

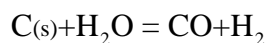
4.2. Gasifikacija

Gasifikacija se može posmatrati kao nastavak procesa pirolize [12, 13, 14]. Gasifikacija biomase je složeni termohemijski proces koji podrazumeva brojne hemijske reakcije. Proces gasifikacije biomase može se podeliti na dve faze: pirolizu i gasifikaciju. Nakon pirolize, tokom procesa gasifikacije, gas, bio-ulje i vrsti ostatak dalje reaguju. Gasifikacija, kao tehnologija za proizvodnju hemijskih supstanci i iste energije, predstavlja proces konverzije biomase u gorivi gas (koji uglavnom sadrži CH₄ i malo N₂) ili u sintezni gas (koji pretežno sadrži H₂ i CO). Tokom procesa gasifikacije odvija se više reakcija [14, 15, 16].

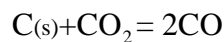
Heterogene reakcije date su izrazima:



$$H_{298}^0 = -394 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}},$$

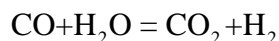


$$H_{298}^0 = 131 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}},$$

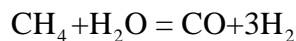


$$H_{298}^0 = 173 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}.$$

Homogene reakcije predstavljene su slede im izrazima:

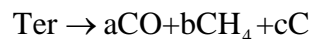


$$H_{298}^0 = -41 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}},$$



$$H_{298}^0 = 206 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}.$$

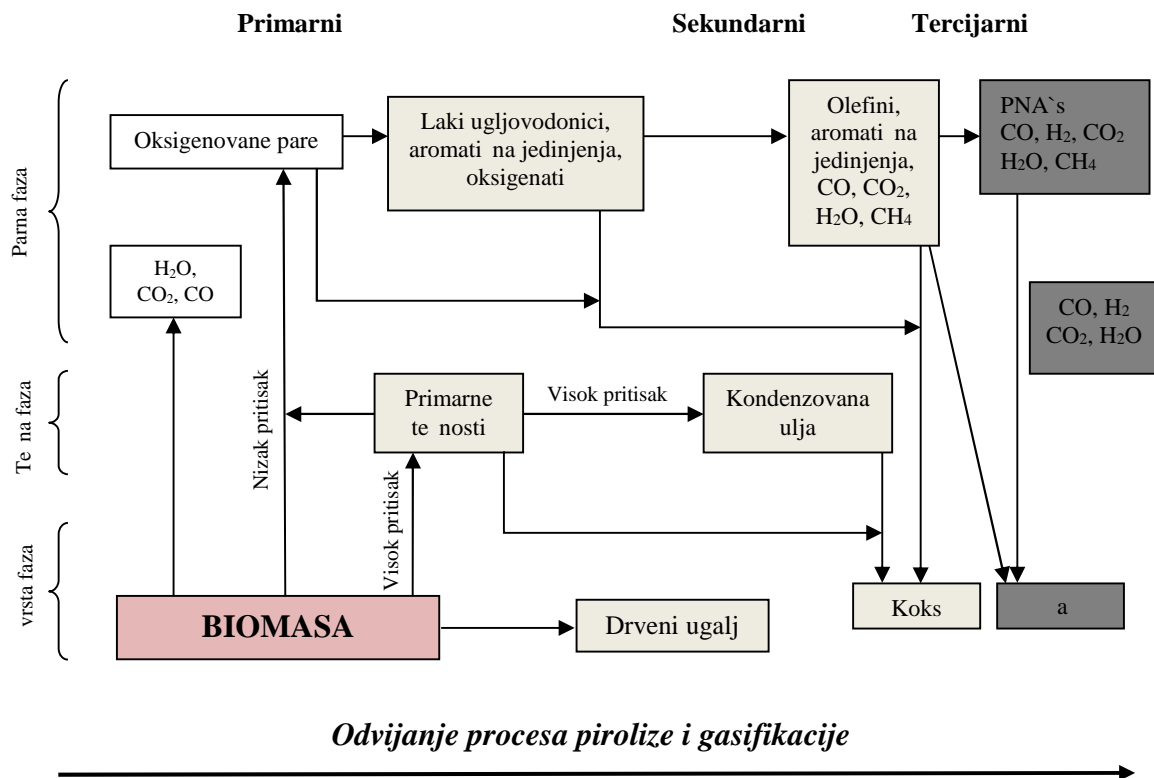
Reakcija krekoavanja može se prikazati na slede i na in:



gde su:

a, b i c broj molova CO, CH₄ i C.

Evans i Milne [17] razmatrali su tri osnovna režima reakcija tokom procesa gasifikacije koje su definisali kao primarni, sekundarni i tercijarni režim (slika 4.7.).



Slika 4.7. Tok reakcija pirolize i gasifikacije [19]

Biomasa konverzijom postaje mešavina vodonika, ugljen monoksida, lakih ugljovodonika, kao što je metan i drugih nesagorljivih gasova, kao što su ugljen dioksid, vodena para i azot. Proizvedeni gas, pored gasova H₂, CO, CO₂ i CH₄ sadrži i razliite ne iste estice, katran, azotna jedinjenja, sumporna jedinjenja i alkalni metali. Temperatura reaktora predstavlja jedan od najznaajnijih uslova odvijanja procesa gasifikacije koja uti e i na toplotnu mo i na sastav proizvedenog gasa.

Proces gasifikacije naj eš e se odvija uz dodavanje gasifikacionih agenasa, kao što su:

- para
- vazduh
- obogaeni vazduh
- kiseonik
- mešavina pare i izvora kiseonika
- ugljen dioksid.

Proces gasifikacije odvija se na relativno visokim temperaturama, od 600 do 1500 °C. Sastav proizvedenog gasa može da znaajno varira u zavisnosti od uslova odvijanja procesa (temperature, pritiska i oksidacionog agenasa), vrste goriva, sadržaja vlage u gorivu, na ina dovo enja reaktanata u kontakt unutar gasifikatora [20]. Kvalitet proizvedenog gasa zavisi od drugih faktora, kao što su tip gasifikatora, vreme boravka i brzina zagrevanja, koji se odre uju u zavisnosti od vrste goriva, veli ine estica i temperature.

U literaturi se može pronaći i veliki broj različitih vrsta gasifikatora. Najčešće se koriste sledeće vrste gasifikatora:

1. Gasifikator sa pokretnim ili fiksnim slojem:
 - a) gasifikator sa uzlaznom strujom oksidanta,
 - b) gasifikator sa silaznom strujom oksidanta i
 - c) unakrsni gasifikator.
2. Gasifikator sa fluidizovanim slojem
 - a) gasifikator sa cirkulacionim slojem i
 - b) gasifikator sa barbotaznim slojem.
3. Istosmerni protokni gasifikator
 - a) gasifikator sa protokom nadole i
 - b) gasifikator sa protokom nagore.

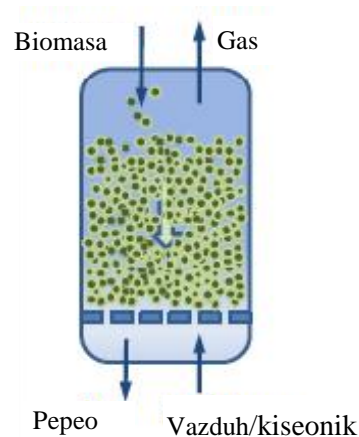
Osnovne razlike između navedenih gasifikatora su:

- na in ulaz: biomasa se uvodi u gornji deo gasifikatora ili sa strane, a zatim pokreće gravitacijom ili vazдушnim tokom
- gasifikacioni agens koji se koristi
- na in zagrevanja: delimično sagorevanje biomase u gasifikatoru (direktno zagrevanje) ili spoljnim izvorom (indirektno zagrevanje), kao što je kruženje inertnog materijala
- temperaturski opseg
- opseg pritiska pri kome se odvija proces u gasifikatoru.

4.2.1. Gasifikator sa pokretnim ili fiksnim slojem

4.2.1.1. Gasifikator sa uzlaznom strujom oksidanta

Gasifikator sa uzlaznom strujom oksidanta je najjednostavniji i najstariji tip gasifikatora. Kod ove vrste gasifikatora, biomasa se uvodi u gornji deo reaktora, dok se vazduh, kiseonik ili para uvode u donji deo reaktora, kreću se na gore, a proizvedeni gas izlazi kroz gornji deo reaktora. Potpuno sagorevanje vrstog ostatka odvija se na dnu sloja, oslobađaju se CO_2 i H_2O . Vreo gas ($\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$) na putu ka vrhu gasifikatora prolaskom kroz sloj nailazi na biomase, koja se uvodi odozgo, redukuje se do CO i H_2 i zatim hladi do $750\text{ }^\circ\text{C}$. Kreću se i se nagore, redukuju i gas (H_2 i CO) pirolizuje silaze u suhu biomasu i na kraju isušuje dolaze u vlažnu biomasu, ostavljaju i reaktor na prilično niskoj temperaturi ($\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$) [21, 22]. Šematski prikaz gasifikatora sa uzlaznom strujom oksidanta dat je na slici 4.8.

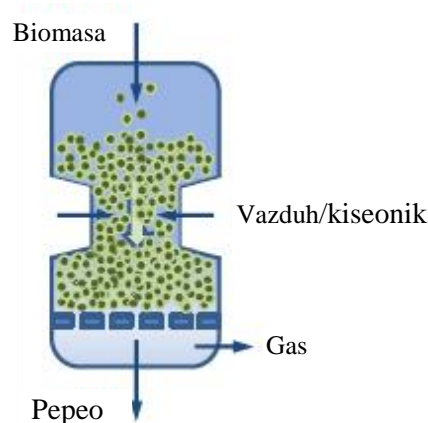


Slika 4.8. Šematski prikaz gasifikatora sa uzlaznom strujom oksidanta [23]

Prednosti korišćenja gasifikatora sa uzlaznom strujom oksidanta ogledaju se u tome što se pomenuti gasifikatori mogu koristiti za primenu u postrojenjima malih dimenzija, mogu da koriste gorivo sa visokim sadržajem vlage i daju nizak sadržaj ugljenika u preostalom pepelu. Nedostaci gasifikatora sa uzlaznom strujom oksidanta su ograničene količine goriva, visok prinos tera što zahteva opsežno ispuštanje sinteznog gasa pre primene u motoru, turbini ili za sintezu.

4.2.1.2. Gasifikator sa silaznom strujom oksidanta

U gasifikatoru sa silaznom strujom oksidanta, gorivo i gasifikacioni agens kreću se u istom smeru (slika 4.9.). Postoje različite reakcione zone u reaktoru sa silaznom strujom oksidanta. U zoni sušenja, vlaga isparava iz biomase kako se polako kreće na dole, ka zoni pirolize. U zoni pirolize, biomasa prelazi u vrstu ostatak, tera i gas. Neki od produkata pirolize sagorevaju. Usled visoke temperature, tera je podvrgnut reakciji krekovanja. Kao rezultat, proizvedeni gas je relativno čist.



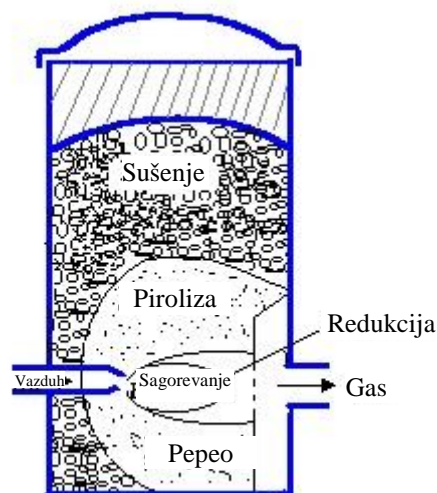
Slika 4.9. Šematski prikaz gasifikatora sa silaznom strujom oksidanta [23]

Gasifikator sa silaznom strujom oksidanta ima i određene nedostatke:

- zahteva sušenje goriva radi postizanja malog sadržaja vlage,
- sintezni gas koji izlazi iz reaktora je na visokoj temperaturi, što zahteva sekundarni sistem za nadoknadu energije.

4.2.1.3. Unakrsni gasifikator

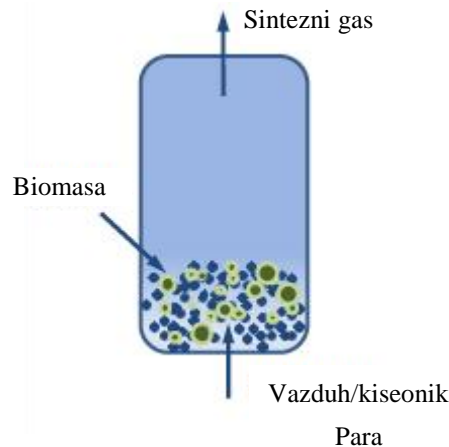
Unakrsni gasifikator (slika 4.10.) ima određene prednosti u odnosu na gasifikatore sa uzlaznom i silaznom strujom oksidanta, ali i određene nedostatke. Nedostaci, kao što su visoka temperatura gasa na izlazu, mala redukcija CO₂ i velika brzina kretanja gasa nastaju kao posledice konstrukcije. Za razliku od gasifikatora sa uzlaznom i silaznom strujom oksidanta, posuda za pepeo, zone vatre i redukcije su odvojene u unakrsnom gasifikatoru. Karakteristike konstrukcije uslovljavaju upotrebu goriva sa niskim sadržajem pepela, kao što su drvo, ugalj i koks. Proces mnogo brže započinje nego kod ostalih gasifikatora. Relativno viša temperatura u unakrsnom gasifikatoru ima značajan uticaj na sastav izlaznog gasa, na primer, udeo ugljen monoksida je visok, a udeli vodonika i metana su niski kada se koristi suvo gorivo kao što je ugalj.



Slika 4.10. Šematski prikaz unakrsnog gasifikatora [24]

4.2.2. Gasifikator sa fluidizovanim slojem

Kod gasifikatora sa fluidizovanim slojem, pri dnu reaktora uvode se biomasa, prethodno usitnjena do finih čestica, kao i vazduh, vodena para ili kiseonik. Za transport toplote i mase kroz reaktor koristi se fluidizovani sloj u vidu inertnog materijala ili katalizatora. Sloj se fluidizuje strujanjem gasifikacionog agensa kroz sloj, što podiže sloj uprkos gravitaciji. Kao rezultat, komešanje u sloju dovodi do jednake raspodele temperature u sloju. Na slici 4.11. dat je šematski prikaz gasifikatora sa fluidizovanim slojem. Za razliku od gasifikatora sa fiksnim slojem, ne postoje različite reakcione zone u gasifikatorima sa fluidizovanim slojem. Temperatura u fluidizovanom sloju je uglavnom u opsegu od 700 do 900 °C dok je opseg pritiska od 0 do 70 bara.



Slika 4.11. Šematski prikaz gasifikatora sa fluidizovanim slojem [23]

Naj eš e koriš eni tipovi gasifikatora sa fluidizovanim slojem su gasifikator sa *barbotažnim* i *cirkulacionim slojem*. Gasifikatori sa fluidizovanim slojem imaju slede e prednosti:

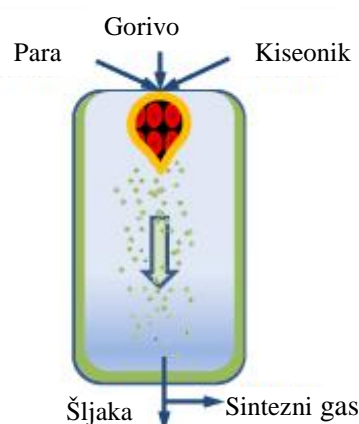
- gotovo uniformna raspodela temperature u reaktoru
- velika brzina transfera toplote izme u inertnog materijala, biomase i gasa
- mogu je visok stepen konverzije sa niskim sadržajem tera i nekonvertovanog ugljenika.

Nedostaci gasifikatora sa fluidizovanim slojem su:

- dozvoljeno odstupanje sadržaja vlage u gorivu je manje
- konstrukcija sistema je složenija, zahteva kompresore za uvo enje oksidanta pri dnu fluidizovanog sloja
- sloj se sinteruje kada se koristi biomasa sa visokim sadržajem pepela. Alkalne komponente u pepelu imaju tendenciju ka formiranju eutektika sa niskom temperaturom topljenja, što uz silicijum dioksid, kao naj eš e koriš eni materijal u sloju, može da dovede do gubitka fluidizacije.

4.2.3. Istosmerni proto ni gasifikator

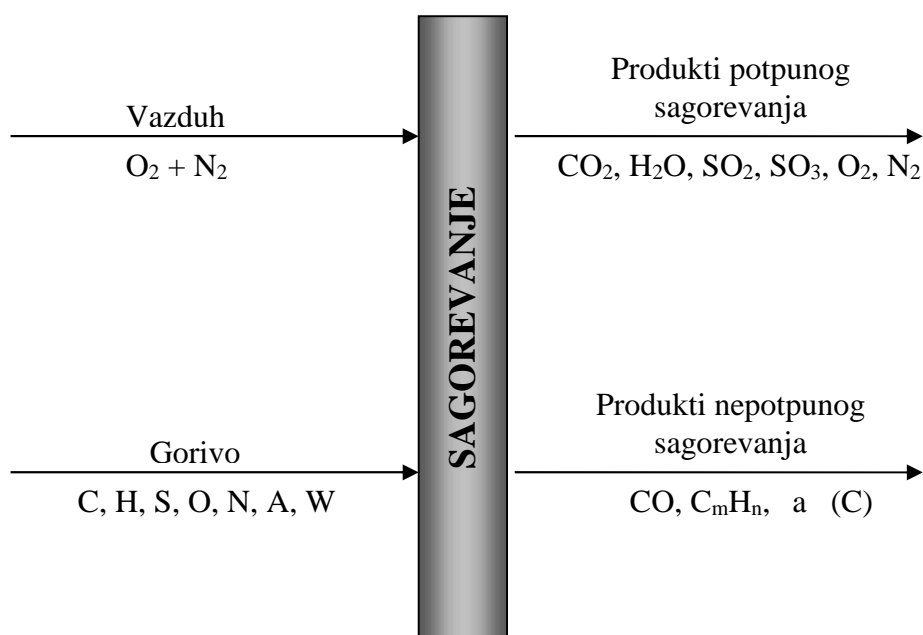
U istosmernom proto nom gasifikatoru (slika 4.12.), biomasa je prisutna u vidu praha. Kontaktne površine su veoma velike i stoga je reakciono vreme vrlo kratko. Gorivo i vazduh kre u se u istom smeru i reakcije se odvijaju u gustom oblaku estica na veoma visokoj temperaturi, iznad 1000 °C, tako da se prvo dobija sintezni gas gotovo oslobo en tera, a zatim se topi pepeo i skuplja na dnu reaktora u obliku šljake. Konverzija u istosmernom proto nom reaktoru je gotovo 100%. U ovakvim sistemima biomasa se retko koristi.



Slika 4.12. Istosmerni protokni gasifikator [23]

4.3. Sagorevanje

Tokom procesa sagorevanja sa kiseonikom, u gorivima se oslobađa unutrašnja hemijska energija koja se prenosi na molekule povećavajući njihovu kinetičku energiju. Time se povećava unutrašnja energija radne materije, a usled toga i temperatura. Kiseonik se gorivu po pravilu dovodi sa vazduhom u kome ga ima približno 21% (zapreminski udeo). Sagorevanje može biti potpuno i nepotpuno (slika 4.13.).



Slika 4.13. Šema procesa potpunog i nepotpunog sagorevanja

Potpuno sagorevanje podrazumeva proces pri kome svi gorivi sastojci u potpunosti izgoru. U slučaju nedostatka kiseonika za sagorevanje ili slabog mešanja goriva i vazduha, proizvodi sagorevanja mogu još uvek sadržati gorive materije ili gasove. To je nepotpuno sagorevanje koje je po pravilu nepoželjno jer predstavlja gubitak. Gorivo se sastoji od: gorive materije, vode i pepela. Sagorevanjem goriva materija prelazi u gas, voda u paru, a pepeo ostaje u vrstom stanju.

Sagorevanje vlažne drvene biomase se može raš laniti u tri odvojene faze:

1. faza - sušenje: Zagrevanje drvene biomase i sušenje pri temperaturi od oko 120 °C. U ovoj fazi troši se zna ajna koli ina toplote na isparavanje vode iz goriva. Ve a koli ina vlage u drvnoj biomasi zna ajno smanjuje neto efekte sagorevanja.

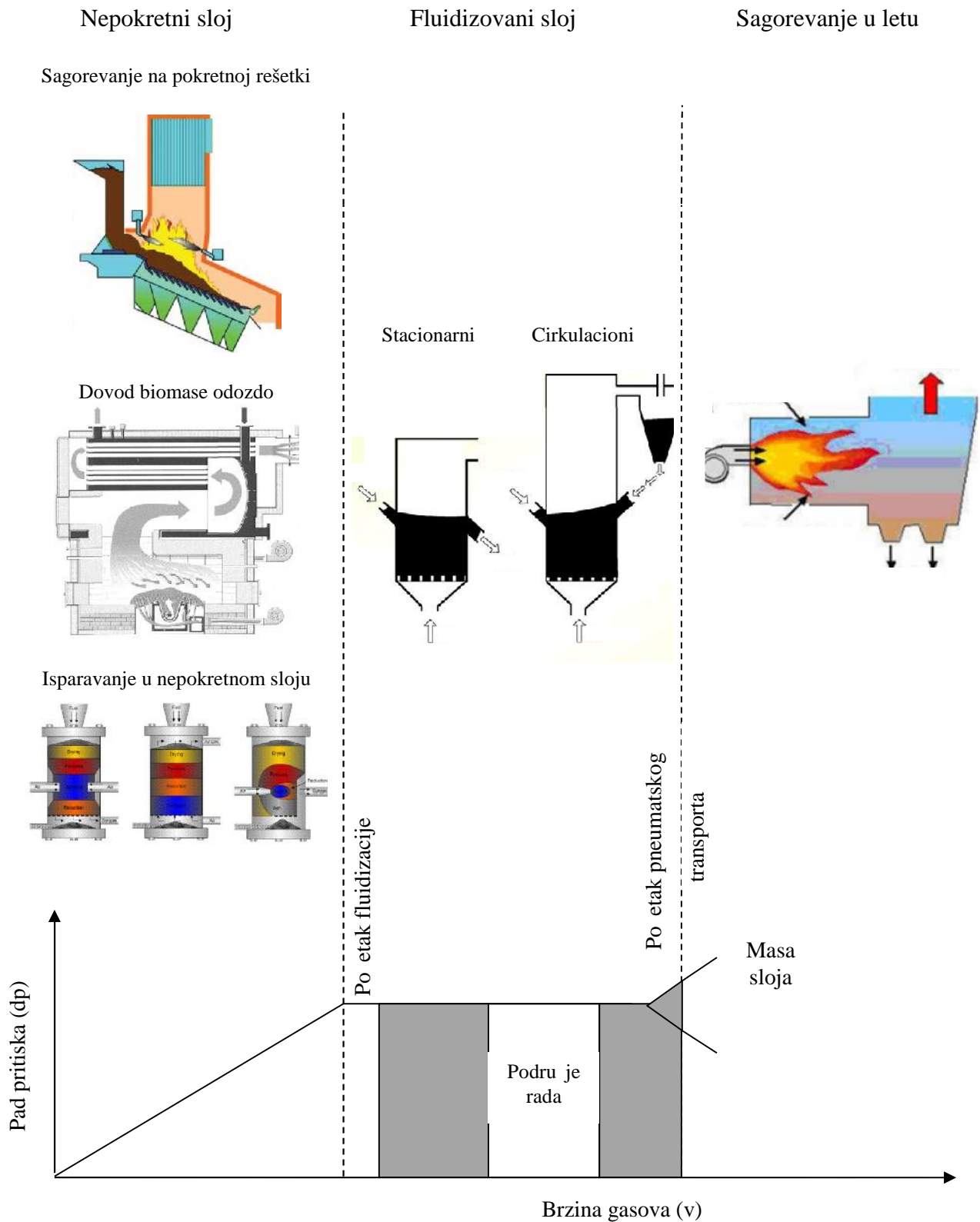
2. faza - piroliza: Drvo samo po sebi ne gori, ve samo gasovi, koji se osloba aju delovanjem toplote. Iznad 150 °C raspadaju se sastojci drveta na svim slabim vezivnim mestima. Osloba aju se na prvom mestu lako zapaljivi gasovi, kao što su CO i H₂, koji ukoliko je koli ina kiseonika u vazduhu dovoljna odmah sagorevaju podižu i temperaturu okoline (od 400 °C do 500 °C). Maseno u eš e volatila (isparljivih materija) u drvetu je 85%. Osim pomenutih, osloba aju se i teško zapaljivi tzv. katranski gasovi, koji se ne smeju pustiti nesagoreli kroz dimnjak u atmosferu. Razlozi su ekonomske (smanjenje procenta iskoriš enja hemijske energije iz goriva) i ekološke prirode. Kao ostatak u ložištu, nakon završene druge faze, ostaje drveni ugalj.

3. faza - frakcionisanje i sagorevanje: Teško zapaljivi katranski gasovi se, na temperaturama iznad 450 °C, raspadaju u lakše zapaljive gasove, koji uz dovoljno snabdevanje vazduhom (sekundarni vazduh) sagorevaju u zoni za dogorevanje. Na temperaturi preko 800 °C prevodi se u gasovito stanje i drveni ugalj i zapo inje njegovo sagorevanje. Temperatura u ložištu od 900 °C je dovoljna za potpuno sagorevanje drveta [25].

U ložištu, pomenute faze nisu vremenski i prostorno razdvojene i teku paralelno ili se preklapaju. Drvna biomasa u razli itim delovima ložišta se nalazi u razli itim fazama sagorevanja. Dok je unutrašnjost deli a drveta u fazi sušenja na njegovoj površini ve dolazi do pojave izdvajanja volatila.

4.3.1. Ložišta kotlova koja koriste drvnu biomasu kao gorivo

Ložišta koja kao gorivo koriste drvnu biomasu su razli ita i dele se prema nekoliko kriterijuma. Osnovna podela je na ložišta s obzirom na vrstu i karakteristike biomase i strujanje vazduha odnosno dimnih gasova. Na slici 4.14. je prikazana osnovna podela:



Slika 4.14. Podela ložišta za biomasu prema vrsti i brzini strujanja [26]

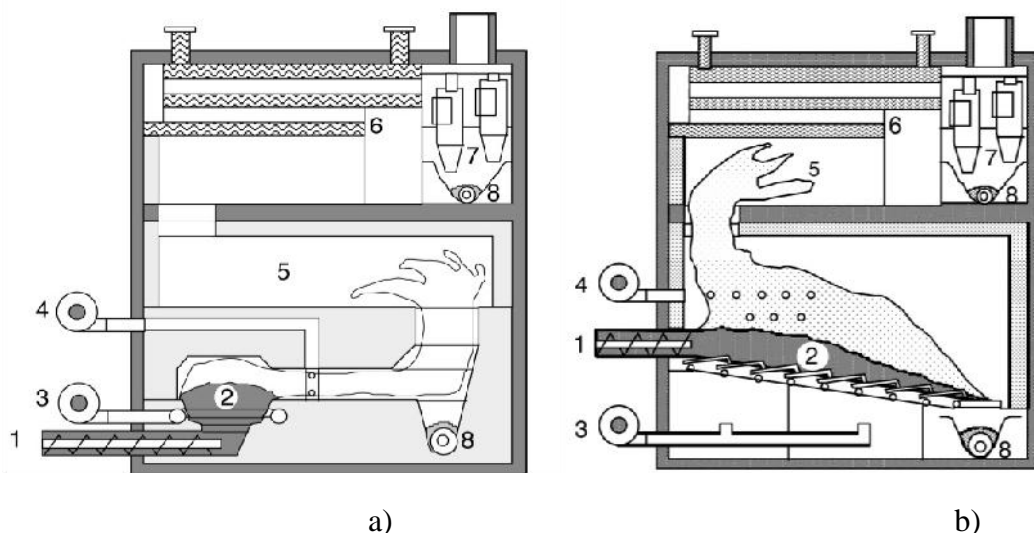
Ložišta kod kojih se sagorevanje odvija u na pokretnoj rešetki u sloju spadaju u klasi ne tipove ložišta. Postoje razli ite vrste ložišta koja karakteriše ovaj tip sagorevanja, a dele se prema na inu pokretanja rešetke (kosa nepokretna rešetka, kontinuirano pokretna rešetka,

rešetka s sistemom pokretanja napred-nazad, vibriraju a rešetka). Sva pomenuta ložišta rade na principu sagorevanja biomase u sloju.

Ložišta sa sagorevanjem u sloju

Sloj estica vrstog goriva smešten je u zbijenom sloju na rešetci koja se nalazi na dnu ložišta. Ispod rešetke se dovodi vazduh na sloj estica goriva. Na kraju sloja se kontinuirano dozira vrsto gorivo što rezultira potrebom da se pokrene sloj goriva mehanizmom pokretne rešetke. Deo gorivih materija iz goriva sagoreva u samom sloju goriva i u neposrednoj blizini iznad sloja goriva, usled čega nastaju ugljen dioksid i vodena para u uslovima dovoljne količine vazduha. U slučaju podstehiometrijskog dovoda vazduha nastaje i ugljen monoksid i nesagoreli ugljovodonici (C_xH_y), koji sagorevaju u ložištu tako što se dovodi sekundarni vazduh za sagorevanje, čime se postiže stepenasto sagorevanje. Drugi proizvodi sagorevanja su pepeo i lebde estice koje odlaze iz sloja ložišta nošene strujom gasova. Kod sistema za sagorevanje biomase, koji koriste tehnologiju sagorevanja u sloju na rešetki, razlikuju se dva područja ili zone: zona fluida iznad sloja biomase i zona koja je u osnovi sloja biomase.

Zona fluida se definiše kao gasovita faza koja izlazi iz sloja biomase na rešetki, a sastoji se od gasova koji nastaju u procesima sagorevanja biomase u sloju. Donja granica ove zone je površina sloja biomase. Unutar ove zone uvode se sekundarni i tercijarni vazduh za sagorevanje kao i recirkulacija dimnih gasova. Sloj biomase je zona sa dve faze. U osnovi se sastoji od vrstih estica goriva (biomase) i gasova koji ih okružuju. Neke od pojava, koje se odvijaju unutar sloja biomase, su prenos toplote i materije kao i hemijske reakcije. Postoje dve vrste ložišta u kojima gorivo sagoreva u *nepokretnom sloju*: ložište sa sagorevanjem uz dovod goriva odozdo i ložište s pokretnom rešetkom (slika 4.15.). Osnovna razlika je u načinu dovoda goriva i odvoda pepela koji preostaje nakon sagorevanja. Procesi koji se odvijaju u ova dva tipa ložišta su različiti. Smerovi kretanja goriva za sagorevanje i vazduha za sagorevanje su kod ložišta na slici 4.15.a istosmerni, dok se kod ložišta prikazanom na slici 4.15.b vazduh za sagorevanje i gorivo kreću u suprotno.

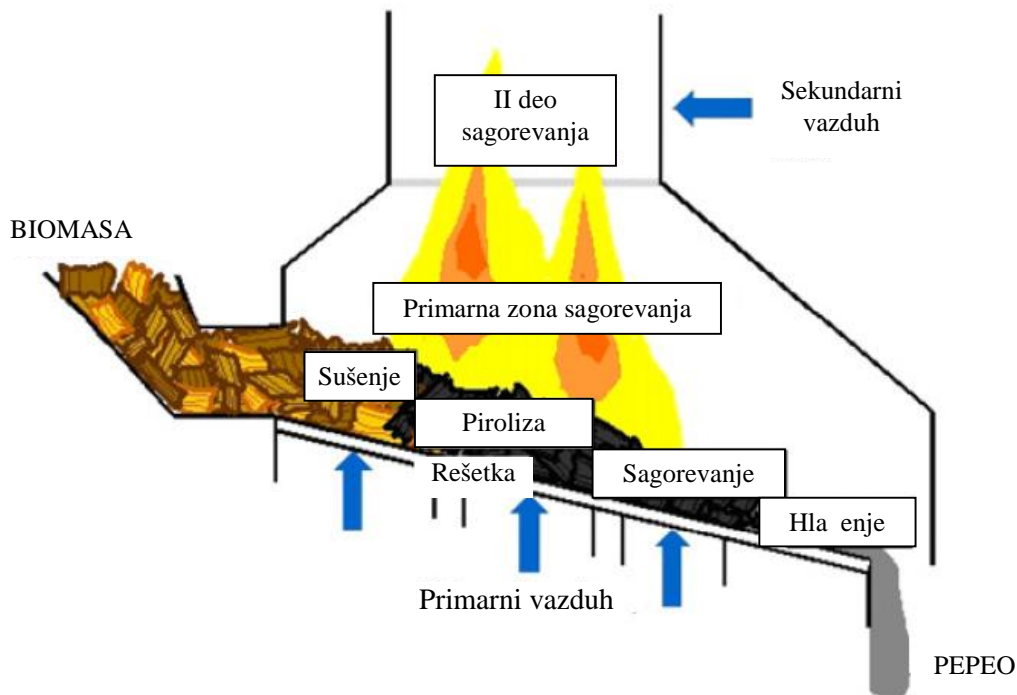


Slika 4.15. Ložišta sa sagorevanjem u sloju [26]

a) ložište sa dovodom goriva odozdo b) ložište sa pokretnom rešetkom

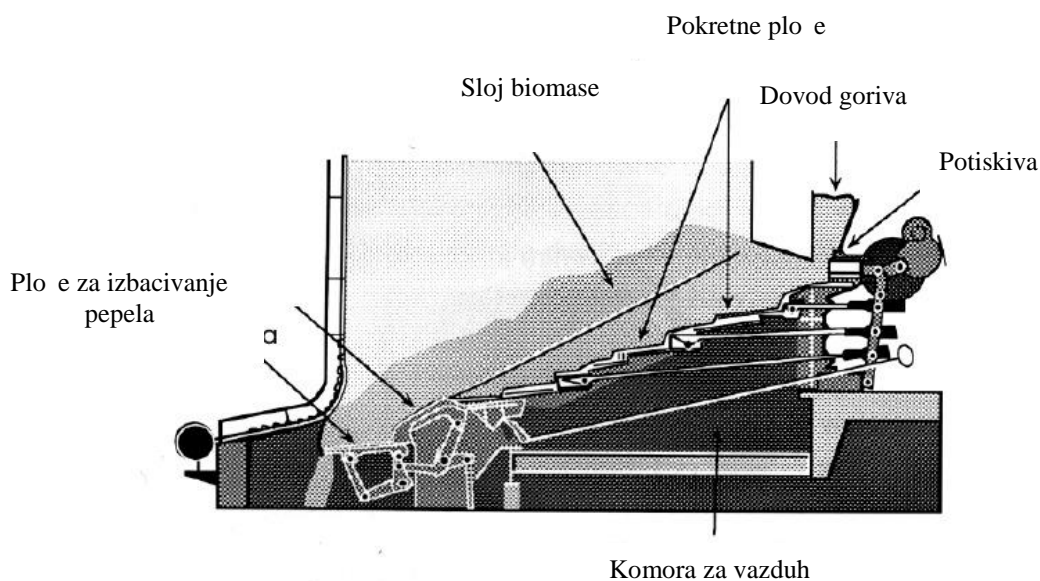
1 – dovod goriva (drvene biomase) 2 – zona nepokretnog sloja 3 – dovod primarnog vazduha 4 – dovod sekundarnog vazduha 5 – ložište 6 – cevi za predaju toplote 7 – ciklonski otprašivač 8 – odvod pepela iz ložišta

Slika 4.16. daje šematski prikaz procesa sagorevanja u ložištu sa pokretnom rešetkom. Kako se vrsto gorivo zagreva na rešetki, u prvoj fazi vlaga iz goriva isparava, nakon čega dolazi do razgradnje organskih materija i oslobađanja volatila. Količina volatila koji se oslobode zavisi od više uticajnih faktora, od kojih prevladavaju udeo volatila u biomasi i temperatura. Proces oslobađanja volatila može biti egzoterman ili endoterman. Količina toplote kod ovih procesa je dovoljno mala da se može zanemariti, pa se ovaj proces može smatrati termički neutralnim.



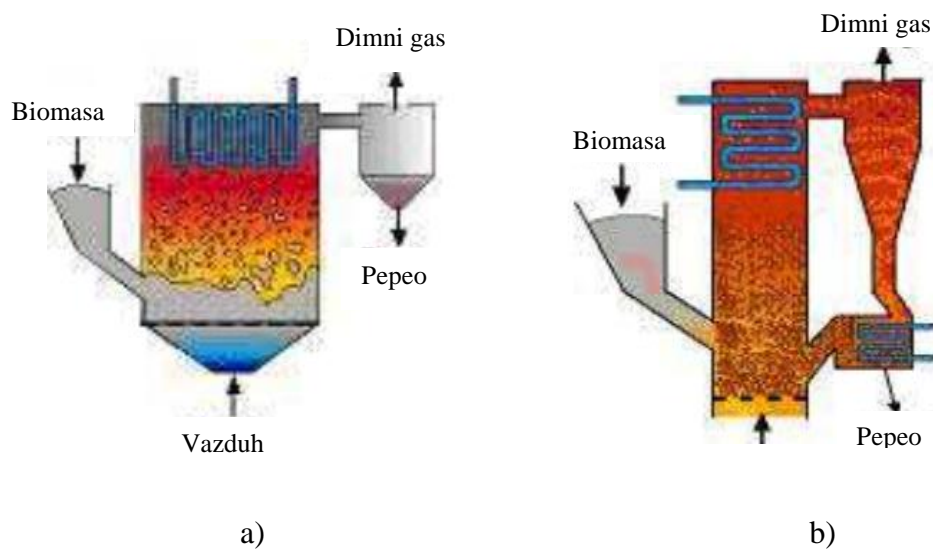
Slika 4.16. Šematski prikaz procesa u ložištu sa pokretnom rešetkom [27]

Ispod zone sloja biomase nalazi se rešetka koja po izvedbi može biti fiksna ili pokretna, horizontalna ili nakošena (slika 4.17.).



Slika 4.17. Šematski prikaz ložišta sa nakošenom rešetkom [27]

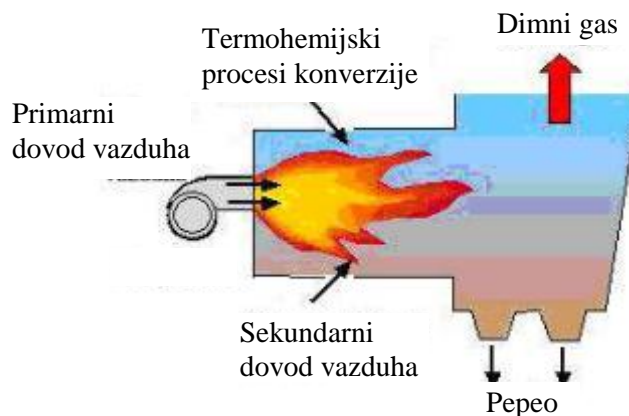
Za sagorevanje sitnijih drvnih otpadaka sa ve im procentom vlage (do 50%) primenjuju se *ložišta sa fluidizovanim slojem* (slika 4.18.). U ložištima za sagorevanje u fluidizovanom sloju materijal sagoreva sa inertnim materijalom kao što su pesak i silikatni materijali. Sitni drveni otpaci transportuju se pužem do ulaznog otvora. Gorivo prihva eno vazdušnom strujom se fluidizira, pri emu se istovremeno suši i sagoreva. Proces sagorevanja ostvaruje se u okviru granica izme u 500 i 900 °C, odnosno za 100 °C ispod temperature topljenja pepela, a nesagorele estice dogorevaju u prostoru iznad fluidizovanog sloja. Prednost ovakvih ložišta je dozirano dodavanje goriva i bezdimno sagorevanje [27].



Slika 4.18. Ložišta se sagorevanjem u fluidizovanom sloju [28]
a) stacionarno b) cirkulaciono

Ložišta sa sistemom za uduvanje biomase u komoru za sagorevanje

Ložište sa sistemom za uduvanje biomase u komoru za sagorevanje prikladno je za sagorevanje drvene prašine tj. vrlo sitnih estica piljevine. Veli ina granulata mora biti manja od 1 mm. Fini granulata se sa primarnim vazduhom uduvava u komoru i sagoreva u letu. Loženje sistemom uduvanja uglavnom se koristi za ve e koli ine suve biomase granulacije ispod 1 mm. Navedeni sistem ložišta koristi se u kotlovima snage iznad 200 kW (slika 4.19.).



Slika 4.19. Ložište sa sistemom za uduvanje biomase u komoru za sagorevanje [28]

4.3.2. Stehiometrijske jedna ine sagorevanja drvene biomase

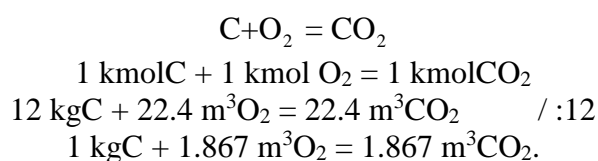
Odre ivanje materijalnog bilansa procesa sagorevanja goriva podrazumeva poznavanje sastava goriva koji se dobija elementarnom i tehni kom analizom. Sastav po jedinici mase za vrsta goriva prikazuje se pomo u jedna ine:

$$C + H + O + N + W + A = 1, \quad (4.1)$$

gde su:

C, H, S, O, N, W i A maseni udeli ugljenika, vodonika, sumpora, kiseonika, azota, vlage i pepela u gorivu, izraženi u (kg/kg).

Potpuno sagorevanje ugljenika definiše se slede om hemijskom reakcijom:



Da bi 1 kg ugljenika potpuno sagoreo, potrebno je dovesti 1.867 m³ kiseonika, pri emu se dobija 1.867 m³ ugljen dioksida pri normalnim uslovima (1.013·10⁵ Pa i 0 °C). Ako je C maseni udeo ugljenika u gorivu dobija se:

$$m_{CO_2} = 3.667 \cdot C \left(\frac{\text{kg} CO_2}{\text{kg} B} \right), \quad (4.2)$$

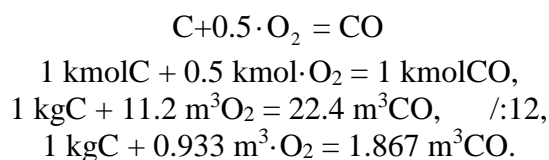
$$V_{CO_2} = 1.867 \cdot C \left(\frac{\text{m}^3 CO_2}{\text{kg} B} \right), \quad (4.3)$$

gde su:

$$m_{CO_2} \text{ masa ugljen dioksida u dimnim gasovima } \left(\frac{\text{kg} CO_2}{\text{kg} B} \right),$$

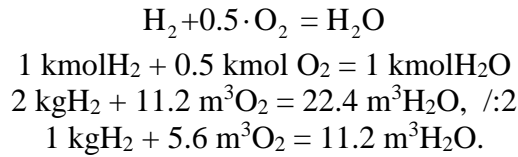
$$V_{CO_2} \text{ zapremina ugljen dioksida u dimnim gasovima } \left(\frac{\text{m}^3 CO_2}{\text{kg} B} \right).$$

Zbog manjka kiseonika ugljenik delimi no sagoreva u ugljen monoksid prema hemijskoj reakciji:



Voda u dimnim gasovima stvara se od vlažnosti goriva, vlažnosti vazduha i sagorevanjem vodonika.

Vodonik sagoreva prema reakciji:



Ako su H i W maseni udeli vodonika i vlage u gorivu, iz prethodnih relacija se dobija:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot H + W \left(\frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right), \quad (4.4)$$

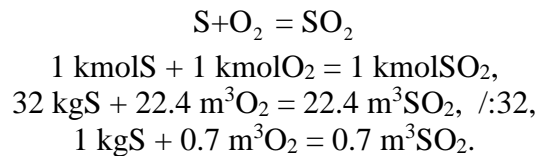
$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22.4}{18} \cdot (9 \cdot H + W) \left(\frac{\text{m}^3\text{H}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right), \quad (4.5)$$

gde su:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{masa vode u dimnim gasovima} \left(\frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right),$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{zapremina vode u dimnim gasovima} \left(\frac{\text{m}^3\text{H}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right).$$

Sagorevanje sumpora odvija se prema reakciji:



Ako je S maseni udeo sumpora u gorivu dobija se:

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot S = 2 \cdot S \left(\frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgB}} \right), \quad (4.6)$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22.4}{32} \cdot S = 0.7 \cdot S \left(\frac{\text{m}^3\text{SO}_2}{\text{kgB}} \right), \quad (4.7)$$

gde su:

$$m_{\text{SO}_2} \quad \text{masa sumpor dioksida u dimnim gasovima} \left(\frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgB}} \right),$$

$$V_{\text{SO}_2} \quad \text{zapremina sumpor dioksida u dimnim gasovima} \left(\frac{\text{m}^3\text{SO}_2}{\text{kgB}} \right).$$

U dimnim gasovima prisutan je azot i kiseonik koji poti u od vazduha dovedenog radi sagorevanja goriva. Pri potpunom sagorevanju goriva i za poznati koeficijent viška vazduha ukupno e biti azota i kiseonika:

$$m_{N_2} = 0.77 \cdot L + N = 0.77 \cdot \cdot L_{min} + N \left(\frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}} \right), \quad (4.8)$$

$$V_{N_2} = 0.79 \cdot L + \frac{22.4}{28} \cdot N \left(\frac{\text{m}^3\text{N}_2}{\text{kgB}} \right), \quad (4.9)$$

$$m_{O_2} = 0.23 \cdot (-1) \cdot L_{min} \left(\frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}} \right), \quad (4.10)$$

$$V_{O_2} = 0.21 \cdot (-1) \cdot L_{min} \left(\frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}} \right), \quad (4.11)$$

gde su:

$$m_{N_2} \text{ masa azota u dimnim gasovima } \left(\frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}} \right),$$

$$V_{N_2} \text{ zapremina azota u dimnim gasovima } \left(\frac{\text{m}^3\text{N}_2}{\text{kgB}} \right),$$

$$m_{O_2} \text{ masa kiseonika u dimnim gasovima } \left(\frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}} \right),$$

$$V_{O_2} \text{ zapremina kiseonika u dimnim gasovima, } \left(\frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}} \right),$$

koeficijent viška vazduha (),

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0.23} \text{ minimalna (teorijska) potrošnja vazduha } \left(\frac{\text{kgVAZDUHA}}{\text{kgB}} \right),$$

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0.21} \text{ minimalna (teorijska) potrošnja vazduha } \left(\frac{\text{m}^3\text{VAZDUHA}}{\text{kgB}} \right),$$

$$O_{min} = 2.667 \cdot C + 8 \cdot H + S - O \text{ minimalna (teorijska) potrošnja kiseonika } \left(\frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}} \right),$$

$$O_{min} = 1.867 \cdot C + 5.6 \cdot H + 0.7 \cdot (S - O) \text{ minimalna (teorijska) potrošnja kiseonika } \left(\frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}} \right),$$

$$L = \cdot L_{min} \text{ stvarna potrošnja vazduha } \left(\frac{\text{kgVAZDUHA}}{\text{kgB}} \right), \left(\frac{\text{m}^3\text{VAZDUHA}}{\text{kgB}} \right),$$

$$N \text{ maseni udeo azota u gorivu } \left(\frac{\text{kgN}}{\text{kgB}} \right).$$

Vrednost koeficijenta viška vazduha zavisi od vrste goriva, gorionika i ložištu u kome se vrši sagorevanje. Za vrsta goriva kao što je biomasa, pri sagorevanju u letu, ubi ajene prakti ne vrednosti se kre u izme u = 1.1 - 1.4. Kod sagorevanja goriva u ložištu potrebno je, s jedne strane, višak vazduha održavati što manjim, kako bi koli ina dimnih gasova i gubici toplote, kao i emisije štetnih gasova bili što manji. S druge strane, višak vazduha mora

biti dovoljno veliki kako bi se osiguralo potpuno sagorevanje goriva jer bi ina e dodatni gubici nastajali zbog nepotpunog sagorevanja. Pri potpunom sagorevanju, vlažni dimni gasovi sagorevanja sastoje se iz CO₂, H₂O, SO₂, N₂ i O₂.

Masa vlažnih dimnih gasova pri potpunom sagorevanju jednog kilograma goriva ini sumu masa pojedina nih gasova:

$$m_{\text{vdg}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right), \quad (4.12)$$

a masa suvih dimnih gasova:

$$m_{\text{sdg}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right), \quad (4.13)$$

Na sli an na in dobija se zapremina vlažnih dimnih gasova, odnosno suvih dimnih gasova:

$$V_{\text{vdg}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right), \quad (4.14)$$

$$V_{\text{sdg}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right). \quad (4.15)$$

Zapreminski udeli pojedinih komponenata u vlažnim dimnim gasovima odre uju se pomo u izraza:

$$\varphi_{i\text{vdg}} = \frac{V_i}{V_{\text{vdg}}}, \quad (4.16)$$

ili izraženi u procentima:

$$\varphi_{i\text{vdg}} = \frac{V_i}{V_{\text{vdg}}} \cdot 100 \quad (\%), \quad (4.17)$$

gde je:

V_i zapremina i-te komponente u u vlažnim dimnim gasovima $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right)$.

Na sli an na in odre uju se zapreminski udeli pojedinih komponenata u suvim dimnim gasovima.

4.3.2.1. Broj ani primer prora una materijalnog bilansa procesa sagorevanja drvene biomase

Primer prora una materijalnog bilansa procesa sagorevanja drvene biomase izvršen je za mešavinu drvene biomase iji je sastav prikazan u tabeli 3.9. i primenom izraza (4.2) do (4.17). Kako je sastav mešavine drvene biomase: A=0.0199 kg/kg, C=0.4200 kg/kg, H=0.0496 kg/kg, O=0.4086 kg/kg, N=0.0105 kg/kg, S=0.0028 kg/kg, W=0.0890 kg/kg, prora un pojedinih veli ina iznosi:

$$m_{\text{CO}_2} = 3.667 \cdot C = 3.667 \cdot 0.4200 = 1.5401 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgB}},$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1.867 \cdot C = 1.867 \cdot 0.4200 = 0.7841 \frac{\text{m}^3\text{CO}_2}{\text{kgB}},$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot H + W = 9 \cdot 0.0496 + 0.0890 = 0.5354 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kgB}},$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22.4}{18} \cdot (9 \cdot H + W) = \frac{22.4}{18} \cdot (9 \cdot 0.0496 + 0.0890) = 0.6663 \frac{\text{m}^3\text{H}_2\text{O}}{\text{kgB}},$$

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot S = 2 \cdot S = 2 \cdot 0.0028 = 0.0056 \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgB}},$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22.4}{32} \cdot S = 0.7 \cdot 0.0028 = 0.0020 \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgB}},$$

$$O_{\min} = 2.667 \cdot C + 8 \cdot H + S - O = 2.667 \cdot 0.4200 + 8 \cdot 0.0496 + 0.0028 - 0.4086 = 1.1111 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}},$$

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 1.867 \cdot C + 5.6 \cdot H + 0.7 \cdot (S - O) = \\ &= 1.867 \cdot 0.4200 + 5.6 \cdot 0.0496 + 0.7 \cdot (0.0028 - 0.4086) = 0.7778 \frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}}, \end{aligned}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0.23} = \frac{1.1111}{0.23} = 4.8309 \frac{\text{kgVAZDUHA}}{\text{kgB}},$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0.21} = \frac{0.4086}{0.21} = 1.9457 \frac{\text{m}^3\text{VAZDUHA}}{\text{kgB}},$$

$$L = \cdot L_{\min} = 1 \cdot 4.8309 = 4.8309 \frac{\text{kgVAZDUHA}}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1,$$

$$L = \cdot L_{\min} = 1 \cdot 1.9457 = 1.9457 \frac{\text{m}^3\text{VAZDUHA}}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1,$$

$$m_{\text{N}_2} = 0.77 \cdot L + N = 0.77 \cdot 4.8309 + 0.0105 = 3.7365 \frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1,$$

$$V_{\text{N}_2} = 0.79 \cdot L + \frac{22.4}{28} \cdot N = 0.79 \cdot 1.9457 + \frac{22.4}{28} \cdot 0.0105 = 1.5455 \frac{\text{m}^3\text{N}_2}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1,$$

$$m_{\text{O}_2} = 0.23 \cdot (-1) \cdot L_{\min} = 0.23 \cdot (1-1) \cdot 4.8309 = 0 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1,$$

$$V_{\text{O}_2} = 0.21 \cdot (-1) \cdot L_{\min} = 0.21 \cdot (1-1) \cdot 1.9457 = 0 \frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1,$$

$$m_{\text{sdg}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} = 1.5401 + 0.0056 + 3.7365 + 0 = 5.2822 \frac{\text{kg}}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1,$$

$$V_{\text{sdg}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = 0.7841 + 0.0020 + 1.5455 + 0 = 2.3316 \frac{\text{m}^3}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1,$$

$$\begin{aligned} m_{\text{vdg}} &= m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} = 1.5401 + 0.5354 + 0.0056 + 3.7356 + 0 = \\ &= 5.8167 \frac{\text{kg}}{\text{kgB}}, \text{ za } = 1, \end{aligned}$$

$$V_{\text{vdg}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = 0.7841 + 0.6663 + 0.0020 + 1.5455 + 0 =$$

$$= 2.9979 \frac{\text{m}^3}{\text{kgB}}, \text{ za } \lambda = 1.$$

Prema bilansu mase (slika 4.20.) masa vlažnih dimnih gasova iznosi:

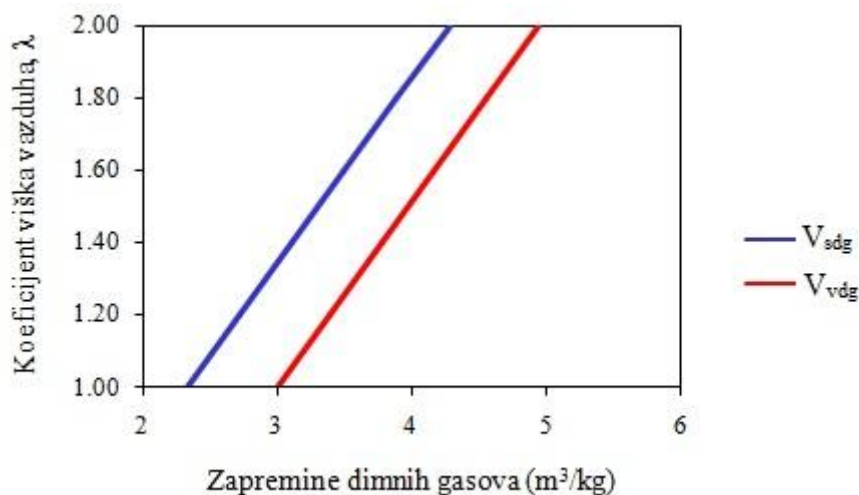
$$m_{\text{vdg}} = 1 - A + \lambda \cdot L_{\text{min}} = 1 - 0.0199 + 1 \cdot 4.8309 = 5.8110 \frac{\text{kg}}{\text{kgB}}, \text{ za } \lambda = 1,$$

a izra unata vrednost iznosi $m_{\text{vdg}} = 5.8167 \frac{\text{kg}}{\text{kgB}}$. Neuskla enost bilansa iznosi $0.0057 \frac{\text{kg}}{\text{kgB}}$ ili 0.1% što je veoma bitno za prakti ne inženjerske prora une.



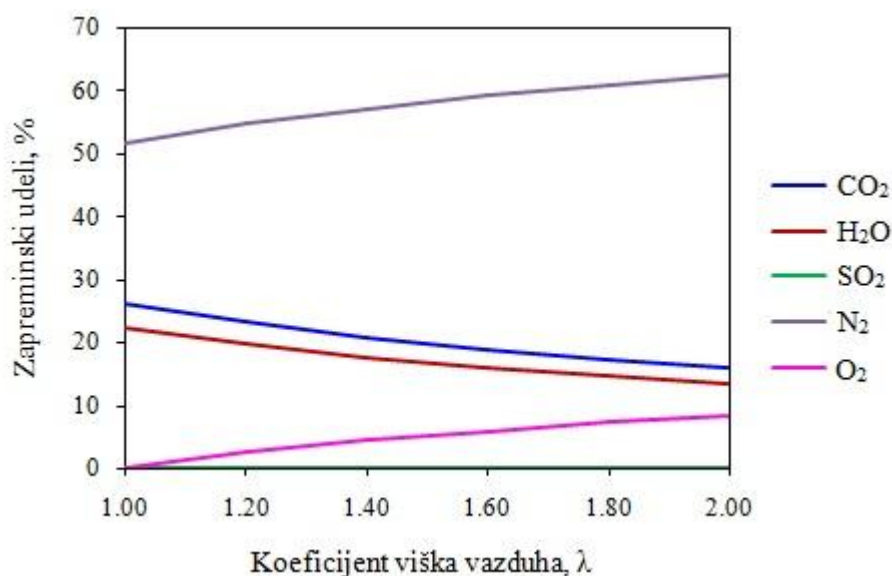
Slika 4.20. Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja drvene biomase

Prora un materijalnog bilansa procesa sagorevanja mešavine drvene biomase u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha prikazan je u prilogu 1., a dijagram produkata sagorevanja prikazan je na slici 4.21.



Slika 4.21. Zapremina dimnih gasova u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu prikazani su u prilogu 2. Slika 4.22. grafi ki prikazuje zavisnost zapreminskih udela u dimnim gasovima od koeficijenta viška vazduha.



Slika 4.22. Sastav vlažnih dimnih gasova u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

4.3.3. Određivanje adijabatske temperature sagorevanja drvene biomase

Teorijska temperatura sagorevanja goriva može se odrediti iz toplotnog bilansa procesa sagorevanja, po kome je suma toplotne moći goriva H_d , entalpije jedinice mase goriva i entalpije dovedenog vazduha jednaka entalpiji produkata sagorevanja.

Ako se zanemare toplotni gubici, toplotni bilans procesa sagorevanja goriva može se prikazati izrazom:

$$H_d + c_{p_g} \cdot t_g + \lambda \cdot L_{min} \cdot c_{p_L} \cdot t_L = (1 - A + \lambda \cdot L_{min}) \cdot c_{p_{vdg}} \cdot t_{teor} + A \cdot c_{p_A} \cdot t_A, \quad (4.18)$$

odakle se dobija izraz za određivanje teorijske temperature sagorevanja goriva:

$$t_{teor} = \frac{H_d}{(1 - A + \lambda \cdot L_{min}) \cdot c_{p_{vdg}}} + \frac{\lambda \cdot L_{min} \cdot c_{p_L} \cdot t_L + c_{p_g} \cdot t_g}{(1 - A + \lambda \cdot L_{min}) \cdot c_{p_{vdg}}} - \frac{A \cdot c_{p_A} \cdot t_A}{(1 - A + \lambda \cdot L_{min}) \cdot c_{p_{vdg}}} \quad (^\circ\text{C}), \quad (4.19)$$

gde su:

$$c_{p_{vdg}} = \sum_i g_i c_{p_i} = \frac{1}{m} \sum_i m_i c_{p_i} \quad \text{specifični toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right),$$

$$c_{p_L} \quad \text{specifični toplotni kapacitet vazduha} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right),$$

$$c_{p_g} \quad \text{specifični toplotni kapacitet goriva} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right),$$

$$c_{p_A} \quad \text{specifični toplotni kapacitet pepela} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right),$$

t_L temperatura vazduha ($^\circ\text{C}$),

t_g temperatura goriva ($^\circ\text{C}$),

t_A temperatura pepela ($^{\circ}\text{C}$).

Temperatura sagorevanja goriva može se jednostavnije odrediti grafi kim putem i to pomo u i-t dijagrama za dimne gasove gde je $i = f(t)$. Kako se dimni gasovi sa porastom temperature približavaju osobinama idealnog gasa, to se bez ve e greške entalpija dimnih gasova može odrediti pomo u izraza:

$$i = m_{\text{vdg}} \cdot c_{\text{pvdg}} \cdot t \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right), \quad (4.20)$$

ili pomo u izraza:

$$i = V_{\text{vdg}} \cdot c_{\text{vvdg}} \cdot t \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right), \quad (4.21)$$

gde su:

c_{pvdg} specifi ni toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova pri konstantnom pritisku $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right)$,

c_{vvdg} specifi ni toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova pri konstantnoj zapremini $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3^{\circ}\text{C}} \right)$.

Jedna ine (4.20) i (4.21) važe pod pretpostavkom da je entalpija dimnih gasova pri temperaturi 0°C jednaka nuli.

Toplotni kapaciteti odre uju se pomo u izraza:

$$c_{\text{pvdg}} = \sum_{i=1}^5 g_i \cdot c_{\text{pi}} = \frac{1}{m_{\text{vdg}}} \cdot \sum_{i=1}^5 m_i \cdot c_{\text{pi}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right), \quad (4.22)$$

$$c_{\text{vvdg}} = \sum_{i=1}^5 \phi_i \cdot c_{\text{pi}} = \frac{1}{V_{\text{vdg}}} \cdot \sum_{i=1}^5 V_i \cdot c_{\text{vi}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3\text{N}^{\circ}\text{C}} \right), \quad (4.23)$$

gde su:

g_i maseni udeli komponente i u vlažnim dimnim gasovima $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$,

ϕ_i zapreminski udeli komponente i u vlažnim dimnim gasovima $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right)$,

m_i masa komponente i u vlažnim dimnim gasovima (kg),

V_i zapremina komponente i u vlažnim dimnim gasovima (m^3).

Specifi ni toplotni kapaciteti komponenata definisani izrazima (4.22) i (4.23) koriste se kao srednje vrednosti u temperaturskom intervalu $t = 0^{\circ}\text{C}$ i temperature dimnih gasova (prilog 3. [29]).

4.3.3.1. Broj ani primer prora una entalpije dimnih gasova

Prora un entalpije dimnih gasova ura en je za koeficijent viška vazduha $\lambda = 1$ i pretpostavljenu temperaturu dimnih gasova $t = 100$ °C. Prema broj anim vrednostima iz priloga 1. i koriš enjem izraza (4.22) i (4.20) dobija se:

specifi ni toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova:

$$c_{P_{vdg}} = \frac{1}{m_{vdg}} \cdot \left(m_{CO_2} \cdot c_{PCO_2} + m_{H_2O} \cdot c_{PH_2O} + m_{SO_2} \cdot c_{PSO_2} + m_{N_2} \cdot c_{PN_2} + m_{O_2} \cdot c_{PO_2} \right) =$$

$$= \frac{1}{5.8176} \cdot (1.5401 \cdot 0.8658 + 0.5354 \cdot 1.8690 + 0.0056 \cdot 0.6364 + 3.7365 \cdot 1.0404 + 0 \cdot 0.9232) =$$

$$= 1.0700 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

gde su:

$$m_{CO_2} = 1.5401 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa ugljen dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda = 1,$$

$$m_{H_2O} = 0.5354 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa vode u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda = 1,$$

$$m_{SO_2} = 0.0056 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa sumpor dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda = 1,$$

$$m_{N_2} = 3.7365 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa azota u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda = 1,$$

$$m_{O_2} = 0 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa kiseonika u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda = 1,$$

$$m_{vdg} = 5.8176 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa vlažnih dimnih gasova za } \lambda = 1,$$

$$c_{PCO_2} = 0.8658 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet ugljen dioksida pri temperaturi od } 100 \text{ } ^\circ C,$$

$$c_{PH_2O} = 1.8690 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet vodene pare pri temperaturi od } 100 \text{ } ^\circ C,$$

$$c_{PSO_2} = 0.6364 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet sumpor dioksida pri temperaturi od } 100 \text{ } ^\circ C,$$

$$c_{PN_2} = 1.0404 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet azota pri temperaturi od } 100 \text{ } ^\circ C,$$

$$c_{PO_2} = 0.9232 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet kiseonika pri temperaturi od } 100 \text{ } ^\circ C,$$

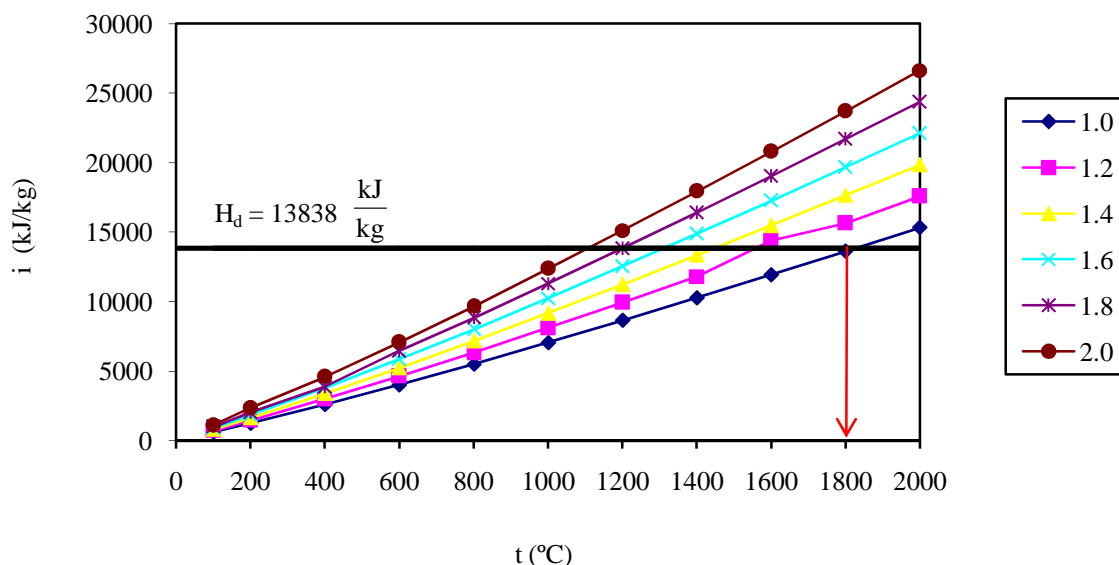
entalpija dimnih gasova:

$$i = m_{\text{vdg}} \cdot c_{\text{pvdg}} \cdot t = 5.8176 \cdot 1.0700 \cdot 100 = 622.4832 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

Na slici 4.23 prikazana je zavisnost entalpije dimnih gasova od temperature i koeficijenta viška vazduha. Pri teorijskoj (minimalnoj) potrošnji vazduha ($\lambda = 1$) i pri normalnim uslovima teorijska (pirometrijska) temperatura sagorevanja iznosi 1800 °C za date karakteristike drvne biomase toplotna moć $H_d = 13838 \text{ kJ/kg}$. Navedena temperatura ne može da se postigne u slučaju potpunog sagorevanja pri $\lambda = 1$ jer se jedan deo toplotne energije troši za disocijaciju produkata sagorevanja (slika 4.23.). Ako se uzme u obzir toplotna energija koja se troši za disocijaciju produkata sagorevanja dobija se teorijska (adijabatska) temperatura koja se određuje pomoću izraza (4.19) ili pomoću $i - t$ dijagrama (slika 4.23.) za poznati koeficijent viška vazduha.

$$\begin{aligned} H_d &= 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W = \\ &= 33900 \cdot 0.4200 + 121400 \cdot \left(0.0496 - \frac{0.4086}{8} \right) + 10460 \cdot 0.0028 - 2510 \cdot 0.0890 = \\ &= 13838.4738 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}. \end{aligned}$$

Adijabatska temperatura raste sa povećanjem temperature predgrevanja goriva i vazduha odnosno pada porastom količine dimnih gasova sagorevanja. Poznavanjem adijabatske temperature sagorevanja goriva moguće je proceniti temperaturu plamena u ložištu. Maksimalna temperatura plamena, radi očuvanja postojanosti materijala zidova ložišta, ne bi smela da prelazi 1700 - 1800 °C, što se postiže odabirom odgovarajućeg koeficijenta viška vazduha. U slučaju za odabrano gorivo (drvenu biomasu), iznosi 1.0 - 1.1.



Slika 4.23. Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja drvene biomase i koeficijenta viška vazduha

U realnim uslovima u reakcionom prostoru (ložištu) kinetika kemijskih reakcija mnogo je složenija i potrebne su desetine reverzibilnih hemijskih reakcija za opis sagorevanja ugljovodonika. Produkti procesa sagorevanja, pri visokim temperaturama koje se pritom pojavljuju, nisu jednostavne smeše produkata sagorevanja kao što bi se to moglo zaključiti iz gore navedenih hemijskih jednačina sagorevanja korištenih za određivanje stehiometrijske smjese. Gasovi disosuju stvarajući i pritom veliki broj jednostavnijih hemijskih komponenta koje dalje u nizu elementarnih hemijskih reakcija reaguju međusobno. Na primer, produkti sagorevanja ugljovodonika sa vazduhom CO_2 , H_2O , O_2 i N_2 disosuju pa se kao rezultat pojavljuju nove hemijske materije H_2 , OH , CO , H , O , N , NO i dr. (tabela 4.2. [30]).

Tabela 4.2. Zavisnost konstanti ravnoteža hemijskih reakcija od temperature [30]

	$\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{OH} + \frac{1}{2}\text{H}_2$	$\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$	$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}$
T (K)	$K_p \left(\text{Pa}^{\frac{1}{2}} \right)$	$K_p \left(\text{Pa}^{\frac{1}{2}} \right)$	$K_p \left(\text{Pa}^{\frac{1}{2}} \right)$	$K_p \text{ (Pa)}$	$K_p \text{ (Pa)}$
500	$0.9886 \cdot 10^{25}$	$0.1302 \cdot 10^{22}$	$0.3518 \cdot 10^{26}$	$0.2944 \cdot 10^{45}$	$0.4899 \cdot 10^{40}$
1000	$0.6331 \cdot 10^{10}$	$0.8728 \cdot 10^{10}$	$0.3604 \cdot 10^{10}$	$0.3631 \cdot 10^{19}$	$0.5148 \cdot 10^{17}$
1500	$0.5870 \cdot 10^5$	$0.1885 \cdot 10^5$	$0.4016 \cdot 10^6$	$0.2113 \cdot 10^{10}$	$0.3087 \cdot 10^9$
2000	$0.1371 \cdot 10^2$	$0.2892 \cdot 10^3$	$0.1378 \cdot 10^3$	$0.5376 \cdot 10^6$	$0.2631 \cdot 10^5$
2500	$0.3810 \cdot 10^1$	$0.6037 \cdot 10^2$	$0.4625 \cdot 10^2$	$0.2423 \cdot 10^1$	$0.6284 \cdot 10^3$
3000	0.3417	$0.4628 \cdot 10^1$	$0.4841 \cdot 10^1$	$0.1441 \cdot 10^1$	$0.2475 \cdot 10^1$
3500	1.6100	0.2000	0.2601	0.2680	0.3459

4.4. Emisija zaga uju ih materija iz procesa sagorevanja biomase

Procesi sagorevanja predstavljaju najznačajnije izvore zaga uju ih materija koje se emituju u atmosferu, suvom ili vlažnom depozicijom izluku uju u vodotokove, zemljište, geološki supstrat. Produkti sagorevanja su osnovni izvor toksinih materija koje se emituju u atmosferu, pa je povećanje potrošnje energije i porast industrijske proizvodnje prouzročilo oštrenje problema zaštite vazduha [31]. U tabeli 4.3. date su specifične emisije zaga uju ih gasova koje nastaju sagorevanjem različitih vrsta goriva.

Tabela 4.3. Specifične emisije gasovitih zaga uju ih materija nastalih pri sagorevanju goriva [32]

Gorivo	Donja toplotna moć	Maseni udeo (%)			Emisija $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right)$		Emisija $\left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}}\right)$	
	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right)$	C	H	S	CO ₂	SO ₂	CO ₂	SO ₂
Lignit "Kolubara"	7813	20.92	1.62	9.00	0.767	0.180	98.18	23.04
Mrki ugalj "Aleksinac"	22127	53.11	3.50	5.00	1.947	0.100	88.01	4.52
Kameni ugalj "Ibarski rudnici"	28206	62.96	4.55	7.10	2.309	0.142	81.85	5.03
Mazut	42340	86.10	10.90	0.50	3.157	0.010	74.56	0.24
Prirodni gas "Banat"	36247	90.30	5.80	0.20	2.013	0	55.55	0
Kukuruzovina	12154	32.30	4.07	0.01	1.184	0	97.44	0.02
Drvo	13553	36.87	4.43	0.07	1.352	0.001	99.75	0.10
Slama pšenice	9123	25.47	3.37	0.05	0.934	0.001	102.37	0.11
Slama soje	13942	37.46	4.88	0.01	1.370	0	98.25	0.01

Iz tabele 4.3. se vidi da je emisija SO₂ znatno manja za sve vrste biomase u odnosu na fosilna goriva, izuzimaju i prirodni gas i kukuruzovinu. Značajno je i štetno dejstvo SO₂ na životnu sredinu, upotreba biomase za sagorevanje je znatno povoljnija u odnosu na fosilna goriva. Emisija CO₂, svedena po kilogramu goriva za fosilna goriva, osim lignita, je veća od emisije biomase. Međutim, emisija CO₂ svedena na MJ donje toplotne moći i goriva, sagorevanjem biomase je veća u odnosu na fosilna goriva ali u krajnjem bilansu CO₂ biomasa je povoljnija jer troši atmosferski ugljen dioksid u procesu fotosinteze.

Biomasa se može koristiti za proizvodnju električne energije u sistemu gasogenerator gasna turbina uz izbalansiranu emisiju CO₂. Biomasa nudi mogućnost za snižavanje emisije CO₂, jer ima potencijal za obezbeđivanje procesne energije na lokacijama na kojima i nastaje. Prednost biomase, u odnosu na većinu fosilnih goriva, je u izbalansiranoj emisiji CO₂ sa njegovom potrošnjom pri fotosintezi, i evidentnoj mnogo manjoj emisiji ostalih gasovitih zaga uju ih materija. Udeo pepela u biomasi je daleko manji u odnosu na ugalj tako da su problemi sa njegovim deponovanjem zanemarljivi, a pepeo biomase se uz eventualnu pripremu može koristiti i kao đubrivo. Dobijeni kompost, poreklom iz različitih vrsta otpadnih materija, sadrži određeni udeo teških metala i organskih jedinjenja. U tabeli 4.4 prikazani su udeli navedenih materija u kompostu. Udeli štetnih materija su najmanji u kompostu od biomase.

Tabela 4.4. Udeo teških metala i organskih jedinjenja u kompostu (suva osnova) [32]

Komponenta	Jedinica	Vrsta komposta		
		Od biomase	Od vlažnih vrstih otpadaka	Od ukupnih komunalnih otpadaka
Organski materijal	(%)	33.58	55.00	n.p. ¹
Teški metali	$\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)$			
Pb		77.60	449.00	513.00
Cd		0.78	2.60	5.50
Cr		33.73	72.00	71.40
Cu		43.40	228.00	274.00
Ni		19.13	30.00	44.90
Cn		232.82	850.00	1570.00
Hg		0.33	1.04	2.40
PCB ²	$\left(\frac{\text{ng}}{\text{g}}\right)$	259.66	938.00	1493.00
PAK ³	$\left(\frac{\text{ng}}{\text{g}}\right)$	1707.00	3370.00	4412.00
PCDD/F ⁴	$\left(\frac{\text{ngITEq}^5}{\text{kg}}\right)$	12.07	50.00	103.00

¹nema raspoloživih podataka, ²polihlorisani bifenili, ³policiklički aromati i ugljovodoni, ⁴polihlorisani dibenzodijoksini i dibenzofurani, ⁵ukupni maseni udeo svih PCDD i PCDF prema meunarodnom standardu (NATO CCSM)

Iz tabele 4.4. se vidi da su koncentracije teških metala i gasovitih zagađujućih materija u kompostu od biomase nekoliko puta manje nego u kompostu od otpadaka. Razlika je veća kada se posmatraju kompost biomase i ukupnih komunalnih otpadaka, i iznosi manje od dva puta za koncentraciju hroma do više od osam puta za polihlorisane dibenzodijoksine i dibenzofurane.

Iz navedenih razloga biomasa, pored drugih alternativnih izvora energije dobija na značajnosti kao resurs za dobijanje "iste energije". Međutim, i pored navedenih prednosti koje poseduju u eksploataciji, biogoriva na bazi biomase imaju i određene nepogodnosti za primenu. Neke od njih su:

- manipulacioni i ekonomski problemi sa sakupljanjem, pakovanjem i skladištenjem biomase
- periodičnost nastanka biomase
- mala zapreminska masa i toplotna moć biomase svedena na jedinicu zapremine
- raznorodnost u prostoru
- nepovoljan oblik i visoka vlažnost biomase
- ekonomske investicije postrojenja za sagorevanje biomase su znatna.

LITERATURA

- [1] Bridgwater A. V. 2003. Renewable fuels and chemical by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal* 91: 87–102.
- [2] Demirba A. 2001. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemical. *Energy Conversion and Management* 42: 1357–1378.
- [3] Karaosmano lu F, Tetik E, Göllü E. 1999. Biofuel production using slow pyrolysis of the straw and stalk of the rapeseed plant. *Fuel Processing Technology* 59: 1–12.
- [4] Bridgewater A. V, Meier D, Radlein D. 1999. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry* 30: 1479–1493.
- [5] Zhang Q, Chang J, Wang T, Xu Y. 2007. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management* 48: 87–92.
- [6] Onay O, Ko kar O. M. 2004. Fixed-bed pyrolysis of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass and Bioenergy* 26: 289–299.
- [7] Predojevi Z. 2010. Goriva iz biomase: bioetanol i biodizel. Tehnološki fakultet Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad.
- [8] Goyal H. B, Diptendu S, Saxena R. C. 2008. Biofuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and sustainable energy reviews* 12: 504–517.
- [9] Bridgwater A. V, Peacocke G. V. C. 2000. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4: 1–73.
- [10] Zajec L. 2009. Slow pyrolysis in a rotary kiln reactor: Optimization and experiments. Master's Thesis, the School for Renewable Energy Science, University of Iceland and University of Akureyri.
- [11] Bridgwater A. V, Carson P, Coulson M. 2007. A comparison of fast and slow pyrolysis liquids from mallee. *International Journal of Global Energy Issues* 27(2): 204–216.
- [12] Dupont C, Boissonnet G, Seiler J. M, Gauthier P, Schweich D. 2007. Study about the kinetic processes of biomass steam gasification. *Fuel* 86(1): 32–40.
- [13] Mousques P, Dirion J. L, Grouset D. 2001. Modeling of solid particles pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 58: 733–745.
- [14] De Jong W, Unal O, Andries J, Hein K. R. G, Spliethoff H. 2003. Thermochemical conversion of brown coal and biomass in a pressurised fluidised bed gasifier with hot gas filtration using ceramic channel filters: measurements and gasifier modeling. *Applied Energy* 74(3): 425–437.
- [15] Moulijn J. A, Makkee M, Van Diepen A. 2001. *Chemical Process Technology*, John Wiley and Sons Ltd, Chichester.
- [16] Van den Aarsen F. G. 1985. Fluidised Bed Wood Gasifier Performance and Modeling. PhD Thesis, TU Twente.
- [17] Evans R.J, Milne T.A. 1987. Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. *Energy and Fuels* 1(2): 123–137.
- [18] McKendry P. 2002. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology* 83(1): 55–63.
- [19] Milne T. A, Agblevor F, Davis M, Deutch S, Johnson D. 1997. A review of chemical composition of fast pyrolysis oils. In *Developments in thermochemical biomass conversion*, eds. Bridgwater A.V, Boocock D. G. B, 409–424. Blackie Academic & Professional, London.
- [20] Basu P. 2006. *Combustion and gasification in fluidized beds*. CRC press, Taylor and Francis group, London.

- [21] Stultz S. C, Kitto J. B. 1992. Steam: it's generation and use. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, USA.
- [22] Bridgwater A. V, Evans G. D. 1993. An Assessment of Thermochemical Conversion Systems For Processing Biomass and Refuse. Energy Technology Support Unit (ETSU), Department of Trade and Industry, UK.
- [23] Chhiti Y, Kemiha M. 2013. Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review. The International Journal of Engineering And Science 2(3): 75-85.
- [24] www.cturare.tripod.com (17.01.2015.)
- [25] Danon G. 2011. Energetika u drvnoj industriji, skripta. Šumarski fakultet, Beograd.
- [26] Nussbaumer T. 2001. Energie. In Energie aus Biomasse, eds. Kaltschmitt M, Haltmann H, 288-389. Springer, Berlin.
- [27] Dragičević V. 2003. Optimizacija ložišta za izgaranje biomase, doktorska disertacija. Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.
- [28] Počučić N, Knežević P. 2010. Biomasa, otpad i energija. Priručnik o biomasi i njenom korišćenju u energetske svrhe. Izdavač: Nikola Počučić, Beograd.
- [29] Bogner M. Termotehnika. 2003. INTERKLIMA-GRAFIKA, Vrnjačka Banja. Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije, Beograd.
- [30] Čorović B, Valent V, Šerbanović S. 1990. Termodinamika i termotehnika, drugo dopunjeno izdanje. DIP "Građevinska knjiga", Beograd.
- [31] Škrbić B. 2002. Tehnologija proizvodnje i primene gasa. Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet u Novom Sadu, Novi Sad.
- [32] Petrov V. A. 1996. Uticajni faktori na proces termičke prerade biomase, doktorska disertacija. Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.

5. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE PIROLIZE DRVNE BIOMASE

5.1. Priprema uzorka

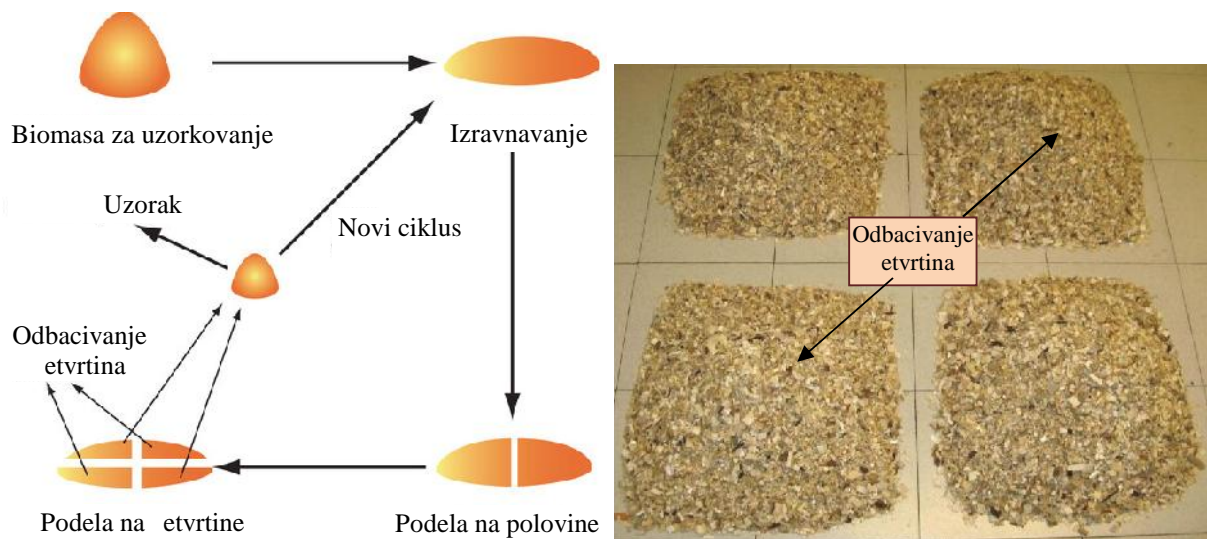
Eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize drvene biomase vršeno je na uzorcima strugotine drveta hrasta, bukve, trešnje, oraha, jele, lipe i mešavine svih navedenih vrsta u jednakoj razmeri. Uzorci poti u iz radionice kompanije “Enterijer Jankovi ” u Novom Sadu. Dobijeno je 4 kg drvene biomase, od ega je 0.7 kg utrošeno za potrebe eksperimentalnog ispitivanja procesa pirolize.

Dostavljeni uzorci drvene biomase bili su u obliku strugotine razli itih veli ina u opsegu 3 10 cm. Strugotina je u laboratoriju dopremljena u zatvorenim plasti nim kesama. Uzorci su usitnjavani u posebnom mlinu za biomasu na veli inu estica pre nika od 0.5 do 1 cm (slika 5.1.). Koriš eni mlin služi za usitnjavanje (mlevenje) biomase i drvenog otpada kao što su okrajci kod rezanja dasaka, otpad u drvenoj industriji, tanje grane i drugo. Dimenzije mlina su 1090x730x1100 mm, a kapacitet 400 500 kg. Proces usitnjavanja drveta vrši se u samo jednom prolazu. Mlin ima ventilator i ciklon za odvajanje sitne prašine.



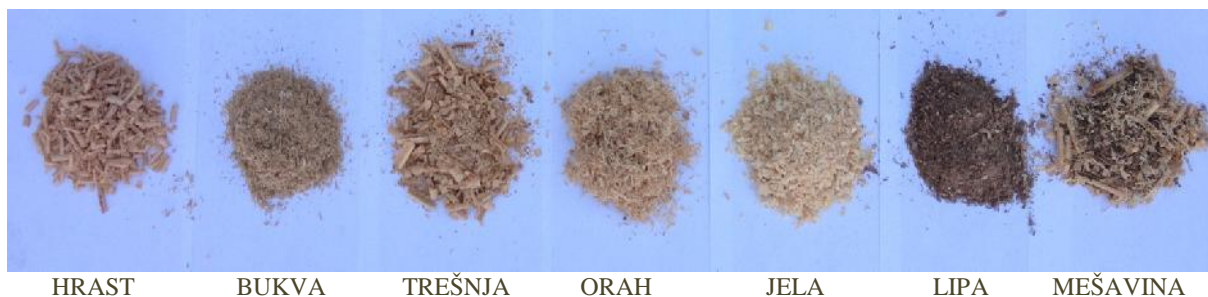
Slika 5.1. Mlin za drvni otpad i biomasu TFS-420, proizvo a Termis MKM doo, Knjaževac

U cilju postizanja homogenosti uzorka, izvršena je metoda uzorkovanja pomoću četvrtina (“quarter sampling method”) (slika 5.2.).



Slika 5.2. Metoda uzorkovanja pomoću četvrtina

Uzorkovanje pomoću četvrtina predstavlja metodu kojom se smanjuje masa biomase namenjene za uzorkovanje i postiže homogenost uzorka. Najpre se formira kupa, koja se potom izravna, nakon toga podeli na polovine, a zatim na četvrtine. Dve četvrtine se mešaju i formiraju uzorak, ili se ponovo podvrgavaju istoj metodi, dok se ne postigne željena masa uzorka (kao što je prikazano na slici 5.2.). Preostale dve četvrtine se odbacuju. Uzorci dobijeni navedenom metodom (slika 5.3.) korišćeni su pri eksperimentalnom ispitivanju.



Slika 5.3. Fotografski prikaz uzoraka različitih vrsta drvne biomase korišćenih za eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize

Uzorci su stavljeni u specijalne plastične kese koje se zatvaraju hermetički, da ne bi došlo do gubitka ili upijanja vlage iz vazduha. Svaka kesa sa uzorkom bila je označena spolja. Oznaka je sadržala: lokaciju uzorkovanja, vrstu biomase, vremenske prilike (kiša, vetar, sunce) i ime uzorkivača.

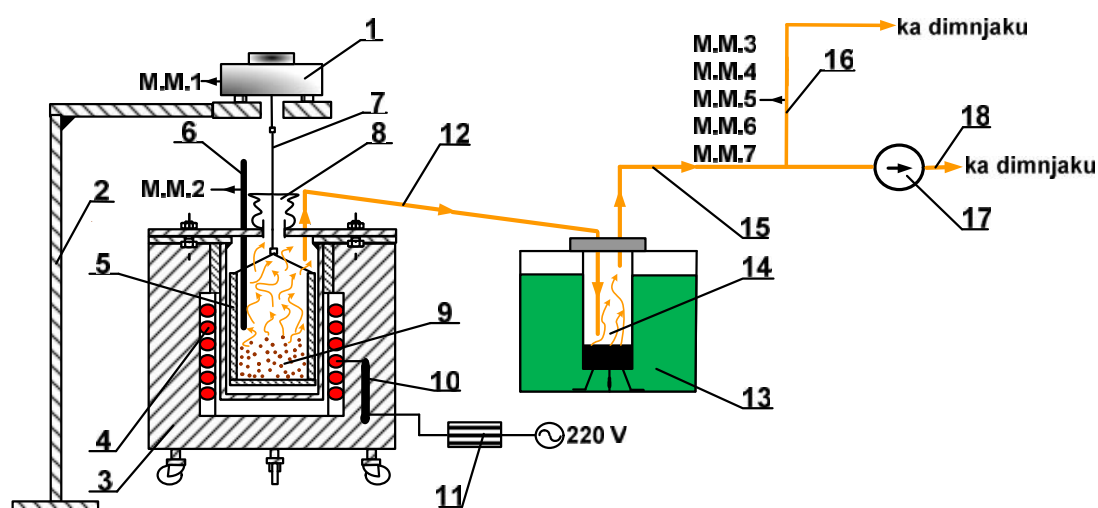
Elementarna i tehnička analiza mešavine drvne biomase koja je bila predmet istraživanja u doktorskoj disertaciji, izvršena je od strane Rudarskog Instituta u Beogradu i prikazana u tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Elementarna i tehni ka analiza mešavine drvene biomase koriš ene pri eksperimentalnom ispitivanju [1]

Tehni ka analiza						
W	VM	A	C_{fix}	H_d		
maseni udeo (%)				$\left(\frac{kJ}{kg}\right)$		
8.90	76.40	1.99	12.71	16299.99		
Elementarna analiza						
C	H	N	S	O	H/C	O/C
maseni udeo (%)					$\left(\frac{kmolH}{kmolC}\right)$	$\left(\frac{kmolO}{kmolC}\right)$
42.00	4.96	1.05	0.28	40.86	1.41	0.73

5.2. Postavka eksperimentalnog postrojenja i postupak merenja

Šema laboratorijskog postrojenja koriš enog za pirolizu drvene biomase i spisak mernih mesta (M.M) prikazani su na slici 5.4.




Slika 5.4. Šema eksperimentalnog postrojenja i mernih mesta za pirolizu drvene biomase
 1 digitalna vaga, 2 stalak za vagu, 3 pe , 4 elektri ni greja i, 5 reaktorski sud, 6 termoelement (mera temperatura u posudi za uzorak biomase), 7 fleksibilna veza izme u vage i posude za uzorak, 8 fleksibilni teflonski omota , 9 uzorak biomase, 10 senzor regulatora temperature, 11 regulator temperature, 12 vod gasovitih produkata pirolize, 13 hladnjak, 14 boca za izdvajanje te ne faze, 15 suvi gasoviti proizvodi pirolize, 16 – uzorkovani gas, 17 pumpa, 18 odvod gasa ka atmosferi

Na prikazanim mernim mestima merene su slede e procesne veli ine:

- M.M.1 - masa uzorka biomase (drvena biomasa)
- M.M.2 - temperatura piroliti kog gasa u posudi za biomasu
- M.M.3 - zapreminski udeo CO u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora (%)
- M.M.4 - zapreminski udeo H₂ u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora (%)
- M.M.5 - zapreminski udeo CO₂ u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora (%)
- M.M.6 - zapreminski udeo O₂ u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora (%)
- M.M.7 - zapreminski udeo CH₄ u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora (%).

Za merenje navedenih procesnih veličina korišćeni su merni instrumenti čiji je opis prikazan u tabeli 5.2.

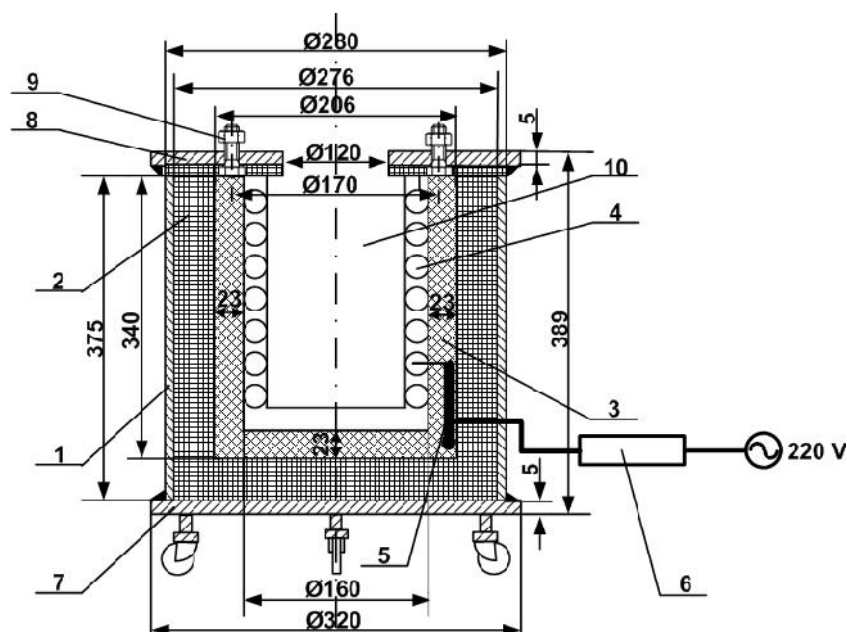
Tabela 5.2. Opis mernih instrumenata korišćenih tokom eksperimentalnog ispitivanja

MERNI INSTRUMENT	OPIS MERENJA	OPSEG MERENJA	GREŠKA MERENJA
Digitalna precizna vaga METTLER P1000 	Merenje mase uzorka poljoprivredne biomase	0 1000 g	1000 g ± 1 g
Digitalni pokazivač temperature Testo 925 sa sondom tipa K (NiCr - Ni) 	Merenje temperature pirolitičkog gasa	-50 1000 °C	±0.2%
Gasni analizator G 750 POLYTECTOR II 	Merenje zapreminskog udela CO na izlazu iz reaktora	0 0.05%	±0.0003%
	Merenje zapreminskog udela H ₂ na izlazu iz reaktora	0 4%	±0.03%
	Merenje zapreminskog udela CO ₂ na izlazu iz reaktora	0 100%	±0.03%
	Merenje zapreminskog udela O ₂ na izlazu iz reaktora	0 25%	±0.2%
	Merenje zapreminskog udela CH ₄ na izlazu iz reaktora	0 100%	±1.0%

Pri izradi električne peći i reaktorske posude korišćeni su sledeći materijali:

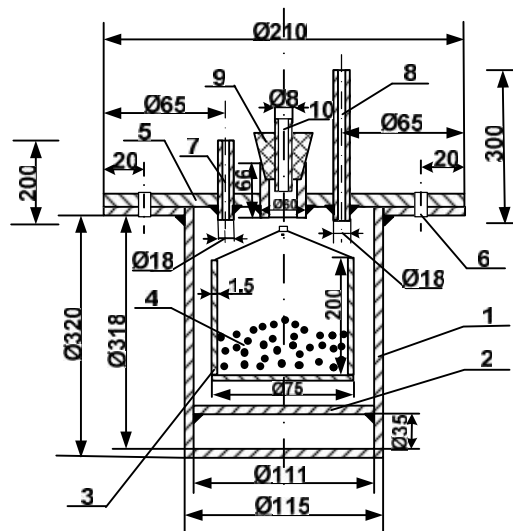
- crni lim - materijal . 0461, dimenzije 879 mm×375 mm, debljine 2 mm
- kamena mineralna vuna - površine 1m²
- šamotna cev, Ø206 mm, debljine zida 3 mm, dužine 340 mm
- čelični cilindar - materijal . 1531, dimenzije 320 mm×320 mm, debljina ploče 5 mm, komada 2
- vijci M12×40 (JUS M.B1.054) V. 5.6, sa navrtkom M12 (JUS M.B1.601) i podloškom za M12, komada 8
- cev od prohroma - materijal . 4970, Ø 115 mm, debljine zida 2 mm, dužine 322 mm
- cev od prohroma - materijal . 4970, Ø 75 mm, debljine zida 1.5mm, dužine 200 mm
- lim od prohroma - materijal . 4970, dimenzije 210mm×210mm, debljine 2 mm
- lim od prohroma - materijal . 4970, dimenzije 210mm×210mm, debljine 4 mm
- cev od prohroma - materijal . 4970, Ø 18 mm, debljine zida 1.5mm, dužine 600 mm
- cev od prohroma - materijal . 4970, Ø 60 mm, debljine zida 1.5 mm, dužine 66 mm
- teflonski ep za cev - Ø 60 mm, dužine 70 mm.

Laboratorijsko postrojenje je projektovano i napravljeno u Laboratoriji Departmana za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu i Departmana za energetiku i procesnu tehniku Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Slike 5.5 i 5.6. prikazuju šeme električne peći i reaktorske posude za pirolizu drvne biomase.



Slika 5.5. Šema električne peći

1 – čelični cilindar, 2 – kamena mineralna vuna (toplotna izolacija), 3 – šamot, 4 – električni grejači, 5 – senzor regulatora temperature, 6 – regulator temperature, 7 – postolje električne peći, 8 – poklopac električne peći, 9 – vijci za stezanje poklopca reaktorske posude, 10 – mesto za reaktorsku posudu



Slika 5.6. Šema reaktorske posude

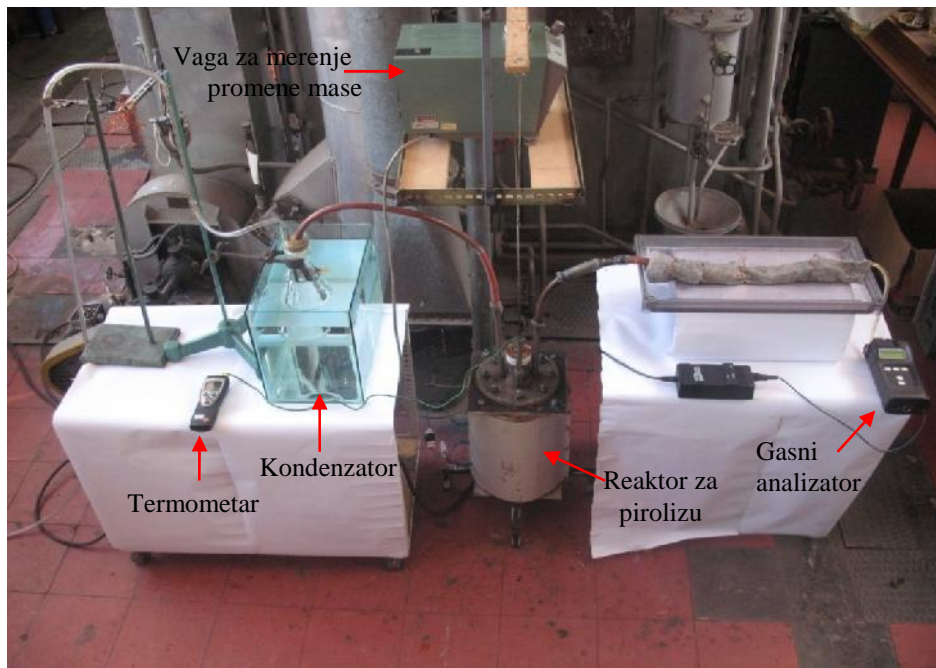
1 – cilindri na posuda, 2 – dno reaktorske posude, 3 – posuda za drvenu biomasu, 4 – uzorak biomase, 5 – poklopac reaktorske posude, 6 – otvor za vijke, 7 – cev za termoelement, 8 – cev za gasovite produkte pirolize, 9 – ep, 10 – cev za prolaz fleksibilne veze izme u vage i posude za uzorak biomase

Pri izgradnji eksperimentalnog postrojenja korišteni su materijali otporni na visoke temperature i na temperaturnu koroziju. Konstrukcija peći i reaktora omogućava ispitivanje šaržnih procesa pirolize biomase radne temperature do 700 °C. Laka izolacija peći i mala masa reaktora omogućavaju merenje promene mase uzorka tokom ispitivanja. Izbor mernih mesta je izvršen tako da realno oslikavaju stanje merenih parametara tokom procesa pirolize. Električna peć je visine 389 mm, spoljašnjeg prenika 320 mm i unutrašnjeg prenika 150 mm, obložena je izolacionim materijalom (kamena mineralna vuna) i okružena je sa tri zasebno kontrolisane električne grejača ukupne snage 4.5 kW koji greju reaktorsku posudu sa uzorkom biomase do željene temperature. Reaktorska posuda za biomasu je visine 200 mm i unutrašnjeg prenika 72 mm. Fotografski izgled električne peći i reaktorske posude prikazan je na slici 5.7.



Slika 5.7. Fotografski izgled električne peći i reaktorske posude

Slika 5.8. prikazuje laboratorijsko postrojenje, projektovano na Fakultetu tehničkih nauka, na kome su vršena eksperimentalna merenja procesa pirolize šest različitih vrsta drvene biomase (strugotine drveta hrasta, bukve, trešnje, oraha, jele i lipe), kao i njihove mešavine, sa injenjen od svih šest ispitivanih vrsta drvene biomase jednakog masenog udela.



Slika 5.8. Fotografski izgled laboratorijskog postrojenja za pirolizu drvene biomase

Vršene su dve serije eksperimenata. Prva serija vršena je radi utvrđivanja uticaja temperature i reakcionog vremena na prinos produkata pirolize. Tokom procesa zagrevanja, beležena je veza između promene mase, temperature i vremena. Gasni analizator G 750 POLYTECTOR II korišten je za merenje zapreminskog udela CO , H_2 , CO_2 , O_2 i CH_4 na izlazu iz reaktora, digitalna precizna vaga METTLER P1000 za merenje promene mase uzorka drvene biomase, a digitalni pokazivač temperature Testo 925 sa sondom tipa K (NiCr - Ni) za merenje temperature (0 - 650 °C) u posudi sa biomasom. Eksperiment je ponovljen po pet puta za šest vrsta drvene biomase i njihovu mešavinu. Rezultati su prikazani u prilogima 5. 11. Brzina zagrevanja je izražavana nakon eksperimenata i kretala se u opsegu od 18 do 25°C/min. Pri ispitivanju uticaja brzine zagrevanja na prinos produkata pirolize korištena je srednja vrednost brzine zagrevanja za sva izvršena merenja koja iznosi 21 °C/min.

Druga serija eksperimenata je izvedena kako bi se utvrdila zavisnost prinosa produkata pirolize mešavine drvene biomase od brzine zagrevanja. U drugoj seriji eksperimenata brzine zagrevanja su iznosile 32 i 55 °C/min, što je dobijeno proračunom nakon izvođenja eksperimenata. Eksperiment je ponovljen po dva puta za navedene brzine zagrevanja (prilozi 12. i 13.). Beležena je promena mase u zavisnosti od temperature i vremena, radi poređenja rezultata sa rezultatima dobijenim u prvoj seriji eksperimenata pri pirolizi mešavine drvene biomase sa prosečnom brzinom zagrevanja u reaktoru od 21 °C/min.

Pri svakom eksperimentalnom ispitivanju, početna masa uzorka drvene biomase iznosila je 10 g, a frakcioni sastav bio je u opsegu 0.5 - 1.0 cm. Uzorci drvene biomase su stavljani u posudu za uzorak biomase a potom zajedno sa posudom u reaktor. Zagrevanje je vršeno električnim grejačima. Nakon postizanja temperature od 650 °C, temperatura je održavana u intervalu od 640 - 660 °C određeno vreme, dok se ne ustali masa uzorka u reaktoru. Posuda sa uzorkom drvene biomase je okrenuta za vagu pomoću fleksibilne veze između vage i posude. Nakon eksperimenata, vršeno je merenje mase koksnog ostatka, kao i mase tečne faze. Svi podaci uneseni su u merne liste.

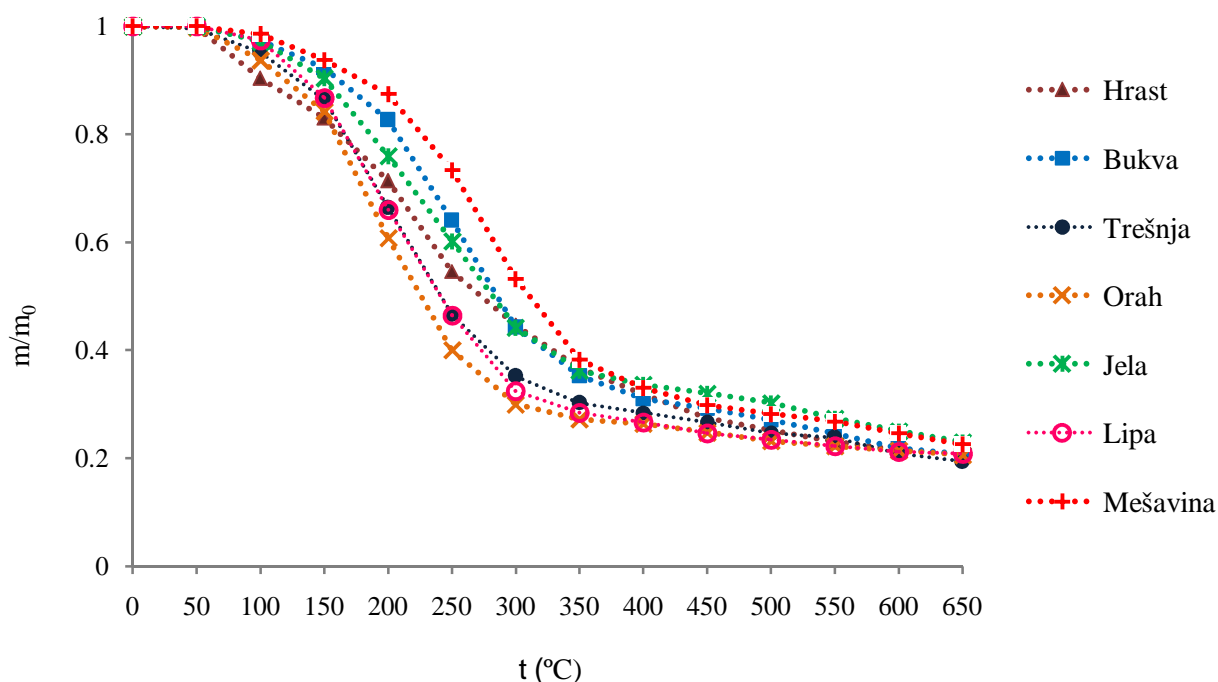
5.3. Rezultati i diskusija eksperimentalnog ispitivanja

Piroliza drvene biomase odvija se kroz više različitih procesa, uključujući i egzotermni proces tokom koga se dobijaju tri proizvoda: gasovi, bio-ulje i vrsti ostatak. Osnovne reakcije do kojih dolazi pri odvijanju procesa pirolize drveta mogu se podeliti na primarne i sekundarne reakcije. Primarne reakcije najčešće podrazumevaju reakcije fragmentacije i dehidratacije. Pri temperaturi ispod 300 °C, prevladava reakcija fragmentacije koja podrazumeva depolimerizaciju biomase u primarni katran. Sekundarnim reakcijama, proizvodi dobijeni primarnim reakcijama se ponovo polimerizuju, podležu daljim reakcijama fragmentacije kao što su krekovanje ili reformiranje, ili reaguju sa slobodnim radikalima čime nastaju sekundarni proizvodi [2].

5.3.1. Uticaj temperature na proces pirolize

Opšte gledano, povećanje temperature dovodi do povećanja udela gasa u krajnjem proizvodu pirolize. Razgradnja biomase na većoj temperaturi rezultat je sekundarnih egzotermnih reakcija. Prinos te ne faze raste do maksimalne vrednosti od 35% na temperaturi od 500 °C a zatim opada sa daljim porastom temperature. Sekundarne egzotermne reakcije (krekovanje) na većim temperaturama povećavaju udeo gasa na kraju te faze. Analize pojedinih istraživanja ukazuju da bi za veći prinos bio-ulja, temperatura trebalo da bude između 500 i 550 °C kako bi se sprečio završetak sekundarnih reakcija [3]. Nasuprot tome, proizvodnju gasa karakteriše suprotan trend. Prinos gasa se smanjuje do 500 °C a zatim značajno raste sa povećanjem temperature usled reakcija krekovanja koje uključuju te nu fazu [3].

Na slici 5.9. prikazana je promena m/m_0 , gde je m masa uzorka drvene biomase koja se menja tokom vremena u reaktoru, a m_0 početna masa uzorka, u zavisnosti od reakcione temperature. Masa uzorka m predstavlja srednju vrednost pet merenja. Pri nižim temperaturama (<100 °C) proces razgradnje uzorka teče sporije i vrsti ostatak je glavni proizvod. Pri višim temperaturama (100–500 °C) razgradnja uzorka teče brže uz značajnu redukciju vrstog ostatka i povećanje prinosa vlažnog gasa. Iznad 500 °C dolazi do stabilizacije prinosa vrstog ostatka. Pri krajnjoj temperaturi od 650 °C, najmanji prinos vrstog ostatka dobijen je za uzorak strugotine drveta trešnje i iznosi 0.194 g/g (19.4%), dok je najveći prinos vrstog ostatka dobijen pri pirolizi uzorka strugotine drveta jele i iznosi 0.230 g/g (23.0%). Prinos vrstog ostatka dobijen nakon eksperimentalnog ispitivanja procesa pirolize drveta hrasta i bora kod Braadbaarta i ostalih iznosio je 15–25% na krajnjoj temperaturi od 1200 °C [4], dok su Chan i ostali [5] proučavanjem procesa pirolize piljevine bora utvrdili da je prinos vrstog ostatka iznosio od 22.1 do 23.6%, tako da se može primetiti da krajnji prinos vrstog ostatka približno odgovara rezultatima predstavljenim u literaturi.



Slika 5.9. Promena mase uzorka drvene biomase u zavisnosti od temperature pirolize (prose na brzina zagrevanja 21 °C/min)

Tabela 5.3. prikazuje vrednost m/m_0 na odre enim temperaturama za svaku vrstu drvene biomase za koju je vršeno ispitivanje procesa pirolize. U tabeli su prikazane srednje vrednosti pet merenja za svaku vrstu drvene biomase. U prvoj koloni prikazana je vrsta drvene biomase, dok ostale kolone prikazuju vrednosti m/m_0 na odre enoj temperaturi. Razlike izme u razli itih vrsti drvene biomase uglavnom nisu velike. Može se re i da su zna ajna odstupanja zabeležena jedino pri temperaturi od 200 °C, na kojoj je najve a vrednost m/m_0 zabeležena za mešavinu (87.4%), a najmanja za strugotinu drveta oraha (60.8%).

Tabela 5.3. Promena mase uzorka drvene biomase m/m_0 u zavisnosti od temperature pirolize (prose na brzina zagrevanja 21 °C/min)

t (°C)	100	200	300	400	450	500	550	600	650
	m/m_0								
Hrast	0.904	0.714	0.446	0.318	0.274	0.252	0.230	0.216	0.206
Bukva	0.974	0.826	0.442	0.310	0.292	0.270	0.246	0.218	0.208
Trešnja	0.952	0.664	0.352	0.284	0.266	0.246	0.238	0.208	0.194
Orah	0.938	0.608	0.300	0.264	0.248	0.232	0.222	0.214	0.206
Jela	0.972	0.760	0.442	0.336	0.320	0.302	0.274	0.250	0.230
Lipa	0.974	0.660	0.324	0.266	0.246	0.234	0.222	0.212	0.208
Mešavina	0.986	0.874	0.532	0.330	0.298	0.282	0.268	0.246	0.226

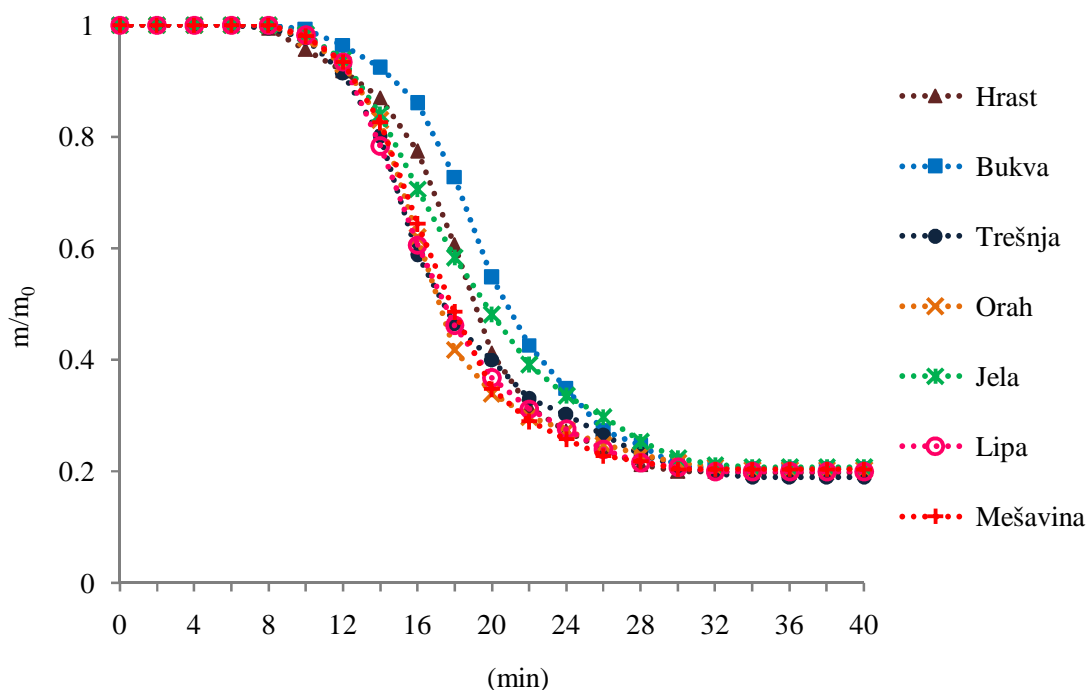
Na osnovu prikazane tabele može se primetiti da do najzna ajnijih promena masenog udela m/m_0 dolazi u opsegu temperature 200–400 °C. Pri 200 °C prinos vrstog ostatka kretao se od 0.608–0.874 g/g, dok je na 400 °C iznosio od 0.264–0.336 g/g. U navedenom opsegu prinos vrstog ostatka se smanjio za 55.46–62.47%, u zavisnosti od vrste drvene biomase. Koriš enjem vrednosti iz tabele može se ustanoviti da se prinos vrstog ostatka u opsegu od 400–600 °C smanjio za 21.81–35.22%.

Tabela 5.3. prikazuje promenu mase uzorka do temperature od 650 °C. Bitno je napomenuti da pri toj temperaturi reakcija pirolize nije završena. Nakon postizanja ove temperature kod nekih uzoraka se može uo iti mali gubitak mase. To ukazuje da bio-ulje i vrsti ostatak i dalje reaguju ili da su prisutne neke druge spore reakcije. Me utim, ve ina komponenta biomase je ve odreagovala.

Mnogi istraživa i su u svojim radovima analizirali promenu mase vrstog ostatka u zavisnosti od temperature i došli su do zaklju ka da se sa porastom temperature pirolize smanjuje prinos vrstog ostatka kao i da su najve e promene zabeležene u intervalu od 200 do 400 °C. Müller - Hagedorn i ostali [6] su u svom radu analizirali pirolizu tri razli ite vrste drveta: graba, oraha i škotskog bora. Na grafiku koji prikazuje termogravimetrijsku analizu hemijski tretiranog drveta graba jasno se vidi da u opsegu temperature 200–400 °C dolazi do najzna ajnije promene masenog udela. Park i ostali [7] razmatrali su pirolizu belog hrasta iz Koree. Režim gubitka mase kod belog hrasta je takav da je izme u 250 i 400 °C došlo do kompletne razgradnje. Ispitivanjem pirolize hrasta i bora, Braadbart i ostali [4] došli su do podatka da se u opsegu temperature od 220 do 310 °C izgubi oko 60% od po etne mase uzorka.

5.3.2. Promena mase uzorka drvene biomase u zavisnosti od reakcionog vremena

Zavisnost promene mase uzorka drvene biomase m/m_0 od reakcionog vremena prikazana je na slici 5.10. Masa uzorka m predstavlja srednju vrednost pet merenja za svaku vrstu drvene biomase. Tokom prvih 7 minuta ispitivanja procesa pirolize masa uzorka u reaktoru ostaje nepromenjena i iznosi 10 g. Sa daljim tokom procesa pirolize od 12 do 24 minuta zabeležen je zna ajniji gubitak mase uzorka. Nakon 34 minuta trajanja procesa pirolize, masa vrstog ostatka ima konstantnu vrednost.



Slika 5.10. Kriva promene mase uzorka drvene biomase u zavisnosti od reakcionog vremena (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase 21 °C/min)

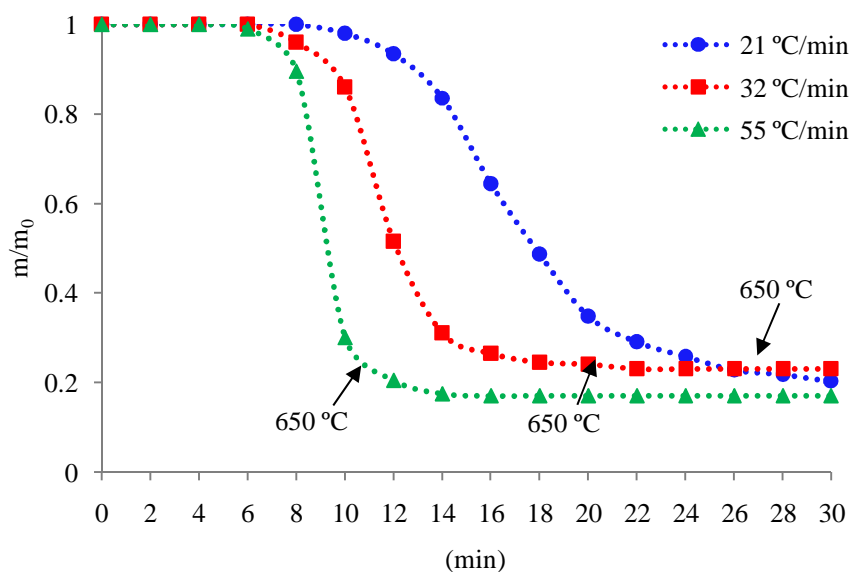
Proces razgradnje najbrže se odvijao pri pirolizi strugotine drveta trešnje, a najsporije pri pirolizi strugotine drveta bukve, ali odstupanja nisu značajna. Od 16-tog do 20-og minuta došlo je do najvećih odstupanja između različitih vrsta drvene biomase. Na kraju procesa pirolize odnos mase vrstog (koksog) ostatka i mase uzorka drvene biomase kretao se u granicama 0.190–0.208 g/g.

5.3.3. Uticaj brzine zagrevanja na prinos produkata pirolize

Brzina zagrevanja utiče na brzinu i stepen pirolitičkih reakcija, na redosled navedenih reakcija i na sastav nastalih proizvoda. Dugo vreme zagrevanja (spora piroliza) pospešuje sekundarne reakcije dok kratko vreme zagrevanja (brza ili fleš piroliza) redukuje sekundarne reakcije i dalju razgradnju primarnih proizvoda. Ukoliko se reaktor dovoljno brzo snabdeva toplotom pri fleš pirolizi, nastaje malo ili nimalo vrstog ostatka. Temperatura reaktora i biomase može se razlikovati. Stoga, pri višim temperaturama, na brzinu reakcije veći i uticaj može imati brzina transfera toplote nego kinetika reakcije.

Sa porastom brzine zagrevanja tokom procesa pirolize povećava se prinos volatila (isparljivih materija), dok prinos vrstog ostatka opada. Pri malim brzinama zagrevanja, volatili imaju dovoljno vremena da napuste zonu odvijanja reakcija pre nego što dođe do reakcije krekovanja. Brzina zagrevanja zavisi od dimenzija goriva i vrste pirolitičkog reaktora. Veći prinos u nekoj fazi podstiče piroliza pri velikim brzinama zagrevanja i visokoj temperaturi, dok se veći prinos vrstog ostatka postiže pirolizom pri malim brzinama zagrevanja i niskim temperaturama.

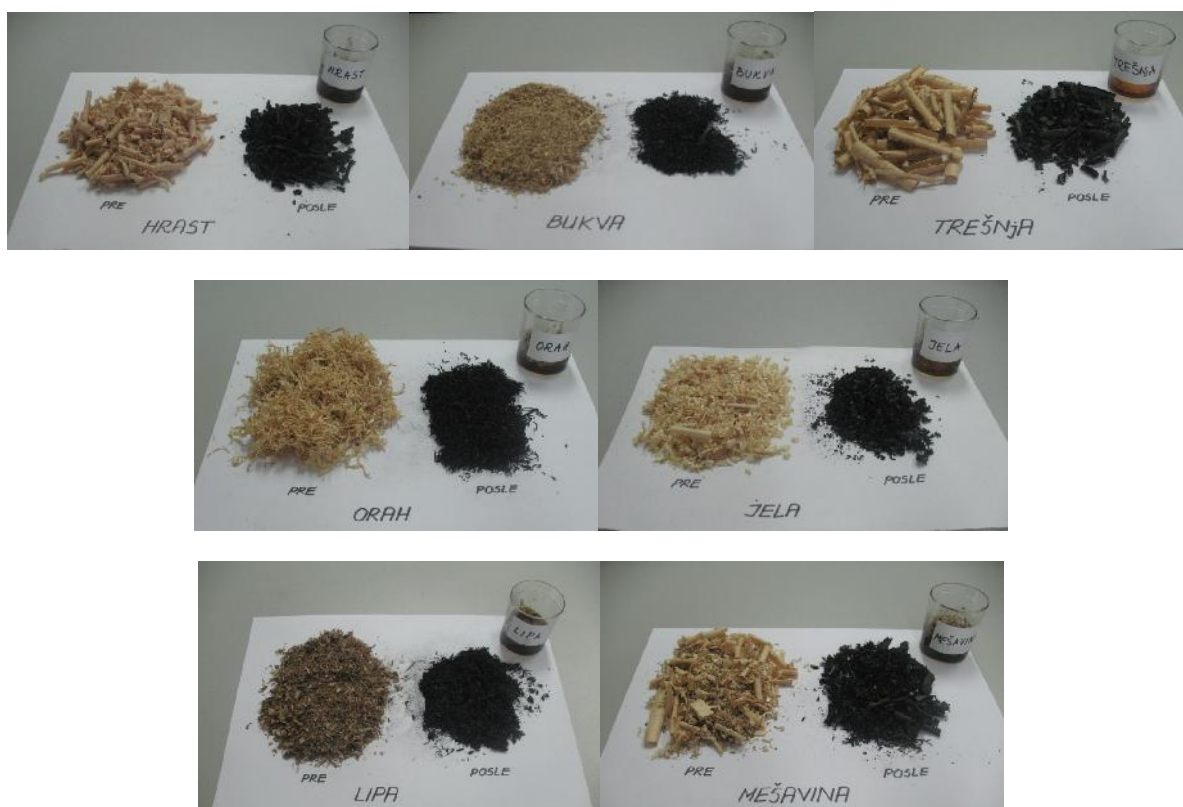
Promena masenog odnosa m/m_0 , gde je m masa uzorka mešavine drvene biomase koja se menja tokom vremena u reaktoru (m predstavlja srednju vrednost izvršenih merenja), a m_0 početna masa uzorka, u zavisnosti od vremena pirolize i brzine zagrevanja uzorka prikazana je na slici 5.11. Sa slike se uočavaju veći prinosi vlažnog pirolitičkog gasa, a manji prinosi vrstog ostatka (koksa) pri većim brzinama zagrevanja uzorka u reaktoru. Veći prinosi koksog ostatka pri manjim brzinama zagrevanja uzorka mešavine u reaktoru su posledice sporih reakcija koje se odvijaju u reaktoru. Krajnja temperatura pirolize mešavine drvene biomase (650 °C) bila je postignuta na 11-om, 20-om i 26-om minutu pri brzinama zagrevanja uzorka od 55, 32 i 21 °C/min (srednje vrednosti), respektivno. Temperatura od 650 °C održavana je do stabilizacije m/m_0 . Masa suvog pirolitičkog gasa, vrstog (koksog) ostatka i u nekoj fazi dobijena merenjem nakon procesa pirolize mešavine drvene biomase kretala se u granicama 5.10–5.54 g, 1.70–2.30 g, 2.40–2.72 g, respektivno. Srednja brzina izdvajanja vlažnog pirolitičkog gasa iznosi 0.30, 0.38 i 0.70 g/min pri brzinama zagrevanja uzorka mešavine biomase od 21, 32 i 55 °C/min. Odnos mase vrstog (koksog) ostatka i mase uzorka mešavine biomase kreće se u granicama 0.17–0.23 g/g pri temperaturi pirolize od 650 °C. Odnos zavisi u prvom redu od udela vlage, ugljenika i vodonika u uzorku. Pri višim temperaturama pirolize taj odnos je manji zbog smanjenog udela vlage i volatila.



Slika 5.11. Kriva gubitka mase uzorka mešavine drvene biomase u zavisnosti od reakcionog vremena i brzine zagrevanja uzorka

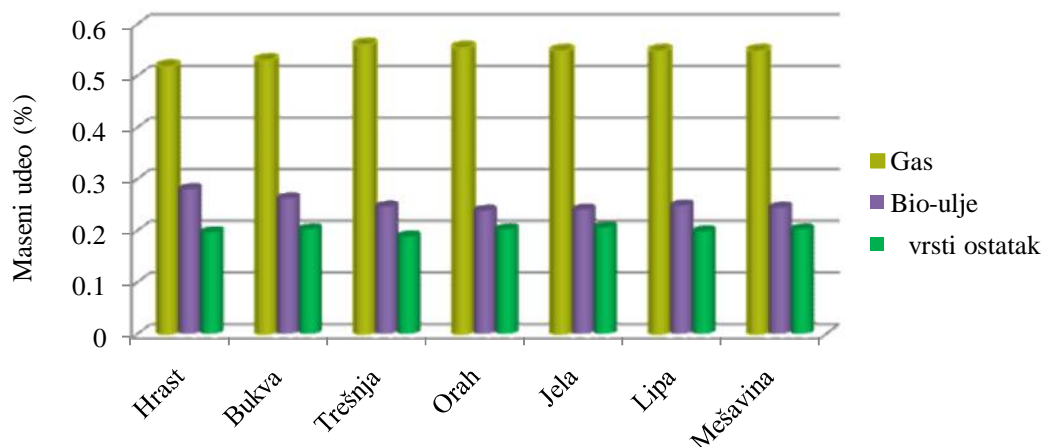
5.3.4. Uticaj vrste drvene biomase na prinos produkata pirolize

Proces pirolize eksperimentalno je ispitivan na uzorcima šest razli itih vrsta drvene biomase (strugotini hrasta, bukve, trešnje, oraha, jele i lipe) i na uzorku dobijenom mešanjem jednakih masenih udela svih šest navedenih vrsta drvene biomase. Na slici 5.12. prikazani su uzorci drvene biomase pre procesa pirolize, vrsti (koksni) ostatak i te na faza.



Slika 5.12. Prikaz uzoraka drvene biomase pre procesa pirolize, vrstog ostatka i te ne faze

Na slici 5.13. prikazan je prinos produkata na kraju procesa pirolize drvene biomase. Prinos piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize kretao se od 52.0% (strugotina drveta hrasta) do 56.2% (strugotina drveta trešnje). Prinos te ne faze na kraju procesa pirolize iznosio je od 24.0% za strugotinu drveta oraha, do 28.2% za strugotinu drveta hrasta. Najmanje promene zabeležene su kod prinosa vrstog ostatak, koji se kretao od 19.0% za strugotinu drveta trešnje do 20.8% za strugotinu drveta jele.



Slika 5.13. Maseni udeo produkata pirolize drvene biomase pri temperaturi 650 °C (prose na brzina zagrevanja 21 °C/min)

Sa slike 5.13. može se primetiti da prinos produkata ne pokazuje značajna odstupanja za različite vrste drvene biomase. Mala odstupanja prinosa mogu se objasniti malim razlikama u odnosima H/C i O/C, koji se kreću od 1.35-1.77 i od 0.59-0.73, respektivno (tabela 5.4.). Za mešavinu drvene biomase koja je eksperimentalno ispitivana, odnos H/C je 1.41, a odnos O/C je 0.73, što je u opsegu vrednosti dobijenih razmatranjem rezultata elementarne analize iz literature za pojedinačne vrste drvene biomase koje su zastupljene u mešavini.

Tabela 5.4. Elementarna i tehnička analiza različitih vrsti drvene biomase

Vrsta drvene biomase	Elementarna analiza								Tehnička analiza				
	C	H	N	S	O	H/C	O/C	W	VM	A	C _{fix}	H _d	
	maseni udeo (%)					$\left(\frac{\text{kmolH}}{\text{kmolC}}\right)$	$\left(\frac{\text{kmolO}}{\text{kmolC}}\right)$	maseni udeo (%)			$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$		
Hrast	[8]	47.06	5.67	0.28	0.09	39.90	1.45*	0.63*	6.50	73.00	0.50	20.00	16628
	[9]	44.27	6.53	1.99	0	41.81	1.77*	0.71*	5.20	77.00	0.20	17.70	16460*
	[10]	48.80	6.22	0.28	0	38.90	1.53*	0.60*	5.20	82.40	0.60	11.80	18061*
Bukva	[11]	45.84	5.74	0.37	0	39.35	1.50*	0.64*	7.40	68.52	1.30	22.78	16351*
	[12]	43.38	5.51	0.37	0	41.54	1.52*	0.73*	8.10	76.00	1.10	14.80	14888*
	[13]	46.61	5.80	0.37	0.36	39.96	1.49*	0.64*	6.40	74.80	0.50	18.30	16563
Trešnja	[14]	47.36	6.42	0.74	0.18	45.30	1.63*	0.71*	6.09	72.97	2.64	18.30	16760
Orah	[15]	43.89	4.94	0.21	0	40.68	1.35*	0.69*	9.53	72.97	0.75	16.75	13762
	[14]	43.59	5.92	0.90	0.18	40.37	1.63*	0.69*	3.65	71.43	5.39	19.00	16310
Jela	[16]	48.53	5.66	0.28	0.09	38.24	1.40*	0.59*	6.70	75.70	0.50	17.10	17361

*dobijeno proračunom

5.3.5. Pore enje prinosa produkata pirolize sa podacima iz literature

U tabeli 5.5. prikazani su prinosi vrstog ostatka, bio-ulja i gasa dobijeni na kraju procesa pirolize mešavine drvene biomase i pore enje sa rezultatima datim u literaturi. Vrednosti prinosa vrstog ostatka dobijene eksperimentalnim ispitivanjem uporedive su sa vrednostima prinosa vrstog ostatka kod drugih istraživača [17-22]. Odstupanja prinosa bio-ulja i gasa mogu se objasniti različitim uslovima odvijanja procesa pirolize, pre svega brzinom zagrevanja.

Tabela 5. 5. Pore enje prinosa produkata pirolize drvene biomase sa podacima iz literature

	Vrsta biomase	Temperatura (°C)	Brzina zagrevanja (°C/min)	Maseni udeo (%)			Voda i gubici
				vrsti ostatak	Bio-ulje	Gas	
Eksperiment	Hrast	650	21	19.8	27.2	51.0*	-
	Bukva			20.4	26.4	53.2*	
	Trešnja			19.0	24.8	56.2*	
	Orah			20.4	24.0	55.6*	
	Jela			20.8	24.2	55.0*	
	Lipa			20.0	25.0	55.0*	
	Mešavina			20.4	24.6	55.0*	
Grieco i Baldi [17]	Bor	677-977	3	27.0	54.0	20.0	1.3
			60	21.0	61.0	18.0	1.1
	Bukva		3	27.0	53.0	21.0	1.1
			60	21.0	62.0	17.0	1.1
Figueiredo et al. [18]	Hrast	600	-	21.9	43.0	35.1	-
		700	-	20.7	37.3	42.0	-
		800	-	18.4	28.1	53.5	-
Knight et al. [19]	Šumski otpad	316-982	-	23.0	25.0	68.0	-
Williams i Besler [20]	Bor	600	5	24.0	12.4	14.6	21.0
			20	22.6	12.8	27.0	37.6
			5	23.2	13.0	26.8	37.0
			20	19.6	14.1	28.8	37.5
Bajus [21]	Bukva	450	7.5-16.5	30.6	44.3	25.1	-
García-Pérez et al. [22]	Drvni otpad	500	12	26.2	26.4	19.9	27.5

*Vrednosti određene iz materijalnog bilansa

5.3.6. Sastav produkata pirolize

Procesom pirolize biomase nastaju tri produkta: te na (bio-ulje), vrsta (biougalj, vrsti ili koksni ostatak) i gasovita (piroliti i gas). Odnos produkata pirolize zavisi od više faktora uključujući i sastav goriva i parametre procesa.

5.3.6.1. Sastav piroliti kog gasa

Tokom procesa pirolize nastaju kondenzibilni i nekondenzibilni gasovi. Kondenzibilni gasovi, (organske pare koje se sastoje od fragmenata lignina, celuloze i hemiceluloze) formiraju bio-

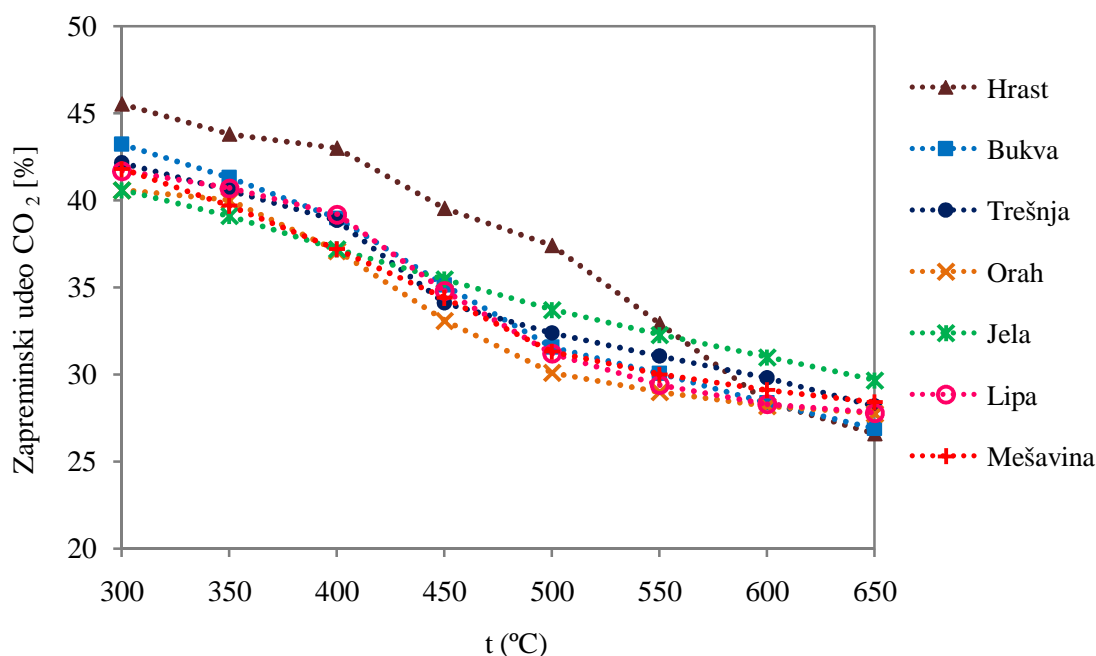
ulje kada se brzo ohlade. Nekondenzibilni gasovi koji nastaju tokom pirolize su vodonik, metan, ugljen monoksid i ugljen dioksid.

Moguće je proizvesti velike zapremine vodonika optimizacijom uslova, što podrazumeva visoku temperaturu pirolize, veliku brzinu zagrevanja i dugo vreme zadržavanja u gasovitoj fazi [23, 24]. Katalizatori mogu da povećaju prinos vodonika. Najčešće korišćeni katalizatori za osnovu imaju nikel, kalijum, kalcijum i magnezijum. Reakcija parnog reformiranja, kao i "water-gas shift" reakcija može dodatno da povećava proizvodnju vodonika [25, 26, 27].

Po Zajecu [3], na sastav gasa značajno utiče temperatura, naročito na prinos CH_4 , koji je najveći na temperaturi između 600 i 700 °C; prinosi CO i H_2 rastu, dok prinos CO_2 ravnomerno opada sa porastom temperature.

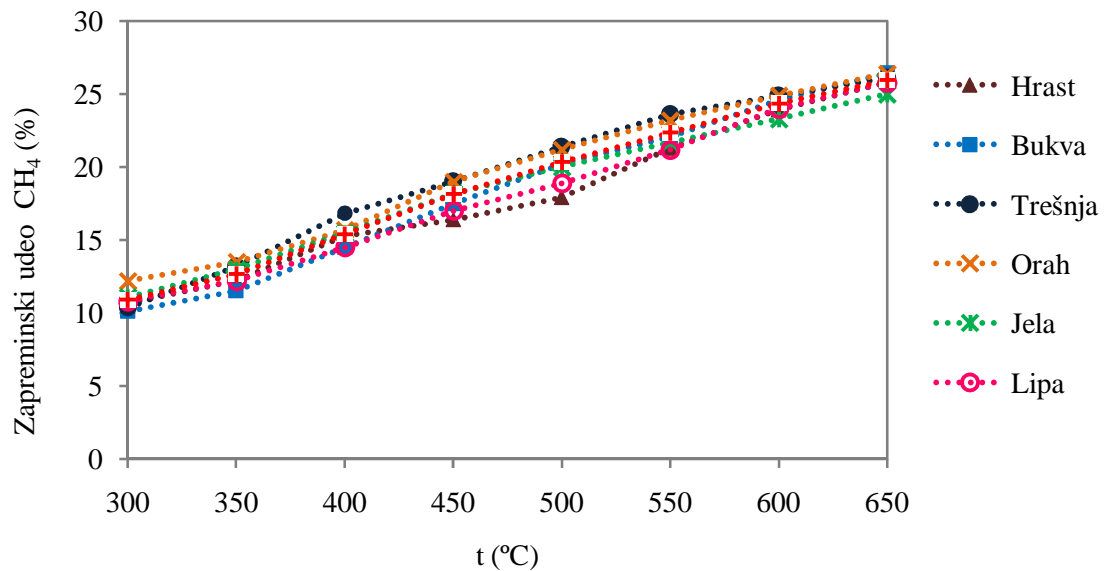
Ispitivanja sastava gasa nastalog procesom pirolize drvene biomase vršeno je u prvoj seriji eksperimenata za svih šest vrsti drvene biomase i mešavinu pri prosečnoj brzini zagrevanja od 21 °C/min. Slike 5.14. i 5.15. ukazuju da porast temperature pirolize od 300 do 650 °C utiče na opadanje zapreminskog udela CO_2 i povećanje zapreminskog udela CH_4 .

Kada temperatura u reaktoru dostigne vrednost od 300 °C, najzastupljenija komponenta u gasu dobijenom procesom pirolize biomase je CO_2 čiji se zapreminski udeo kreće u intervalu od 40.60% (strugotina oraha i jele) do 45.52% (strugotina hrasta) (slika 5.14.). Pri najvećoj vrednosti temperature od 650 °C zapreminski udeo CO_2 kretao se u intervalu od 26.60% (strugotina hrasta) do 29.68% (strugotina jele). Može se uočiti da vrsta drvene biomase nije imala značajan uticaj na prinos ugljen dioksida, jer se jedino pri pirolizi strugotine hrasta javljaju primetna odstupanja u opsegu temperature od 300 do 500 °C.



Slika 5.14. Promene zapreminskih udela CO_2 tokom procesa pirolize različitih vrsti drvene biomase u zavisnosti od reakcione temperature (prosečna brzina zagrevanja 21 °C/min)

Slika 5.15. grafi ki prikazuje zapreminske udele metana u zavisnosti od temperature. Na temperaturi od 300 °C, zapreminski udeo metana kretao se u opsegu od 10.1% (strugotina bukve) do 12.2% (strugotina oraha) (slika 5.15.). Najve u vrednost zapreminski udeo CH₄ dostigao je pri temperaturi od 650 °C, pri kojoj je iznosio od 25.0% (strugotina jela) do 26.4% (strugotina bukve i oraha). Na osnovu slike 5.15. može se zaklju iti da vrsta drvne biomase koriš ene pri procesu pirolize nema uticaj na prinos metana.



Slika 5.15. Promene zapreminskih udela CH₄ tokom procesa pirolize razli itih vrsta drvne biomase u zavisnosti od reakcione temperature (prose na brzina zagrevanja 21 °C/min)

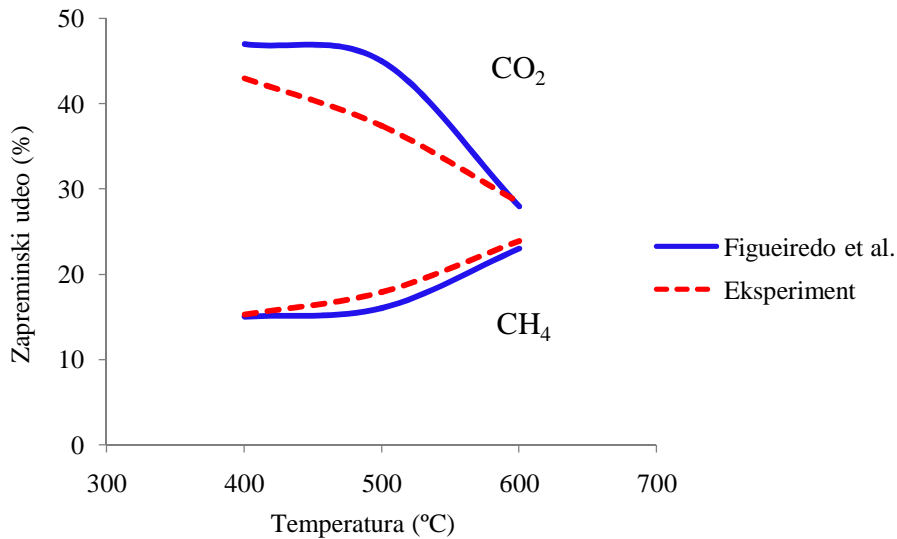
Pore enje sastava gasa dobijenog eksperimentalnim ispitivanjem pirolize drvne biomase sa podacima iz literature prikazano je u tabeli 5.6.

Tabela 5. 6. Pore enje sastava gasa dobijenog pirolizom drvene biomase sa podacima iz literature

	Vrsta biomase	Temperatura (°C)	Brzina zagrevanja (°C/min)	Zapreminski udeo (%)				
				CO ₂	CH ₄	H ₂	CO	C _x H _y
Eksperiment	Razli ite vrste drvene biomase i njihova mešavina	350	21	39.1-43.8	11.5-13.5	1.1-2.1	-	-
		400		37.1-43.0	14.5-16.8	1.6-2.5	-	-
		450		33.1-39.5	16.4-19.0	3.0-3.3	-	-
		500		30.1-37.4	17.9-21.4	3.8-n.o.	-	-
		550		29.0-32.9	21.2-23.6	-	-	-
		600		28.2-31.0	23.3-24.9	-	-	-
		650		26.6-29.7	25.0-26.4	-	-	-
Grieco i Baldi [17]	Bor	677-977	3	36.5	19.8	11.7	29.9	2.1
			60	37.6	15.5	8.8	36.1	2.1
	Bukva		3	40.1	18.9	10.3	28.9	1.7
			60	38.2	15.4	9.3	35.5	1.5
Figueiredo et al. [18]	Hrast	400	-	47.0	15.0	0	38.0	-
		500		45.0	16.0	4.0	35.0	-
		600		28.0	23.0	12.0	37.0	-
		700		23.0	18.0	21.0	38.0	-
Bajus [21]	Bukva	350	7.5-16.5	42.9	10.7	0	42.8	3.6
		400		40.7	13.1	0	42.0	4.2
		450		35.8	16.2	3.1	40.1	4.8
Hwang et al. [28]	Drvna biomasa, se ka	500	-	40.0	13.0	5.0	40.0	2.0
		700		20.0	15.0	18.0	43.0	4.0
		900		15.0	16.0	25.0	41.0	3.5

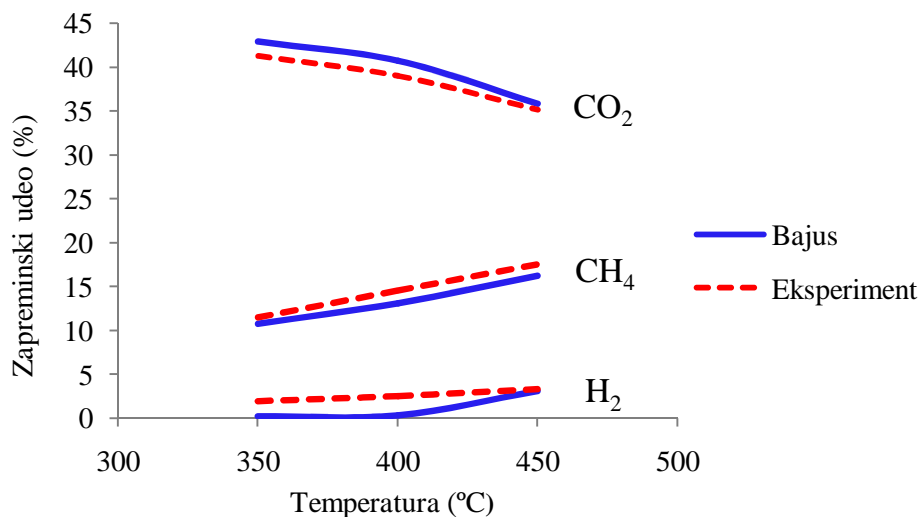
n.o. - nije odre eno

Analizom podataka iz tabele 5.6. može se zaklju iti da su eksperimentalno ispitivani zapreminski udeli sastavnih komponenata piroliti kog gasa u saglasnosti sa podacima iz literature. Figueiredo et al. [18] su ispitivali pirolizu hrasta pri temperaturi od 400 do 900 °C. Pore eni su zapreminski udeli metana i ugljen dioksida na temperaturama od 400, 500 i 600 °C sa eksperimentalno dobijenim podacima za pirolizu hrasta u okviru doktorske disertacije (slika 5.16.). Može se primetiti da se zna ajnija odstupanja javljaju pri pore enju zapreminskog udela ugljen dioksida na 500 °C, dok su ostale vrednosti u dobroj saglasnosti.



Slika 5.16. Pore enje zapreminskih udela CO₂ i CH₄ u gasu dobijenom pirolizom hrasta sa podacima iz literature

Bajus je u svom radu [21] vršio eksperimentalno ispitivanje pirolize bukve u šaržnom reaktoru na temperaturi od 350 do 450 °C. Za date temperature izvršeno je pore enje zapreminskih udela ugljen dioksida, metana i vodonika sa vrednostima dobijenim eksperimentalnim ispitivanjem pirolize bukve u okviru doktorske disertacije (slika 5.17.). Može se uo iti da su odstupanja neznatna.



Slika 5.17. Pore enje zapreminskih udela CO₂, CH₄ i H₂ u gasu dobijenom pirolizom bukve sa podacima iz literature

5.3.6.2. Sastav bio-ulja

Bio-ulje je gusta kompleksna mešavina oksigenovanih organskih jedinjenja tamno braon boje. Toplotna moć bio-ulja iznosi 50-70% toplotne moć i goriva naftnog porekla i može se koristiti kao gorivo za kotlove, ili uz određenu preradu kao obnovljivo gorivo za transport.

Bio-ulje nastaje brzo i istovremenom depolimerizacijom i fragmentacijom celuloze, hemiceluloze i lignina sa naglim porastom temperature. Brzo hlađenje zadržava mnoge mehanizme uproizvode koji bi dalje reagovali kada bi se produžilo vreme boravka na visokoj temperaturi. Bio-ulje sadrži mnoge reagense što doprinosi njegovim neobičnim karakteristikama. Hemijski posmatrano, bio-ulje je po elementarnom sastavu slično biomasi od koje je proizvedeno i sastoji se od veoma složene mešavine oksigenovanih ugljovodonika sa приметnim udelom vode koja se sastoji od početne vlage i vode kao reakcionog proizvoda.

Bio-ulje je hemijski nestabilno jer sadrži veliki broj različitih komponenata koje mogu da mehanizmom usobnom reakcijom proizvedu vodu, katran i ostale organske komponente pri različitim temperaturama i uslovima. Stoga se ne praktikuje destilacija bio-ulja, a skladištenje i transport moraju biti strogo kontrolisani. Uprkos tome, bio-ulje pokazuje veliki potencijal kao gorivo ili sirovina za proizvodnju goriva pomoću katalitičkih procesa, kao što navode Huber i ostali [28]. Sem toga, može se koristiti u katalitičkim procesima za proizvodnju drugih značajnih jedinjenja. Gustina bio-ulja je veća od gustine biomase, što smanjuje troškove prilikom transporta [29].

U tabeli 5.7. prikazane su uobičajene karakteristike i sastav bio-ulja dobijenog pirolizom drvne biomase [30]. Srednja vrednost masenog udela kiseonika u bio-ulju je približno 37%. Kiseonik je prisutan u većini jedinjenja prisutnih u bio-ulju, a njegov udeo uglavnom zavisi od vrste biomase i uslova procesa (temperature, vremena boravka, brzine zagrevanja). Jedinjenje koja imaju najveći udeo u bio-ulju je voda. Ostale značajne grupe identifikovanih komponenata su hidroksi aldehidi, hidroksi ketoni, šećeri, karboksilne kiseline i fenolna jedinjenja. Većina fenolnih jedinjenja prisutna su u vidu oligomera molekulske mase između 900 i 2500 [31]. Prisustvo kiseonika u mnogim komponentama bio-ulja je osnovni razlog za razlike u osobinama i ponašanju ugljovodoničnog goriva i ulja dobijenog pirolizom biomase.

Tabela 5.7. Karakteristike bio-ulja dobijenog pirolizom drvene biomase [30]

Fizička karakteristika	Karakteristične vrednosti	Napomene
Maseni udeo vlage	25%	Maseni udeo vlage obuhvata vlagu iz goriva i iz reakcije. Najčešće se kreće u opsegu od 15 do 25%.
pH	2.5	Niska pH vrednost potiče od organskih kiselina.
Gustina	1.2 kg/l	Gustina bio-ulja iznosi približno 1.2 kg/l, što je visoko u poređenju sa lakim loživim uljem čija gustina iznosi približno 0.85 kg/l.
Elementarna analiza		Karakteristične vrednosti: C: 57%, H: 6%, O: 37%, N: u tragovima, pepeo: u tragovima, zavisi od sadržaja vrstog ostatka
Pepeo	0%	Sav pepeo je povezan sa vrstom ostatkom
Gornja toplotna moć (zavisi od udela vlage)	18 MJ/kg	Bio-ulje ima gornju toplotnu moć od približno 18 MJ/kg kada je maseni udeo vlage približno 25%.
Viskoznost (na 40 °C i za maseni udeo vlage od 25%)	0.05 Pa·s	Viskoznost koja se proizvede može da varira od 0.05 do 1 Pa·s (mereno na 40 °C) u zavisnosti od vrste goriva, sadržaja vode i starosti.
vrste materije (vrsti ostatak)	0.2%	Optimalan maseni udeo vrstog ostatka u bio-ulju je manji od 0.1%, međutim često se kreće 1% vrstog ostatka.
Ostatak vakuumske destilacije	50%	Ne može u potpunosti da ispari. Zagrevanjem do 100 °C nastaje vrsti ostatak čiji je maseni udeo približno 50% od početne težine i destilata koji sadrže organske isparljive materije i vodu.
Izgled		Najčešće je u vidu tečnosti tamno braon boje.
Miris		Karakterističan miris dima
Mešljivost		Dodavanje vode je dozvoljeno dok maseni udeo vode ne dostigne 35%. Bio-ulje je mešljivo sa polarnim rastvaračima kao što je metanol, ali potpuno nemešljivo sa naftnim derivatima.

Voda u bio-ulju potiče od prvobitne vlage u gorivu i od proizvoda reakcije dehidratacije do kojih dolazi tokom procesa pirolize [32]. Prisustvo vode ima i negativan i pozitivan uticaj na osobine bio-ulja. Voda utiče na smanjenje toplotne moći, naročito donje, kao i temperature plamena i doprinosi dužem odlaganju paljenja. Osim toga, voda poboljšava karakteristike protoka bio-ulja tako što smanjuje viskoznost, dovodi do uniformnijeg temperaturnog profila i do nižih emisija NO_x. Zbog svog hemijskog sastava, temperatura ključanja bio-ulja kreće se u širokom opsegu. Pored vode i isparljivih komponenata, bio-ulje sadrži značajnu količinu neisparljivih materija, kao što su šećeri i oligomerna fenolna jedinjenja. Osim toga, sporo zagrevanje ulja tokom destilacije dovodi do polimerizacije nekih reaktivnih komponenata. Zbog toga bio-ulje počinje da ključa na temperaturi ispod 100 °C, ali destilacija prestaje na temperaturi od 250 do 280 °C ostavljajući 35-50% od početne materije. Stoga se bio-ulje ne može koristiti za određene primene koje zahtevaju potpuno isparavanje pre termičke konverzije. Viskoznost bio-ulja značajno varira u zavisnosti od vrste goriva i uslova procesa, a naročito od efikasnosti sakupljanja jedinjenja sa niskom temperaturom ključanja. Bio-ulja mogu da sadrže značajnu količinu organskih kiselina, uglavnom sirćetne i mravlje kiseline, što čini da pH vrednost iznosi od 2 do 3. Iz tog razloga bio-ulje deluje korozivno na

gra evinske materijale koji se naj eš e koriste, kao što su ugljeni ni elik i aluminijum i može da uti e na neke zaptivne materijale. Korozivnost raste sa ve om temperaturom i ve im sadržajem vlage.

Osobine bio-ulja imaju zna ajan uticaj na ponašanje bio-ulja pri procesima termi ke konverzije. Tabela 5.8. prikazuje elementarnu analizu bio-ulja dobijenog pirolizom razli itih vrsta drveta. Podaci su preuzeti iz literature.

Tabela 5.8. Osnovne karakteristike bio-ulja dobijenog pirolizom drvene biomase

Fizi ke karakteristike	Bukva [33]	Bor [33]	Hrast [34]
maseni udeo vlage (%)	31.90	17.40	-
elementarni sastav (%)	maseni udeo (%)		
C	54.35	55.23	56.54 ^{s.o.}
H	6.80	6.60	6.00 ^{s.o.}
O	38.63	38.06	36.84 ^{s.o.}
N	0.22	0.11	0.61 ^{s.o.}
Gornja toplotna mo $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)$	21.20	21.30	22.1

s.o. – suva osnova

Smatra se da bi bio-ulje moglo da zameni uobi ajena goriva u kotlovima, motorima sa unutrašnjim sagorevanjem i turbinama. Ispitivanja su pokazala da je pomenuta zamena mogu a ali postoji verovatno a da do e do ošte enja opreme zbog kiselosti bio-ulja pa je neophodno izvršiti odre ene modifikacije [27, 35, 36]. Osim toga, prime eni su i problemi sa paljenjem. Ve ina proizvo a a motora i turbina ne odobrava upotrebu bio-ulja. Kako bi se efikasno koristilo, bio-ulje zahteva dalju preradu. Hemijske supstance, kao što su sir etna kiselina, metanol i aceton mogu se uspešno izdvojiti iz proizvoda, ali je trenutno jeftinije proizvesti ih iz fosilnih goriva [27]. Bio-ulje iz procesa brze pirolize kompanija “Red Arrow Products” prera uje u te ni dim, proizvod koji se koristi kao za in, i predstavlja retku komercijalnu primenu bio-ulja.

5.3.6.3. Sastav vrstog ostatka

vrsti, koksni ostatak (biougalj) se može definisati kao proizvod bogat ugljenikom koji nastaje kada se biomasa zagreva u sistemu bez prisustva kiseonika. vrsti ostatak nastaje tokom procesa pirolize, a u manjoj meri i tokom procesa gasifikacije i nepotpunog sagorevanja. Može da se koristi za poboljšanje kvaliteta zemljišta, za filtriranje i zadržavanje hranljivih materija iz vode u zemljištu. Smatra se da predstavlja sredstvo za odvajanje i uklanjanje ugljenika iz atmosfere kada se primenjuje kao dodatak zemljištu kako bi skladištio ugljenik i smanjio emisije gasova koji dovode do efekta staklene bašte (azotni oksidi i metan). Fizi ke i hemijske karakteristike vrstog ostatka variraju u zavisnosti od vrste goriva koja se koristi i uslova odvijanja procesa pirolize. vrsti ostatak definišu njegove fizi ke karakteristike (veli ina estice, raspodela veli ine estica, površina, sadržaj vlage, isparljive materije, pH) i hemijski sastav (elementarna analiza). Maseni udeo ugljenika u vrstom ostatku zavisi od elementarnog sastava biomase kao i procesa pirolize koji se koristi. Tabela 5.9. prikazuje rezultate elementarne i tehni ke analize vrstog ostatka dobijenog procesom pirolize mešavine drvene biomase koriš ene u eksperimentalnom istraživanju, kao i rezultate drugih istraživa a za vrsti ostatak nastao pirolizom razli itih vrsta drvene biomase. Iz tabele 5.9. može se zaklju iti da su dobijeni rezultati u skladu sa podacima koje su prikazali drugi autori.

Tabela 5.9. Osobine vrstog ostatka dobijenog pirolizom razli itih vrsti drvene biomase

Osobine vrstog ostatka	Mešavina drvene biomase				
	(eksperiment) [1]	Hrast [37]	Bor [37]	Bor [38]	Strugotina drveta [38]
W	0	3.17	2.69	-	-
A	1.87	2.92	2.30	7.00	-
VM maseni udeo (%)	-	15.58	16.89	-	-
FC	-	78.33	78.12	-	-
H _g	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$ 29390.04	31059.08	31705.71	-	30530.00
H _d	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$ 28940.04	30470.60	31054.43	-	-
Elementarni sastav					
C	83.63	82.83	83.47	76.00	83.30
H	2.00	2.70	2.99	2.40	3.10
N maseni udeo (%)	0.30	0.31	0.27	1.10	0.21
S	0.05	0.02	0.03	-	0.015
O	12.15	8.05	8.25	13.50	11.38

5.4. Obrada rezultata ispitivanja procesa pirolize mešavine drvene biomase

5.4.1. Karakteristike proizvedenog gasa

Kako bi se izvršila analiza gasa proizvedenog procesom pirolize mešavine drvene biomase, potrebno je poznavati zapreminske udele svih komponenata u gasu. Piroliti ki gas najve im delom ine CO, H₂, CO₂ i CH₄. Analiza gasa proizvedenog procesom pirolize vrši se na krajnjoj temperaturi od 650 °C. Zapreminski udeli merenih gasovitih komponenata CO₂ i CH₄ na kraju procesa pirolize su u saglasnosti sa podacima iz literature [21]. Zapreminski udeli CO i H₂ su bili izvan opsega merenja na krajnjoj temperaturi, pa je zbog uskla enosti drugih komponenata u gasu sa podacima iz literature [21] pretpostavljeno da vrednosti zapreminskih udela CO i H₂ na kraju procesa pirolize odgovaraju vrednostima prikazanim u navedenoj literaturi. Pretpostavlja se da u proizvedenom gasu ima i azota, iji je zapreminski udeo dobijen prora unom, kako bi zbir zapreminskih udela svih komponenata u gasu iznosio 100%.

Analiza proizvedenog kondenzibilnog gasa pri 650 °C, na kraju procesa pirolize (Prilog 11., ispitivanje 7):

$$\begin{aligned}
 \text{CO} &= 38.88\% & \text{H}_2 &= 6.33\% \\
 \text{CO}_2 &= 30.00\% & \text{CH}_4 &= 24.00\% \\
 \text{O}_2 &= 0.20\% & \text{N}_2 &= 0.59\%
 \end{aligned}$$

Gustina piroliti kog kondenzibilnog gasa je:

$$\begin{aligned}
 w_g &= \sum_i \rho_i \cdot V_i = \text{CO} \cdot \text{CO} + \text{CO}_2 \cdot \text{CO}_2 + \text{O}_2 \cdot \text{O}_2 + \text{H}_2 \cdot \text{H}_2 + \text{CH}_4 \cdot \text{CH}_4 + \text{N}_2 \cdot \text{N}_2 = \\
 &= 0.3888 \cdot 1.250 + 0.3000 \cdot 1.976 + 0.0020 \cdot 1.429 + 0.0633 \cdot 0.08985 + 0.2400 \cdot 0.717 + \\
 &\quad + 0.0059 \cdot 1.251 = 1.27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},
 \end{aligned}$$

gde su:

$$\rho_{\text{CO}} = 1.250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad - \text{gustina CO pri normalnim uslovima,}$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = 1.976 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad - \text{gustina CO}_2 \text{ pri normalnim uslovima,}$$

$$\rho_{\text{O}_2} = 1.429 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad - \text{gustina O}_2 \text{ pri normalnim uslovima,}$$

$$\rho_{\text{H}_2} = 0.08985 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad - \text{gustina H}_2 \text{ pri normalnim uslovima,}$$

$$\rho_{\text{CH}_4} = 0.717 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad - \text{gustina CH}_4 \text{ pri normalnim uslovima,}$$

$$\rho_{\text{N}_2} = 1.251 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad - \text{gustina N}_2 \text{ pri normalnim uslovima.}$$

Molarna masa vlažnog kondenzibilnog gasa može se izraziti na sledeći način:

$$\begin{aligned} M_{\text{wg}} &= \sum \rho_i \cdot M_i = \rho_{\text{CO}} \cdot M_{\text{CO}} + \rho_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} + \rho_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2} + \rho_{\text{H}_2} \cdot M_{\text{H}_2} + \rho_{\text{CH}_4} \cdot M_{\text{CH}_4} + \rho_{\text{N}_2} \cdot M_{\text{N}_2} = \\ &= 0.3888 \cdot 28 + 0.3000 \cdot 44 + 0.0020 \cdot 32 + 0.0633 \cdot 2 + 0.2400 \cdot 16 + 0.0059 \cdot 28 = 28.28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}, \end{aligned}$$

gde su:

$$M_{\text{CO}} = 28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad - \text{molarna masa CO,}$$

$$M_{\text{CO}_2} = 44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad - \text{molarna masa CO}_2,$$

$$M_{\text{O}_2} = 32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad - \text{molarna masa O}_2,$$

$$M_{\text{H}_2} = 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad - \text{molarna masa H}_2,$$

$$M_{\text{CH}_4} = 16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad - \text{molarna masa CH}_4,$$

$$M_{\text{N}_2} = 28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad - \text{molarna masa N}_2.$$

Donja toplotna moć vlažnog kondenzibilnog gasa iznosi:

$$\begin{aligned} H_{\text{d, wg}} &= 12644 \cdot \rho_{\text{CO}} + 10760 \cdot \rho_{\text{H}_2} + 35797 \cdot \rho_{\text{CH}_4} = 12644 \cdot 0.3888 + 10760 \cdot 0.0633 + \\ &\quad + 35797 \cdot 0.2400 = 14188.37 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}, \\ H_{\text{d, wg}} &= \frac{14188.37}{1.27} = 11171.95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}. \end{aligned}$$

5.4.2. Materijalni bilans

Šema materijalnog bilansa u piroliti kom reaktoru prikazana je na slici 5.18.

Sastav goriva (maseni udeli):	Sastav vrstog ostatka (maseni udeli):
C=42.00%	C=83.63%
H=4.96%	H=2.00%
O=40.86%	O=12.15%
N=1.05%	N=0.30%
S=0.28%	S=0.05%
W=8.90%	W=0.00%
A=1.99%	A=1.87%

Empirijska formula goriva je $CH_xO_yN_zS_w$. Koriš enjem rezultata elementarne analize može se odrediti empirijska formula mešavine drvene biomase na slede i na in:

$$x = \frac{H}{C} \cdot \frac{M_C}{M_H} = \frac{4.96}{42.00} \cdot \frac{12}{1} = 1.4171,$$

$$y = \frac{O}{C} \cdot \frac{M_C}{M_O} = \frac{40.86}{42.00} \cdot \frac{12}{16} = 0.7296,$$

$$z = \frac{N}{C} \cdot \frac{M_C}{M_N} = \frac{1.05}{42.00} \cdot \frac{12}{14} = 0.0214,$$

$$w = \frac{S}{C} \cdot \frac{M_C}{M_S} = \frac{0.28}{42.00} \cdot \frac{12}{32} = 0.0025.$$

Uvo enjem dobijenih vrednosti utvr eno je da je empirijska formula mešavine drvene biomase koriš ene pri eksperimentalnom ispitivanju $CH_{1.4171}O_{0.7296}N_{0.0214}S_{0.0025}$.

Empirijska formula vrstog (koksno)g) ostatka odre uje se istim postupkom. Najpre se izra unaju x, y, z i w:

$$x = \frac{H}{C} \cdot \frac{M_C}{M_H} = \frac{2.00}{83.63} \cdot \frac{12}{1} = 0.2870,$$

$$y = \frac{O}{C} \cdot \frac{M_C}{M_O} = \frac{12.15}{83.63} \cdot \frac{12}{16} = 0.1090,$$

$$z = \frac{N}{C} \cdot \frac{M_C}{M_N} = \frac{0.30}{83.63} \cdot \frac{12}{14} = 0.0031,$$

$$w = \frac{S}{C} \cdot \frac{M_C}{M_S} = \frac{0.05}{83.63} \cdot \frac{12}{32} = 0.0002.$$

Nakon toga se može odrediti empirijska formula vrstog ostatka: $CH_{0.2870}O_{0.1090}N_{0.0031}S_{0.0002}$.

Bilans ugljenika

Masa ugljenika po jedinici goriva iznosi: $C_B = 0.4200 \frac{\text{kgC}}{\text{kgB}}$.

Masa ugljenika u vrstom ostatku (koku) po jedinici goriva je:

$$C_{KB} = 0.8363 \cdot \frac{m_K}{m_B} = 0.8363 \cdot \frac{0.0020}{0.0100} = 0.1673 \frac{\text{kgC}}{\text{kgB}},$$

gde su:

m_K – masa vrstog ostatka (koksa) nakon procesa pirolize (kgK),

m_B – masa goriva (mešavine drvene biomase) u piroliti kom reaktoru (kgB).

Masa ugljenika u vlažnom piroliti kom gasu po jedinici goriva iznosi:

$$C_{wgB} = C_B - C_{KB} = 0.4200 - 0.1673 = 0.2527 \frac{\text{kgC}}{\text{kgB}}.$$

Stepen konverzije ugljenika je:

$$c = \left(1 - \frac{C_{KB}}{C_B}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{0.1673}{0.4200}\right) \cdot 100 = 60.17\%.$$

Bilans vodonika

Masa vodonika po jedinici goriva je:

$$H_{2B} = 0.0496 \frac{\text{kgH}_2}{\text{kgB}}.$$

Masa vodonika u vrstom ostatku (koku) po jedinici goriva iznosi:

$$H_{2KB} = 0.0200 \cdot \frac{m_K}{m_B} = 0.0200 \cdot \frac{0.0020}{0.0100} = 0.0040 \frac{\text{kgH}_2}{\text{kgB}}.$$

Masa vodonika u vlažnom piroliti kom gasu po jedinici goriva je:

$$H_{2wgB} = H_{2B} - H_{2KB} = 0.0496 - 0.0040 = 0.0456 \frac{\text{kgH}_2}{\text{kgB}}.$$

Stepen konverzije vodonika je:

$$H_2 = \left(1 - \frac{H_{2KB}}{H_{2B}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{0.0040}{0.0496}\right) \cdot 100 = 91.93\%.$$

Bilans kiseonika

Masa kiseonika po jedinici goriva je: $O_{2B} = 0.4086 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}}$.

Masa kiseonika u vrstom ostatku (koku) po jedinici goriva iznosi:

$$O_{2KB} = 0.1215 \cdot \frac{m_K}{m_B} = 0.1215 \cdot \frac{0.0020}{0.0100} = 0.0243 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}}$$

Masa kiseonika u vlažnom piroliti kom gasu po jedinici goriva je:

$$O_{2wgB} = O_{2B} - O_{2KB} = 0.4086 - 0.0243 = 0.3843 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}}$$

Stepen konverzije kiseonika je:

$$\alpha_{O_2} = \left(1 - \frac{O_{2KB}}{O_{2B}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{0.0243}{0.4086}\right) \cdot 100 = 94.05\%.$$

Bilans azota

Masa azota po jedinici goriva je: $N_{2B} = 0.0105 \frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}}$.

Masa azota u vrstom ostatku (koku) po jedinici goriva iznosi:

$$N_{2KB} = 0.0030 \cdot \frac{m_K}{m_B} = 0.0030 \cdot \frac{0.0020}{0.0100} = 0.0006 \frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}}$$

Masa azota u vlažnom piroliti kom gasu po jedinici goriva je:

$$N_{2wgB} = N_{2B} - N_{2KB} = 0.0105 - 0.0006 = 0.0099 \frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}}$$

Stepen konverzije azota je:

$$\alpha_{N_2} = \left(1 - \frac{N_{2KB}}{N_{2B}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{0.0006}{0.0105}\right) \cdot 100 = 94.29\%.$$

Bilans sumpora

Masa sumpora po jedinici goriva je: $S_B = 0.0028 \frac{\text{kgS}}{\text{kgB}}$.

Masa sumpora u vrstom ostatku (koku) po jedinici goriva iznosi:

$$S_{KB} = 0.0005 \cdot \frac{m_K}{m_B} = 0.0005 \cdot \frac{0.0020}{0.0100} = 0.0001 \frac{\text{kgS}}{\text{kgB}}$$

Masa sumpora u vlažnom piroliti kom gasu po jedinici goriva je:

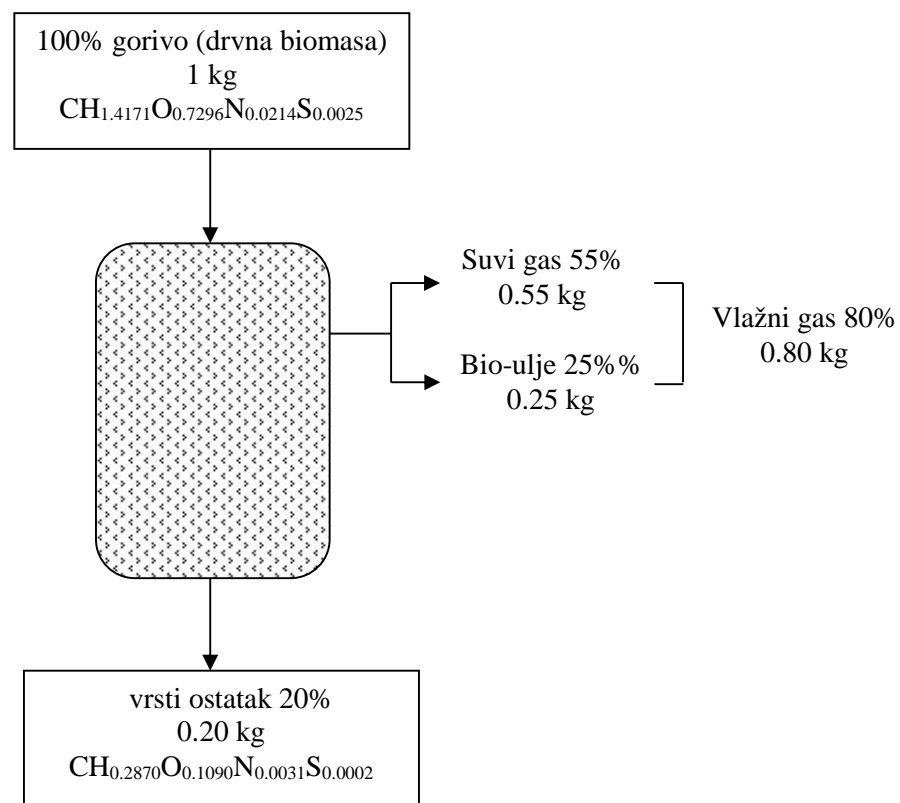
$$S_{wgB} = S_B - S_{KB} = 0.0028 - 0.0001 = 0.0027 \frac{\text{kgS}}{\text{kgB}}$$

Stepen konverzije sumpora je:

$$s = \left(1 - \frac{S_{KB}}{S_{2B}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{0.0001}{0.0027}\right) \cdot 100 = 96.30\%$$

C=42.00%
H=4.96%
O=40.86%
N=1.05%
S=0.28%
W=8.90%
A=1.99%

C=83.63%
H=2.00%
O=12.15%
N=0.30%
S=0.05%
W=0.00%
A=1.87%



Slika 5.18. Šema bilansa materije u piroliti kom reaktoru

5.4.3. Toplotni bilans

Toplotna moć uzorka mešavine drvene biomase korišćena za eksperimentalno ispitivanje iznosi 16299.99 kJ/kgB [1]. Zagrevanje reaktora za pirolizu vršeno je pomoću dva električna grejača. Snaga jednog grejača je 1.5 kW. Vreme trajanja procesa pirolize je 40 min. Koristeći navedene podatke dobija se toplota (energija) grejača u reaktoru:

$$E_G = 1.5 \cdot 2 \cdot 40 \cdot 60 = 7200 \text{ kJ/kgB.}$$

Toplotna moć vrstog ostatka (koksa) izražava se pomoću rezultata elementarne analize vrstog ostatka [1]:

$$H_{d_K} = 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W = 33900 \cdot 0.8363 + \\ + 121400 \cdot \left(0.0200 - \frac{0.1215}{8} \right) + 10460 \cdot 0.0005 - 2510 \cdot 0 = 28940.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK.}}$$

Svedena na jedinicu mase goriva, toplotna moć vrstog ostatka iznosi:

$$H_{d_{KB}} = \frac{28940.04 \cdot m_K}{m_B} = \frac{28940.04 \cdot 0.0020}{0.0100} = 5788.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kgB}},$$

gde su:

m_K - masa vrstog ostatka (koksa) (kg),

m_B - masa goriva (uzorka mešavine drvene biomase) (kg).

Toplotna moć vlažnog kondenzibilnog gasa, svedena na jedinicu mase goriva je:

$$H_{d_{wgB}} = \frac{H_{d_{wg}} \cdot m_{wg}}{m_B} = \frac{11171.95 \cdot 0.0080}{0.0100} = 8937.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kgB}},$$

gde je:

m_{wg} - masa vlažnog gasa (kg).

Fizička toplota pirolitičkog gasa na kraju procesa pirolize izražava se na sledeći način:

$$i_{f_{wg}} = \sum_i i_i = i_{CO} \cdot i_{CO} + i_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + i_{O_2} \cdot i_{O_2} + i_{H_2} \cdot i_{H_2} + i_{CH_4} \cdot i_{CH_4} + i_{N_2} \cdot i_{N_2} = \\ = 0.3888 \cdot 887.39 + 0.3000 \cdot 1343.20 + 0.0020 \cdot 926.96 + 0.0633 \cdot 851.60 + \\ + 0.2400 \cdot 1510.15 + 0.0059 \cdot 879.23 = 1171.36 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}, \\ i_{f_{wg}} = \frac{1171.36}{1.27} = \frac{1171.36}{1.27} = 922.33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}},$$

gde su:

$i_{CO} = 887.39 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ - specifična entalpija CO pri temperaturi od 650 °C,

$$i_{\text{CO}_2} = 1343.20 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija CO}_2 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$i_{\text{O}_2} = 926.96 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija O}_2 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$i_{\text{H}_2} = 851.60 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija H}_2 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$i_{\text{CH}_4} = 1510.15 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija CH}_4 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$i_{\text{N}_2} = 879.23 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija N}_2 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Svedena na jedinicu mase goriva, fizi ka toplota piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize iznosi:

$$i_{f_{\text{wgB}}} = \frac{922.33 \cdot m_{\text{wg}}}{m_{\text{B}}} = \frac{922.33 \cdot 0.0080}{0.0100} = 737.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kgB}}.$$

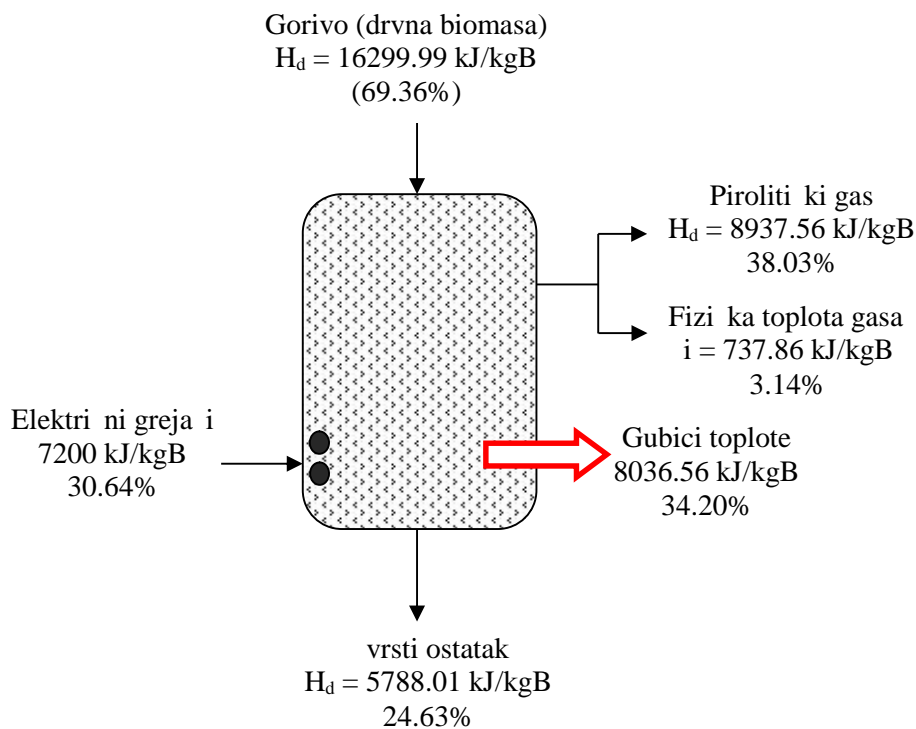
Gubici toplote izra unavaju se na slede i na in:

$$\text{ULAZ} = 16299.99 + 7200 = 23499.99 \text{ kJ/kgB}$$

$$\text{IZLAZ} = 8937.56 + 5788.01 + 737.86 = 15463.43 \text{ kJ/kgB}$$

$$\text{GUBICI} = \text{ULAZ} - \text{IZLAZ} = 8036.56 \text{ kJ/kgB}.$$

Šema bilansa toplote u piroliti kom reaktoru prikazana je na slici 5.19.



Slika 5.19. Šema bilansa toplote u piroliti kom reaktoru

5.4.4. Stepen korisnosti piroliti kog reaktora

Odnos energije na izlazu iz reaktora i uložene energije na ulazu u reaktor (slika 5.19.) iznosi:

$$= \frac{\text{IZLAZ}}{\text{ULAZ}} = \frac{15463.43}{23499.99} = 0.6580 = 65.80\%.$$

Odnos hemijske energije gasa na izlazu iz reaktora i uložene hemijske energije na ulazu u reaktor je:

$$w_g = \frac{8937.56}{16299.99} = 0.5483 = 54.83\%.$$

Toplotno opterećenje poprečnog preseka reaktora izražava se na sledeći način:

$$Q = \frac{m_B \cdot H_{dB}}{A_p} = \frac{m_B \cdot H_{dB}}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{0.01 \cdot 16299.99}{\frac{(160 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3.14}{4}} = 8.11 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2},$$

gde su:

m_B - masa goriva (kg),

H_{dB} - donja toplotna moć goriva $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgB}} \right)$,

A_p - poprečni presek reaktora (m^2),

d - unutrašnji prečnik reaktora (m).

5.5. Analiza greške pri eksperimentalnom ispitivanju

Rezultati merenja se ne mogu dobiti sa proizvoljno velikom tačnošću. Vrednosti koje su dobijene kao rezultat merenja su približne vrednosti. Svaki rezultat izvršenog merenja nije potpun ukoliko ne postoji informacija o tačnosti merenja. Podaci o tačnosti merenja mogu se dobiti pomoću apsolutne, relativne i srednje kvadratne greške.

Srednja vrednost merenja je:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_D}{D}, \quad (5.1)$$

gde su:

D - broj ponovljenih direktnih merenja veličine x ,

x_1, x_2, \dots, x_D - izmerene vrednosti.

Apsolutna greška merenja predstavlja apsolutnu vrednost odstupanja izmerene vrednosti od njene srednje vrednosti:

$$| \Delta x_i | = | x_i - \bar{x} |. \quad (5.2)$$

Relativna greška predstavlja količnik apsolutne greške i srednje vrednosti veličine:

$$x_i = \frac{|x_i|}{x}, \quad (5.3)$$

$$x_i (\%) = \frac{|x_i|}{x} \cdot 100. \quad (5.4)$$

Kod velikog broja merenja, značajnu informaciju o grešci merenja daje srednja kvadratna greška:

$$x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^D \Delta x_i^2}{D-1}}, \quad (5.5)$$

gde je:

$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ greška približnog broja x_i .

Primenom izraza 5.1 - 5.5 i broj anih vrednosti iz Priloga 5 urađen je primer proračuna pojedinih parametara za prinos bio-ulja:

$$\bar{x} = \frac{3.0 + 2.8 + 3.0 + 2.7 + 2.7}{5} = 2.84 \text{ g},$$

$$|x_i| = |x_i - \bar{x}| = |3.0 - 2.84| = 0.16 \text{ g},$$

$$x_i = \frac{|x_i|}{x} = \frac{0.16}{2.84} = 0.06,$$

$$x_i (\%) = \frac{|x_i|}{x} \cdot 100 = \frac{0.16}{2.84} \cdot 100 = 5.63\%,$$

$$x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^D \Delta x_i^2}{D-1}} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_4^2 + \Delta x_5^2}{5-1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0.16^2 + (-0.04)^2 + 0.16^2 + (-0.14)^2 + (-0.14)^2}{4}} = 0.15 \text{ g}.$$

Apsolutna i relativna greška rezultata eksperimentalnog ispitivanja procesa pirolize drvene biomase za ispitivanja 1 - 7 prikazane su u tabelama 5.10 - 5.23.

Tabela 5.10. Greške merenja prinosa produkata strugotine hrasta na kraju procesa pirolize (ispitivanje 1)

Broj merenja i	Rezultat merenja (g)	Apsolutna greška $ x_i $ (g)	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
Prinos vrstog ostatka				
1	2.000	0.020	0.010	1.010
2	2.000	0.020	0.010	1.010
3	2.10	0.12	0.06	6.06
4	1.90	0.08	0.04	4.04
5	1.90	0.08	0.04	4.04
Prinos bio-ulja				
1	3.00	0.16	0.06	5.63
2	2.80	0.04	0.01	1.41
3	3.00	0.16	0.06	5.63
4	2.70	0.14	0.05	4.93
5	2.70	0.14	0.05	4.93

Tabela 5.11. Greške merenja zapreminskih udela CO₂, O₂ i CH₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine hrasta na 650 °C (ispitivanje 1)

Broj merenja i	Rezultat merenja $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Apsolutna greška $ x_i \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
CO ₂				
1	0.2680	0.0020	0.0075	0.7518
2	0.272	0.006	0.023	2.256
3	0.252	0.014	0.053	5.263
4	0.2680	0.0020	0.0075	0.7518
5	0.270	0.004	0.015	1.504
O ₂				
1	0.0020	0.0006	0.4286	42.8571
2	0.0010	0.0004	0.2857	28.5714
3	0.0020	0.0006	0.4286	42.8571
4	0.0000	0.0014	1.0000	100.0000
5	0.0020	0.0006	0.4286	42.8571
CH ₄				
1	0.2600	0.0020	0.0077	0.7752
2	0.265	0.007	0.027	2.713
3	0.245	0.013	0.050	5.039
4	0.250	0.008	0.031	3.101
5	0.270	0.012	0.047	4.651

Tabela 5.12. Greške merenja prinosa produkata strugotine bukve na kraju procesa pirolize (ispitivanje 2)

Broj merenja i	Rezultat merenja (g)	Apsolutna greška $ x_i $ (g)	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
Prinos vrstog ostatka				
1	2.00	0.04	0.02	1.96
2	2.10	0.06	0.03	2.94
3	2.10	0.06	0.03	2.94
4	2.00	0.04	0.02	1.96
5	2.00	0.04	0.02	1.96
Prinos bio-ulja				
1	2.80	0.16	0.06	6.06
2	2.50	0.14	0.05	5.30
3	2.70	0.06	0.02	2.27
4	2.60	0.04	0.02	1.52
5	2.60	0.04	0.02	1.52

Tabela 5.13. Greške merenja zapreminskih udela CO₂, O₂ i CH₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine bukve na 650 °C (ispitivanje 2)

Broj merenja i	Rezultat merenja $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Apsolutna greška $ x_i \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
CO ₂				
1	0.274	0.005	0.019	1.859
2	0.284	0.015	0.056	5.576
3	0.259	0.010	0.040	3.717
4	0.242	0.027	0.100	10.037
5	0.286	0.017	0.063	6.320
O ₂				
1	0.0010	0.0004	0.2857	28.5714
2	0.0010	0.0004	0.2857	28.5714
3	0.0020	0.0006	0.4286	42.8571
4	0.0020	0.0006	0.4286	42.8571
5	0.0010	0.0004	0.2857	28.5714
CH ₄				
1	0.250	0.014	0.053	5.303
2	0.2650	0.0010	0.0038	0.3788
3	0.2650	0.0010	0.0038	0.3788
4	0.285	0.021	0.080	7.954
5	0.255	0.009	0.034	3.409

Tabela 5.14. Greške merenja prinosa produkata strugotine trešnje na kraju procesa pirolize (ispitivanje 3)

Broj merenja i	Rezultat merenja (g)	Apsolutna greška $ x_i $ (g)	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
Prinos vrstog ostatka				
1	1.80	0.10	0.05	5.21
2	2.00	0.10	0.05	5.21
3	1.9	0	0	0
4	2.00	0.10	0.05	5.21
5	1.80	0.10	0.05	5.21
Prinos bio-ulja				
1	2.500	0.020	0.008	0.806
2	2.500	0.020	0.008	0.806
3	2.60	0.12	0.05	4.84
4	2.40	0.08	0.03	3.23
5	2.40	0.08	0.03	3.23

Tabela 5.15. Greške merenja zapreminskih udela CO₂, O₂ i CH₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine trešnje na 650 °C (ispitivanje 3)

Broj merenja i	Rezultat merenja $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Apsolutna greška $ x_i \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
CO ₂				
1	0.262	0.020	0.070	6.960
2	0.272	0.010	0.034	3.409
3	0.292	0.010	0.037	3.693
4	0.286	0.004	0.016	1.562
5	0.296	0.014	0.051	5.114
O ₂				
1	0.0080	0.0024	0.4286	42.8571
2	0.0080	0.0024	0.4286	42.8571
3	0.0040	0.0016	0.2857	28.5714
4	0.0040	0.0016	0.2857	28.5714
5	0.0040	0.0016	0.2857	28.5714
CH ₄				
1	0.255	0.006	0.023	2.299
2	0.2600	0.0010	0.0038	0.3831
3	0.2600	0.0010	0.0038	0.3831
4	0.2600	0.0010	0.0038	0.3831
5	0.270	0.009	0.034	3.448

Tabela 5.16. Greške merenja prinosa produkata strugotine oraha na kraju procesa pirolize (ispitivanje 4)

Broj merenja i	Rezultat merenja (g)	Apsolutna greška $ x_i $ (g)	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
Prinos vrstog ostatka				
1	2.10	0.06	0.03	2.94
2	2.10	0.06	0.03	2.94
3	2.10	0.06	0.03	2.94
4	1.90	0.14	0.07	6.86
5	2.00	0.04	0.02	1.96
Prinos bio-ulja				
1	1.9	0.5	0.2	20.8
2	2.50	0.10	0.04	4.16
3	2.50	0.10	0.04	4.16
4	2.50	0.10	0.04	4.16
5	2.60	0.20	0.08	8.33

Tabela 5.17. Greške merenja zapreminskih udela CO₂, O₂ i CH₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine oraha na 650 °C (ispitivanje 4)

Broj merenja i	Rezultat merenja $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Apsolutna greška $ x_i \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
CO ₂				
1	0.2760	0.0016	0.0058	0.5763
2	0.282	0.004	0.016	1.585
3	0.262	0.016	0.056	5.620
4	0.298	0.020	0.073	7.349
5	0.270	0.008	0.027	2.738
O ₂				
1	0.00700	0.00020	0.02941	2.94117
2	0.00700	0.00020	0.02941	2.94117
3	0.0060	0.0008	0.1176	11.7647
4	0.00700	0.00020	0.02941	2.94117
5	0.00700	0.00020	0.02941	2.94117
CH ₄				
1	0.285	0.021	0.080	7.954
2	0.270	0.006	0.023	2.273
3	0.285	0.021	0.080	7.954
4	0.235	0.029	0.110	10.985
5	0.245	0.019	0.072	7.197

Tabela 5.18. Greške merenja prinosa produkata strugotine jele na kraju procesa pirolize (ispitivanje 5)

Broj merenja i	Rezultat merenja (g)	Apsolutna greška $ x_i $ (g)	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
Prinos vrstog ostatka				
1	2.00	0.08	0.04	3.85
2	2.100	0.020	0.010	0.961
3	2.100	0.020	0.010	0.961
4	2.100	0.020	0.010	0.961
5	2.100	0.020	0.010	0.961
Prinos bio-ulja				
1	2.400	0.020	0.008	0.826
2	2.50	0.08	0.03	3.31
3	2.50	0.08	0.03	3.31
4	2.30	0.12	0.05	4.96
5	2.40	0.02	0.01	0.83

Tabela 5.19. Greške merenja zapreminskih udela CO₂, O₂ i CH₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine jele na 650 °C (ispitivanje 5)

Broj merenja i	Rezultat merenja $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Apsolutna greška $ x_i \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
CO ₂				
1	0.282	0.015	0.050	4.986
2	0.300	0.003	0.011	1.078
3	0.304	0.007	0.024	2.426
4	0.300	0.003	0.011	1.078
5	0.2980	0.0012	0.0040	0.4043
O ₂				
1	0.0050	0.0006	0.1071	10.7143
2	0.0060	0.0004	0.0714	7.1429
3	0.0040	0.0016	0.2857	28.5714
4	0.0060	0.0004	0.0714	7.1429
5	0.0070	0.0014	0.2500	25.0000
CH ₄				
1	0.270	0.020	0.080	8.000
2	0.265	0.015	0.060	6.000
3	0.225	0.025	0.100	10.000
4	0.255	0.005	0.020	2.000
5	0.235	0.015	0.060	6.000

Tabela 5.20. Greške merenja prinosa produkata strugotine lipe na kraju procesa pirolize (ispitivanje 6)

Broj merenja i	Rezultat merenja (g)	Apsolutna greška $ x_i $ (g)	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
Prinos vrstog ostatka				
1	1.90	0.10	0.05	5.00
2	2	0	0	0
3	2	0	0	0
4	2.10	0.10	0.05	5.00
5	2	0	0	0
Prinos bio-ulja				
1	2.5	0	0	0
2	2.5	0	0	0
3	2.40	0.10	0.04	4.00
4	2.5	0	0	0
5	2.60	0.10	0.04	4.00

Tabela 5.21. Greške merenja zapreminskih udela CO₂, O₂ i CH₄ u gasu dobijenom pirolizom strugotine lipe na 650 °C (ispitivanje 6)

Broj merenja i	Rezultat merenja $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Apsolutna greška $ x_i \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
CO ₂				
1	0.285	0.007	0.026	2.518
2	0.270	0.008	0.029	2.878
3	0.285	0.007	0.026	2.518
4	0.275	0.003	0.011	1.079
5	0.275	0.003	0.011	1.079
O ₂				
1	0.007	0	0	0
2	0.007	0	0	0
3	0.007	0	0	0
4	0.007	0	0	0
5	0.007	0	0	0
CH ₄				
1	0.250	0.008	0.031	3.101
2	0.245	0.013	0.050	5.038
3	0.2600	0.0020	0.0078	0.7752
4	0.265	0.007	0.027	2.713
5	0.270	0.012	0.046	4.651

Tabela 5.22. Greške merenja prinosa produkata mešavine drvene biomase na kraju procesa pirolize (ispitivanje 7)

Broj merenja i	Rezultat merenja (g)	Apsolutna greška $ x_i $ (g)	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
Prinos vrstog ostatka				
1	2.10	0.04	0.02	1.94
2	2.10	0.04	0.02	1.94
3	2.00	0.06	0.03	2.91
4	2.00	0.06	0.03	2.91
5	2.10	0.04	0.02	1.94
Prinos bio-ulja				
1	2.30	0.08	0.03	3.36
2	2.30	0.08	0.03	3.36
3	2.30	0.08	0.03	3.36
4	2.50	0.12	0.05	5.04
5	2.50	0.12	0.05	5.04

Tabela 5.23. Greške merenja zapreminskih udela CO₂, O₂ i CH₄ u gasu dobijenom pirolizom mešavine drvene biomase na 650 °C (ispitivanje 7)

Broj merenja i	Rezultat merenja $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Apsolutna greška $ x_i \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Relativna greška x_i (-)	Relativna greška x_i (%)
CO ₂				
1	0.2850	0.0010	0.0035	0.3521
2	0.300	0.016	0.056	5.633
3	0.280	0.004	0.014	1.408
4	0.280	0.004	0.014	1.408
5	0.275	0.009	0.032	3.169
O ₂				
1	0.0050	0.0010	0.2500	25.0000
2	0.0020	0.0020	0.5000	50.0000
3	0.004	0	0	0
4	0.004	0	0	0
5	0.0050	0.0010	0.2500	25.0000
CH ₄				
1	0.2500	0.0020	0.0079	0.7936
2	0.240	0.012	0.048	4.761
3	0.255	0.003	0.012	1.190
4	0.265	0.013	0.052	5.158
5	0.2500	0.0020	0.0079	0.7936

Ukoliko je izvršeno 5 i više merenja veličine x , rezultat merenja se izražava na sledeći način:

$$x = \bar{x} \pm s_x$$

Kako je prilikom svakog ispitivanja vršeno po 5 merenja, pomenuti na in izražavanja merenja primenjen je na rezultate dobijene pri ispitivanju prinosa vrstog ostatka i bio-ulja na kraju procesa pirolize drvene biomase i zapreminskih udela merenih gasova pri temperaturi 650 °C (tabela 5.24.).

Tabela 5.24. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja procesa pirolize sa srednjom kvadratnom greškom merenja

Vrsta drvene biomase	Prinos vrstog ostatka (g)	Prinos bio-ulja (g)	Zapreminski udeo CO ₂ $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Zapreminski udeo O ₂ $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$	Zapreminski udeo CH ₄ $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}\right)$
Hrast	1.98±0.08	2.84±0.15	0.266±0.008	0.0014±0.0009	0.258±0.010
Bukva	2.04±0.05	2.640±0.010	0.269±0.018	0.0014±0.0005	0.264±0.013
Trešnja	1.90±0.10	2.48±0.08	0.282±0.014	0.0056±0.0022	0.261±0.006
Orah	2.04±0.09	2.40±0.28	0.278±0.014	0.0068±0.0004	0.264±0.023
Jela	2.08±0.04	2.42±0.08	0.297±0.009	0.0056±0.0011	0.250±0.019
Lipa	2.00±0.07	2.50±0.07	0.278±0.007	0.007±0	0.258±0.010
Mešavina	2.060±0.009	2.38±0.11	0.284±0.010	0.0040±0.0012	0.252±0.009

LITERATURA

- [1] ***, Izveštaj o ispitivanju br. 72/14, Laboratorija za vrsta goriva, Rudarski institut Beograd.
- [2] Gade P. 2010. Investigation of Volatile Products from Wood Pyrolysis, Master Thesis. Faculty of the Department of Chemistry, Western Kentucky University, Bowling Green, Kentucky.
- [3] Zajec L. 2009. Slow pyrolysis in a rotary kiln reactor: Optimization and experiment, Master's thesis. School for Renewable Energy Science, in affiliation with University of Iceland and the University of Akureyri, Akureyri.
- [4] Braadbaart F, Poole I. 2008. Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contents. *Journal of Archaeological Science* 35(9): 2434–2445.
- [5] Chan W. R, Kelbon M, Krieger B. B. 1985. Modelling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large biomass particle. *Fuel* 64(11): 1505–1513.
- [6] Müller - Hagedorn M, Bockhorn H, Krebs L, Müller U. 2003. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 68-69: 231–249.
- [7] Park H. J, Park Y. K, Dong J. I, Kim J. S, Jeon J. K, Kim S. S, Kim J, Song B, Park J, Lee K. J. 2009. Pyrolysis characteristics of Oriental white oak: Kinetic study and fast pyrolysis in a fluidized bed with an improved reaction system. *Fuel Processing Technology* 90(2): 186–195.
- [8] ensöz S. 2003. Slow pyrolysis of wood barks from *Pinus brutia* Ten. and product compositions. *Bioresource Technology* 89: 307–311.
- [9] Carrasco J. C, Oporto G. S, Zondlo J, Wang J. 2013. Torrefaction of red oak. *Bioresources* 8(4): 5067–5082.
- [10] Hanaoka T, Yoshida T, Fujimoto S, Kamei K, Harada M, Suzuki Y, Hatano H, Yokoyama S, Minowa T. 2005. Hydrogen production from woody biomass by steam gasification using a CO₂ sorbent. *Biomass and Bioenergy* 28(1): 63–68.
- [11] Demirba A. 1997. Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel* 76(5): 431–434.
- [12] Prins M. J, Ptasiński K. J, Janssen F. J. J. G. 2006. Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77(1): 35–40.
- [13] Demirbas A. 2005. Pyrolysis of ground beech wood in irregular heating rate conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 73: 39–43.
- [14] Bilandzija N, Voca N, Kricka T, Matin A, Jurisic V. 2012. Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10(2): 292–298.
- [15] Wei Q, Ma X, Dong J. Preparation, chemical constituents and antimicrobial activity of pyroligneous acids from walnut tree branches. 2010. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 87(1): 24–28.
- [16] Vassilev S. V, Baxter D, Andersen L.K, Vassileva C. G. 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89: 913–933.
- [17] Grieco E, Baldi G. 2011. Analysis and modelling of wood pyrolysis. *Chemical Engineering Science* 66(4): 650–660.
- [18] Figueiredo J. L, Valenzuela C, Bernalte A, Encinar J. M. 1989. Pyrolysis of holm-oak wood: influence of temperature and particle size. *Fuel* 68(8): 1012–1016.

- [19] Knight J. A, Bowen M. D, Purdy K. R. 1976. Pyrolysis - A method for conversion of forestry wastes to useful fuels. Conference on Energy and Wood Products Industry, Forest Products Research Society, Atlanta, Georgia.
- [20] Williams P, Besler S. 1996. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy* 7(3): 233-250.
- [21] Bajus M. 2010. Pyrolysis of woody material. *Petroleum and Coal* 52(3): 207-214.
- [22] García-Pérez M, Chaala A, Pakdel H, Kretschmer D, Roy C. 2007. Vacuum pyrolysis of softwood and hardwood biomass: Comparison between product yields and bio-oil properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 78(1): 104-116.
- [23] Demirbas A. 2009. Hydrogen-rich Gases from Biomass via Pyrolysis and Air-steam Gasification. *Energy Sources Part A - Recovery Utilization and Environmental Effects* 31(19):1728-1736.
- [24] Demirbas A. 2009. Pyrolysis Mechanisms of Biomass Materials. *Energy Sources Part A - Recovery Utilization and Environmental Effects* 31(13):1186-1193.
- [25] Ni M, Leung D. Y. C, Leung M. K. H, Sumathy K. 2006. An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology* 87(5):461-472.
- [26] Czernik S, Evans E, French R. 2007. Hydrogen from biomass-production by steam reforming of biomass pyrolysis oil. *Catalysis Today* 129(3-4):265-268.
- [27] Czernik S, Bridgwater A. V. 2004. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy & Fuels* 18(2):590-598.
- [28] Huber G. W, Iborra S, Corma A. 2006. Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts and Engineering. *Chemical Reviews* 106(9): 4044-4098.
- [29] Ware A. E. 2013. Application of pyrolysis-GC/MS to the study of biomass and biomass constituents, Ph.D. diss, College of Arts and Sciences, University of Kentucky, Lexington.
- [30] Bridgwater A. V. 2004. Biomass fast pyrolysis. *Thermal Science* 8(2): 21-49.
- [31] Meier D, Oasmaa A, Peacocke G. V. C. 1997. Properties of Fast Pyrolysis Liquids: Status of Test Methods. Characterization of Fast Pyrolysis Liquids. In: *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*, eds. Bridgwater A. V, Boocock D. G. B, 391-408. Blackie Academic & Professional, London, United Kingdom.
- [32] Elliott D. 1994. Water, Alkali and Char in Flash Pyrolysis Oils. *Biomass and Bioenergy* 7(1-6): 179-185.
- [33] Scholze B, Meier D. 2001. Characterization of the water-insoluble fraction from pyrolysis oil (pyrolytic lignin). Part I. PY-GC/MS, FTIR, and functional groups. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 60: 41-54.
- [34] Mullen A. C, Boateng A. A. 2011. Production and Analysis of Fast Pyrolysis Oils from Proteinaceous Biomass. *Bioenergy Resource* 4 (4): 303-311.
- [35] Zhang Q, Chang J, Wang T. J, Xu Y. 2007. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management* 48(1):87-92.
- [36] Vamvuka D. 2011. Bio-oil, solid and gaseous biofuels from biomass pyrolysis processes - An overview. *International Journal of Energy Research* 35: 835-862.
- [37] Mohan D, Pittman C.U, Bricka M, Smith F, Yanceyd B, Mohammad J, Steele P. H, Alexandre-Franco M. F, Gómez-Serrano V, Gong H. 2007. Sorption of arsenic, cadmium, and lead by chars produced from fast pyrolysis of wood and bark during bio-oil production. *Journal of Colloid and Interface Science* 310(1): 57-73.
- [38] Janse A. M. C, de Jonge H. G, Prins W, van Swaaij W. P. M. 1998. Combustion Kinetics of Char Obtained by Flash Pyrolysis of Pine Wood. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 37(10): 3909-3918.

- [39] Di Blasi C, Signorelli G, Di Russo C, Rea G. 1999. Product Distribution from Pyrolysis of Wood and Agricultural Residues. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 38(6): 2216-2224.

6. ZAKLJUČAK

Cilj doktorske disertacije predstavljalo je eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize različitih vrsta drvene biomase (strugotine drveta hrasta, bukve, oraha, trešnje, jele, lipe i mešavine navedenih vrsta biomase) kao potencijalnih izvora energije i eksperimentalno ispitivanje sastava mešavine drvene biomase, koje podrazumeva tehničku i elementarnu analizu.

Osnovni doprinosi izvršenog ispitivanja su:

- *Pregled literature o:*
 - dosadašnjim istraživanjima u oblasti pirolize drvene biomase
 - zakonskoj regulativi u oblasti obnovljivih izvora energije
 - termohemijskim procesima konverzije
- *Fizičko-hemijska karakterizacija drvene biomase*
 - ostvaren je doprinos znanju o elementarnoj i tehničkoj analizi drvene biomase i poređenje sa rezultatima u literaturi
 - analiza kvalitativnih karakteristika drvene biomase u trećem poglavlju, koja je izvršena na osnovu rezultata tehničke i elementarne analize mešavine drvene biomase korišćenje pri eksperimentalnom ispitivanju i petnaest različitih vrsti drvene biomase iz literature pokazala je da postoje određena odstupanja razmatranih karakteristika: 74.85% (vlaga), 9.76% (isparljive materije), 85.32% (pepeo) i 12.12% (toplotna moć) od srednjih vrednosti, na šta ukazuje koeficijent varijacije C_v (tabela 3.9.). Značajna odstupanja karakteristika pepela od srednje vrednosti (85.32%) mogu nepovoljno da utiču na primenu i rad postrojenja za suvo odsumporavanje dimnih gasova pri procesima sagorevanja zbog dodatne količine praha
 - zavisnost donje toplotne moći od ugljenika i isparljivih materija, svedeno na sagorljivu osnovu, ukazala je na korelacionu vezu karakteristika drvene biomase, kao i zavisnost veličine $M = ((H^g + O^g/8) \cdot 12) / C_{isp}^g$ od isparljivih materija, dok je u odnosu na C_{fix}^g , promena veličine M ukazala na disperziju rezultata. Može se zaključiti da pored slaganja pojedinih podataka postoje i određena odstupanja. Stoga, poznavanje rezultata elementarne i tehničke analize drvene biomase može imati veliki značaj
- *Primer proračuna materijalnog i toplotnog bilansa procesa sagorevanja drvene biomase*
 - ustanovljeno je da neusklađenost mase vlažnih dimnih gasova dobijene bilansom mase i izrađene vrednosti iznosi 0.1%, što može da bude od

zna aja pri prakti nim inženjerskim prora unima. Teorijska temperatura sagorevanja goriva odre ena je iz toplotnog bilansa procesa sagorevanja. Pri teorijskoj (minimalnoj) potrošnji vazduha ($\lambda = 1$) i pri normalnim uslovima teorijska (pirometrijska) temperatura sagorevanja iznosi 1800 °C za date karakteristike drvene biomase toplotne mo i. Navedena temperatura ne može da se postigne u slu aju potpunog sagorevanja pri $\lambda = 1$ jer se jedan deo toplotne energije troši za disocijaciju produkata sagorevanja. Maksimalna temperatura plamena, radi o uvanja postojanosti materijala zidova ložišta, ne bi smela da prelazi 1700 1800 °C, što se postiže odabirom odgovaraju eg koeficijenta viška vazduha. Za odabrano gorivo (drvnu biomasu), iznosi 1.0 - 1.1

- *Eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize drvene biomase*
 - ispitivan je uticaj temperature, reakcionog vremena, brzine zagrevanja i vrste drvene biomase na prinos produkata pirolize drvene biomase u šaržnom reaktoru.

Analizom eksperimentalno dobijenih podataka došlo se do slede ih zaklju aka:

- maseni udeo vrstog ostatka opada sa porastom temperature pirolize, dok maseni udeo gasa raste
- najzna ajnija promena mase uzorka je u opsegu temperature od 200 do 400 °C, pri emu gubitak mase iznosi 55.46–62.47% u zavisnosti od vrste drvene biomase
- sa porastom brzine zagrevanja tokom procesa pirolize pove ava se prinos volatila (isparljivih materija), dok prinos vrstog ostatka opada
- vrsta drvene biomase ne uti e zna ajno na prinos produkata pirolize. Pri pirolizi razli itih vrsti drvene biomase odstupanja rezultata nisu zna ajna, što se može objasniti malim razlikama u odnosima H/C i O/C
- vrednosti prinosa vrstog ostatka dobijene eksperimentalnim ispitivanjem su uporedive sa vrednostima prinosa vrstog ostatka kod drugih istraživa a. Odstupanja prinosa bio-ulja i gasa mogu se objasniti razli itim uslovima odvijanja procesa pirolize
- porast temperature pirolize od 300 do 650 °C uti e na opadanje zapreminskog udela CO₂ i pove anje zapreminskog udela CH₄
- vrsta drvene biomase koriš ena pri procesu pirolize nema zna ajan uticaj na prinos CO₂ i CH₄
- pore enjem sastava gasa sa rezultatima drugih istraživa a uo eno je da odstupanja nisu velika. Vrednosti zapreminskih udela CO₂ i CH₄ u piroliti kom gasu u saglasnosti su sa podacima iz pregledane literature koji se odnose na pirolizu hrasta i bukve
- sastav vrstog (koksno)g ostatka dobijen pirolizom mešavine drvene biomase u skladu je sa podacima prikazanim u literaturi za razli ite vrste drvene biomase
- na osnovu toplotnog bilansa utvr eno je da gubici toplote u piroliti kom reaktoru iznose 8036.56 kJ po kg goriva i da stepen korisnosti piroliti kog reaktora iznosi 65.80%.

Može se zaklju iti da su hipoteze postavljene u uvodnom delu doktorske disertacije potvr ene, izuzev hipoteze da koriš enje razli itih vrsti drvene biomase uti e na prinos produkata pirolize. Pretpostavlja se da nema velikih odstupanja u rezultatima zbog malih razlika u sastavu razli itih vrsta drvene biomase, budu i da je sa istog podneblja. Kako bi ova pretpostavka bila potvr ena, dalja istraživanja bi trebalo da obuhvate tehni ku i elementarnu analizu svih ispitivanih vrsti drvene biomase. Osim toga, kako je pokazano da je piroliza

složen proces iji parametri zna ajno uti u na produkte, budu a istraživanja trebalo bi da idu u pravcu zna ajnijeg variranja ispitivanih parametara. Poželjno bi bilo ispitivati ve i opseg temperature pirolize i razli ite tipove reaktora. Predlog rešenja koriš enja produkata pirolize drvene biomase i potvrda dobijenih rezultata može se dati tek nakon ispitivanja na poluindustrijskim i industrijskim postrojenjima.

PRILOZI

PRILOG 1. Mase i zapremine produkata sagorevanja mešavine drvene biomase u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$m_{\text{CO}_2} \left(\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgB}} \right)$	1.5401	1.5401	1.5401	1.5401	1.5401	1.5401
$m_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right)$	0.5354	0.5354	0.5354	0.5354	0.5354	0.5354
$m_{\text{SO}_2} \left(\frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgB}} \right)$	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056
$m_{\text{N}_2} \left(\frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}} \right)$	3.7365	4.4817	5.2269	5.9721	6.7173	7.4626
$m_{\text{O}_2} \left(\frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}} \right)$	0	0.2226	0.4452	0.6678	0.8904	1.1130
$m_{\text{sdg}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right)$	5.2822	6.2500	7.2178	8.1856	9.1534	10.1213
$m_{\text{vdg}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right)$	5.8176	6.7854	7.7532	8.7210	9.6888	10.6567
$V_{\text{CO}_2} \left(\frac{\text{m}^3\text{CO}_2}{\text{kgB}} \right)$	0.7841	0.7841	0.7841	0.7841	0.7841	0.7841
$V_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{\text{m}^3\text{H}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right)$	0.6663	0.6663	0.6663	0.6663	0.6663	0.6663
$V_{\text{SO}_2} \left(\frac{\text{m}^3\text{SO}_2}{\text{kgB}} \right)$	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020
$V_{\text{N}_2} \left(\frac{\text{m}^3\text{N}_2}{\text{kgB}} \right)$	1.5455	1.8529	2.1603	2.4678	2.7751	3.0826
$V_{\text{O}_2} \left(\frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}} \right)$	0	0.0817	0.1634	0.2451	0.3269	0.4086
$V_{\text{sdg}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right)$	2.3316	2.7207	3.1098	3.4990	3.8881	4.2773
$V_{\text{vdg}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right)$	2.9979	3.3870	3.7761	4.1653	4.5544	4.9436

PRILOG 2. Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu.

	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
CO ₂ (%)	26.15	23.15	20.76	18.82	17.22	15.86
H ₂ O (%)	22.22	19.67	17.64	16.00	14.63	13.48
SO ₂ (%)	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04
N ₂ (%)	51.55	54.71	57.21	59.25	60.93	62.35
O ₂ (%)	0	2.41	4.33	5.88	7.18	8.26

PRILOG 3. Srednje specifične toplote

[izvor: Bogner M. Termotehnikar. 2003. INTERKLIMA-GRAFIKA, Vrnjačka Banja. Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije, Beograd.]

Temperatura	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
t	c _p	c _p	c _p	c _p	c _p
(°C)	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right)$
0	1.0392	0.9148	0.8148	1.8594	0.6071
100	1.0404	0.9232	0.8658	1.8690	0.6364
200	1.0434	0.9353	0.9102	1.8937	0.6615
400	1.0567	0.9651	0.9826	1.9477	0.7076
600	1.0760	0.9927	1.0396	2.0092	0.7369
800	1.0947	1.0157	1.0852	2.0754	0.7620
1000	1.1179	1.0350	1.1225	2.1436	0.7829
1200	1.1359	1.0509	1.1530	2.2106	0.7976
1400	1.1526	1.0647	1.1782	2.2743	0.8039
1600	1.1673	1.0773	1.1995	2.3346	0.8164
1800	1.1798	1.0886	1.2179	2.3970	0.8248
2000	1.1911	1.0990	1.2334	2.4422	0.8332

PRILOG 4. i t dijagram procesa sagorevanja drvene biomase

	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
t = 100 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	622.4832	720.5910	818.6720	916.7531	1014.8341	1112.9256
t = 200 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	1263.6109	1460.7588	1658.4611	1855.0546	2052.2025	2361.8791
t = 400 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	2603.3692	3004.2828	3405.1965	3806.1101	3892.0426	4607.9796
t = 600 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	4020.8486	4634.5347	5248.2208	5861.9070	6475.5931	7089.3438
t = 800 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	5501.6795	6335.1717	7168.6640	8002.1562	8835.6484	9669.2282
t = 1000 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	7057.8633	8121.3133	9184.7634	10248.2135	11311.6636	12375.2255
t = 1200 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	8649.6569	9946.1406	11242.6242	12539.1078	13835.5914	15132.2114
t = 1400 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	10280.7569	11815.0445	13349.3322	14883.6198	16417.9074	17952.3564
t = 1600 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	11941.5729	14385.0778	15492.5455	17268.0318	19043.5181	20819.1912
t = 1800 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	13629.5697	15648.2865	17667.0033	19685.7200	21704.4368	23723.3659
t = 2000 °C						
$i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	15324.6486	17589.1388	19853.6291	22118.1193	24382.6095	26647.3380

PRILOG 5. PIROLIZA STRUGOTINE HRASTA (ISPITIVANJE 1)

MERENJE BR: 1		DATUM MERENJA: 27.06.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA HRASTA		VREME MERENJA: 20:18 20:58													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	27	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.58	12.00	14.07	15.95	16.93	18.60	20.70	21.70	22.60	23.40	24.28	25.37	26.90
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.1	8.7	8.0	7.0	5.8	4.1	3.7	3.5	3.3	3.0	2.7	2.4
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.9	1.3	2.0	3.0	4.2	5.9	6.3	6.5	6.7	7.0	7.3	7.6
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0	0.08	0.12	0.24	0.44	0.63	0.72	0.83	2.53	3.88	4.00	4.00
	CO ₂	%	0	0.17	0.94	5.60	26.20	34.50	47.50	45.50	44.00	42.80	41.80	35.20	28.60
	O ₂	%	21.0	21.0	19.2	13.8	2.1	1.2	0.9	0.7	0.7	0.2	0.1	0.2	0.2
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	8.5	10.0	11.5	16.0	18.0	19.5	22.5	23.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	3.0													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.0													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	23													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 1 - nastavak

<i>Naziv veli ina</i>	<i>Jedinica</i>																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.5	9.3	9.1	8.9	8.7	8.5	8.0	7.0	6.4	5.4	4.5	4.0	3.6	3.4	3.1	2.9	2.6	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	2.0	3.0	3.6	4.6	5.5	6.0	6.4	6.6	6.9	7.1	7.4	7.6	7.8	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 5. ISPITIVANJE 1 - nastavak

MERENJE BR: 2		DATUM MERENJA: 28.06.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA HRASTA		VREME MERENJA: 20:25 – 21:05														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648										MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640				
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	30	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.17	13.25	15.73	17.32	20.17	22.53	24.67	25.83	26.73	27.63	28.68	30.05	31.37	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.2	7.8	6.6	4.1	3.2	2.8	2.5	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.8	2.2	3.4	5.9	6.8	7.2	7.5	7.6	7.8	7.9	8.0	8.0	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.12	0.18	0.32	0.44	1.11	2.05	2.43	3.13	3.55	3.98	4.00	4.00	
	CO ₂	%	0	0.20	1.40	4.35	22.60	30.20	45.60	43.50	42.00	36.80	35.20	34.40	28.80	
	O ₂	%	21.0	21.0	19.2	13.6	2.4	1.4	0.9	0.6	0.5	0.2	0.0	0.1	0.1	
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	8.5	10.5	12.0	14.5	16.0	17.5	20.0	23.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.8														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.2														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	20														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 2 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.6	9.4	9.2	8.9	8.5	7.6	6.8	6.0	5.0	4.2	3.8	3.3	3.1	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.5	0.4	0.6	0.8	1.1	1.5	2.4	3.2	4.0	5.0	5.8	6.2	6.7	6.9	7.1	7.3	7.5	7.7	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 5. ISPITIVANJE 1 - nastavak

MERENJE BR: 3		DATUM MERENJA: 29.06.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA HRASTA		VREME MERENJA: 8:35 – 9:05													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	28	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.2	13.17	15.75	17.28	20.08	22.55	24.70	25.88	26.80	27.65	28.70	30.08	31.40
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.1	8.2	6.5	4.4	3.3	2.8	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.9	1.8	3.5	5.6	6.7	7.2	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	7.9
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.05	0.14	0.25	0.31	0.43	0.60	1.08	2.52	3.14	3.88	4.00	4.00
	CO ₂	%	0	0.21	0.97	3.85	26.80	33.50	45.50	44.50	43.20	40.80	38.60	30.40	27.80
	O ₂	%	21.0	20.4	19.3	13.4	1.9	1.0	0.9	0.7	0.6	0.6	0.2	0.2	0.2
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	4.5	9.0	10.5	14.5	15.0	16.5	20.0	22.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	3.0													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	4.9													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	20													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 3 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.7	9.4	9.1	8.9	8.7	7.9	6.7	5.8	5.0	4.4	3.9	3.5	3.1	2.9	2.7	2.5	2.4	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.1	1.3	2.1	3.3	4.2	5.0	5.6	6.1	6.5	6.9	7.1	7.3	7.5	7.6	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 5. ISPITIVANJE 1 - nastavak

MARENJE BR: 4		DATUM MARENJA: 3.07.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA HRASTA		VREME MARENJA: 8:56 – 9:36													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.9						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	29	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.00	11.05	12.80	14.18	15.38	16.40	17.95	19.10	20.12	21.12	21.93	22.98	24.5
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.2	8.8	8.4	7.7	7.0	6.0	4.8	3.2	2.6	2.1	2.0	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.8	1.2	1.6	2.3	3.0	4.0	5.2	6.8	7.4	7.9	8.0	8.1
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0194	0.0423	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0	0.09	0.18	0.32	0.59	0.71	1.10	2.15	3.14	3.73	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	0.56	1.08	3.26	7.35	29.50	45.50	44.00	43.50	38.60	34.20	30.80	28.60
	O ₂	%	21.0	21.0	19.3	14.2	5.6	2.1	1.1	0.9	0.8	0	0	0	0
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	4.5	11.5	13.5	15.0	16.0	17.5	19.5	23.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	1.9													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.7													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	25													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 4 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.7	9.5	9.3	9.0	8.7	8.5	7.8	7.2	6.8	6.0	4.8	3.2	2.6	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5	2.2	2.8	3.2	4.0	5.2	6.8	7.4	7.9	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 5. ISPITIVANJE 1 - nastavak

MERENJE BR: 5		DATUM MERENJA: 4.07.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA HRASTA		VREME MERENJA: 8:43 – 9:23													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.9						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	29	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.40	13.55	16.20	17.72	20.42	23.25	25.57	26.70	27.52	28.65	29.70	31.35	32.97
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	9.9	8.6	8.0	6.2	4.1	3.0	2.6	2.4	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0.1	1.4	2.0	3.8	5.9	7.0	7.4	7.6	7.8	7.8	7.9	8.0	8.1
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.05	0.16	0.27	0.35	0.42	0.56	1.12	2.05	3.07	3.97	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	0.69	1.62	8.50	24.80	32.50	43.50	41.50	42.20	38.60	37.20	33.80	28.20
	O ₂	%	21.0	19.9	18.4	11.4	2.3	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2
	CH ₄	%	0	0	0	0	10.5	12.5	13.5	16.5	17.0	18.5	24.5	26.5	27.0
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	1.9													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.6													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.5													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	19													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 5 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.2	9.1	9.0	8.8	8.5	8.3	8.0	7.3	6.1	5.3	4.3	3.9	3.3	3.1	2.8	2.7	2.5	2.3	2.2	2.2	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.7	3.9	4.7	5.7	6.1	6.7	6.9	7.2	7.3	2.5	2.3	2.2	2.2	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 6. PIROLIZA STRUGOTINE BUKVE (ISPITIVANJE 2)

MERENJE BR: 1		DATUM MERENJA: 7.09.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA BUKVE		VREME MERENJA: 8:15 8:55														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640									
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	23	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.53	11.17	13.53	16.05	18.25	20.52	22.77	23.47	24.18	25.08	26.15	27.23	28.27	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.5	8.9	7.7	5.9	4.1	3.2	2.9	2.6	2.4	2.2	2.1	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.5	1.1	2.3	4.1	5.9	6.8	7.1	7.4	7.6	7.8	7.9	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0142	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.17	0.42	0.71	0.98	1.13	1.23	1.40	2.00	3.50	>4.00	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.17	0.92	7.40	22.20	35.50	44.50	42.50	40.60	36.80	32.60	30.60	29.20	27.40
	O ₂	%	21.0	21.0	19.2	13.8	2.6	1.4	1	0.8	0.7	0.7	0.3	0.2	0.2	0.1
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	8.5	10.5	11.5	16.0	18.5	20.0	22.0	23.5	25.0
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.8														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.2														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	22														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 1 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.5	9.3	9.0	8.8	8.1	7.7	6.9	6.1	5.1	4.3	3.9	3.4	3.1	2.7	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.5	0.7	1.0	1.2	1.9	2.3	3.1	3.9	4.9	5.7	6.1	6.6	6.9	7.3	7.6	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 6. ISPITIVANJE 2 - nastavak

MERENJE BR: 2		DATUM MERENJA: 11.09.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA BUKVE		VREME MERENJA: 11:15 - 11:55														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	26	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.42	11.0	13.62	15.78	17.78	20.62	22.72	23.72	24.47	25.17	26.03	27.03	28.3	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.9	9.7	9.0	7.2	4.9	4.0	3.1	3.0	2.6	2.3	2.2	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.1	0.3	1.0	2.8	5.1	6.0	6.9	7.0	7.4	7.7	7.8	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.16	0.22	0.31	1.17	1.38	1.79	2.10	2.80	3.00	>4.00	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.14	0.70	1.36	4.95	29.40	42.50	41.50	39.00	36.20	34.00	31.20	29.80	28.40
	O ₂	%	21.0	21.0	19.8	15.2	11.2	1.9	1.0	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	3.0	10.5	12.5	14.5	16.0	19.5	23.0	25.0	26.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	22														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 2 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.9	9.8	9.7	9.6	9.3	8.9	8.1	7.1	6.0	5.2	4.6	4.0	3.9	3.1	2.9	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1.1	1.9	2.9	4.0	4.8	5.4	6.0	6.1	6.9	7.1	7.7	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 6. ISPITIVANJE 2 - nastavak

MERENJE BR: 3		DATUM MERENJA: 12.09.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA BUKVE		VREME MERENJA: 9:50 10:30													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.08	11.80	14.87	17.5	20.08	22.95	22.47	26.32	27.03	27.85	28.92	30.07	31.23
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.8	9.4	7.9	5.8	3.9	3.1	3.0	2.9	2.8	2.5	2.3	2.2
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.2	0.6	2.1	4.2	6.1	6.9	7.0	7.1	7.2	7.5	7.7	7.8
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0462	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.20	0.22	0.41	0.73	1.02	1.50	2.00	2.72	3.72	>4.00	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	0.17	0.53	1.32	12.80	27.60	41.50	39.50	36.80	30.60	28.20	27.90	26.20
	O ₂	%	21.0	20.5	19.8	14.8	4.5	1.4	1.0	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.3
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	5.0	10.5	11.5	14.5	19.0	20.5	22.0	24.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.7													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.2													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	20													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 3 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.9	9.8	9.8	9.6	9.3	8.9	8.2	7.5	6.7	5.8	5.0	4.3	3.9	3.6	3.3	3.0	2.9	2.8	2.5	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.7	1.1	1.8	2.5	3.3	4.2	5.0	5.7	6.1	6.4	6.7	7.0	7.1	7.2	7.5	7.7	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 6. ISPITIVANJE 2 - nastavak

MERENJE BR: 4		DATUM MERENJA: 13.09.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA BUKVE		VREME MERENJA: 11:34 12:14														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648										MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640				
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.9	11.63	14.53	16.95	19.42	22.22	24.42	25.53	26.28	27.20	28.05	29.25	30.53	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.8	9.2	8.3	6.6	4.3	3.3	3.0	2.9	2.9	2.7	2.2	2.0	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.2	0.8	1.7	3.4	5.7	6.7	7.0	7.1	7.1	7.3	7.8	8.0	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0262	0.0475	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.19	0.23	0.34	1.75	2.21	2.40	2.57	2.89	3.19	3.89	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.07	0.25	0.68	5.90	27.90	43.50	41.50	37.80	35.20	30.80	28.90	26.80	24.20
	O ₂	%	21.0	21.0	20.5	19.7	9.1	1.6	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	5.0	9.5	11.0	13.5	17.0	20.5	21.5	26.5	28.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.6														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	20														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 4 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																												
Masa uzorka	g	10																																											
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40			
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.7	9.6	9.2	9.1	8.9	8.3	7.8	7.0	6.1	5.2	4.6	4.0	3.8	3.1	2.9	2.9	2.7	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.4	0.8	0.9	1.1	1.7	2.2	3.0	3.9	4.8	5.4	6.0	6.2	6.9	7.1	7.1	7.3	7.5	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 6. ISPITIVANJE 2 - nastavak

MERENJE BR: 5		DATUM MERENJA: 14.09.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA BUKVE		VREME MERENJA: 10:37 11:17													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.05	11.5	14.48	16.92	19.43	22.25	24.50	25.48	26.33	27.17	28.08	29.28	30.62
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.7	8.9	8.4	6.5	4.9	4.0	3.5	3.2	2.8	2.6	2.1	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.3	1.1	1.6	3.5	5.1	6.0	6.5	6.8	7.2	7.4	7.9	8.0
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0464	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.22	0.42	0.58	0.74	0.92	1.07	1.52	2.16	3.16	3.92	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	0.17	0.54	1.58	14.80	28.20	44.00	41.50	40.80	36.80	32.20	31.60	29.80
	O ₂	%	21.0	20.6	19.8	14.6	4.5	1.8	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.2
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	8.5	9.5	11.0	14.0	17.0	20.5	22.0	23.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.6													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	20													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 5 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.6	9.4	9.0	8.8	8.6	8.4	7.9	7.0	6.0	5.3	5.0	4.6	4.2	3.8	3.3	2.9	2.6	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.6	1.0	1.2	1.4	1.6	2.1	3.0	4.0	4.7	5.0	5.4	5.8	6.2	6.7	7.1	7.4	7.8	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 7. PIROLIZA STRUGOTINE TREŠNJE (ISPITIVANJE 3)

MERENJE BR: 1		DATUM MERENJA: 27.09.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA TREŠNJE		VREME MERENJA: 10:03 10:43														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.8							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	24	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	6.57	9.43	11.87	14.32	17.15	20.77	23.03	23.88	24.60	25.32	26.13	27.25	28.78	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10	9.9	9.0	7.0	4.4	3.0	2.3	2.3	2.2	2.0	2.0	1.9	1.8	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.1	1.0	3.0	5.6	6.0	6.7	7.7	7.8	8.0	8.0	8.1	8.2	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0278	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.20	1.11	1.48	1.54	1.63	1.82	1.98	2.20	3.21	>4.00	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.20	2.28	4.50	21.40	28.80	41.60	39.40	38.80	34.60	31.00	29.40	28.20	26.20
	O ₂	%	21.0	20.6	17.5	13.2	1.5	1.0	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	6.0	12.5	13.0	14.0	16.5	20.0	22.0	24.0	25.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	1.8														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.7														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	22														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 1 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																												
Masa uzorka	g	10																																											
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40			
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.5	9.0	8.2	7.4	6.2	5.1	4.5	4.0	3.7	3.1	2.9	2.5	2.3	2.3	2.1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.5	1.0	1.8	2.6	3.8	4.9	4.5	5.0	6.3	6.9	7.1	7.5	7.7	7.7	7.9	8.0	8.0	8.1	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 7. ISPITIVANJE 3 - nastavak

MERENJE BR: 2		DATUM MERENJA: 28.09.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA TREŠNJE		VREME MERENJA: 9:53 10:33													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.15	10.83	13.75	16.03	19.33	23.63	26.32	27.30	28.23	29.18	30.05	31.42	33.15
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	9.9	9.7	8.9	7.0	5.0	3.9	3.4	3.3	3.1	3.0	2.8	2.3	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0.1	0.3	1.1	3.0	5.0	6.1	6.6	6.7	6.9	7.0	7.2	7.7	7.9
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0310	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.20	0.84	0.95	1.12	1.24	1.65	1.97	2.22	2.80	3.90	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	0.12	1.86	10.50	29.60	29.80	42.20	41.20	38.40	33.60	31.40	30.00	28.60
	O ₂	%	21.0	21.0	18.2	9.2	1.0	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
	CH ₄	%	0	0	0	0	2.5	8.0	9.5	10.5	16.5	18.5	20.5	24.5	25.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.5													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	19													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 2 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.7	9.7	9.6	9.3	9.2	8.8	8.0	7.0	6.1	5.8	5.4	4.8	4.4	4.0	4.0	3.9	3.8	3.6	3.3	3.2	3.1	2.8	2.6	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7	0.8	1.2	2.0	3.0	3.9	4.2	4.6	5.2	5.6	6.0	6.0	6.1	6.2	6.4	6.7	6.8	6.9	7.2	7.4	7.8	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 7. ISPITIVANJE 3 - nastavak

MERENJE BR: 3		DATUM MERENJA: 1.10.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA TREŠNJE		VREME MERENJA: 11:16 11:56													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.9						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	24	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.22	11.05	13.12	14.53	17.13	20.25	22.57	23.52	24.20	24.97	25.82	26.90	28.33
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.7	9.0	8.0	5.8	4.5	3.8	3.5	3.1	2.9	2.8	2.2	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.3	1.0	2.0	4.2	5.5	6.2	6.5	6.9	7.1	7.2	7.8	8.0
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0275	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.19	0.56	0.76	0.97	1.16	1.55	1.98	2.19	3.15	3.95	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	0.07	1.38	5.85	18.40	29.00	43.60	42.40	39.80	33.60	32.40	31.40	30.20
	O ₂	%	21.0	21.0	19.4	13.8	3.2	1.0	1.0	0.7	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	4.5	11.0	15.5	16.5	18.5	22.5	24.0	25.0
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	1.9													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.6													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.5													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	22													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 3 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.7	9.5	9.1	8.3	7.5	6.7	5.9	5.3	5.0	4.7	4.2	4.0	3.6	3.2	3.0	2.7	2.2	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.5	0.9	1.7	2.5	3.3	4.1	4.7	5.0	5.3	5.8	6.0	6.4	6.8	7.0	7.3	7.8	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 7. ISPITIVANJE 3 - nastavak

MERENJE BR: 4		DATUM MERENJA: 2.10.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA TREŠNJE		VREME MERENJA: 8:40 9:20														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640									
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.15	10.88	13.03	15.05	17.58	20.63	22.90	24.03	24.90	25.80	26.83	28.05	29.67	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	9.9	9.1	8.3	6.3	4.4	3.3	2.9	2.8	2.6	2.3	2.2	2.1	2.0	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0.1	0.9	1.7	3.7	5.6	6.7	7.1	7.2	7.4	7.7	7.8	7.9	8.0	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.39	0.56	0.63	0.76	0.83	1.25	1.98	2.21	3.25	3.94	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.19	1.12	3.90	13.80	26.40	42.40	40.20	38.80	34.40	33.20	32.00	30.80	
	O ₂	%	21.0	20.4	18.9	14.3	1.6	1.3	1.3	0.9	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	5	9	11.5	16.5	19.5	21.0	23.0	24.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.4														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 4 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.7	9.5	9.1	8.9	8.3	7.6	6.3	5.5	4.8	4.1	3.9	3.7	3.2	3.0	2.9	2.8	2.6	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.5	0.9	1.1	1.7	2.4	3.7	4.5	5.2	5.9	6.1	6.3	6.8	7.0	7.1	7.2	7.4	7.7	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 7. ISPITIVANJE 3 - nastavak

MERENJE BR: 5		DATUM MERENJA: 3.10.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA TREŠNJE		VREME MERENJA: 8:44 9:24														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648										MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.8				
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	21	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.35	10.90	13.82	16.45	19.88	24.47	26.12	27.18	28.33	29.45	30.43	31.88	34.75	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.2	8.0	4.9	3.7	2.9	2.7	2.3	2.3	2.1	2.0	1.9	1.8	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.8	2.0	5.1	6.3	7.1	7.3	7.7	7.7	7.9	8.0	8.1	8.2	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.20	0.30	0.58	0.92	1.02	1.23	1.87	2.07	2.37	3.36	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.13	0.57	9.30	18.50	29.50	41.00	39.60	38.40	34.20	33.80	32.40	31.20	
	O ₂	%	21.0	20.5	19.9	10.3	1.4	1.2	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	
	CH ₄	%	0	0	0	0	0	5.0	10.0	15.5	20.5	22.0	23.0	24.5	25.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	1.8														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.4														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.8														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	18														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 5 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.6	9.2	9.0	8.4	7.9	6.1	5.1	4.6	4.0	3.9	3.7	3.1	3.0	2.9	2.9	2.8	2.7	2.3	2.3	2.2	2.0	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.8	1.0	1.6	2.1	3.9	4.9	5.4	6.0	6.1	6.3	6.9	7.0	7.1	7.1	7.2	7.3	7.7	7.7	7.8	8.0	8.0	8.1	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 8. PIROLIZA STRUGOTINE ORAHA (ISPITIVANJE 4)

MERENJE BR: 1		DATUM MERENJA: 21.11.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA ORAHA		VREME MERENJA: 11:06 11:46														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	16	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.78	12.73	14.92	17.37	20.87	24.22	26.87	28.13	28.15	30.02	31.52	32.88	35.23	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	9.9	8.9	6.8	4.3	3.2	2.9	2.8	2.8	2.7	2.5	2.4	2.2	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0.1	1.1	3.2	5.7	6.8	7.1	7.2	7.2	7.3	7.5	7.6	7.8	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0276	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.27	1.08	1.19	1.33	1.42	1.67	1.85	2.02	2.95	3.84	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.96	6.70	28.50	35.50	40.50	39.00	38.50	33.50	32.00	29.50	28.50	27.80	27.60
	O ₂	%	21.0	20.6	17.6	2.4	1.4	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	CH ₄	%	0	0	0	2.5	10.5	12.5	13.5	15.0	16.5	19.5	22.5	25.5	27.0	28.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	1.9														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	6.0														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	18														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 1 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																									
Masa uzorka	g	10																																								
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.7	9.5	9.1	8.8	7.6	6.7	5.3	4.8	4.0	3.8	3.5	3.1	3.1	3.0	3.0	2.9	2.9	2.8	2.8	2.7	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.5	0.9	1.2	2.4	3.3	4.7	5.2	6.0	6.2	6.5	6.9	6.9	7.0	7.0	7.1	7.1	7.2	7.2	7.3	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 8. ISPITIVANJE 4 - nastavak

MERENJE BR: 2		DATUM MERENJA: 22.11.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA ORAHA		VREME MERENJA: 9:19 – 9:59													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	17	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.70	12.05	14.08	16.52	19.83	22.20	24.48	25.13	26.12	27.08	30.48	31.45	32.68
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.4	8.7	6.3	3.8	3.0	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.6	1.3	3.7	6.2	7.0	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	7.9	7.9
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0159	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.31	0.76	1.06	>2.46	1.45	2.04	2.25	2.45	3.14	3.98	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	1.96	7.20	26.50	37.50	39.50	40.50	38.00	36.50	34.00	31.50	29.50	28.60
	O ₂	%	21.0	20.4	18.2	3.4	1.6	1.2	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7
	CH ₄	%	0	0	0	0	9.5	11.5	13.0	14.5	16.5	20.0	22.5	24.0	25.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	19													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 2 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.6	9.4	9.2	8.7	8.0	6.9	5.7	4.5	4.1	3.7	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.3	2.0	3.1	4.3	5.5	5.9	6.3	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.7	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 8. ISPITIVANJE 4 - nastavak

MERENJE BR: 3		DATUM MERENJA: 24.11.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA ORAHA		VREME MERENJA: 15:23 – 16:03														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	17	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.75	12.25	13.97	16.47	19.78	22.15	24.42	25.07	26.05	27.02	30.42	31.37	32.53	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.4	8.6	5.6	3.7	3.2	2.8	2.8	2.7	2.5	2.2	2.2	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.6	1.4	4.4	6.3	6.8	7.2	7.2	7.3	7.5	7.8	7.8	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0364	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.02	0.06	0.11	0.22	0.36	0.51	0.66	2.05	3.65	>4.00	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	1.96	7.20	25.50	30.50	34.50	40.50	39.50	35.50	29.50	28.00	27.40	26.80	26.20
	O ₂	%	21.0	20.4	18.4	3.2	1.6	1.2	1.1	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
	CH ₄	%	0	0	0	1.5	9.5	13.0	14.5	15.5	17.5	20.5	23.5	26.0	27.5	28.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	19														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 3 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.6	9.4	9.1	8.6	7.5	6.4	4.8	4.0	3.8	3.6	3.4	3.2	3.0	2.9	2.8	2.7	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.6	0.9	1.4	2.5	3.6	5.2	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.1	7.2	7.3	7.5	7.6	7.7	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 8. ISPITIVANJE 4 - nastavak

MERENJE BR: 4		DATUM MERENJA: 26.11.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA ORAHA		VREME MERENJA: 9:53 – 10:33													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.9						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	15	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.75	11.05	13.88	15.58	18.62	21.73	24.28	25.18	25.92	26.73	27.72	28.73	30.28
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.6	8.7	6.9	4.1	3.0	2.8	2.6	2.3	2.1	2.1	2.0	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.4	1.3	3.1	5.9	7.0	7.2	7.4	7.7	7.9	7.9	8.0	8.1
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0388	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.33	0.54	0.62	0.92	1.10	1.39	1.58	2.03	2.98	3.87	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	3.0	3.65	10.20	27.50	33.50	43.50	42.50	39.50	35.50	32.00	31.60	30.20
	O ₂	%	21.0	20.3	18.9	14.4	2.14	0.8	0.9	0.7	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7
	CH ₄	%	0	0	0	0.5	2.5	8.0	9.5	11.0	13.5	16.5	18.0	19.5	22.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	1.9													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21													

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 4 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.6	9.2	9.0	8.6	7.6	6.3	5.0	4.3	3.9	3.3	3.1	2.9	2.8	2.8	2.7	2.3	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.8	1.0	1.4	2.4	3.7	5.0	5.7	6.1	6.7	6.9	7.1	7.2	7.2	7.3	7.7	7.9	8.0	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 8. ISPITIVANJE 4 - nastavak

MERENJE BR: 5			DATUM MERENJA: 28.11.2012.												
UZORAK: STRUGOTINA ORAHA			VREME MERENJA: 10:11 – 10:51												
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638			MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	17	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.18	10.5	12.9	14.73	16.9	19.83	22.15	23.08	24.0	24.9	25.82	27.07	28.73
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.6	9.3	7.3	5.2	2.9	2.7	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.4	0.7	2.7	4.8	7.1	7.3	7.4	7.6	7.7	7.7	7.8	7.9
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0315	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0	0.22	0.30	0.68	0.86	1.85	2.44	2.87	3.03	3.83	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	1.96	4.45	8.40	28.00	35.50	39.50	41.50	40.50	34.50	29.50	28.00	27.50
	O ₂	%	21.0	20.5	19.2	16.2	2.2	1.0	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	CH ₄	%	0	0	0	1.0	3.5	9.5	10.5	11.5	14.5	18.5	19.5	21.0	22.0
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.6													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	22													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 5 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.7	9.5	9.4	9.2	8.0	7.0	6.1	5.1	4.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	2.0	3.0	3.9	4.9	5.9	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.6	7.7	7.7	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 9. PIROLIZA STRUGOTINE JELE (ISPITIVANJE 5)

MERENJE BR: 1										DATUM MERENJA: 12.10.2012.						
UZORAK: STRUGOTINA JELE										VREME MERENJA: 9:41 10:21						
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638					MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640						
Naziv veli ina		Jedinica														
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	15	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.67	10.78	13.15	15.33	17.58	20.87	23.50	24.15	24.98	26.03	27.97	28.50	29.92	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.5	9.0	7.3	5.3	3.8	3.0	2.9	2.7	2.5	2.1	2.1	2.0	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.5	1.0	2.7	4.7	6.2	7.0	7.1	7.3	7.5	7.9	7.9	8.0	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0450	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0	0.09	0.29	0.65	0.81	1.08	1.27	2.02	3.27	>4.00	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.18	0.84	8.50	26.50	30.50	40.50	39.00	37.50	34.50	32.80	30.00	29.60	
	O ₂	%	21.0	20.6	19.8	12.5	1.6	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	
	CH ₄	%	0	0	0	0	4.5	9.0	11.5	15.0	18.5	21.0	22.5	24.0	25.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.4														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 1 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.5	9.3	9.0	8.5	7.6	6.5	5.5	5.1	4.6	4.2	3.8	3.4	3.1	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.4	3.5	4.5	4.9	5.4	5.8	6.2	6.6	6.9	7.1	7.3	7.5	7.7	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 9. ISPITIVANJE 5 - nastavak

MERENJE BR: 2		DATUM MERENJA: 15.10.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA JELE		VREME MERENJA: 9:32 10:12														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	17	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.75	10.48	12.52	14.77	17.17	19.92	22.03	22.98	23.75	24.60	25.53	26.63	28.12	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.9	9.8	9.2	8.3	6.1	4.9	4.2	4.0	3.9	3.5	3.2	2.9	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.1	0.2	0.8	1.7	3.9	5.1	5.8	6.0	6.1	6.5	6.8	7.1	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.36	0.78	1.19	1.28	1.35	1.56	1.88	2.17	3.16	3.94	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.62	1.96	9.50	28.50	31.50	40.50	39.50	37.00	35.20	33.80	32.80	31.40	30.00
	O ₂	%	21.0	21.0	19.6	12.0	1.8	1.0	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6
	CH ₄	%	0	0	0	0	6.5	8.5	10.0	11.0	13.0	16.5	18.5	20.5	23.0	26.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	23														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 2 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.7	9.3	9.2	8.9	8.5	7.9	6.9	6.1	5.5	4.9	4.2	4.0	3.7	3.3	3.1	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.7	0.8	1.1	1.5	2.1	3.1	3.9	4.5	5.1	5.8	6.0	6.3	6.7	6.9	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 9. ISPITIVANJE 5 - nastavak

MERENJE BR: 3										DATUM MERENJA: 16.10.2012.						
UZORAK: STRUGOTINA JELE										VREME MERENJA: 9:55 10:35						
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638					MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1						
Naziv veli ina		Jedinica														
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	17	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.92	10.93	13.48	15.68	18.02	20.97	23.53	24.43	25.48	26.42	27.52	28.53	30.15	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.8	9.2	8.9	7.9	5.9	4.4	3.9	3.7	3.4	3.1	2.7	2.2	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.2	0.8	1.1	2.1	4.1	5.6	6.1	6.3	6.6	6.9	7.3	7.8	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.25	0.42	0.88	0.93	1.02	1.37	1.57	2.37	3.04	3.97	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.22	3.60	9.50	28.00	31.00	39.00	38.00	36.50	35.80	33.20	32.20	31.40	
	O ₂	%	21.0	21.0	18.4	10.4	1.2	1.1	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	
	CH ₄	%	0	0	0	0	4.5	5.5	12.0	14.5	15.5	17.0	18.0	20.0	21.0	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 3 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.7	9.2	9.1	9.0	8.8	8.7	7.9	7.3	6.7	5.9	5.1	4.7	4.0	3.8	3.6	3.1	2.9	2.5	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	2.1	2.7	3.3	4.1	4.9	5.3	6.0	6.2	6.4	6.9	7.1	7.5	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 9. ISPITIVANJE 5 - nastavak

MERENJE BR: 4		DATUM MERENJA: 16.11.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA JELE		VREME MERENJA: 13:30 14:10														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1									
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	17	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.73	10.77	13.23	15.43	17.77	20.77	23.25	24.17	24.15	25.87	26.87	28.05	29.72	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.7	8.8	6.7	4.6	3.3	2.9	2.9	2.8	2.7	2.5	2.2	2.2	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.3	1.2	3.3	5.4	6.7	7.1	7.1	7.2	7.3	7.5	7.8	7.8	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0325	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.30	0.55	0.69	0.75	0.92	1.23	1.55	2.71	3.14	3.74	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.81	4.30	10.60	30.50	33.50	41.50	38.50	36.50	34.00	33.60	32.80	31.20	
	O ₂	%	21.0	20.3	19.4	11.5	1.4	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	
	CH ₄	%	0	0	0	0	5.0	9.5	12.5	14.0	17.0	20.5	22.5	23.0	24.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.3														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21														

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 4 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.6	9.2	8.9	8.1	7.0	6.0	5.3	4.3	3.9	3.6	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.5	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.8	1.1	1.9	3.0	4.0	4.7	5.7	6.1	6.4	6.8	6.9	7.0	7.1	7.2	7.3	7.5	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 9. ISPITIVANJE 5 - nastavak

MERENJE BR: 5			DATUM MERENJA: 21.11.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA JELE			VREME MERENJA: 11:18 11:58													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638			MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	21	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	6.30	10.05	12.88	15.30	18.07	23.50	24.25	25.58	26.50	27.47	28.72	29.90	31.77	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.7	8.4	5.9	4.0	3.0	2.9	2.9	2.8	2.6	2.5	2.3	2.2	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.3	1.6	4.1	6.0	7.0	7.1	7.1	7.2	7.4	7.5	7.7	7.8	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0249	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.24	0.38	0.59	0.80	1.52	1.87	2.21	2.79	3.19	3.89	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.95	3.65	12.60	28.50	34.50	41.50	40.50	38.50	37.80	35.20	33.60	31.40	
	O ₂	%	21.0	21.0	19.6	13.3	1.3	1.2	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	
	CH ₄	%	0	0	0	0	6.5	8.5	9.5	10.5	13.5	16.0	18.5	21.0	22.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.4														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.5														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	20														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 5 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.7	9.3	8.9	8.4	7.0	6.1	5.1	4.5	4.0	3.8	3.5	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8	2.7	2.5	2.5	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.7	1.1	1.6	3.0	3.9	4.9	5.5	6.0	6.2	6.5	6.8	6.9	7.0	7.0	7.1	7.2	7.3	7.5	7.5	7.7	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 10. PIROLIZA STRUGOTINE LIPE (ISPITIVANJE 6)

MERENJE BR: 1			DATUM MERENJA: 29.11.2012.												
UZORAK: STRUGOTINA LIPE			VREME MERENJA: 10:00 10:40												
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638			MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.9						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	19	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.35	10.63	13.15	15.40	18.05	21.42	23.67	24.73	25.63	26.50	27.53	28.67	30.18
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.8	8.9	6.8	4.6	3.1	2.8	2.6	2.4	2.3	2.1	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.2	1.1	3.2	5.4	6.9	7.2	7.4	7.6	7.7	7.9	8.0	8.0
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0459	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.29	0.89	1.57	1.79	1.98	2.08	2.54	2.76	2.95	3.75	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	2.90	3.45	10.20	28.00	33.50	43.50	42.50	40.00	35.50	33.00	31.50	29.00
	O ₂	%	21.0	20.4	18.6	14.4	5.1	2.1	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8
	CH ₄	%	0	0	0.5	0.5	3.0	7.5	9.5	11.0	13.5	16.5	18.0	19.5	23.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	1.9													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 1 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																										
Masa uzorka	g	10																																									
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.9	9.6	9.4	8.9	8.0	7.0	6.0	5.1	4.6	4.0	3.5	3.1	3.0	2.9	2.7	2.5	2.4	2.2	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.4	0.6	1.1	2.0	3.0	4.0	4.9	5.4	6.0	6.5	6.9	7.0	7.1	7.3	7.5	7.6	7.8	8.0	8.0	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 10. ISPITIVANJE 6 - nastavak

MERENJE BR: 2		DATUM MERENJA: 29.11.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA LIPE		VREME MERENJA: 19:13 19:53														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640									
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	15	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.52	10.58	13.02	15.33	18.08	21.45	23.70	24.75	25.50	26.53	27.57	28.75	30.52	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.7	8.8	6.7	4.8	3.4	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.3	1.2	3.3	5.2	6.6	7.2	7.4	7.6	7.7	7.8	7.9	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0392	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.33	0.88	1.03	1.24	1.44	1.85	2.11	2.72	3.01	3.92	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	0.95	1.98	11.60	26.50	34.00	41.50	40.50	39.00	34.50	31.50	28.00	27.50	
	O ₂	%	21	20.6	18.2	12.2	4.8	1.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	
	CH ₄	%	0	0	0	0	4.5	8.0	10.0	11.5	14.0	16.5	19.5	21.0	22.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.5														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21														

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 2 - nastavak

<i>Naziv veli ina</i>	<i>Jedinica</i>																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.6	9.3	8.8	8.0	6.9	6.1	5.2	4.8	4.4	4.0	3.6	3.2	2.9	2.7	2.5	2.4	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2	2.0	3.1	3.9	4.8	5.2	5.6	6.0	6.4	6.8	7.1	7.3	7.5	7.6	7.8	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 10. ISPITIVANJE 6 - nastavak

MERENJE BR: 3			DATUM MERENJA: 30.11.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA LIPE			VREME MERENJA: 10:27 11:07													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638			MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	16	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.75	10.48	12.97	15.37	17.98	21.52	23.75	24.67	25.47	26.45	27.58	28.68	30.42	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.7	8.6	6.5	4.6	3.3	2.9	2.7	2.5	2.4	2.3	2.1	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.3	1.4	3.5	5.4	6.7	7.1	7.3	7.5	7.6	7.7	7.9	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0462	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.32	0.92	1.64	1.71	1.89	1.92	2.18	2.33	2.93	3.63	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	1.96	4.25	11.80	28.50	35.50	40.50	39.50	38.00	35.50	31.50	29.50	29.00	
	O ₂	%	21	20.6	17.6	10.5	3.2	1.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	
	CH ₄	%	0	0	0	0	4.0	8.5	11.0	12.5	14.5	17.0	18.5	21.5	24.0	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.4														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 3 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.6	9.3	8.6	7.9	7.0	6.1	5.1	4.6	4.0	3.7	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.4	2.1	3.0	3.9	4.9	5.4	6.0	6.3	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.7	7.8	7.9	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 10. ISPITIVANJE 6 - nastavak

MERENJE BR: 4			DATUM MERENJA: 30.11.2012.													
UZORAK: STRUGOTINA LIPE			VREME MERENJA: 19:18 19:58													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638			MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	17	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.82	10.42	12.92	15.33	17.83	21.43	23.73	24.70	25.53	26.55	27.63	28.73	30.33	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.7	8.5	6.8	4.6	3.1	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.3	1.5	3.2	5.4	6.9	7.2	7.4	7.6	7.7	7.8	7.8	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0465	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.28	0.96	1.12	1.33	1.59	1.74	2.10	2.61	3.13	3.61	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	2.14	4.52	11.20	28.00	34.00	40.50	39.50	38.50	33.50	29.50	29.00	28.00	
	O ₂	%	21	20.6	19.2	11.5	3.8	2.2	1.0	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	
	CH ₄	%	0	0	0	0.5	4.5	9.0	11.5	12.5	15.0	17.5	19.0	21.5	24.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 4 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.6	9.3	8.5	7.8	6.9	6.2	5.2	4.5	4.0	3.6	3.2	3.0	2.9	2.7	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.7	1.5	2.2	3.1	3.8	4.8	5.5	6.0	6.4	6.8	7.0	7.1	7.3	7.5	7.7	7.8	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 10. ISPITIVANJE 6 - nastavak

MERENJE BR: 5		DATUM MERENJA: 1.12.2012.														
UZORAK: STRUGOTINA LIPE		VREME MERENJA: 12:12 12:52														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	15	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.87	10.40	12.90	15.37	17.92	21.50	23.77	24.75	25.52	26.58	26.72	28.67	30.25	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.8	8.6	6.2	4.6	3.3	2.9	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.2	1.4	3.8	5.4	6.7	7.1	7.2	7.4	7.6	7.7	7.8	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.28	0.52	0.82	0.96	1.13	1.22	1.51	2.54	3.04	3.97	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	1.98	4.25	11.60	28.50	34.00	42.50	41.50	40.50	35.00	30.50	29.00	28.00	27.50
	O ₂	%	21	20.2	17.8	12.6	4.2	2.6	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7
	CH ₄	%	0	0	0	0.5	4.5	8.0	12.0	13.5	15.5	17.5	19.5	22.5	25.5	27.0
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.6														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 5 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.7	9.4	8.6	7.5	6.6	5.9	5.3	4.6	3.9	3.6	3.4	3.2	3.0	2.9	2.7	2.5	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.6	1.4	2.5	3.4	4.1	4.7	5.4	6.1	6.4	6.6	6.8	7.0	7.1	7.3	7.5	7.7	7.8	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 11. PIROLIZA MEŠAVINE DRVNE BIOMASE (ISPITIVANJE 7)

MERENJE BR: 1			DATUM MERENJA: 4.12.2012.												
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE			VREME MERENJA: 11:52 - 12:32												
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638			MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	14	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.57	10.48	12.55	13.68	14.85	18.22	20.55	21.52	22.35	23.20	24.18	25.30	26.92
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.9	9.3	8.7	7.5	4.7	3.6	3.2	3.0	2.8	2.7	2.5	2.2
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.1	0.7	1.3	2.5	5.3	6.4	6.8	7.0	7.2	7.3	7.5	7.8
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0381	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.08	0.14	0.19	0.31	0.52	0.72	0.88	1.05	3.04	>4.00	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	2.00	2.25	6.80	14.60	32.50	45.50	43.00	39.00	35.00	33.50	31.50	29.50
	O ₂	%	21.0	20.6	19.8	16.7	12.5	3.4	0.8	0.8	0.6	0.3	0.6	0.5	0.5
	CH ₄	%	0	0	0	0	1.0	1.0	9.5	11.5	15.5	17.5	20.5	22.5	24.0
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.3													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 1 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.7	9.0	8.1	7.3	6.0	5.6	4.8	4.1	3.9	3.3	3.0	2.9	2.7	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	1.0	1.9	2.7	4.0	4.4	5.2	5.9	6.1	6.7	7.0	7.1	7.3	7.5	7.7	7.8	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 11. ISPITIVANJE 7 - nastavak

MERENJE BR: 2			DATUM MERENJA: 5.12.2012.													
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE			VREME MERENJA: 11:32 – 12:12													
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638			MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.0						
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	15	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	6.20	8.60	10.68	12.53	14.13	16.20	18.42	19.47	20.25	21.15	22.03	23.23	24.87	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.9	9.5	9.0	8.1	6.1	4.5	3.8	3.0	2.8	2.6	2.3	2.1	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.1	0.5	1.0	1.9	3.9	5.5	6.2	7.0	7.2	7.4	7.7	7.9	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0229	0.0435	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.26	0.33	0.38	0.63	0.93	1.05	1.15	1.39	2.96	4.00	4.00	4.00	
	CO ₂	%	0	1.20	2.30	3.15	4.30	18.80	39.00	36.50	35.50	34.00	32.50	31.50	30.50	30.00
	O ₂	%	21.0	21.0	20.2	18.6	16.8	7.4	0.8	0.8	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
	CH ₄	%	0	0	0.5	0.5	0.5	1.5	4.0	11.0	14.0	17.5	20.5	21.5	23.0	24.0
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.3														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	22														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 2 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.7	9.4	9.1	8.9	8.1	7.2	6.3	5.4	4.8	4.0	3.1	2.8	2.6	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.6	0.9	1.1	1.9	2.8	3.7	4.6	5.2	6.0	6.9	7.2	7.4	7.7	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 11. ISPITIVANJE 7 - nastavak

MARENJE BR: 3		DATUM MARENJA: 6.12.2012.														
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE		VREME MARENJA: 19:13 – 19:53														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640									
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	14	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8.05	9.83	12.33	13.83	16.05	18.13	20.37	21.45	22.43	23.28	24.30	25.33	26.65	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.8	9.2	8.5	6.7	5.1	3.3	2.9	2.8	2.7	2.6	2.4	2.3	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.2	0.8	1.5	3.3	4.9	6.7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.6	7.7	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0461	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.11	0.15	0.20	0.36	0.56	0.65	0.97	1.52	3.20	4.00	4.00	4.00	
	CO ₂	%	0	1.96	2.75	7.20	15.60	32.50	43.50	42.50	38.00	34.50	30.50	29.00	28.50	
	O ₂	%	21.0	20.3	19.2	16.6	10.5	3.2	0.8	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
	CH ₄	%	0	0	0	0	1.5	4.5	10.5	11.5	13.5	17.0	22.5	24.0	24.5	
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.3														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.6														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	23														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 3 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.8	9.6	9.3	8.9	8.4	7.5	6.7	6.0	5.1	4.1	3.4	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.7	1.1	1.6	2.5	3.3	4.0	4.9	5.9	6.6	7.0	7.1	7.3	7.4	7.5	7.7	7.7	7.8	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 11. ISPITIVANJE 7 - nastavak

MARENJE BR: 4		DATUM MARENJA: 7.12.2012.														
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE		VREME MARENJA: 9:58 –10:38														
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638		MASA PUNOG SUDA (g): 648							MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640							
Naziv veli ina	Jedinica															
Masa uzorka	g	10														
Temperatura u reaktoru	°C	14	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.98	9.87	12.08	13.63	15.80	17.88	20.12	21.20	22.18	23.03	24.05	24.55	26.35	
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	9.7	9.3	8.4	6.5	4.7	3.5	3.1	3.0	2.8	2.6	2.5	2.2	
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.3	0.7	1.6	3.5	5.3	6.5	6.9	7.0	7.2	7.4	7.5	7.8	
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0466	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
	H ₂	%	0	0.20	0.31	0.35	0.44	0.53	0.71	0.92	2.05	3.50	>4.00	>4.00	>4.00	
	CO ₂	%	0	1.92	2.90	7.60	15.80	33.50	39.50	36.50	35.00	33.50	30.50	29.50	29.00	28.00
	O ₂	%	21.0	20.2	19.2	14.6	10.0	3.6	0.8	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
	CH ₄	%	0	0	0	0	1.5	5.0	11.5	13.0	15.5	19.5	22.5	24.0	25.5	26.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.0														
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5														
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.5														
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	20														

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 4 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.7	9.5	9.3	8.9	8.1	7.2	6.3	5.5	4.7	4.9	3.5	3.1	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.1	1.9	2.8	3.7	4.5	5.3	5.1	6.5	6.9	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 11. ISPITIVANJE 7 - nastavak

MERENJE BR: 5			DATUM MERENJA: 7.12.2012.												
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE			VREME MERENJA: 19:17 – 19:57												
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638			MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.1						
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	15	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7.37	9.03	11.25	12.80	14.80	16.88	19.12	20.20	21.17	22.02	23.05	24.53	26.13
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10.0	10.0	10.0	9.6	9.1	7.9	6.0	4.2	3.5	3.1	3.0	2.9	2.6	2.5
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0.4	0.9	1.1	4.0	5.8	6.5	6.9	7.0	7.1	7.4	7.5
Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0	0.0362	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	H ₂	%	0	0.28	0.34	0.42	0.63	0.92	1.11	1.41	2.10	2.87	>4.00	>4.00	>4.00
	CO ₂	%	0	1.22	2.82	8.60	15.20	33.00	41.50	40.00	38.50	35.00	29.50	28.50	28.00
	O ₂	%	21.0	20.6	19.4	15.2	11.0	4.0	0.9	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	CH ₄	%	0	0	0.5	0.5	2.0	5.5	11.0	12.5	16.0	17.5	19.5	21.5	23.5
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.1													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.5													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize	g	5.4													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	21													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

MERENJE BR. 5 - nastavak

Naziv veli ina	Jedinica																																											
Masa uzorka	g	10																																										
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.6	9.3	9.2	9.1	8.6	6.9	6.0	4.9	4.2	3.5	3.1	3.0	2.9	2.8	2.6	2.5	2.6	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.7	0.8	0.9	1.4	3.1	4.0	5.1	5.8	6.5	6.9	7.0	7.1	7.2	7.4	7.5	7.4	7.7	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 12. PIROLIZA MEŠAVINE DRVNE BIOMASE PRI BRZINI ZAGREVANJA OD 32 ° C/min

MERENJE BR: 1														DATUM MERENJA: 19.11.2013.			
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE														VREME MERENJA: 11:27 - 11:57			
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638				MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.3							
Naziv veli ina		Jedinica															
Masa uzorka		g		10													
Temperatura u reaktoru		°C		19.4	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize		min		0	6.35	7.40	8.33	9.18	9.95	10.66	11.35	12.03	12.73	13.92	15.67	17.6	19.97
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)		g		10	10	9.8	9.4	8.8	8.3	7.0	5.8	4.3	3.2	3.0	2.7	2.5	2.4
Prinos piroliti kog gasa*		g		0	0	0.2	0.6	1.2	1.7	3.0	4.2	5.7	6.8	7.0	7.3	7.5	7.6
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize		g		2.3													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize		g		2.6													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize*		g		5.1													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru		°C/min		32													

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

Naziv veli ina		Jedinica																																
Masa uzorka		g		10																														
Vreme odvijanja procesa pirolize		min		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)		g		10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.8	9.0	8.3	6.3	4.3	3.1	3.0	2.9	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Prinos piroliti kog gasa*		g		0	0	0	0	1	1	1	0.1	0.3	0.6	1.1	2.0	4.0	5.9	6.8	6.1	7.3	7.5	7.5	7.6	7.6	7.6	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7

* Vrednosti odre ene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 12. - nastavak

MERENJE BR: 2										DATUM MERENJA: 22.11.2013.					
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE										VREME MERENJA: 10:03 - 10:33					
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638					MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640.3					
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	18	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	6.05	7.16	8.20	9.02	9.83	10.55	11.18	11.87	12.57	13.68	15.37	17.38	19.58
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	9.9	9.7	9.4	9.0	8.5	7.5	6.0	4.9	3.3	2.8	2.5	2.4
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0.1	0.3	0.6	1.0	1.5	2.5	4.0	5.1	6.7	7.2	7.5	7.6
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	2.3													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.6													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize*	g	5.1													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	32													

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

Naziv veli ina	Jedinica																															
Masa uzorka	g	10																														
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	9.9	9.7	9.4	8.9	8.0	6.0	4.1	3.2	2.9	2.7	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	1	1	1	0.1	0.3	0.6	1.1	2.0	4.0	5.9	6.8	6.1	7.3	7.5	7.5	7.6	7.6	7.6	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 13. PIROLIZA MEŠAVINE DRVNE BIOMASE PRI BRZINI ZAGREVANJA OD 55 ° C/min

MERENJE BR: 1														DATUM MERENJA: 13.11.2013.			
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE														VREME MERENJA: 12:18 - 12:48			
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638				MASA PUNOG SUDA (g): 648						MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.5							
Naziv veli ina		Jedinica															
Masa uzorka	g															10	
Temperatura u reaktoru	°C	20.3	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650		
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	3.58	4.57	5.18	5.72	6.17	6.62	7.07	7.55	8.10	8.75	9.52	10.35	11.33		
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	9.9	9.8	9.7	9.5	9.3	8.8	6.9	4.3	2.5	2.3		
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.2	3.1	5.7	7.5	7.7		
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g															1.5	
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g															2.7	
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize*	g															5.8	
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min															55	

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

Naziv veli ina		Jedinica																														
Masa uzorka	g																													10		
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	9.9	9.5	9.0	6.0	3.0	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	4.0	7.0	7.6	8.0	8.2	8.4	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

PRILOG 13. - nastavak

MERENJE BR: 2										DATUM MERENJA: 14.11.2013.					
UZORAK: MEŠAVINA DRVNE BIOMASE										VREME MERENJA: 9:46 - 10:06					
MASA PRAZNOG SUDA (g): 638					MASA PUNOG SUDA (g): 648					MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639.9					
Naziv veli ina	Jedinica														
Masa uzorka	g	10													
Temperatura u reaktoru	°C	20.3	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	4.08	5.03	5.65	6.08	6.62	7.07	7.45	7.90	8.42	9.07	9.97	10.77	11.67
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	9.8	9.6	9.3	9.0	8.9	8.0	7.1	4.5	2.6	2.2
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0.2	0.4	0.7	1.0	1.1	2.0	2.9	5.5	7.4	7.8
Masa vrstog ostatka na kraju procesa pirolize	g	1.9													
Masa te ne faze na kraju procesa pirolize	g	2.8													
Masa suvog piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize*	g	5.3													
Prose na brzina zagrevanja u reaktoru	°C/min	55													

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

Naziv veli ina	Jedinica																															
Masa uzorka	g	10																														
Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Promena mase uzorka (vrstog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	9.9	9.3	8.9	7.1	3.0	2.4	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0.1	0.7	1.1	2.9	7.0	7.6	7.9	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1

* Vrednosti odredene iz izraza $m_{\text{gas}} = m_0 - m$