



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNI KIH NAUKA U  
NOVOM SADU

---



Saša Brankov

**MOGU NOSTI KORIŠ ENJA  
ENERGIJE PIROLIZOM  
POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2016.



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNI KIH NAUKA U  
NOVOM SADU



# MOGU NOSTI KORIŠ ENJA ENERGIJE PIROLIZOM POLJOPRIVREDNE BIOMASE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor

Dr Slavko uri , vanredni profesor

Kandidat

Mr Saša Brankov

Novi Sad, 2016.



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNI KIH NAUKA  
21000 NOVI SAD, rg Dositeja Obradovi a 6

## KLJU NA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, <b>RBR</b> :	
Identifikacioni broj, <b>IBR</b> :	
ip dokumentacije, <b>TD</b> :	Monografska dokumentacija
ip zapisa, <b>Z</b> :	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada, <b>VR</b> :	Doktorski rad
utor, <b>U</b> :	Saša Brankov, magistar tehni kih nauka iz oblasti Industrijskog Inženjerstva i Menadžmenta
ntor, <b>N</b> :	Dr Slavko uri , vanredni profesor
Naslov rada, <b>NR</b> :	Mogu nosti koriš enja energije pirolizom poljoprivredne biomase
ezik publikacije, <b>P</b> :	Srpski
ezik izvoda, <b>I</b> :	Srpski/Engleski
Zemlja publikovanja, <b>ZP</b> :	Srbija
Uže geografsko podru je, <b>UGP</b> :	Vojvodina
Godina, <b>G</b> :	2016.
Izdava , <b>IZ</b> :	Autorski reprint
sto i adresa, :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovi a 6
Fizi ki opis rada, <b>F</b> : (poglavlja/strana/ citata/tabela/slika/grafika/priloga)	6/-/111/17/42/-/12
Nau na oblast, <b>NO</b> :	Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu
Nau na disciplina, <b>ND</b> :	Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu
Predmetna odrednica/ lju ne re i, <b>P</b> :	Poljoprivredna biomasa, piroliza, prinos gasa, prinos vrstog (koksno) ostatka, prinos bio-ulja
<b>UDK</b>	
uva se, <b>U</b> :	U biblioteci Fakulteta tehni kih nauka, Trg Dositeja Obradovi a 6, Novi Sad
Važna napomena, <b>VN</b> :	
Izvod, <b>IZ</b> :	U doktorskoj disertaciji realizovano je istraživanje mogu nosti konverzije energije razli itih vrsta poljoprivredne biomase procesom pirolize. Ispitivanu poljoprivrednu biomasu predstavljale su pšeni na, ovsena, sojina slama, slama od kukuruzovine kao i mešavina navedenih slama. Dobijeni eksperimentalni rezultati ukazuju da prinos gasa, te ne i vrste faze tokom odvijanja procesa pirolize zavise od više parametara vo enja procesa me u kojima dominantan uticaj imaju reakciono vreme, temperatura i brzina zagrevanja.
Datum prihvatanja teme, <b>DP</b> :	
Datum odbrane, <b>DO</b> :	
lanovi komisije, :	Predsednik: Dr Maja Turk – Sekuli , vanredni profesor
lan:	Dr Ejub Džaferovi , redovni profesor
lan:	Dr Petko stanojevi , docent
lan:	Dr Dragan Adamovi , docent
lan, mentor:	Dr Slavko uri , vanredni profesor
	Potpis mentora



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monograph documentation
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	Ph.D. thesis
Author, <b>AU</b> :	Saša Brankov, master of Science in Industrial Engineering and Management
Mentor, <b>MN</b> :	Ph.D. Slavko uri , associate professor
Title, <b>TI</b> :	The possibilities for application of energy from agricultural biomass pyrolysis
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian/English
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2015
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovi a 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6/-/111/17/42/-/12
Scientific field, <b>SF</b> :	Environmental Engineering and Occupational Safety
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Environmental Engineering and Occupational Safety
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Agricultural biomass, pyrolysis, gas yield, char yield, bio-oil yield
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovi a 6
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	Doctoral dissertation investigates possibilities for energy conversion of different agricultural biomass types through pyrolysis process. Investigated agricultural biomass included wheat, corn, oat, soy straw and the mixture of mentioned straws. Obtained experimental results imply that gas, liquid and solid phase yields during pyrolysis process depend on various process parameters, where the reaction time, temperature and heating rate have dominant influence.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	President: Ph. D. Maja Turk – Sekuli , associate professor
	Member: Ph. D. Ejub Džaferovi , full professor
	Member: Ph. D. Petko Stanojevi , assistant professor
	Member: Ph. D. Dragan Adamovi , assistant professor
	Member, Mentor: Ph.D. Slavko uri , associate professor
	Mentor's sign

## SADRŽAJ

Popis slika	i
Popis tabela	iii
Popis oznaka i simbola	iv
1. Uvod	1
1.1. Pregled vladajućih stavova i shvatanja u literaturi u području istraživanja	2
1.2. Predmet i cilj istraživanja	4
1.3. Polazne hipoteze	4
1.4. Metodologija istraživanja	5
1.5. Struktura rada	5
Literatura	7
2. Biomasa kao obnovljiv izvor energije	9
2.1. Potencijal biomase	9
2.1.1. Potencijal biomase u Republici Srbiji	10
2.2. Zakonska regulativa o obnovljivim izvorima energije u Evropskoj uniji i Republici Srbiji	12
Literatura	16
3. Fizičko – hemijske osobine poljoprivredne biomase	17
3.1. Poljoprivredna biomasa kao gorivo	17
3.2. Hemijski sastav poljoprivredne biomase	18
3.2.1. Sastav poljoprivredne biomase	18
3.2.1.1. Celuloza	18
3.2.1.2. Hemiceluloza	19
3.2.1.3. Lignin	19
3.3. Tehničke i elementarna analiza poljoprivredne biomase	21
3.3.1. Ugljenik	23
3.3.2. Fiksni ugljenik	24
3.3.3. Vodonik	24
3.3.4. Azot	24
3.3.5. Sumpor	25
3.3.6. Kiseonik	25
3.3.7. Isparljive materije – volatili	26
3.3.8. Pepeo	26
3.3.9. Vlaga	27
3.4. Poređenje rezultata tehničke i elementarne analize sa literaturnim podacima	27
3.5. Uticaj hemijskog sastava poljoprivredne biomase na toplotnu moć	28
3.6. Kvalitativna ocena karakteristika mešavine navedenih biomasa	30
Literatura	32
4. Termički procesi prerade poljoprivredne biomase	34
4.1. Piroлиза	35

4.1.1. Uvod	35
4.1.2. Vrste pirolize	35
4.1.2.1. Spora piroliza	36
4.1.2.2. Fleš piroliza	36
4.1.2.3. Brza piroliza	36
4.1.3. Reakcije procesa pirolize	36
4.1.4. Reaktori za pirolizu	36
4.2. Gasifikacija	40
4.2.1. Uvod	40
4.2.2. Postupak gasifikacije	40
4.2.2.1. Reakcije u zonama sagorevanja i redukcije pri procesu gasifikacije	40
4.2.3. Stvaranje produkata procesom gasifikacije	41
4.2.4. Reaktori za gasifikaciju	42
4.2.4.1. Reaktori sa fiksnim slojem	42
4.3. Sagorevanje	46
4.3.1. Uvod	46
4.3.2. Tehnologije sagorevanja i njihova primena	46
4.3.2.1. Sagorevanje na rešetki	47
4.3.2.2. Sagorevanje u sloju uz doziranje goriva odozdo	47
4.3.2.3. Sagorevanje u barbotaznom fluidizovanom sloju	48
4.3.2.4. Sagorevanje u cirkulacionom fluidizovanom sloju	48
4.3.2.5. Sagorevanje u letu	48
4.3.3. Tehnologije sagorevanja biomase u Republici Srbiji	49
4.3.4. Stehiometrijske jedna ine sagorevanja poljoprivredne biomase	49
4.3.4.1. Primer prora una materijalnog bilansa procesa sagorevanja mešavine navedenih biomasa	54
4.3.5. Odre ivanje adijabatske temperature sagorevanja mešavine navedenih biomasa	57
4.3.5.1. Primer prora una entalpije dimnih gasova	58
Literatura	62
5. Eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize poljoprivredne biomase	64
5.1. Uzorkovanje i priprema poljoprivredne biomase	64
5.2. Tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase	65
5.3. Šema i opis laboratorijskog postrojenja za pirolizu poljoprivredne biomase	66
5.4. Rezultati i analiza eksperimentalnog ispitivanja pirolize poljoprivredne biomase	73
5.4.1 Uticaj temperature na prinos produkata pirolize	73
5.4.2. Uticaj reakcionog vremena na prinos produkata pirolize	74
5.4.3. Uticaj brzine zagrevanja na prinos produkata pirolize	76
5.4.4. Uticaj vrste poljoprivredne biomase na prinos produkata pirolize	77
5.4.5. Pore enje prinosa produkata pirolize sa podacima iz literature	79
5.4.6. Sastav produkata pirolize dobijenih eksperimentalnim putem	79
5.4.6.1. Sastav piroliti kog gasa	79

5.4.6.2. Sastav piroliti kog ulja	82
5.4.6.3. Sastav koksnog ostatka	84
5.5. Obrada rezultata ispitivanja procesa pirolize mešavine navedenih slama (kukuruzne, pšeni ne, sojine i ovsene)	85
5.5.1. Karakteristike proizvedenog gasa	85
5.5.2. Materijalni bilans u piroliti kom reaktoru	87
5.5.3. Toplotni bilans u piroliti kom reaktoru	89
5.5.4. Stepen korisnosti piroliti kog reaktora	92
Literatura	93
 6. Zaključak	 97
 Prilozi	
Prilog P1: Mase produkata sagorevanja mešavine navedenih biomasa u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	99
Prilog P2: Zapremine produkata sagorevanja mešavine navedenih biomasa u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	100
Prilog P3: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu	101
Prilog P4: Srednja masena specifi na toplota nekih gasova	102
Prilog P5: Entalpija dimnih gasova pri sagorevanju mešavine navedenih biomasa	103
Prilog P6: Piroliza slame kukuruzovine (ispitivanje 1)	104
Prilog P7: Piroliza pšeni ne slame (ispitivanje 2)	114
Prilog P8: Piroliza sojine slame (ispitivanje 3)	124
Prilog P9: Piroliza ovsene slame (ispitivanje 4)	134
Prilog P10: Piroliza mešavine navedenih biomasa (ispitivanje 5)	144
Prilog P11: Piroliza mešavine navedenih biomasa pri brzini zagrevanja od 30 °C/min (ispitivanje 6)	154
Prilog P12: Piroliza mešavine navedenih biomasa pri brzini zagrevanja od 54 °C/min (ispitivanje 7)	158

## Popis slika

Naziv slike	Broj stranice	
Slika 2.1.	Tehni ki i održivi potencijal biomase do 2050. godine	10
Slika 2.2.	Struktura potencijala obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji	11
Slika 3.1.	Hemijska struktura celuloze	19
Slika 3.2.	Hemijska struktura hemiceluloze	19
Slika 3.3.	Naj eš e hemijske strukture lignina	20
Slika 3.4.	Grafi ki prikaz analize elementarnog sastava poljoprivredne biomase	22
Slika 3.5.	Zavisnost donje toplotne mo i goriva poljoprivredne biomase od masenog udela vlage i pepela	30
Slika 4.1.	Termini ki postupci prerade poljoprivredne biomase	34
Slika 4.2.	Reaktor sa barbotaznim fluidizovanim slojem	37
Slika 4.3.	Reaktor sa cirkulacionim fluidizovanim slojem	37
Slika 4.4.	Rotiraju i konusni reaktor za pirolizu	38
Slika 4.5.	Reaktor za vakum pirolizu	39
Slika 4.6.	Reaktor za ablativnu pirolizu	39
Slika 4.7.	Reaktor sa fiksnim slojem sa tokom nagore	42
Slika 4.8.	Reaktor sa fiksnim slojem sa tokom nadole	43
Slika 4.9.	Reaktor sa barbotaznim fluidizovanim slojem	44
Slika 4.10.	Cirkulacioni gasifikator sa fluidizovanim slojem	45
Slika 4.11.	Istosmerni proto ni gasifikator	45
Slika 4.12.	Sagorevanje u nepokretnom sloju, barbotaznom i cirkulacionom fluidizovanim slojem i sagorevanje u letu	47
Slika 4.13.	Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja mešavine poljoprivredne biomase	55
Slika 4.14.	Zapremina dimnih gasova u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	56
Slika 4.15.	Sastav vlažnih dimnih gasova u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	56
Slika 4.16.	Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja poljoprivredne biomase i koeficijenta viška vazduha	60



Slika 5.1.	Fotografski prikaz poljoprivredne biomase koriš ene pri eksperimentalnom ispitivanju procesa pirolize	64
Slika 5.2.	Mlin za usitnjavanje poljoprivredne biomase	65
Slika 5.3.	Šema eksperimentalnog postrojenja za pirolizu poljoprivredne biomase i prikaz mernih mesta	67
Slika 5.4.	Digitalna vaga METTLER P1000	68
Slika 5.5.	Digitalni pokaziva temperature Testo 925	69
Slika 5.6.	Gasni analizator G 750 POLYLECTOR II	69
Slika 5.7.	Eksperimentalno postrojenje za ispitivanje pirolize poljoprivredne biomase	70
Slika 5.8.	Fotografski prikaz elektri ne pe i i reaktorske posude	71
Slika 5.9.	Šema elektri ne pe i a) i reaktorske posude b)	72
Slika 5.10.	Kriva gubitka mase uzorka razli itih vrsta poljoprivredne biomase u opsegu temperature 25-650 °C (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)	73
Slika 5.11.	Prinos piroliti kog gasa u zavisnosti od temperature pirolize (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)	74
Slika 5.12.	Kriva gubitka mase uzorka poljoprivredne biomase u zavisnosti od reakcionog vremena (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21°C/min)	75
Slika 5.13.	Prinos piroliti kog gasa u zavisnosti od reakcionog vremena (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)	75
Slika 5.14.	Kriva gubitka mase uzorka mešavine poljoprivredne biomase u zavisnosti od reakcionog vremena i brzine zagrevanja uzorka	77
Slika 5.15.	Fotografski prikaz promene biomase tokom procesa pirolize a) Uzorak biomase pre procesa pirolize, b) Koksni ostatak nakon procesa pirolize, c) Piroliti ko ulje (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)	78
Slika 5.16.	Promene zapreminskih udela CO <sub>2</sub> tokom procesa pirolize razli itih vrsta biomase u zavisnosti od reakcione temperature (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21°C/min)	80
Slika 5.17.	Promene zapreminskih udela CH <sub>4</sub> tokom procesa pirolize razli itih vrsta biomase u zavisnosti od reakcione temperature (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)	81
Slika 5.18.	Šema materijalnog bilansa u piroliti kom reaktoru	89
Slika 5.19.	Šema bilansa toplote u piroliti kom reaktoru	92

## Popis tabela

Naziv tabele	Broj stranice
Tabela 2.1. Potencijalne količine biomase iz ostatka poljoprivredne proizvodnje u Republici Srbiji	11
Tabela 3.1. Hemijski sastav različitih vrsta poljoprivrednih biomasa	21
Tabela 3.2. Faktori konverzije za elementarne analize poljoprivredne biomase	23
Tabela 3.3. Sadržaj vlage različitih vrsta biomase	27
Tabela 3.4. Elementarna i tehnička analiza različitih vrsta poljoprivrednih biomasa prema različitim autorima	27
Tabela 3.5. Tehnička i elementarna analiza poljoprivredne biomase korištena pri eksperimentalnom ispitivanju procesa pirolize	28
Tabela 3.6. Kvalitativne karakteristike mešavine poljoprivredne biomase	31
Tabela 4.1. Zavisnost konstanti ravnoteža hemijskih reakcija od temperature	61
Tabela 5.1. Tehnička i elementarna analiza poljoprivredne biomase	65
Tabela 5.2. Elementarna i tehnička analiza različitih vrsta poljoprivredne biomase iz literature	66
Tabela 5.3. Opis mernih instrumenata korištenih tokom eksperimentalnog ispitivanja	68
Tabela 5.4. Prinos pirolitičkog ulja pri različitim brzinama zagrevanja na kraju procesa pirolize	77
Tabela 5.5. Poređenje prinosa produkata pirolize poljoprivredne biomase sa podacima iz literature	79
Tabela 5.6. Poređenje sastava pirolitičkog gasa dobijenog pirolizom poljoprivredne biomase sa podacima iz literature	81
Tabela 5.7. Karakteristike pirolitičkog ulja dobijenog pirolizom poljoprivredne biomase	83
Tabela 5.8. Osnovne karakteristike pirolitičkog ulja dobijenog pirolizom poljoprivredne biomase	83
Tabela 5.9. Osobine koksnog ostatka dobijenog pirolizom različitih vrsta poljoprivredne biomase	85

## 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
$E_G$	Toplota (energija) grejanja, 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
h	Entalpija, kJ/kg
$h_f$	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
$m_o$	Početna masa uzorka, g
$m_i$	Masa komponente i u dimnim gasovima, kg/kg
$m_{vl}$	Masa vlažne poljoprivredne biomase, kg
$m_s$	Masa apsolutno suve poljoprivredne biomase, 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 %
	Stepen korisnosti pirolitičkog reaktora, %
$\eta_c$	Stepen konverzije ugljenika, %
$\eta_{N_2}$	Stepen konverzije azota, %
$\eta_{O_2}$	Stepen konverzije kiseonika, %
s	Stepen konverzije sumpora, %
	Koeficijent viška vazduha

	Gustina, kg/m <sup>3</sup>
	Standardno odstupanje
	Vreme, min ili h
$i$	Zapreminski udeo komponente $i$ u dimnim gasovima
$\bar{X}$	Aritmetička sredina
$X_i$	Vrednosti razmatranih (obeležja) karakteristika poljoprivredne biomase
$Q$	Toplotno opterećenje, kJ/m <sup>3</sup>
$W$	Maseni udeo vlage u gorivu, kg/kg ili %

## 1. UVOD

ovekov položaj u biosferi je, u odnosu na sva ostala živa bi a, svojevrsan i izuzetan po tome što je on misaono bi e, ali i zato što je jedan od najmo njih ekoloških faktora na Zemlji. Svojim aktivnostima ovek menja fizi ke uslove i izgled predela. Tokom poslednjih sto godina, koriš enje energije fosilnih goriva drasti no je uticalo na atmosferu i promenu klimatskih uslova.

Temperaturu Zemlje regulišu atmosferski gasovi, uglavnom ugljen dioksid, ali i drugi gasovi kao što su azotni oksidi, ozon, hloro-fluoro-karbonati i metan, koji dozvoljavaju sun evoj energiji da prodre do Zemlje, ali zarobljavaju toplotu emitovanu sa površine Zemlje. Nau nici su zabrinuti da e pomenuti gasovi koji dospevaju u atmosferu ljudskim aktivnostima pove ati zagrevanje do nivoa do sada nezabeleženog u istoriji ove anstva. Emisije ugljen dioksida koje nastaju usled koriš enja fosilnih goriva što ini otprilike 85% ukupnih svetskih potreba za primarnom energijom, dovode do zna ajnog porasta CO<sub>2</sub> koncentracije u atmosferi.

Savremeni izazovi ove anstva u zadovoljavanju potreba za energijom postavljaju potpuno nove horizonte za goriva i tehnologije koje e se u budu nosti koristiti. Biomasa kao primarni izvor energije po ela je ponovo da se razmatra prilikom rešavanja problema klimatskih promena [1]. Mnoge zemlje širom sveta sprovode istraživanja kako bi se procenile mogu nosti primene biomase u energetske svrhe [2, 3, 4, 5, 6]. Navedena istraživanja ukazuju da e u budu nosti biomasa predstavljati zna ajan obnovljiv izvor energije koji omogu ava smanjenje zavisnosti od fosilnih goriva, sigurnost snabdevanja, smanjenje zaga enja životne sredine i otvaranje novih radnih mesta. Istovremeno, za primenu biomase postavljaju se novi, savremeni zahtevi koji se odnose na spre avanje ugrožavanja lanca ishrane i zadovoljenja kriterijuma održivosti [7].

Hemijsku energiju biomase mogu e je transformisati u toplotnu i/ili elektri nu energiju, primenom razli itih procesa termi ke konverzije biomase kao što su: sagorevanje, gasifikacija i piroliza [8]. U odnosu na proces sagorevanja, procesi pirolize i gasifikacije predstavljaju fleksibilnije i efikasnije procese termi ke konverzije hemijske energije biomase u elektri nu i/ili toplotnu energiju, proizvodnju biogoriva i u brojna hemijska jedinjenja. Procesom sagorevanja, hemijska energija biomase se osloba a u vidu toplotne energije [8]. Prednost pirolize u odnosu na proces sagorevanje jeste dobijanje šireg spektra zna ajnih produkata: bio-ulja (tera), koksnog ostatka i gasa, dok su emisije zaga uju ih materija zna ajno niže. Koksnii ostatak dobijen procesom pirolize esto se koristi kao ubrivo i za remedijaciju zemljišta koje sadrži teške metale i organske zaga uju e materije. Piroliti ki gas uspešno se koristi za proizvodnju toplotne i elektri ne energije ili se sintetiše kako bi se dobio metanol i amonijak. Široka primena i pozitivne osobine produkata pirolize usmerili su istraživanja u

doktorskoj disertaciji na optimizaciju parametara procesa pirolize radi unapre ivanja nastalih produkata.

### 1.1. PREGLED VLADAJU IH STAVOVA I SHVATANJA U LITERATURI U PODRU JU ISTRAŽIVANJA

Dosadašnja istraživanja pirolize pokazuju da bi radi zadovoljavanja energetske potrebe i ekoloških principa, naro ito u zemljama u razvoju kao što je Republika Srbija, trebalo koristiti poljoprivredne ostatke dostupne u velikoj koli ini, za proizvodnju energetski vrednih produkata. Trenutno, istraživanja procesa pirolize biomase usmeravaju pažnju na pove anje prinosa te ne faze i prou avanje funkcionalnih grupa i hemijskih jedinjenja prisutnih u te nom produktu. Proces pirolize i prinos produkata pirolize najviše zavise od parametara procesa.

Yang i saradnici [9] istraživali su uticaj osnovnih komponenata biomase na karakteristike procesa pirolize koriste i termogravimetrijsku analizu. Hemiceluloza se lako razlaže i do pirolize dolazi pri temperaturi 220 – 315 °C. Piroliza celuloze odvija se pri temperaturi 315 – 400 °C. Piroliza lignina pokriva širok opseg temperature (150 – 900 °C). Ispitivanjem uticaja celuloze, hemiceluloze i lignina na gasovite produkte pirolize došlo se do zaklju ka da do osloba anja CO<sub>2</sub> dolazi uglavnom primarnom pirolizom, dok sekundarna piroliza dovodi do osloba anja CO i CH<sub>x</sub>. Hemiceluloza, zbog ve eg broja karboksilnih grupa, uti e na ve i prinos CO<sub>2</sub>. Piroliza celuloze daje ve i prinos CO, zbog termi kog razlaganja jedinjenja sa karbonilnim i karboksilnim grupama. Usled ve eg prisustva aromati nih jedinjenja i metoksil grupa, razlaganje lignina dovodi do ve eg prinosa H<sub>2</sub> i CH<sub>x</sub>.

Kirubakaran i saradnici [10] su razmatrali uticaj veli ine estica, strukture, okoline, temperature, brzine zagrevanja, sastava biomase i pepela na gasifikaciju/pirolizu biomase. Došli su do slede ih zaklju aka:

- Protok gasa nosa a spre ava sekundarno razlaganje koksnog ostatka na gas i dovodi do ve eg prinosa koksnog ostatka koji je jednak sadržaju fiksnog ugljenika u biomasi.
- Svaka vrsta biomase ima dovoljan sadržaj kiseonika za konverziju vrste materije u gasovito gorivo.
- Pepeeo predstavlja katalizator reakcije gasifikacije. Odsustvo pepela u biomasi pove ava prinos te ne faze i smanjuje prinos gasa.

Bridgewater [11] je analizirao unapre ivanje te nog proizvoda pirolize i proizvodnju hemijskih supstanci pirolizom biomase uz dodavanje razli itih katalizatora. Katalizatori koji su ve prisutni u biomasi uti u na visok prinos hemijskih supstanci. Uklanjanje ili poja avanje pomenutih katalizatora ima zna ajan uticaj na prinos i sastav produkata, pa je donet zaklju ak da se katalizatori mogu koristiti za pove anje prinosa ili kvaliteta gasa.

Islama i Ani [12] izvršili su tehnoeкономsku analizu proizvodnje bio-ulja brzom pirolizom ljuške pirin a u fluidizovanom sloju sa i bez katalizatora u postrojenjima kapaciteta 0,3, 100 i 1000 kg/h. Zaklju ili su da prisustvo katalizatora pove ava troškove, dok manji kapacitet postrojenja smanjuje proizvodne troškove.

Uticaj više parametara, temperature opsega izme u 300 i 800 °C, veli ine estica izme u 0,4 i 2 mm u pre niku, po etne mase uzorka od 2,5 do 10 g i protoka azota od 100 do 300 cm<sup>3</sup>/min na pirolizu *Cynara cardunculus L* i toplotnu mo produkata pirolize ispitivali su Encinar i saradnici [13] u reaktoru sa fiksnim slojem. Istraživanje je pokazalo da na prinos produkata

zna ajno uti e temperatura, ali ne i veli ina estica, protok azota i po etna masa uzorka. Maksimalan prinos bio-ulja postignut je pri temperaturi izme u 400 i 500 °C. Najve a toplotna mo nastalog koksnog ostatka iznosila je 31 MJ/kg.

Zabanitou i saradnici [14] poredili su rezultate dobijene eksperimentalnim ispitivanjem spore, brze i kataliti ke pirolize pet razli itih vrsta lignocelulozne biomase (oklasak kukuruza i kukuruzna stabljika, ostaci suncokreta, koštice maslina i ostaci od rezidbe drveta masline). Prinos gasa dobijenog brzom pirolizom bio je ve i u odnosu na sporu pirolizu, sa ili bez katalizatora. Kukuruzna stabljika dala je ve i prinos gasa u odnosu na ostale vrste biomase. Pirolizom biomase sa ve im sadržajem celuloze i hemiceluloze dobijen je ve i prinos vodonika, u odnosu na biomasu sa ve im sadržajem lignina. Ljuske maslina i kukuruzni ostaci (oklasak i stabljika) dali su najve i prinos te nog produkta. Katalizatori su pove ali prinos te nog produkta kod oklaska kukuruza i koštica maslina, dok su na ostale vrste biomase imali suprotan efekat. Dodavanje katalizatora uticalo je na ve u proizvodnju vode i manju proizvodnju organskih materija. Pirolizom ostataka suncokreta dobijen je ve i prinos koksnog ostatka u odnosu na druge poljoprivredne ostatke, što je zabeleženo i pri brzom i pri sporom pirolizi.

Das i Ganesh [15] prou avali su uticaj temperature na pirolizu ljuske indijskog oraha u postrojenju za vakuum pirolizu sa fiksnim slojem. Najve i prinos bio-ulja dobijen je pri temperaturi od 500 °C. Toplotna mo proizvedenog bio-ulja iznosila je 40 MJ/kg, što je bilo približnije vrednosti toplotne mo i nafte u odnosu na ranija istraživanja, što je dovelo do zaklju ka da bio-ulje dobijeno pirolizom ljuski indijskog oraha ima veliki potencijal kao gorivo. Bio-ulje je sadržalo mali udeo pepela (0,01%), dok je udeo vode iznosio samo 3-3,5 %.

Williams i Nugranad [16] ispitivali su uticaj katalizatora na prinos i sastav produkata pirolize ljuske pirin a u reaktoru sa fluidizovanim slojem. Za analizu sastava piroliti kog ulja koristili su gasno hromatografsku analizu. Katalizator zeolit ZSM-5 koriš en je kako bi se unapredio prinos i sastav te nog produkta. Pre dodavanja katalizatora, piroliti ko ulje bilo je homogeno, male viskoznosti i sa velikim sadržajem kiseonika. Policikli ni aromati ni ugljovodonici (PAH) bili su prisutni u piroliti kom ulju u malim koncentracijama, koje su se pove avale sa porastom temperature. Prinos ulja kao i sadržaj kiseonika u ulju smanjeni su sa dodatkom katalizatora.

Sporu pirolizu komine masline istraživali su u reaktoru sa fiksnim slojem pri razli itim radnim uslovima ensoz i saradnici [17]. Ispitivan je uticaj temperature u opsegu od 350 do 550 °C sa brzinama zagrevanja 10 i 50 °C/min na prinos produkata pirolize. Veli ina estica i protok gasa nosa a varirali su u opsegu 0,224–1,8 mm i 50–200 cm<sup>3</sup>/min, respektivno. Pri brzini zagrevanja od 10 °C/min prinos bio-ulja iznosio je 27,8 % pri temperaturi pirolize od 350 °C. Maksimalan prinos bio-ulja zabeležen je pri temperaturi od 500 °C i iznosio je 34,4 %. Analiza hemijskog sastava pokazala je da bio-ulje dobijeno pirolizom komine maslina ima veliki potencijal za koriš enje kao gorivo.

Pütün i saradnici [18] ispitivali su sporu pirolizu sojine sa me u reaktoru sa fiksnim slojem i prou avali uticaj veli ine estica na prinos piroliti kog ulja. Prime en je porast prinosa piroliti kog ulja sa 26,74 na 30,23 % kada je veli ine estice pove ana sa 0,224-0,425 mm na 0,850-1,250. Zaklju ili su da je maksimalan prinos piroliti kog ulja postignut za veli inu estica izme u 0,850-1,250 mm.

Pirolizu stabljike pamuka prou avali su Pütün i saradnici [19]. Istraživanje je vršeno za različite veličine estica, pri temperaturi 550 °C i brzini zagrevanja 7 °C/min. Zaključilo se da veličina estica nije imala značajan uticaj na koksni ostatak. Međutim, povećanje veličine estica uticalo je na povećanje prinosa pirolitičkog ulja.

Sporu pirolizu stabljike pirin prou avali su Pütün i saradnici [20] kako bi ispitali uticaj parametara procesa pirolize na prinos produkata. Brzina protoka gasa nosa varirala je od 50 do 400 ml/min, a veličina estica od 0,425-0,850 mm. Dobijeni rezultati su pokazali da je najveći prinos bio-ulja u statičnoj atmosferi iznosio 27,77 %, dok je za protok azota od 200 cm<sup>3</sup>/min, a maksimalan prinos bio-ulja iznosio je 30,23%.

Sporu pirolizu pamu ne sa me u reaktoru sa fiksnim slojem prou avali su Özbay i saradnici [21]. Brzine protoka vodene pare iznosile su 0,6, 1,3 i 2,7 cm/s, respektivno. Najveća vrednost prinosa bio-ulja postignuta je za brzinu protoka vodene pare 1,3 cm/s.

Prinos produkata pirolize uljane repice prou avali su Haykiri i saradnici [22] termogravimetrijskom analizom. Brzine zagrevanja iznosile su 5, 10, 20, 30, 40 i 50 K/min, krajnja temperatura 1273 K, a protok azota 40 cm<sup>3</sup>/min. Utvrdili su značajne promene u režimu gubitka mase sa povećanjem brzine zagrevanja. Krajnja temperatura pirolize takođe je zavisila od brzine zagrevanja. Usled nedovoljnih interakcija estica pri većim brzinama zagrevanja, proces pirolize nastavio se i pri visokim temperaturama.

Kumar i saradnici [23] su termogravimetrijskom analizom ispitivali pirolizu kukuruzovine sa azotom i vazduhom. Brzine zagrevanja iznosile su 10, 30 i 50 °C/min. Gubitak mase uzorka kukuruzovine odvijao se u tri faze. Ustanovljeno je da do prve faze razlaganja dolazi u opsegu temperature 25-125 °C, druge od 250 do 450 °C, a treće 450-560 °C.

## 1.2. PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja u doktorskoj disertaciji predstavljaju produkti dobijeni procesom pirolize različitih vrsta poljoprivredne biomase: slame kukuruzovine, pšenične slame, ovsene slame, sojine slame i mešavine navedenih slama u jednakoj razmeri. Ispitivani su prinos gasa, te ne i vrste faze, promena mase uzorka i sastav gasa u zavisnosti od vremena i temperature.

Cilj doktorske disertacije je eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize različitih vrsta poljoprivredne biomase kao potencijalnih izvora energije. Izvršena je tehnička i elementarna analiza sastava uzoraka slame od kukuruzovine, pšenične, ovsene, sojine slame i mešavine datih slama. Dobijeni podaci služe kao osnova za definisanje materijalnog i toplotnog bilansa procesa pirolize, što je značajno pri projektovanju i dimenzionisanju pirolitičkih reaktora. Eksperimentalno istraživanje u doktorskoj disertaciji obuhvata ispitivanje uticaja procesnih parametara (pirolitičke temperature, reakcionog vremena i brzine zagrevanja) na prinos koksnoeg ostatka i pirolitičkog gasa. Tehnički i elementarnom analizom koksnoeg ostatka dobijeni su podaci potrebni za proračun materijalnog bilansa procesa pirolize.

## 1.3. POLAZNE HIPOTEZE

Piroliza poljoprivredne biomase predstavlja proces termohemijske konverzije koji ima industrijski i ekološki značaj. Na osnovu pregleda literature iz oblasti pirolize biomase definisane su polazne hipoteze u doktorskoj disertaciji:



- Temperatura pirolize je parametar koji zna ajno uti e na prinos produkata pirolize. Pove anjem temperature pirolize raste prinos piroliti kog gasa, dok prinos koksnog ostatka opada.
- Sa porastom reakcionog vremena raste prinos piroliti kog gasa, dok prinos koksnog ostatka opada.
- Pove anje brzine zagrevanja dovodi do smanjenja prinosa koksnog ostatka, dok prinos volatila raste.
- Maseni udeo piroliti kog ulja raste sa pove anjem brzine zagrevanja.
- Prinos produkata pirolize zavisi od vrste koriš ene poljoprivredne biomase.
- Zapreminski udeo ugljen dioksida opada, dok zapreminski udeo metana u piroliti kom gasu raste sa porastom temperature.
- Procesom pirolize poljoprivredne biomase dobijaju se vredni produkti koji se dalje mogu koristiti kao energent ili kao polazna sirovina za druge procese.
- Projektovanjem laboratorijskog postrojenja za pirolizu poljoprivredne biomase sti e se uvid u složenost procesa pirolize.

#### **1.4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA**

Pri izradi doktorske disertacije koriš ene su slede e metode:

- Metode prikupljanja podataka:
  - Analiza podataka iz objavljenih relevantnih nau nih publikacija
  - Gravimetrijska metoda odre ivanja mase uzorka
  - Eksperiment (vršen u laboratorijskim uslovima), merenje, posmatranje
- Metode obrade podataka:
  - Statisti ke metode obrade eksperimentalnih podataka
  - Komparativna metoda analize.

#### **1.5. STRUKTURA RADA**

Doktorsku disertaciju ini šest celina:

*1. Uvod* - prikazan je pregled vladaju ih stavova i shvatanja u oblasti procesa pirolize biomase, postavljene su polazne hipoteze, predmet i cilj rada i razmotrene su koriš ene nau ne metode.

*2. Biomasa kao obnovljiv izvor energije* - prikazan je potencijal biomase u svetu i Republici Srbiji. Potom je predstavljena zakonska regulativa o obnovljivim izvorima energije u Evropskoj uniji (EU) i Republici Srbiji.

*3. Fizi ko - hemijske osobine poljoprivredne biomase* - opisane su karakteristike poljoprivredne biomase kao goriva. Prikazana je tehni ka i elementarna analiza etiri vrste poljoprivredne biomase (slame kukuruzovine, pšeni na, sojina i ovsena slama), kao i mešavina datih slama. Ura eno je pore enje tehni ke i elementarne analize navedenih vrsta poljoprivredne biomase sa podacima iz literature. Razmatran je uticaj sastava poljoprivredne biomase na toplotnu mo i prikazana je kvalitativna ocena mešavine navedenih biomasa kao goriva.

*4. Termini procesi prerade poljoprivredne biomase* - razmatrani su: piroliza, gasifikacija i sagorevanje. Izvršena je analiza postoje ih rešenja za termi ku preradu biomase. Osim toga,

prikazana je stehiometrija sagorevanja poljoprivredne biomase i odre ena je adijabatska temperatura sagorevanja mešavine poljoprivredne biomase.

5. *Ekperimentalno ispitivanje procesa pirolize poljoprivredne biomase* - opisano je uzorkovanje i priprema poljoprivredne biomase. Prikazan je uticaj temperature, reakcionog vremena i brzine zagrevanja na prinos produkata pirolize, kao i pore enje prinosa produkata pirolize sa podacima iz literature. Analiziran je sastav dobijenog piroliti kog gasa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ), kao i sastav koksnog ostatka i piroliti kog ulja. Tako e, u okviru navedenog poglavlja prikazan je materijalni i toplotni bilans, kao i stepen korisnosti piroliti kog reaktora.

6. *Zaključak* - navodi se doprinos doktorske disertacije u razmatranoj oblasti, da li su polazne hipoteze potvr ene ili opovrgnute i u kom pravcu bi trebalo da idu dalja istraživanja u oblasti pirolize poljoprivredne biomase.

## LITERATURA

- [1] Hoffrt M. I., Caldeira K., Jain A. K., Haites E. F., Harvey L. D., Potter S. D. D., Schlesinger M. E., Schneider S. H., Watts R. G., Wigley T. M. L., Wuebbles D. J. Energy implications of future stabilization of atmospheric CO<sub>2</sub> content. *Nature* 395: 881 – 884. 1998.
- [2] Berndes G., Hoogwijk M., Broek R. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy* 25: 1 – 28. 2003.
- [3] Junginger M., Bolkesjo T., Bradley D., Dolzan P., Faaij A., Heinimo J., Hektor B., Leistad O., Ling E., M., Piacente E., Rosillo-Calle F., Ryckmans Y., Schouwenberg P., Solberg B., Tromborg E., Walter A., Wit M. Developments in international bioenergy trade. *Biomass and Bioenergy* 32: 717 – 729. 2008.
- [4] \*\*\*, An EU Strategy for Biofuels - Impact Assessment. Commission Staff Working Document, nn to the Communication from the Commission, COM,34 final. 2006.
- [5] Njit M., Faaij A. European biomass resource potential and costs. *Biomass and Biofuels* 34: 188 – 202. 2010.
- [6] \*\*\*, Renewable Energy in Europe - Markets, trends and technologies, European Renewable Energy Council, Intelligent nergy Europe, 2010.
- [7] Stojiljkovi D. D. Perspektive koriš enja biomase i komunalnog otpada. Sanu, Energetika i životna sredina, Urednik: akademik Marko An elkovi , 2013.
- [8] Trnini M. Modeling and optimization of corn cob pyrolysis, Ph.D. diss. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd. 2015.
- [9] Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86: 1781–1788. 2007.
- [10] Kirubakaran V., Sivaramakrishnan V., Nalini R., Sekar T., Premalatha M., Subramanian P. A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(1): 179–186. 2009.
- [11] Bridgwater A. V. Production of high grade fuels and chemicals from catalytic pyrolysis of biomass. *Catalysis Today* 29(1-4): 285-295. 1996.
- [12] Islama M. N., Ani A. N. Techno-economics of rice husk pyrolysis, conversion with catalytic treatment to produce liquid fuel. *Bioresource Technology* 73(1): 67-75. 2000.
- [13] Encinar J. M., González J. F., González J. Fixed-bed pyrolysis of *Cynara cardunculus* L. Product yields and compositions. *Fuel Processing Technology* 68(3): 209-222.

- [14] Zabaniotou A., Ioannidou O., Antonakou E., Lappas A. Experimental study of pyrolysis for potential energy, hydrogen and carbon material production from lignocellulosic biomass. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(10): 2433-2444. 2008.
- [15] Das P., Ganesh A. Bio-oil from pyrolysis of cashew nut shell - A near fuel. *Biomass and Bioenergy* 25(1): 113-117. 2003.
- [16] Williams P.T., Nugranad N. Comparison of products from the pyrolysis and catalytic pyrolysis of rice husks. *Energy* 25(6): 493-513. 2000.
- [17] ensoz S., Demiral ., Gerçel H. F. Olive bagasse (*Olea europea* L.) pyrolysis. *Bioresource Technology* 97(3): 429-436. 2006.
- [18] Pütün A.E., Apaydin E., Pütün E. Bio-oil production from pyrolysis and steam pyrolysis of soybean-cake: Product yields and composition. *Energy* 27(7): 703-713. 2002.
- [19] Pütün A.E., Özbay N., Önal E. P., Pütün E. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products. *Fuel Processing Technology* 86(11): 1207-1219. 2005.
- [20] Pütün A.E., E. Apaydın ve E. Pütün, "Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis," *Energy* 29, 2171–2180, 2004
- [21] Özbay N., Pütün A. E., Uzun B. B., Pütün E. Biocrude from biomass: pyrolysis of cottonseed cake. *Renewable Energy* 24(3): 615-625. 2001.
- [22] Haykiri-Acma H., Yaman S., Kucukbayrak S. Effect of Heating Rate on the Pyrolysis Yields of Rapeseed. *Renewable Energy* 31(6): 803-810. 2006.
- [23] Kumar A., Wang L., Yuris D., Jones D. D., Hanna M. A. Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass and Bioenergy* 32: 460-467. 2008.

## 2. BIOMASA KAO OBNOVLJIV IZVOR ENERGIJE

Biomasa, kao obnovljivi izvor energije, omogućava primenu u različitim sektorima i može značajno da doprinese zameni koriš enja fosilnih goriva kako u svetu, tako i u Republici Srbiji. S obzirom to da postoje velike razlike u karakteristikama i raspoloživosti biomase (od zemlje do zemlje, od regiona do regiona), potrebno je za svaki konkretan slučaj razmotriti sve tehničko-tehnološke, ekonomske mogućnosti primene i uticaj na životnu sredinu.

S obzirom na različite aspekte koriš enja i posledice koriš enja biomase, uveden je sledeći niz definicija kako bi se što preciznije odredile vrste i raspoložive količine koje se mogu koristiti u energetske svrhe, kao i da bi se na osnovu karakteristika različitih vrsta biomase odredile najbolje mogućnosti primene [1, 2]. U opštem smislu, biomasa predstavlja biorazgradivi deo proizvoda, otpada i ostataka biološkog porekla iz poljoprivrede (uključujući i biljne i životinjske materije), šumarstva i povezanih industrija, kao i biorazgradivi deo industrijskog i komunalnog otpada [1].

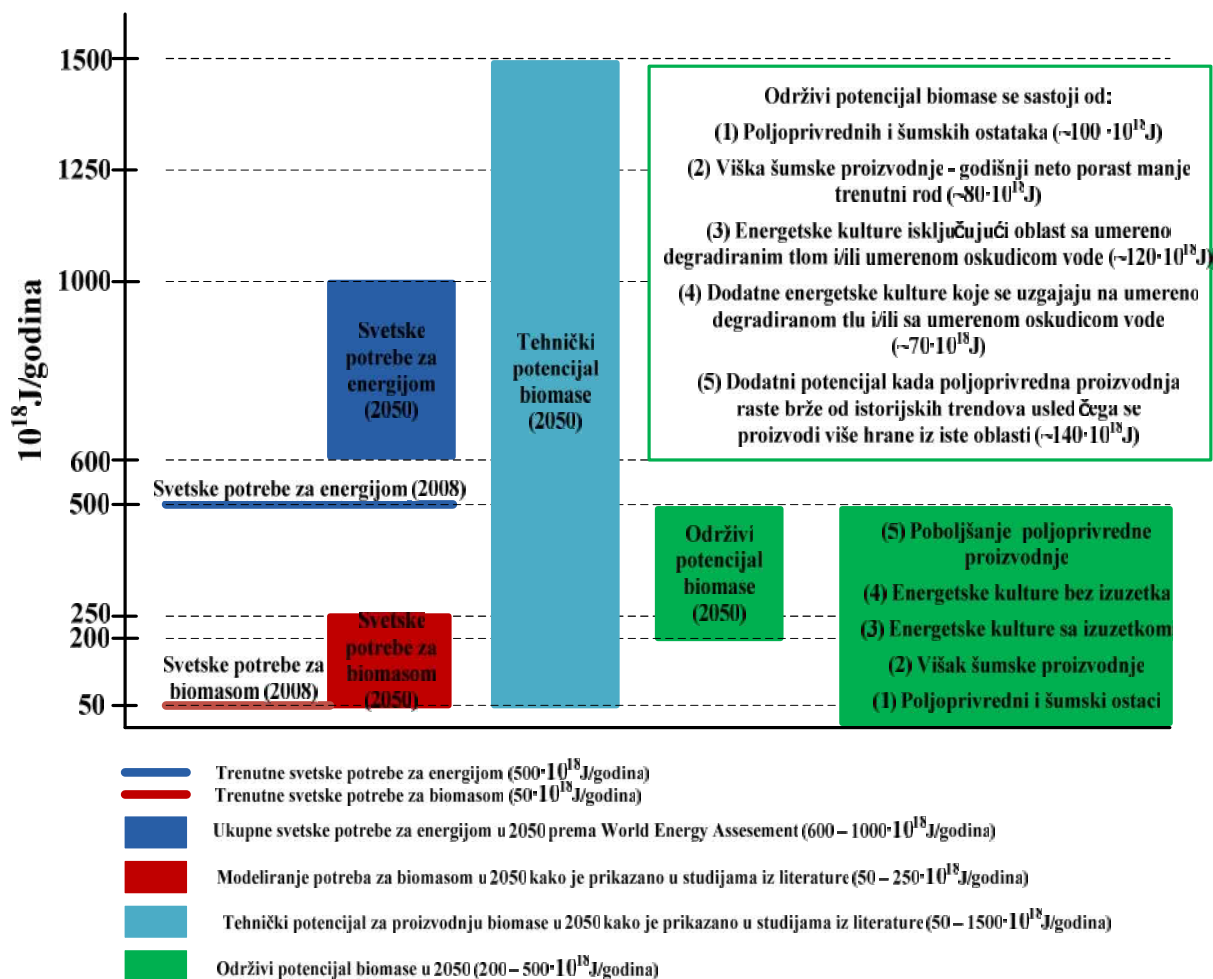
Biomasa se može podeliti na:

- Biomasa u izvornom obliku (sirovu biomasa) koju čine:
  - Kopnena (trave, drveća, energetske zasade, obradivi usevi)
  - Vodena (alge, vodene biljke)
- Ostatak (otpadnu biomasa):
  - Komunalni otpad (komunalni vršni otpad, mulj i organske materije dobijene tretmanom otpadnog mulja)
  - Poljoprivredni vršni otpad (poljoprivredni biljni ostaci, stočni otpad i ubrivo)
  - Šumski ostaci (kora, lišće, ostaci nakon seče stabala)
  - Industrijski otpad (drvni otpad, piljevina, otpadno ulje).

### 2.1. Potencijal biomase

Za analizu mogućnosti primene biomase, neophodna je analiza raspoloživih potencijala i tehnologija, kao i ekonomskih parametara koji se odnose na cenu biomase kao sirovine, cenu energije dobijene iz biomase i konkurentnost ovih cena u odnosu na druge izvore energije. Na osnovu navedenih analiza definišu se teorijski, tehnički i ekonomski potencijal biomase. Procena potencijala može da se vrši prema različitim metodologijama i u zavisnosti od primenjene metodologije moguće su značajne razlike u procenjenim količinama [3].

Danas, koriš enjem biomase obezbe uje se  $50 \cdot 10^{18} \text{J}$ , što predstavlja oko 10% potrošnje primarne energije u svetu [4]. Biomasa se najviše koristi za proizvodnju elektri ne i toplotne energije, a samo manji deo koristi za proizvodnju biogoriva. Mogu nosti za pove anje koriš enja biomase u energetske svrhe postoje i to koriš enjem degradiranog i nekoriš enog zemljišta za uzgajanje lignoceluloznih sirovina, kao i uzgajanjem vodenih organizama (alge). Prema podacima Svetskog saveta za energiju (eng. World Energy Council.WEC), ukupni tehni ki potencijal svih oblika biomase je procenjen na  $1.500 \cdot 10^{18} \text{J/god.}$  u 2050. godini (Slika 2.1.), pri emu bi po kriterijumima održivosti ovaj potencijal, bez vodenih organizama, bio smanjen na 200 do  $500 \cdot 10^{18} \text{J/god.}$ [4].



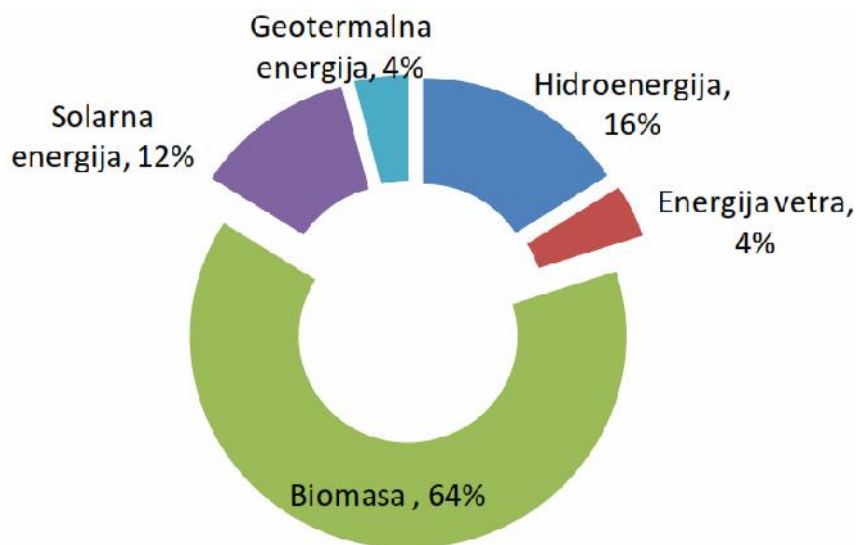
**Slika 2.1.** Tehni ki i održivi potencijal biomase do 2050. godine [4]

Cena biomase, izražena u odnosu na sadržaj energije, danas na tržištu iznosi od 3 do 5 £/GJ ( $1,35 \cdot 10^{-9} - 2,25 \cdot 10^{-9} \text{ kg/J}$ ). U budu nosti se o ekuje smanjenje cene na 2 do 4 £/GJ ( $0,9 \cdot 10^{-9} - 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ kg/J}$ ) i to zbog ve ih površina na kojima e se vršiti uzgajanje i zbog pove anja efikasnosti tehnologija koje se koriste za konverziju [3].

### 2.1.1. Potencijal biomase u Republici Srbiji

Potencijal Srbije u obnovljivim izvorima energije iznosi oko 6 Mt godišnje. Iskoriš enjem ovog potencijala može se zna ajno smanjiti koriš enje fosilnih goriva. Pri tome je najve i potencijal koriš enja biomase koja predstavlja 64% u odnosu na sve ostale obnovljive izvore

energije i iznosi oko 3,3 Mt godišnje (Slika 2.2). Osim biomase, Republika Srbija godišnje može da obezbedi 1,7 Mt iz hidropotencijala, 0,2 Mt iz energije vetra i 0,6 Mt iz solarne energije. Trenutno se u Republici Srbiji koristi 33% raspoloživog potencijala [5].



**Slika 2.2.** Struktura potencijala obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji [5]

Proizvodnja i potrošnja vrste biomase obuhvata proizvodnju i potrošnju poljoprivredne biomase, ogrevnog drveta, peleta i briketa u energetske svrhe (za potrebe proizvodnje elektri ne i toplotne energije ).

Raspoloživost biomase u Republici Srbiji iz ostatka poljoprivredne proizvodnje prikazana je u Tabeli 2.1.

**Tabela 2.1.** Potencijalne koli ine biomase iz ostatka poljoprivredne proizvodnje u Republici Srbiji [5]

Biomasa	Površina (10 <sup>3</sup> ha)	Prinos (t/ha)	Ukupno biomase (10 <sup>3</sup> t)
Pšenica	850	3,5	2975
Je am	165	2,5	412,5
Ovas	16	1,6	25,6
Raž	5	2	12
Kukuruz	1300	5,5	7150
Semenski kukuruz	25	2,3	86,25
Oklasak	–	–	1430
Suncokret	200	2	800
Ljuske suncokreta	–	–	120
Soja	80	2	320
Uljana repica	60	2,5	300
Hmelj	1,5	1,6	7,92
Duvan	3	1	1,05
Vo naci	275	1,05	289,44
Vinogradi	75	0,95	71,55
<b>UKUPNO:</b>	<b>3055,5</b>		<b>12461,31</b>

Planirana proizvodnja vrste biomase u 2016. godini je 1,118 Mtoe. Od ove koli ine veoma mali iznos se troši u toplanama, svega 0,002 Mtoe što je na istom nivou kao i u 2015. godini. Planirana finalna potrošnja biomase iznosi 1,036 Mtoe. U strukturi ove potrošnje, industrija u estvuje sa 12%, doma instva sa 83%, a ostali sektori sa 5% [6]. Potrošnja vrste biomase odvija se dominantno u okviru sektora doma instva za potrebe zagrevanja prostorija. Upotreba poljoprivredne biomase i ogrevnog drveta za potrebe zagrevanja karakteristika je ruralnih krajeva i obodnih delova prigradskih naselja. Po pravilu ruralni krajevi gravitiraju podru jima sa visokom produkcijom poljoprivredne biomase i drvne mase.

Neophodno je napomenuti da je u 2016. godini planirani kapacitet postrojenja na deponijski i kanalizacioni gas za proizvodnju elektri ne energije 1MW, a postrojenja na biomasu za proizvodnju elektri ne energije 5MW [6].

Planirano koriš enje biogasa u 2016. godini za proizvodnju elektri ne i toplotne energije je 0,0085 Mtoe što je za 58% više u odnosu na 2015. godinu kada je iznosilo 0,0054 Mtoe [6].

Koriš enje potencijala biomase u budu nosti mora se razmatrati u svim sektorima eneregetike i to: sektoru elektri ne energije, sektoru grejanja i sektoru saobra aja (za proizvodnju biogoriva). Primena biomase u energetske svrhe u narednom periodu treba da se zasniva na savremenim tehnologijama koja e omogu iti i zadovoljenje svih zahteva u pogledu zaštite životne sredine koji obuhvataju izme u ostalog i smanjenje emisije CO<sub>2</sub>. Savremene tehnologije treba da obuhvate ko-sagorevanje sa fosilnim gorivom u termoenergetskim postrojenjima, sagorevanje u novim postrojenjima za kombinovanu proizvodnju elektri ne i toplotne energije i proizvodnju biogasa. Istovremeno, treba razmatrati mogu nost zamene fosilnih goriva koja se koriste u sektoru grejanja biomasom, kao i koriš enje biomase u pe ima i kotlovima male snage (nominalne snage do 100 kWh) i sistemima srednje snage (nominalne snage od 100 do 1,000 kWh) [7].

U skladu sa predvi anjima o potrošnji goriva u sektoru saobra aja [8], Republika Srbija bi u 2020. godini trebala da obezbedi oko 200 ktoe iz obnovljivih izvora u ovom sektoru. Na taj na in bio bi zadovoljen obavezuju i zahtev iz Direktive 2009/28/ES od 10 % obnovljivih u sektoru saobra aja. Uzimaju i u obzir trenutno raspoložive kapacitete za proizvodnju biodizela (oko 80,000 t/god.), kao i raspoložive sirovine za proizvodnju (suncokret, uljana repica i soja), mogu a je proizvodnja od 65 ktoe/god. Ovoj koli ini treba dodati i koli ine koje bi se dobile proizvodnjom u postrojenjima koja su u izgradnji (oko 40.000 t/god.), kao i koli ine koje bi se dobile iz manjih pogona koji su fleksibilniji za proizvodnju [9].

## **2.2. Zakonska regulativa o obnovljivim izvorima energije u Evropskoj uniji i Republici Srbiji**

Energetska politika Srbije, i oblast obnovljivih izvora energije, definisana je novim Zakonom o energetici, usvojenim u julu 2011. Usvajanje navedenog zakona je jedan od koraka koje je Srbija morala da preduzme da bi ispunila uslove za sticanje statusa kandidata za lanstvo u Evropskoj uniji. Novim zakonom podsti u se investicije u obnovljive izvore energije, kroz pojednostavljivanje procedura za ulaganje i uvo enje povlaš enih proizvo a a energije iz biomase, vode, vetra, solarne i geotermalne energije [10].



Novi zakon o energetici uvodi garancije porekla za elektri nu i toplotnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora energije, koje e proizvo a ima omogu iti da izvoze "zelenu energiju". Garancije e se izdavati po jedinicama za jedini nu koli nu od jedan megavata (MWh) i traje e godinu dana.

U Srbiji je po ela izrada nove strategije razvoja energetike od 2015 do 2025 godine, sa projekcijama 2050. Sadašnja strategija nije u tolikoj meri obuhvatila projekcije koliko e se zemlja približiti EU, koje e obaveze iz toga proizia, a u me uvremenu je došlo i do promena na energetskom tržištu i poreme aja koji nisu mogli da se predvide. Novi dokument treba da obuhvati nove uticaje, a jedan od osam delova budu e strategije e se odnositi isklju ivo na obnovljive izvore energije.

Republika Srbija je zajedno sa drugim državama jugoisto ne Evrope potpisala „Ugovor o osnivanju Energetske zajednice“ 25. oktobr 2005 u Atini sa Evropskom zajednicom, kojim su se zemlje jugoisto ne Evrope pravno obavezale kako na proširenje unutrašnjeg tržišta energije EU na svoj region tako i na ispunjavanje i poboljšanje društvenog, ekonomskog i ekološkog standarda u regionu. Ugovor je stupio na snagu 1. jula 2006., a prakti no u Srbiji ratifikacijom i usvajanjem u Skupštini („Službeni glasnik RS”, broj 62/2006), Ugovor je obavezuju i po ev od 1. septembra 2006 godine. Pomenuti ugovor je klju ni dokument izme u Srbije i EU koji pokriva potrebne reforme energetskog sektora za proces pridruživanja EU, pripremu energetskog tržišta za punu primenu evropskih pravila, primenu direktiva EU i u eš e na jedinstvenom evropskom energetskom tržištu. Sprovo enje Ugovora o osnivanju Energetske zajednice povereno je ministarstvu nadležnom za rudarstvo i energetiku.

Prema lanu 20. Ugovora o osnivanju Energetske zajednice, Republika Srbija je prihvatila obavezu da primeni evropske Direktive u oblasti obnovljivih izvora energije [11]:

➤ **Direktivu 2001/77/EZ o promociji proizvodnje elektri ne energije iz obnovljivih izvora energije na me unarodnom elektroenergetskom tržištu**

Srbija je na inila plan za sprovo enje ove direktive, što je samo formalno ispunjenje zahteva Evropske Unije, tj. poštovanje rokova datih Ugovorom o osnivanju energetske zajednice, dok još puno toga ostaje da se uradi kako bi se otklonile postoje e barijere za promociju (odre ivanje nacionalnog cilja, uspostavljanje sistema podrške i garancija o poreklu - zeleni sertifikati, kratke i jednostavne administrativne procedure)

➤ **Direktivu 2003/30/EZ za promociju biogoriva ili drugih goriva proizvedenih iz obnovljivih izvora za saobra aj**

Ova se direktiva odnosi na pove anje koriš enja biogoriva na tržištu u iznosu od 5.75% od ukupne koli ine goriva u saobra aju do kraja 2010. godine.

Navedene Direktive su od 2009. godine postepeno zamenjivane i u januaru 2012. godine ukinute novom **Direktivom 2009/28/EZ** Evropskog parlamenta i Saveta od 23. aprila 2009. godine o promociji koriš enja energije iz obnovljivih izvora. U skladu sa Direktivom 2009/28/EZ postavljeni su obavezuju i ciljevi za lanice Evropske Unije kako bi se obezbedilo da obnovljivi izvori energije, u 2020. godini, u estvuju sa 20% u bruto finalnoj potrošnji na nivou Evropske Unije.

U skladu sa Direktivom 2009/28/EZ i Odlukom Ministarskog saveta Energetske zajednice od 18. oktobra 2012. godine (D/2012/04/MS - EnZ) odre en je veoma ambiciozan obavezuju i cilj za Republiku Srbiju koji iznosi 27 % obnovljivih izvora energije u njenoj bruto finalnoj

potrošnji energije u 2020. godini. Istom Odlukom definisano je da Nacionalni akcioni plan za obnovljive izvore energije Republike Srbije treba da bude pripremljen u skladu sa usvojenim obrascem za izradu ovog dokumenta (Odluka 2009/548/EZ).

Prema **Nacionalnom akcionom planu** za obnovljive izvore u Srbiji, 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% [10].

U cilju uskla ivanja sa ciljevima EU do 2020. u oblasti obnovljivih izvora energije i energetske efikasnosti EPS je u maju 2011. objavio strateški dokument, **Belu knjigu**, koji sadrži pregled obaveza i planiranih aktivnosti. Procenjuje se da e za realizaciju tih planova biti potrebno oko etiri milijarde evra. U oblasti obnovljivih izvora energije EPS planira izgradnju i revitalizaciju 35 malih hidroelektrana i u tom cilju je sa Ministarstvom poljoprivrede potpisao Protokol o saradnji u realizaciji projekata energetske efikasnosti i koriš enja obnovljivih izvora energije. EPS planira i ulaganje u vetroparkove i solarne elektrane [10].

Koriš enje biomase kao obnovljivog izvora energije u Republici Srbiji regulisano je velikim brojem zakona i propisa. Osnovni zakonski okvir koriš enja obnovljivih izvora energije definišu:

- **Zakon o energetici Republike Srbije**(„Službeni glasnik RS”, broj 57/2011, 80/2011 -ispravka, 93/2012 i 124/2012)
- **Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine**
- **Program ostvarivanja strategije razvoja energetike Republike Srbije**
- **Zakon o planiranju i izgradnji Republike Srbije** („Službeni glasnik RS”, broj 72/2009, 81/2009 - ispravka, 64/2010, 24/2011, 121/2012, 42/2013, 50/2013, 98/2013)
- **Uredba o uslovima i postupku sticanja statusa povlaš enog proizvo a a elektri ne energije** („Službeni glasnik RS”, broj 8/2013 i 70/2014)
- **Uredba o merama podsticaja za povlaš ene proizvo a e elektri ne energije**(„Službeni glasnik RS”, broj 8/2013)
- **Uredba o na inu obra una i na inu raspodele prikupljenih sredstava po osnovu naknade za podsticaj povlaš enih proizvo a a elektri ne energije**(„Službeni glasnik RS”, broj 8/2013)
- **Uredba o visini posebne naknade za podsticaj u 2014. godini**(„Službeni glasnik RS”, broj 3/2014)
- **Ugovor o energetske zajednici jugoisto ne Evrope ili ECSEE**
- **Pravilnik o tehni kim i drugim zahtevima za te na goriva bioporekla** („Službeni list SCG”, broj 23/2006)
- **Zakon o zaštiti životne sredine** („Službeni glasnik RS”, broj 135/2004, 36/2009, 72/2009, 43/2011)
- **Zakon o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu** („Službeni glasnik RS”, broj 135/2004 i 88/2010)
- **Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu** („Službeni glasnik RS”, broj 135/2004 i 36/2009)
- **Zakon o integrisanom spre avanju i kontroli zaga ivanja životne sredine** („Službeni glasnik RS”, broj 135/2004)

- **Zakon o upravljanju otpadom** („Službeni glasnik RS”, broj 36/2009 i 88/2010)
- **Zakon o zaštiti vazduha** („Službeni glasnik RS”, broj 36/2009 i 10/2013)
- **Zakon o Fondu za zaštitu životne sredine** („Službeni glasnik RS”, broj 72/2009 i 101/2011)
- **Zakon o potvrivanju Kjoto Protokola uz Okvirnu konvenciju Ujedinjenih nacija o promeni klime** („Službeni glasnik RS”, broj 88/2007)
- **Nacionalna strategija održivog razvoja od 2009. do 2017. godine** („Službeni glasnik RS”, broj 57/2008)
- **Strategija uvo enja istije proizvodnje u Republici Srbiji** („Službeni glasnik RS”, broj 17/2009)

## LITERATURA

- [1] \*\*\*, 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, Official Journal of the European Union, L 140/16, 2009.
- [2] \*\*\*, CSN EN 14588 - Solid biofuels - Terminology, definitions and descriptions, European standards, 2010.
- [3] Panoutsou C., Eleftheriadis J., Nikolaou A. Biomass supply in EU27 from 2010 to 2030. Energy Policy 37(12):5675–5686. 2009.
- [4] \*\*\*, 2010 Survey on Energy Resources, World Energy Council, pp. 618, 2010.
- [5] Cari M., Soleša D. Biomasa kao obnovljivi izvor energije i tehnologija za proizvodnju biogasa, priručnik, u okviru projekta “Ja anje prekograni ne teritorijalne konkuretnosti i ekonomskog razvoja Nišavskog i Jablani kog (Srbija) i Sofijskog (Bugarska) regiona efikasnim koriš enjem regionalnih obnovljivih izvora energije sa naglaskom na koriš enje biomase”, DAI, Agencija za konsalting, Leskovac, 2014.
- [6] \*\*\*, Energetski bilans Republike Srbije, 2016. Beograd. 2015.
- [7] An elkovi M. Energetika i životna sredina, Srpska akademija nauka i umetnosti, Naučni skupovi, Knjiga CXLIII, Odeljenje hemijskih i bioloških nauka, Knjiga 4, Beograd, 2013.
- [8] \*\*\*, Emergency Oil Stocks in the Energy Community Level - Final Report, Energetski institut Hrvoje Požar, 2011.
- [9] Stojiljkovi D., Jovanovi B., Mani N., Jovovi A., Petrovi S., Tomi M., Popovi V., Miti S., Mojovi LJ., Šiler-Marinkovi S., Nikoli S., Su ek I., Leskovac S., Mici R. Studija o biogorivima za saobraćaj, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd, 2012.
- [10] Dodi J., Grahovac J. Studija o obnovljivim izvorima energije u okviru projekta “Ja anje prekograni ne teritorijalne konkuretnosti i ekonomskog razvoja Nišavskog i Jablani kog (Srbija) i Sofijskog (Bugarska) regiona efikasnim koriš enjem regionalnih obnovljivih izvora energije sa naglaskom na koriš enje biomase”, DAI, Agencija za konsalting, Leskovac, 2013.
- [11] Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine. Nacionalni akcioni plan za koriš enje obnovljivih izvora energije Republike Srbije, Beograd, 2013.

## 3. FIZI KO – HEMIJSKE OSOBINE POLJOPRIVREDNE BIOMASE

### 3.1. Poljoprivredna biomasa kao gorivo

Srbija je bogata biomasom koja potiče od biljnih kultura. Prema podacima iz studije koju je finansirala Vlada republike Srbije pod nazivom: Energetski potencijal i karakteristike ostataka biomase i tehnologije za njenu pripremu i energetsko iskorišćenje u Srbiji u okviru Ministarstva nauke i zaštite životne sredine zaključeno je da: Energetski potencijal biljnih ostataka iznosi 108000 TJ/god., odnosno 40000 TJ/god. ostataka ratarskih kultura (procenjeno kao 30% ukupnih ostataka u poljoprivredi), 25000 TJ/god. ostataka u voćarstvu i vinogradarstvu i 43000 TJ/god. u šumarstvu i drvenoj industriji ne računajući mogućnost gajenja biomase bogate uljima na neobrađenoj zemlji za proizvodnju od oko 50000 t/god. i namenskog gajenja brzorastućih šuma sa energetskim potencijalom od oko 16000 TJ/god. [1]. Već korišćenje ostataka iz primarne proizvodnje poljoprivrednih proizvoda i iz njihove dorade u energetske svrhe je posebno interesantno u Vojvodini, za koju se sa pravom može reći da predstavlja jedan od najvećih „rudnika” održivog energenta u Srbiji. Smatra se da od ukupnih potencijala biomase nastale iz poljoprivredne proizvodnje za dobijanje toplotne energije nesmetano može da se koristi od 25–30%, što bi iznosilo oko 4 miliona tona (ekvivalentno sa oko 1,4 miliona tona ulja za loženje).

Uopšteno posmatrano, biomasa je obnovljivi, biorazgradivi materijal, koji predstavlja zajednički pojam za brojne, najrazličitije proizvode živog sveta. U pogledu sastava i na način nastajanja, generalno, biomasa kao energent može da se klasifikuje kao:

- drvena biomasa (iz šumarstva, voćarstva i vinogradarstva, otpadno drvo i ostaci drvene prerivačke industrije (piljevina, okorci...),
- drvena uzgajana biomasa (brzorastuće drveće, vrba, topola, jasen...),
- sekundarni ili tercijelni proizvodi iz poljoprivrede (slama pšenice, soje, ječma, raži, kukuruzovina, stabljike suncokreta i dr.),
- ostaci prehrambeno-prerivačke industrije (ljuske suncokreta, oklasak, koštice itd.),
- nedrvna uzgajana biomasa (brzorastuće alge i trave ...),
- životinjski otpad i ostaci i
- komunalni i industrijski otpad.

Navedene vrste biomase su u mnogome sli ne po sastavu i tehni kim karakteristikama sa aspekta da se koriste kao biogoriva. Ali, uprkos tome postoje zna ajne specifi nosti koje su uslovile razvoj posebnih tehnologija i tehnike za njihovo koriš enje u energetske svrhe.

Srbija, a posebno Vojvodina je bogata biomasom koja može da se koristi u procesima pirolize, gasifikacije, sagorevanja za dobijanje toplotne energije koja se koristi u termoenergetskim postrojenjima, a upotreba je mogu a kako za manje individualne korisnike, doma instva, tako i za velike potroša e, kakvi su industrijski kompleksi, zagrevanje objekata (plastenika, staklenika, farmi i radionica), sušenje poljoprivrednih proizvoda i za tehnološke procese finalizacije poljoprivrednih proizvoda.

Biomasa kao gorivo ima niz prednosti, ali i nedostataka. Od dobrih osobina biomase kao goriva se može ista i da je biomasa lako dostupan, obnovljiv, tehni ki i ekološki prihvatljiv izvor energije. Koriš enjem biomase smanjuju se potrebe za uvozom konvencionalnih energenata, što u posrednom smislu obezbe uje neprekidnost u snabdevanju energijom, pove anje broja zaposlenih, podiže kvalitet života u ruralnim podru jima, smanjenje migracije selo-grad i obezbe uje manju zavisnost države od uvoznih energenata. Me utim, i pored mnogih povoljnosti u eksploataciji biomase njeno koriš enje je vezano i za odre ene nedostatke, od kojih bi se moglo navesti: periodi nost nastanka biomase, razu enost u prostoru, otežano sakupljanje, pakovanje i skladištenje, što je uslovljeno malom nasipnom masom (gustinom), manjom toplotnom mo i svedene na jedinicu zapremine, nepovoljnim oblikom i visokim sadržajem vlage, a i investicioni troškovi za izgradnju postrojenja za sagorevanje biomase su ve i od onih za sagorevanje konvencionalnih energenata. Navedeni problemi se umnogome mogu izbe i ili njihov uticaj smanjiti ukoliko se biomasa sabija u obliku peleta i briketa. Me utim, za te procese se troši dodatna energija, za usitnjavanje, po potrebi sušenje, sabijanje i hla enje.

## **3.2. Hemijski sastav poljoprivredne biomase**

### **3.2.1. Sastav poljoprivredne biomase**

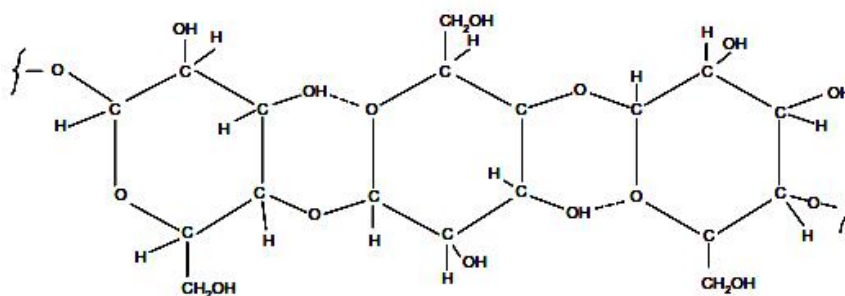
Sva biomasa svedena na istu gorivu masu ima prakti no isti hemijski sastav, definisan izrazom  $CH_{1,4}O_{0,6}N_{0,1}$ , ali postoje velike razlike u prirodi polimera, koji ulaze u njen sastav. Organski deo ine: celuloza, hemiceluloza, lignin i ekstrativna ulja. Neorganski deo uklju uje biološki aktivne elemente kalijum i hlor, estice materijala uklju enih u samu biljku, kao što su silikati i vrlo esto razne ne isto e, koje se javljaju kao posledica procesa obrade, transporta i skladištenja (metali, plastika, staklo i sl.). U produktima sagorevanja neorganski deo biomase u najve em delu se može na i u pepelu.

Tako se za poljoprivrednu biomasu može konstatovati da je lignocelulozni materijal.

#### **3.2.1.1. Celuloza**

Hemijska formula celuloze je  $(C_6H_{10}O_5)_n$  a atomi unutar polimera su povezani kovalentnim vezama, vodoni nim vezama i Wan Der Waalsovim silama pa je po sastavu polisaharid na bazi glukoze. Suvu biomasu ini 88% do 99,9% organskih komponenata [2].

Celuloza (Slika 3.1.) je homopolisaharid sastavljen od  $\beta$ -D-glukopiranoznih jedinica koje su povezane (1-4) glikozidnim vezama. Molekuli celuloze su linearni;  $\beta$ -D-glukopiranozne jedinice su u konformaciji stolice. Celuloza pokazuje izraženu tendenciju ka formiranju intermolekularnih veza, što im omogućava da molekuli formiraju mikrofibrile koje delom pripadaju čvrstoj (kristalna) i sa manjom uređenošću (amorfna) [3]. Mikrofibrili grade fibrile, a zatim i celulozna vlakna. Vlaknasta struktura i jake vodonične veze daju celulozi visoku zateznu čvrstoću i čvrsta vlakna nerastvorljivim u većini rastvarača.

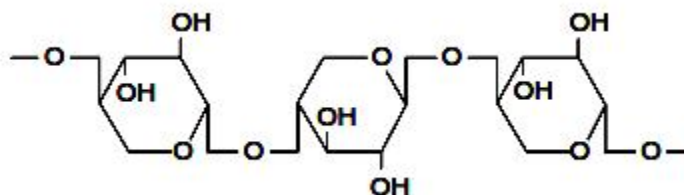


Slika 3.1. Hemijska struktura celuloze [4]

### 3.2.1.2. Hemiceluloza

Nasuprot celulozi, koja je homopolisaharid, hemiceluloza je heteropolisaharid (Slika 3.2.). Monomerske komponente hemiceluloze su uglavnom D-glukoza, D-manoza, D-galaktoza, D-ksiloza, L-arabinoza, ali u izvesnoj meri može biti i L-ramnoza uz D-glukuronsku kiselinu, D-galakturonsku kiselinu i 4-O-metil-D-glukuronsku kiselinu. Hemiceluloze mogu biti hidrolizovane kiselinama [3].

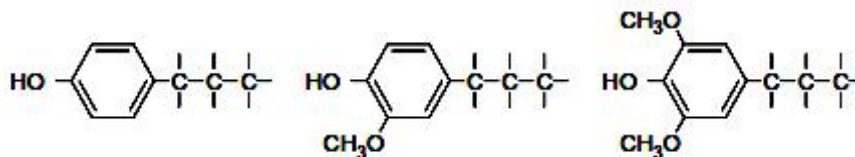
Hemiceluloza čini oko 25% mase poljoprivredne biomase.



Slika 3.2. Hemijska struktura hemiceluloze [4]

### 3.2.1.3. Lignin

Pod imenom lignin podrazumeva se grupa visokomolekulskih, umreženih, amorfnih veza koje čine oko 25-30% masenih procenata biomase. Taj udeo je nešto viši kod drvene biomase nego kod biljne biomase. Molekul lignina je izrazito trodimenzionalan i razgranat, dugog lanca sliči mnogim polimerima osim što se sastoji od različitih monomera, uglavnom fenil-propan jedinica spojenih vezom ugljenik-ugljenik. Strukture lignina su različite, u zavisnosti od izvora iz kog je dobijen. Najčešće zastupljeni monomer je koniferil alkohol. Na Slici 3.3. je predstavljene su najčešće strukture lignina koju je moguće prikazati kao p-kumaril alkohol ( $C_9H_6O_3$ ), koniferil alkohol ( $C_{10}H_{12}O_3$ ) i sinapil alkohol ( $C_{11}H_{14}O_4$ ) [2].



**Slika 3.3.** Naj eš e hemijske strukture lignina [4]

Udeli navedenih fenola u ligninu zavise od vrsti biljke i njenom staništu. Sadržaj kiseonika u ligninima je zna ajno niži nego kod celuloze i hemiceluloze i kre e se u rasponu od 12-30% [2]. Modeli naj eš ih hemijskih struktura lignina prikazani su na Slici 3.3. Makromolekul lignina je veoma složen i struktura varira za razli ita bio-goriva.

Ekstraktivi su dobili ime po tome što se ve im delom mogu ukloniti iz biomase ekstrakcijom sa neutralnim rastvara ima. Ekstraktivi su komponente razli itog hemijskog sastava, kao što su smole, še eri, ulja, skrob, alkaloidi i tanin. Sastav varira u zavisnosti od vrste biomase. Ekstraktivi izazivaju karakteristi nu boju i miris razli itih vrsti, ili kod nekih vrsti biomase, otpornost na truljenje i napade insekata.

Neorganski deo je obi no veoma mali i ine ga alkalni metali (Na, K), zemno-alkalni metali (Mg, Ca) i druge komponente: S, Cl, N, P, Si, Al, teški metali (Cd, Zn, As, Pb, Cu, Hg). Preostali neorganski deo nakon potpunog sagorevanja naziva se pepeo. Skladištenje i transport mogu da dovedu do prisustva ne isto a: zemlje, peska, kamenja. Neorganske frakcije variraju od 0.1 do 12%. Šumska biomasa sadrži manje neorganskih materija nego slama i žitarice.

Me u pomenutim ne isto ama, neke su štetnije u odnosu na druge. Posebna pažnja se mora posvetiti alkalnim metalima i zemno-alkalnim metalima, koje imaju zna ajnu ulogu u taloženju pepela, gomilanju u sloju, vreloj koroziji i emisijama estica. Si, K, Mg, su tako e zna ajni, zbog karakteristika nastalog pepela. Cl, S mogu da dovedu do problema sa korozijom, „trovanja“ SCR katalizatora. Teški metali se moraju uzeti u obzir kako bi se pristupilo rešavanju problema koji nastaju u životnoj sredini usled pomenutog procesa. Azot se delimi no pretvara u NH<sub>3</sub> i HCN, što dalje vodi do formiranja NO<sub>x</sub>.

Poljoiprivredna biomasa je bogata kiseonikom i stoga ima nisku toplotnu mo . Koriš enje biomase za pirolizu, gasifikaciju i sagorevanje ima brojne prednosti. Zna ajan deo isparljivih materija i visoko reaktivnog koksnog ostatka dobija se nakon devolatilizacije. Sadržaj pepela ima tendenciju da zna ajno varira u zavisnosti od toga o kojoj se vrsti biomase radi.



Uobi ajeni hemijski sastav razli itih vrsta poljoprivrednih biomasa prikazan je u Tabeli 3.1.

**Tabela 3.1.** Hemijski sastav razli itih vrsta poljoprivrednih biomasa [3]

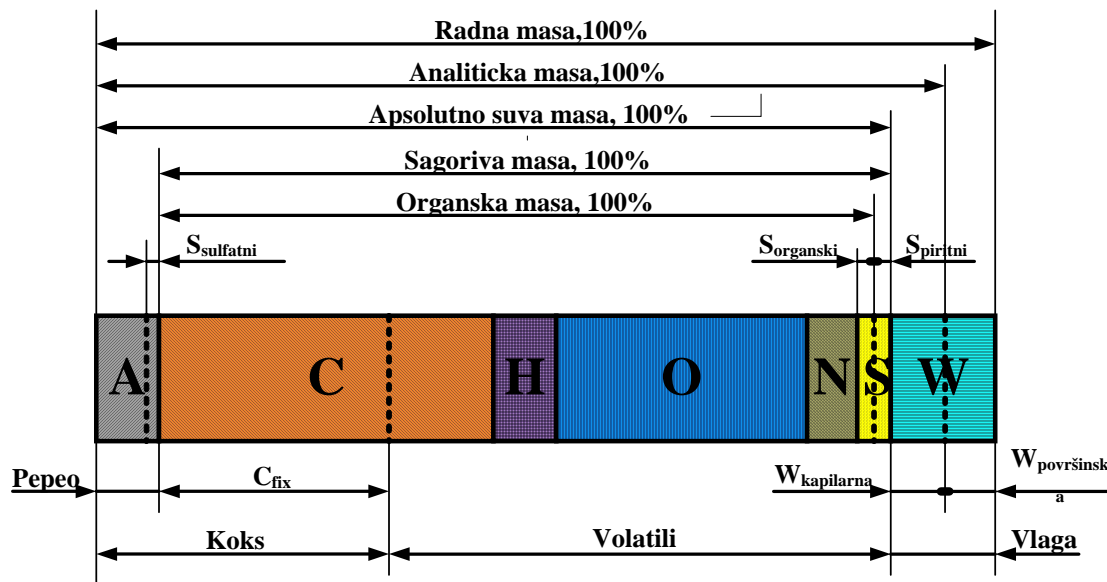
Vrste poljoprivredne biomase	Maseni udeo (%)				
	Celuloza	Hemiceluloza	Lignin	Ekstraktivi	Pepeo
Meko drvo (prose na vrednost)	45,8	24,4	28,0		1,7
Tvrdo drvo (prose na vrednost)	45,2	31,3	21,7		2,7
Ljuska kokosovog oraha	36,3	25,1	28,7	8,3	0,7
Stabljike kukuruza	42,7	23,6	17,5	9,8	6,8
Komina maslina	24,0	23,6	48,4		4,0
Pšeni na slama	30,5	28,9	16,4	2,4	11,2–6,6
Pirin ana slama	37,0	22,7	2,6	2,1	19,8–16,1

### 3.3. Tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase

Tehni ka analiza obuhvata odre ivanje masenih udela vlage, pepela, sumpora (ukupnog, u pepelu i sagorivog), koksa, fiksnog ugljenika, isparljivih i sagorljivih materija u biomasi izraženih u (%) i toplotnu mo (gornju i donju) izraženu u kJ/kg.

Elementarna analiza goriva daje podatke o masenim udelima ugljenika, vodonika, sumpora, azota i kiseonika u biomasi, tako e radi korektnog dimenzionisanja delova termoenergetskih postrojenja, ta nije mogu nosti egzaktnog modelovanja procesa termohemijske konverzije biomase i samim tim nastanka emisije štetnih gasova, nužno je dobro izanalizirati sastav biomase kao goriva. Osnovni podaci o kvalitetu biomase kao goriva dobijaju se izradom tehni ke i elementarne analize izraženih u procentima.

U zavisnosti od elementarnog sastava, uslovno se definišu i razli ite mase biogoriva, što je prikazano na Slici 3.4.



**Slika 3.4.** Grafi ki prikaz elementarnog sastava poljoprivredne biomase ( $S_{\text{sulfatni}}$  - udeo sulfatnog sumpora,  $S_{\text{organski}}$  - udeo organskog sumpora,  $S_{\text{piritni}}$  - udeo piritnog sumpora,  $C_{\text{fix}}$  - udeo fiksnog ugljenika,  $W_{\text{kapilarna}}$  - udeo kapilarne vlage i  $W_{\text{površinsk}}$  - udeo površinske vlage)

Elementarna analiza je hemijska analiza izvršena na uzorcima koji reprezentuju ukupnu raspoloživu koli inu poljoprivredne biomase. Ova analiza može se predstaviti izrazom [5]:

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

gde su:

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

Elementarna analiza osušene poljoprivredne biomase ( $W = 0$ ) definiše hemijski sastav sveden na suhu masu poljoprivredne biomase. Ova analiza odre ena je izrazom:

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

gde su:

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

Elementarna analiza sagorljive mase poljoprivredne biomase odre ena je izrazom:

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

gde su:

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

Elementarna analiza organske mase poljoprivredne biomase data je izrazom:

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

gde su:

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

Poljoprivredna biomasa koja se troši u termoenergetskim postrojenjima zove se radno gorivo. Ako radnom gorivu oduzmemo svu vlagu, dobija se suva masa goriva, od koje se dobija sagorljiva masa daljim oduzimanjem mineralnih materija. U sagorljivoj masi inertni azot i kiseonik predstavljaju balastne materije jer njihovo prisustvo smanjuje stvarno sagorljive sastojke goriva. U inženjerskim prora unima, pri modelovanju procesa sagorevanja u ložištu neophodno je znati kako prera unati sa jedne mase goriva na drugu. Prera unavanje sa jedne uslovne mase na drugu vrši se odgovaraju im izrazima prikazanim u Tabeli 3.2.

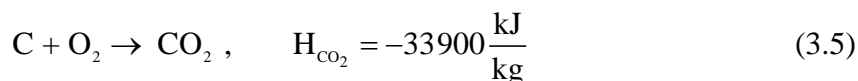
**Tabela 3.2.** Faktori konverzije za elementarne analize poljoprivredne biomase

Masa poljoprivredne biomase kao goriva	Masa poljoprivredne biomase kao goriva			
	Organska	Sagorljiva	Suva	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	$\frac{100 - A^s}{100}$	$\frac{100 - (A + W)}{100}$
Suva	$\frac{100}{100 - (S^s + A^s)}$	$\frac{100}{100 - A^s}$	1	$\frac{100 - W}{100}$
Radna	$\frac{100}{100 - (S + A + W)}$	$\frac{100}{100 - (A + W)}$	$\frac{100}{100 - W}$	1

### 3.3.1. Ugljenik

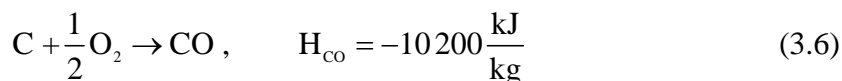
Ugljenik (C) predstavlja osnovnu komponentu organske i sagorljive mase goriva (poljoprivredne biomase) koji pri potpunom sagorevanju do ugljendioksida ( $CO_2$ ) osloba a toplotu oko 33 900 kJ/kg [6].

Reakcija se odvija prema formuli:



Me utim, ugljenik se u gorivu ne nalazi slobodan, nego u vidu složenih organskih jedinjenja sa vodonikom, kiseonikom, azotom i sumporom, ije raspadanje zahteva odre enu koli inu toplote, pa se pri sagorevanju goriva ne osloba a teorijska koli ina toplote, ve nešto manja. Pri nepotpunom sagorevanju ugljenika stvara se ugljenmonoksid (CO) pri emu se osloba a znatno manja koli ina toplote oko 10 200 kJ/kg [6].

Reakcija se odvija po formuli:



Pove anjem sadržaja ugljenika, poboljšava se kvalitet goriva, jer se osobine goriva približavaju osobini istog ugljenika. Uglavnom sagoreva u ugljendioksid ali u nedostatku kiseonika sagoreva u ugljen – monoksid .

### 3.3.2. Fiksni ugljenik

Fiksni ugljenik ( $C_{\text{fix}}$ ) u gorivu (poljoprivrednoj biomasi) odre uje se pomo u slede eg izraza:

$$C_{\text{fix}} = 1 - W - VM - A \quad (3.7)$$

gde su: W, VM i A , maseni udeli vlage, isparljive materije i pepela respektivno (kg/kg).

Fiksni ugljenik predstavlja vrsti ugljenik u biomasi koji ostaje u vrstom ostatku tokom procesa pirolize nakon devolatilizacije. Uz ugalj,  $C_{\text{fix}}$  sadrži elementarni ugljenik iz prvobitnog goriva zajedno sa ugljeni nim ostacima koji nastaju prilikom zagrevanja.

Ugljenik u biomasi nastaje fotosinteti kim vezivanjem  $CO_2$  i stoga je u potpunosti organski. Tokom odre ivanja isparljivih materija (volatila – VM), deo organskog ugljenika se transformiše u ugljeni ni materijal koji se naziva fiksni ugljenik. Kako  $C_{\text{fix}}$  zavisi od koli ine VM ne može se direktno odrediti. VM tako e varira u zavisnosti od brzine zagrevanja. Fiksni ugljenik nije fiksna veli ina, ali njegova vrednost, merena pri standardnim uslovima daje korisnu procenu parametara goriva. Pri analizi gasifikacije,  $C_{\text{fix}}$  je zna ajan parametar jer u ve ini gasifikatora konverzija fiksnog ugljenika u gasove odre uje brzinu gasifikacije i prinos navedenih gasova.

### 3.3.3. Vodonik

Vodonik (H) je sastavni deo svakog goriva. Pri potpunom sagorevanju 1 kg vodonika osloba a se koli ina toplote od 143 200 kJ/kg, ako se produkt sagorevanja (voda) nalazi u te noj fazi, odnosno 119 600 kJ/kg [6], ako se nalazi u parnoj fazi. Ako se vodonik pojavljuje sjedinjen sa kiseonikom u vodi ( $H_2O$ ), onda predstavlja balast u gorivu. Koli ina vezanog vodonika je odre ena koli inom vezanog kiseonika.

### 3.3.4. Azot

Azota (N) u gorivu po pravilu ima malo i ne u estvuje u sagorevanju. Predstavlja unutrašnji balast goriva, jer svojim prisustvom smanjuje procenat sagorljivih elemenata. Azot se izdvaja u slobodnom stanju pri sagorevanju goriva i udaljava se sa gasovitim produktima sagorevanja.

Pri visokim temperaturama sagorevanja azot se jedini sa kiseonikom u azotne okside ( $\text{NO}_x$ ) koji su veoma otrovni .

### 3.3.5. Sumpor

Sumpor (S) koji se nalazi u gorivu može biti organskog i neorganskog porekla. Neorganski sumpor može biti piritni ili sulfatni pa je ukupan sumpor:

$$S_{\text{ukupni}} = S_{\text{organski}} + S_{\text{piritni}} + S_{\text{sulfatni}} \quad (3.8)$$

Sagorljivoj masi pripadaju organski i piritni sumpor koji sagorevaju u sumpordioksid i pri tome osloba aju izvesnu toplotu. Ta jedinjenja su ugljenik-sulfid ( $\text{CS}_2$ ), gvož e-sulfid ( $\text{FeS}_2$ ) ili sumpor-vodonik ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Reakcije koje se odvijaju pri procesu sagorevanja sumpora mogu se prikazati na slede i na in [7]:

- pri temperaturi  $550 - 600^\circ\text{C}$  pirit se razlaže prema reakciji:



- pirit reaguje sa vodonikom koji se pojavljuje u procesu sagorevanja poljoprivredne biomase prema reakcijama:



- hemijska reakcija (3.10), se odvija na  $500^\circ\text{C}$ , a hemijska reakcija (3.11), na  $800^\circ\text{C}$ .

Pri visokim temperaturama oko  $1000^\circ\text{C}$ , ugljenik redukuje  $\text{FeS}_2$  prema reakcijama:



Na osnovu navedenih hemijskih reakcija može se kontrolisati transformacija sumpora kroz temperaturene zone koje vladaju pri procesima sagorevanja poljoprivredne biomase u ložištima termoenergetskih postrojenja.

Sulfatni sumpor ulazi u mineralni deo goriva u vidu sulfata  $\text{CaSO}_4$  i  $\text{FeSO}_4$  i zato u procesu sagorevanja dalje ne oksidiše. Sulfatna jedinjenja pri sagorevanju prelaze u pepeo.

### 3.3.6. Kiseonik

Kiseonik (O) služi za oksidaciju sagorljivih elemenata u gorivu. Kiseonik nije sagorljivi deo goriva ali potpomaže i omogu ava sagorevanje. U gorivima se javlja vezan sa drugim elementima. Kiseonik svojim prisustvom umanjuje toplotnu mo poljoprivredne biomase, jer sa hemijskom reakcijom sa H daje  $\text{H}_2$  kao balast (ne sagoriv).

### 3.3.7. Isparljive materije volatili

Isparljive materije – volatili (VM) u gorivu predstavljaju kondenzibilnu i nekondenzibilnu paru koja se osloba a kada se gorivo zagreva. Maseni udeo VM zavisi od brzine zagrevanja i temperature do koje se zagreva. Volatili se prema izrazu (3.14) mogu odrediti:

$$VM = 1 \quad \text{Koks} \quad W \quad (3.14)$$

### 3.3.8. Pepeo

Pepeo (A) predstavlja neorganski vrsti ostatak nakon potpunog sagorevanja goriva. Osnovni inioi pepela su silicijum dioksid, aluminijum, gvož e i kalcijum, a magnezijum, titanijum, natrijum i kalijum mogu biti prisutni u malim koli inama. Sadržaj pepela u biomasi je naj eš e veoma mali, ali može da ima zna ajnu ulogu pri koriš enju biomase naro ito ako sadrži alkalne metale kao što je kalijum. Ovaj problem se naj eš e javlja kod slame, trave i drvne biomase.

Temperatura topljenja pepela je najvažniji faktor u procesima sagorevanja poljoprivredne biomase. Pepeo, kao mešavina više komponenata nema jednu odre enu temperaturu topljenja. Pojava topljenja pepela je veoma zna ajna za ocenu ponašanja pepela u ložištu. Visok sadržaj kalijuma u pepelu dovodi do problema sa slepljivanjem pepela nastalog sagorevanjem biogoriva i formiranjem naslaga što nepovoljno uti e na termoenergetsko postrojenje.

Prema temperaturi topljenja pepela deli se na:

- lakotopljiv (do 1200 °C)
- topljiv ( od 1200–1350 °C )
- teškotopljiv ( od 1350 –1650 °C )
- prakti no netopljiv ( preko 1650 °C )

Temperatura topljenja pepela može se odrediti pomo u izraza [8]:

$$IT(\text{indeks topljivosti}) = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO + \text{alkalni metali}} \quad (3.15)$$

gde su:  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  i  $MgO$  – maseni udeli pojedinih komponenata pepela u biomasi, kg/kg.

Na osnovu IT imamo podelu:

- lako topljiv pepeo IT (0,2 – 1,5)
- srednje topljiv pepeo IT (1,5 – 2,5)
- teško topljiv pepeo IT (ve e od 2,5)

Analizom izraza (3.15) može se zaklju iti da se pepeo lakše topi ukoliko u pepelu biomase ima manje silikata i aluminijumovih jedinjenja. Pove anjem masenih udela alkala i jedinjenja kalcijumovih i magnezijumovih oksida u biomasi tako e dolazi do pove anja topljivosti pepela.

### 3.3.9. Vлага

Visok sadržaj vlage (W) je osnovna karakteristika biomase. Za neke vrste biomase može dosti i ak i 95% (Tabela 3.3). Usled vlage se gubi veliki deo energije iz postrojenja za termohemijsku konverziju jer se energija koja se koristi za isparavanje ne obnavlja. Zbog toga je vlaga zna ajni ulazni parametar pri projektovanju postrojenja za sagorevanje biomase i procene troškova sušenja biomase.

**Tabela 3.3.** Sadržaj vlage razli itih vrsta biomase [4]

	Slama kukuruzovine	Pšeni na slama	Pirin ana slama	Ljuske pirin a	Kora drveta	Piljevina	Vodeni ljljan
Vлага Maseni udeo (%)	40–60	8–20	50–80	7–10	30–60	25–55	95,3

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

U Tabeli 3.4. dati su podaci tehni ke i elementarne analize poljoprivrednih biomasa prikazanih od strane raznih autora. Mogu se uo iti prili ne neujedna enosti masenih udela pojedinih komponenata u razli itim vrstama poljoprivredne biomase.

**Tabela 3.4.** Elementarna i tehni ka analiza razli itih vrsta poljoprivrednih biomasa prema razli itim autorima

Poljoprivredna Biomasa	Elementarna analiza					Tehni ka analiza				
	C	H	N	S	O	VM	C <sub>fix</sub>	W	A	H <sub>d</sub>
	Maseni udeo (%)					Maseni udeo ( €)				(kJ/kg)
Kukuruzna slama [9]	41,64	5,47	0,60	0,07	37,71	67,70	17,80	7,40	7,10	14855,63
Kukuruzna slama [10]	42,20	5,50	0,70	0,10	35,00	68,60	14,90	10,70	5,80	15413,44
Kukuruzna stabljika [11]	37,95	6,47	0,77	0,59	40,76	69,86	16,68	7,39	6,06	14410,52
Pšeni na slama [9]	41,25	5,09	0,58	0,14	36,41	67,20	16,30	10,10	6,40	14398,93
Pšeni na slama [12]	41,63	4,67	1,65	0,00	31,20	57,64	21,50	8,50	12,35	14834,00
Ovsena slama [9]	42,16	5,18	0,43	0,07	38,53	73,90	12,50	8,20	5,40	14535,33
Sojina ljuska [9]	40,22	5,94	0,80	0,09	41,55	69,60	19,00	6,30	5,10	14391,81
Sojina slama [13]	36,88	5,71	0,41	0,00	38,60	60,73	20,91	11,35	7,05	13291,82
Je mena slama [9]	41,40	5,20	0,59	0,11	36,54	67,40	16,40	11,50	4,70	14525,31
Pirin ana slama [9]	36,97	4,21	0,74	0,12	31,73	59,40	14,40	7,60	18,60	12650,53

Za potrebe eksperimenta ura ena je tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase u Institutu za nizijsko šumarstvo i životnu sredinu i Instituta za ratarstvo i povrtarstvo iz Novog Sada (Tabela 3.5.). Može se uo iti da postoji prili no dobra ujedna enost masenih udela komponenata za razne vrste poljoprivredne biomase.

**Tabela 3.5.** Tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase koriš ena pri eksperimentalnom ispitivanju procesa pirolize

Poljoprivredna biomasa	Tehni ka analiza					Elementarna analiza				
	(wt%)				(kJ/kg)	Suva osnova (wt%)				
	Vlaga (W)	Pepeo (A)*	Fiksni ugljenik (C <sub>fix</sub> )	Volatili (VM)	Donja toplotna mo , (Hd)	Ugljenik (C)	Vodonik (H)	Azot (N)	Ukupan sumpor (S)	Kiseonik (O)**
Slama kukuruzovine	13,17	11,52	16,60	60,23	16291	48,23	8,18	0,81	0,18	31,08
Pšeni na slama	14,77	7,80	16,35	62,23	16590	48,23	8,30	1,09	0,19	34,38
Sojina slama	12,08	3,02	18,74	66,52	17465	53,05	7,78	0,89	0,16	35,10
Ovsena slama	12,22	15,06	15,38	59,18	16676	44,82	7,88	1,20	0,14	30,89
Mešavina navedenih slama	13,06	9,35	16,77	62,04	16756	48,58	8,04	1,00	0,17	32,86

\*Suva osnova

\*\*Vrednost kiseonika odre ena je prora unom

### 3.5. Uticaj hemijskog sastava poljoprivredne biomase na toplotnu mo

Toplotna mo goriva (poljoprivredne biomase) se definiše kao odnos oslobo ene koli ine toplote pri potpunom sagorevanju goriva i koli ine goriva iz koje je toplota oslobo ena. U opštem slu aju, gorivo se sastoji od gorivog dela i balasta (negorivog dela). Vlaga, zajedno sa mineralnim materijama, ini tzv. spoljnu balast. Vlaga se u gorivu javlja u tri oblika: kao gruba, higroskopna i konstitucionalna. Vlaga umanjuje toplotnu mo goriva jer se za njeno isparavanje troši deo toplote nastao sagorevanjem goriva. Shodno tome, razlikujemo gornju i donju toplotnu mo goriva.

Gornja toplotna mo goriva (H<sub>g</sub>) je koli ina toplote koja se oslobodi potpunim sagorevanjem jedinice mase goriva pod slede im uslovima:

- voda iz produkata sagorevanja, koja poti e od vlage iz goriva i od sagorelog vodonika (H<sub>2</sub>), prevedena je u te no stanje,
- produkti sagorevanja goriva dovedeni su na temperaturu koju je gorivo imalo na po etku i
- sumpor (S) i ugljenik (C) iz gorive materije se nalaze u obliku svojih dioksida (SO<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>), dok do sagorevanja azota (N<sub>2</sub>) nije došlo.



Donja toplotna mo goriva ( $H_d$ ) je koli ina toplote koja se oslobodi potpunim sagorevanjem jedinice mase goriva pod slede im uslovima:

- voda u produktima sagorevanja ostaje u parnom stanju,
- produkti sagorevanja goriva dovedeni su na temperaturu koju je gorivo imalo na po etku i
- sumpor (S) i ugljenik (C) iz gorive materije se nalaze u obliku svojih dioksida ( $SO_2$  i  $CO_2$ ), dok do sagorevanja azota ( $N_2$ ) nije došlo.

Veza izme u gornje i donje toplotne mo i kod vrstih goriva može se predstaviti relacijom [14]:

$$H_g = H_d + 2500 \cdot (9H + W), \quad (\text{kJ} / \text{kg}) \quad (3.16)$$

gde su:

W - maseni udeo vlage u gorivu, (kg/ kg),

H - maseni udeo vodonika u gorivu, (kg/ kg).

Ako su poznati rezultati elementarne analize poljoprivredne biomase, donja toplotna mo može se odrediti koriš enjem izraza [14]:

$$H_d = 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W, \quad (\text{kJ} / \text{kg}) \quad (3.17)$$

gde su:

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

Uticaj balasta (masenih udela pepela i vlage) na donju toplotnu mo vlažne poljoprivredne biomase može se proceniti pomo u izraza:

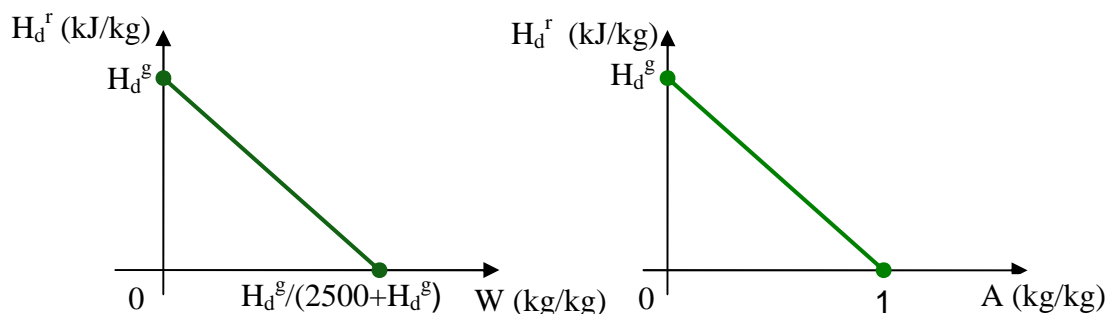
$$H_d^r = H_d^g \cdot (1 - A - W) - 2500 \cdot W, \quad (\text{kJ} / \text{kg}) \quad (3.18)$$

Definišu i grani ne uslove  $A = 0$  i  $W = 0$  pri  $H_d^g = \text{const.}$  jedna ina (3.18) transformiše se u jedna ine:

$$\frac{W}{H_d^g} + \frac{H_d^r}{2500 + H_d^g} = 1 \quad (3.19)$$

$$\frac{A}{1} + \frac{H_d^r}{H_d^g} = 1 \quad (3.20)$$

iji grafici predstvaljaju opadaju u linearnu funkciju kao što je prikazano na Slici 3.5. Može se приметiti osetno smanjenje donje toplotne mo i poljoprivredne biomase sa pove anjem masenih udela vlage i pepela.



**Slika 3.5.** Zavisnost donje toplotne mo i goriva poljoprivredne biomase od masenog udela vlage i pepela

### 3.6. Kvalitativna ocena karakteristika mešavina navedenih biomasa

Poznavanje karakteristika poljoprivredne biomase zna ajno je u mnogim procesima: sagorevanju, pirolizi, gasifikaciji, pre iš avanju dimnih gasova itd. Tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase predstavlja polaznu osnovu u raznim tehni kim prora unima. Kvalitativnom analizom obuhva ene su karakteristike poljoprivredne biomase, i to maseni udeli: isparljivih materija (VM), vlage (W), pepela (A) i donja toplotna mo ( $H_d$ ).

Od statisti kih parametara odre eni su [15]:

1. apsolutni raspon

$$R = \max X_i - \min X_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3.21)$$

2. aritmeti ka sredina

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.22)$$

3. standardno odstupanje

$$\dagger = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

4. koeficijent varijacije

$$C_v = \frac{\dagger}{\bar{X}} \cdot 100, (\%) \quad (3.24)$$

gde su:

n - broj uzoraka,

$X_i$  - vrednosti razmatranih (obeležja) karakteristika mešavine navedenih biomasa.

Koriš enjem broj anih vrednosti karakteristika mešavine navedenih biomasa iz Tabele 3.5. kao i izraza 3.21 do 3.24, izra unati su statisti ki parametri za maseni udeo isparljivih materija, pepela i donju toplotnu mo mešavine poljoprivredne biomase. Rezultati prora una prikazani su u Tabeli 3.6.

**Tabela 3.6.** Kvalitativne karakteristike mešavine poljoprivredne biomase

Karakteristike poljoprivredne biomase	Statisti ki parametri mešavine poljoprivredne biomase			
	R	$\bar{X}$	†	$C_v$ (%)
$W \left( \frac{\text{kgW}}{\text{kgB}} \right)$	2,69	13,06	1,24	9,49
$VM \left( \frac{\text{kgVM}}{\text{kgB}} \right)$	7,34	62,04	3,24	5,22
$A \left( \frac{\text{kgA}}{\text{kgB}} \right)$	12,04	9,35	5,16	55,19
$H_d \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$	1174,00	16756,00	500,95	2,99

Koeficijent varijacije ( $C_v$ ) ukazuje na odstupanja razmatranih karakteristika mešavine poljoprivredne biomase od srednje vrednosti. Najve e odstupanje od srednje vrednosti odnosi se na karakteristiku pepela (A) u biomasi i iznosi 55,19% i vlage (W) od 9,49 %. Ovo ukazuje na ve e oscilacije masenog udela pepela i vlage u datoj biomasi koje može nepovoljno da uti e na rad kotlovskog i elektrofiltarskog postrojenja, kao i na nemogu nost primene suvih postupaka odsumporavanja dimnih gasova zbog dodatne koli ine praha.

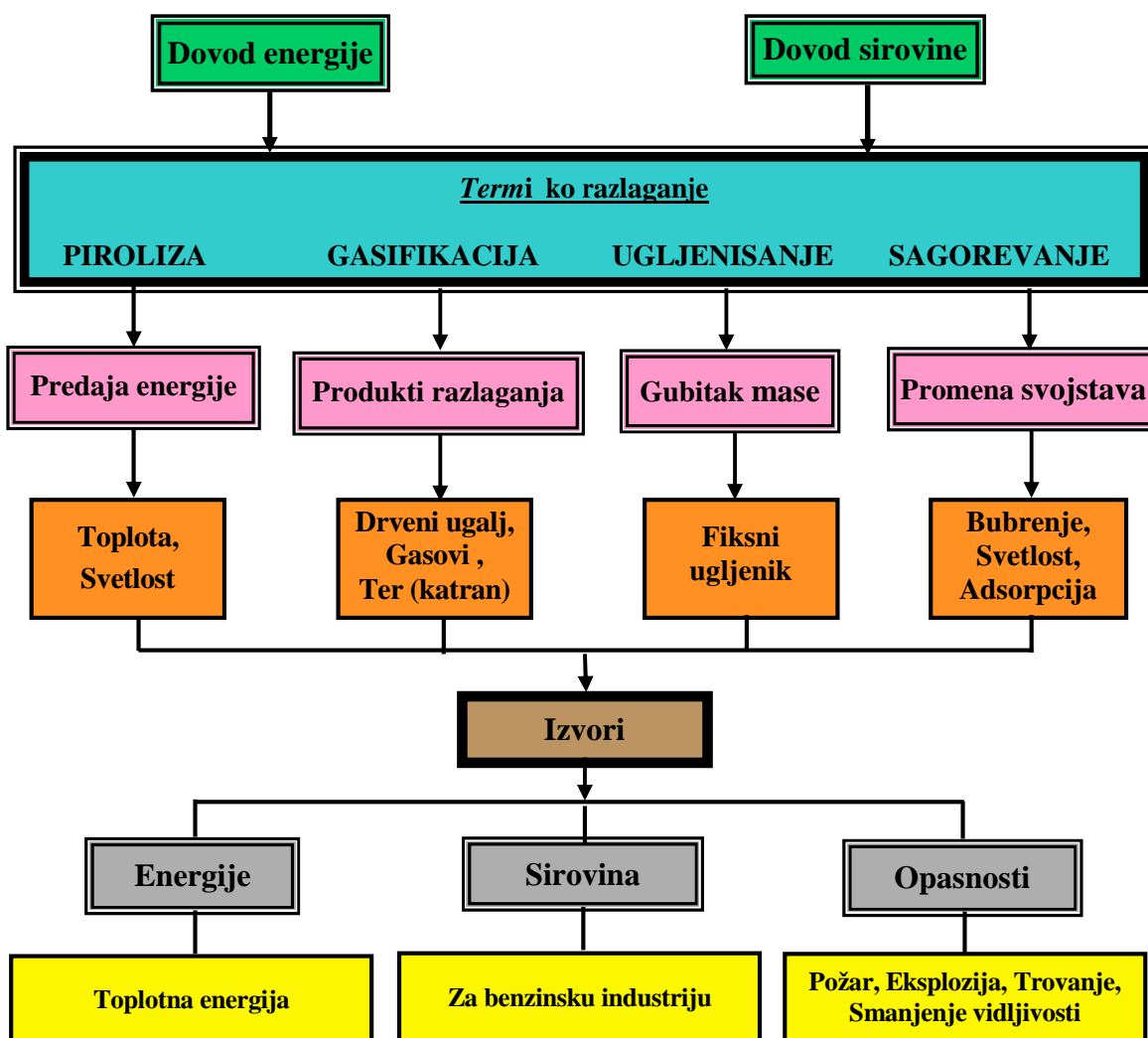
## LITERATURA

- [1] Miti D., Stankovi M., Proti M. Biomasa za toplotnu energiju. Fakultet zaštite na radu Univerziteta u Nišu. Niš. 2009.
- [2] Bonefa i I. Analiza utjecaja oblika i veli ine estica biomase pri izgaranju. doktorska disertacija, Sveu ilište u Rijeci, Tehni ki fakultet, Rijeka. 2012.
- [3] Vigouroux R. Z. Pyrolysis of biomass. Ph.D. diss, Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm. 2001.
- [4] Basu P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Second Edition. Elsevier, USA. 2013.
- [5] Stanojevi P. Istraživanje uticaja procesnih parametara dimnih gasova na optimizaciju elektrofiltra. Doktorska disertacija, Fakultet tehni kih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2008.
- [6] Guli M., Brki Lj., Perunoovi P. Parni kotlovi. Mašinski fakultet univerziteta u Beogradu, Beograd. 1991.
- [7] Omerovi M. R. Uticaj temperature i granulometrijskog sastava sorbenta (kre njaka –  $\text{CaCO}_3$ ) na odsumporavanje dimnih gasova suhim aditivnim postupkom. Magistarska teza, Mašinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo. 2012.
- [8] uri S. Uticaj karakteristika ugljeva (masenog udela sumpora i pepela i sastava pepela) i temperature dimnih gasova na odsumporavanje dimnih gasova suvim aditivnim postupkom. Magistarska teza, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd. 1998.
- [9] Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva C. G. An overview of the chemical composition of biomass. Fuel 89 (5): 913 – 933. 2010.
- [10] Wang L., Shen S., Yang S., Shi X. Experimental investigation of pyrolysis process of corn straw. International Journal of Low-Carbon Technologies 00: 1 – 4, 2010.
- [11] Wang Q., Xu H., Liu H., Jia C., Zhao W. Co-combustion Performance of Oil Shale Semi-coke with Corn Stalk. Energy Procedia 17 (Part A): 861 – 868, 2012.
- [12] Demirbas A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. Fuel 76 (5): 431 – 434, 1997.
- [13] Stojanovi A., Nemoda S., Eri A., Repi B., Daki D., urovi D. Procena efikasnosti konverzije koksnog ostatka u zoni sagorevanja balirane poljoprivredne biomase. Laboratorija za termotehniku i energetiku, Institut za nuklearne nauke Vin a, 2010.
- [14] or evi B., Valent V., Šerbanovi S. Termodinamika i termotehnika, drugo dopunjeno izdanje. Gra evinska knjiga, Beograd. 1990.

- [15] uri S., Brankov S., i dr. : Qualitative analysis of coal combusted in boilers of the thermal power plants in Bosnia and Herzegovina, *Thermale science*, 16(2): 605-612, Beograd. 2012.

## 4. TERMI KI POSTUPCI PRERADE POLJOPRIVREDNE BIOMASE

Smanjivanje rezervi fosilnih goriva i potreba za smanjenjem emisije štetnih gasova, kao što su ugljen – dioksid i sumpor – dioksid, doveli su do intenziviranja istraživanja tehnologija konverzije biomase u druge vidove energije. Poljoprivredna biomasa može biti konvertovana u neki drugi oblik energije ili prerađeno biogorivo termičkim postupcima konverzije. Na Slici 4.1. prikazani su termički postupci prerade poljoprivredne biomase.



Slika 4.1. Termički postupci prerade poljoprivredne biomase [1]

Osnovni postupci konverzije biomase u energiju su: piroliza, gasifikacija, direktno sagorevanje i likvefakcija (prevo enje u te nu fazu).

**Piroliza** – je termi ki postupak koji se odvija bez prisustva kiseonika. Produkti koji nastaju procesom pirolize su: koksni ostatak, piroliti ko ulje i piroliti ki gas. Koksni ostatak može da se preradi do nivoa aktivnog uglja za upotrebu u zaštitnim sredstvima i metalurgiji i u doma instvima kao umur za pravljenje roštilja. Piroliti ki gas može da se koristi za proizvodnju toplotne i elektri ne energije ili da se sintetiše kako bi se dobio metanol ili amonijak. Piroliti ko ulje se prera uje u te no gorivo, koje može da se dalje upotrebi za proizvodnju elektri ne energije i za sagorevanje.

**Gasifikacija** - predstavlja proces termi ke destrukcije goriva u prisustvu oksidanta dovedenog iz spoljašnje atmosfere. Gasifikacija je proces nepotpunog sagorevanja sa organizovanom redukcijom nastalog CO<sub>2</sub> i destrukcijom H<sub>2</sub>O koriš enjem dobijenog koksno g ostataka. Glavne komponente gasa dobijenog procesom gasifikacije su: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i drugi ugljovodonici.

**Sagorevanje** – predstavlja složen fizi ko – hemijski proces u okviru koga nastaje odre ena koli ina energije (toplotne i svetlosne) kao i materijalni produkti sagorevanja (gasovitih i vrstih – pepeo). Gasoviti produkti mogu da se koriste direktno za zagrevanje u malim jedinicama za sagorevanje, za zagrevanje vode u malim kotlovima za centralno grejanje, zagrevanje vode i proizvodnju pare u kotlovima za proizvodnju elektri ne energije ili kao izvor toplote za procesnu tehniku.

**Likvefakcija** – ute njavanje (prevo enje biomase u te nu fazu) može da se definiše kao termi ka konverzija vrstog biogoriva u te nu fazu na nižim temperaturama (523–623K) i visokim pritiscima (100–200 bar) [2]. U pore enju sa pirolizom, likvefakcija ima ve i prinos te nosti i daje kao rezultat te no gorivo sa višom toplotnom mo i i nižim sadržajem kiseonika.

## 4.1. Piroliza

### 4.1.1. Uvod

Piroliza predstavlja termi ko razlaganje goriva na te nosti, gasove i koksni ostatak, bez prisustva kiseonika. Obi no se podrazumeva da se odvija bez prisustva vode. Proizvodi pirolize mogu da se koriste kao goriva, sa ili bez prethodnog unapre ivanja, ili se mogu koristiti kao sirovina za hemijsku industriju ili industriju materijala. Zbog prirode procesa, prinos korisnih proizvoda je visok u odnosu na druge procese. Proizvodi pirolize se sve više usavršavaju i stoga mogu da se koriste sa ve om efikasnoš u. Proces pirolize podrazumeva primenu goriva kao što su: ugalj, životinjski i komunalni otpad, otpaci od hrane, papir, karton, plastika, guma i biomasa.

### 4.1.2. Vrste pirolize

Postoje tri osnovne vrste procesa pirolize koji se razlikuju po temperaturi i vremenu boravka biomase.

#### 4.1.2.1. Spora piroliza

Konvencionalnu ili sporu pirolizu karakterišu male brzine zagrevanja biomase, niske temperature i dugo vreme boravka gasa i vrste faze (4–8 min). U zavisnosti od sistema, brzine zagrevanja se kre u od 0,1 do 2 °C/s, a preovla aju e temperature su oko 500 °C [3]. Pri nižim temperaturama odvijanja procesa pirolize, najzastupljeniji produkti su koksni ostatak i piroliti ko ulje (ter) [4].

#### 4.1.2.2. Fleš piroliza

Fleš pirolizu karakteriše velika brzina zagrevanja (> 1000 °C/s), kratko vreme boravka (0,1 1 s) vrstih i isparljivih materija i razli it temperaturski opseg u zavisnosti od željenog proizvoda. Kod fleš pirolize, veli ina estice mora biti mala da bi se ublažila ograni enja unutrašnjeg prenosa toplote. Razmatrana vrsta pirolize uglavnom se postiže samo u fluidizovanom sloju ili u fluidizovanom cirkulacionom sloju. Naj eš e se koristi za sintezu bio-ulja. Biomasa se na taj na in može transformisati u oblik koji ima visoku energetske vrednost [5].

#### 4.1.2.3. Brza piroliza

Brza piroliza je visokotemperaturni proces pri kome se biomasa zagreva velikom brzinom, od 10 do 200 °C/s [6] u odsustvu kiseonika. Zbog kratkog vremena boravka vodene pare, proizvodi su visokog kvaliteta, gasovi bogati etilenom mogu da se koriste kasnije za proizvodnju alkohola ili benzina. Proizvodnja vrstog ostataka i katrana je znatno manja tokom navedenog procesa.

### 4.1.3. Reakcije procesa pirolize

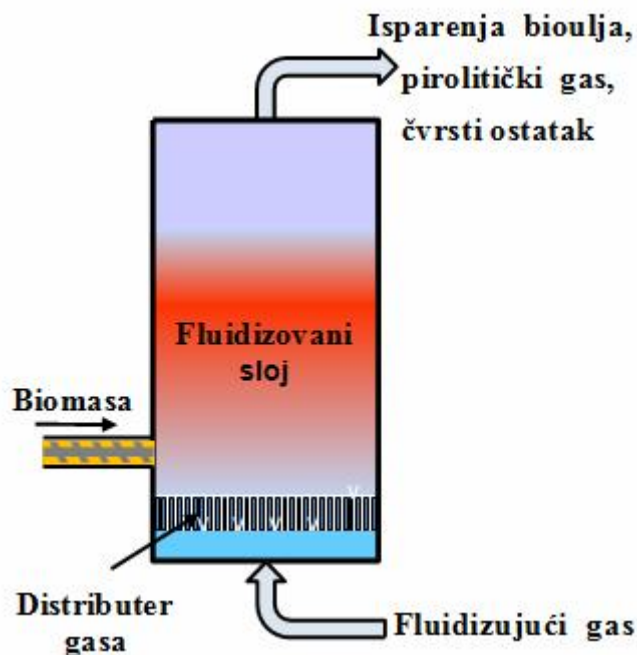
Primarne reakcije pirolize su reakcije dehidracije i reakcije fragmentacije. Pri temperaturi ispod 300 °C, preovla uje reakcija fragmentacije koja podrazumeva depolimerizaciju biomase u primarni ter. Sekundarne reakcije odvijaju se pri povišenim temperaturama (iznad 600 °C) izme u produkata primarnih reakcija, a mogu biti homogene i heterogene. Sekundarne reakcije obuhvataju reakcije repolimerizacije i reakcije krekovanja. Piroliti ko ulje se reakcijom repolimerizacije razlaže na gas, a krekovanjem na koksni ostatak [7].

#### 4.1.4. Reaktori za pirolizu

Postoji više vrsta reaktora za pirolizu. Naj eš e se koriste reaktor sa barbotажnim fluidizovanim slojem, rotiraju i konusni reaktor, reaktor sa cirkulacionim fluidizovanim slojem i reaktor za vakum pirolizu.

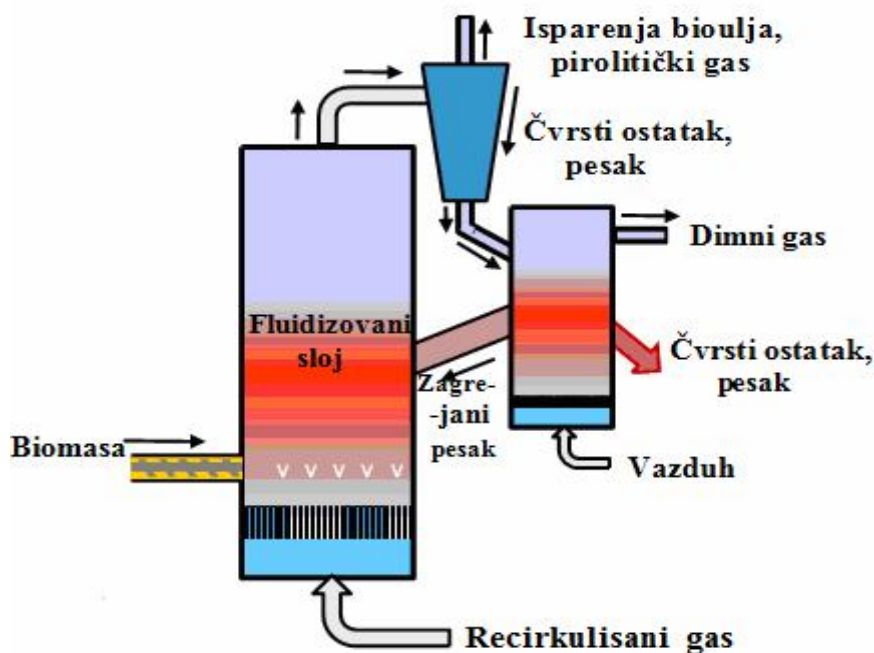
Reaktori sa barbotажnim fluidizovanim slojem (Slika 4.2.) su jednostavniji za projektovanje u odnosu na druge reaktore i karakteriše ih velika kontaktna površina gasa i vrste materije, dobar transfer toplote, jednostavna kontrola temperature i veliki kapacitet za skladištenje toplote. Upotrebom pomenutih reaktora uglavnom se postiže visok prinos te ne faze (oko 70% od ukupne mase suve biomase [8]. Da bi se obezbedile velike brzine zagrevanja potrebno je koristiti gorivo sa malim dimenzijama estica.





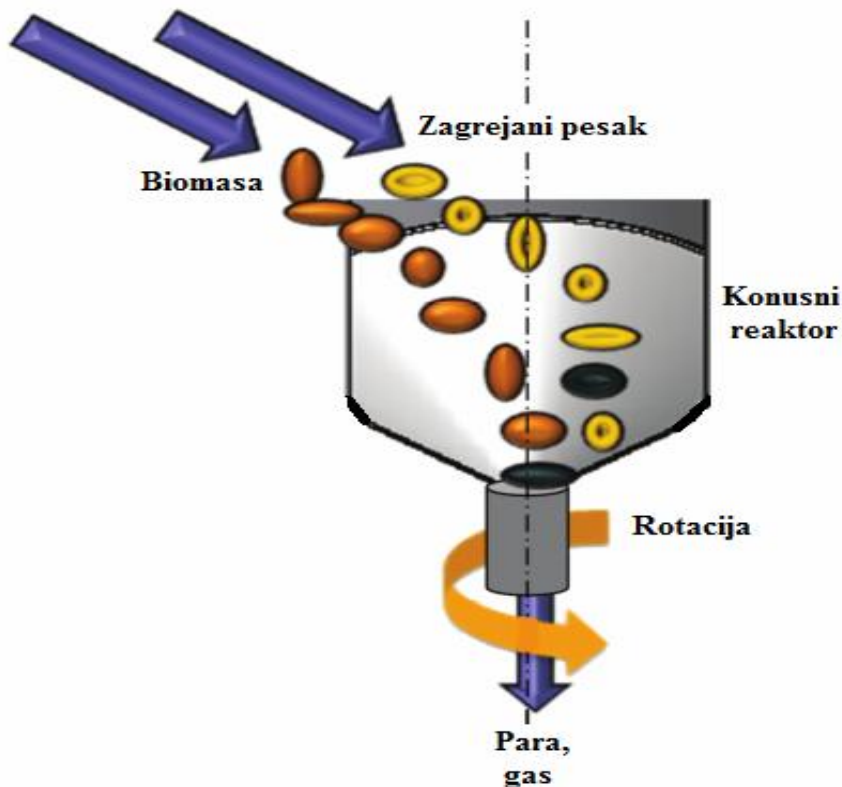
Slika 4.2. Reaktor sa barbotaznim fluidizovanim slojem [9]

Reaktori sa cirkulacionim fluidizovanim slojem (Slika 4.3.) sli ni su sa reaktorima sa barbotaznim fluidizovanim slojem ali imaju kra e vreme boravka vrstog ostatka što dovodi do ve e brzine gasa, para i vrsti ostatak brže napuštaju reaktor i ve i je sadržaj vrstog ostatka u bioulju. U pore enju sa reaktorima sa barbotaznim fluidizovanim slojem, reaktori sa cirkulacionim fluidizovanim slojem imaju ve i radni kapacitet, bolji kontakt gasa i vrste materije i poboljšanu sposobnost da pirolizuju vrste materije koje je teško fluidizovati, ali se re e koriste. Toplotom se snabdevaju uglavnom iz sekundarnog gorionika za vrsti ostatak.



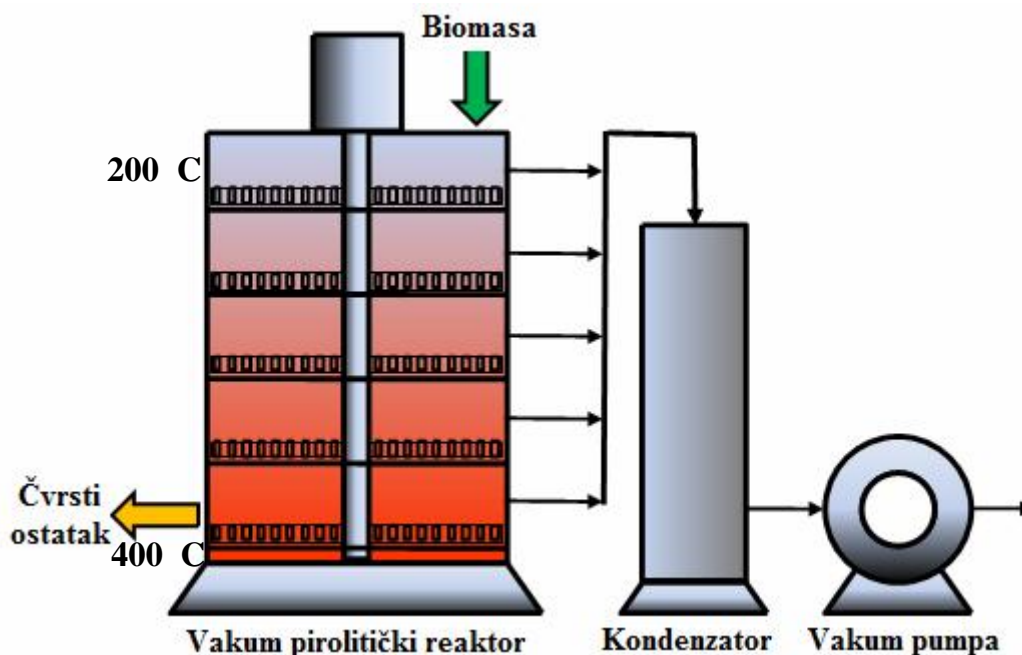
Slika 4.3. Reaktori sa cirkulacionim fluidizovanim slojem [9]

U rotiraju i konusni reaktor za pirolizu (Slika 4.4.) estice biomase na sobnoj temperaturi i zagrejeni pesak uvode se pri dnu kupe, mešaju i transportuju na gore rotacijom kupe. Pritisak je malo iznad atmosferskog pritiska. Može se posti i brzo zagrevanje i kratko vreme boravka gasovite faze.



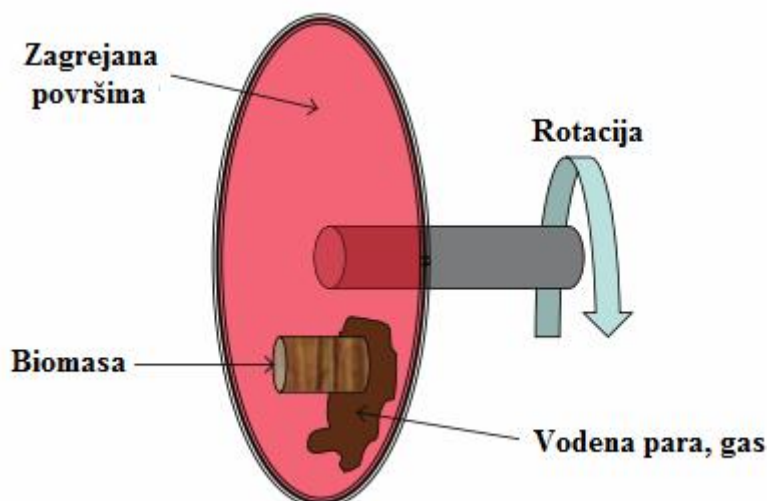
**Slika 4.4.** Rotiraju i konusni reaktor za pirolizu [9]

Reaktor za vakum pirolizu (Slika 4.5.) ini više zagrejanih kružnih plo a. Na gornjoj plo i temperatura je približno 200 °C, a na donjoj približno 400 °C [9]. Sa gornje plo e biomasa dospeva do donjih plo a pomo u strugova. Prilikom kretanja biomasa se suši i podleže procesu pirolize. U razmatranjoj vrsti reaktora nije potreban gas nosa . Kada biomasa do e do najniže plo e preostaje samo vrsti ostatak. I ako je brzina zagrevanja biomase relativno mala, vreme boravka pare u zoni pirolize je kratko. Kao rezultat, prinos te ne faze u ovom procesu je relativno skroman, približno 35–50% suve osnove, dok je prinos vrstog ostatka visok.



Slika 4.5. Reaktor za vakum pirolizu [9]

Reaktor za ablativnu pirolizu, prikazan na Slici 4.6. Ablativna piroliza podrazumeva stvaranje visokog pritiska izme u estice biomase i zagrejanog zida reaktora. To omogu ava neometani transfer toplote sa zida reaktora na biomasu što izaziva topljenje te nog proizvoda iz biomase. Klize i po zidu reaktora biomasa ostavlja te ni film koji isparava i napušta zonu pirolize. Kao rezultat neometanog prenosa toplote i kratkog vremena boravka gasa, prinos te ne faze može da bude ak do 80 % [8]. Pritisak izme u biomase i zida postiže se ili mehani ki ili centrifugalnom silom. Kog mehani kog sistema, veliki komad biomase pritiska se uz rotiraju u zagrejanu plo u.



Slika 4.6. Reaktor za ablativnu pirolizu [8]

## 4.2. Gasifikacija

### 4.2.1. Uvod

Gasifikacija je termohemijski proces pri kome dolazi do konverzije vrstog goriva u gasovito gorivo. Proces gasifikacije se odvija pri visokim temperaturama (700–1000 °C) [10], koje ne dozvoljavaju da se proces sagorevanja razvije i time utroši sva goriva materija. Proces gasifikacije se može podeliti na tri faze: sušenje goriva, piroliza i gasifikacija. Sušenje goriva se odvija do temperature od 110 °C. Pri daljem zagrevanju, pri temperaturama od 250 °C, po inje osloba anje gasova, uglavnom ugljovodonika i oksida ugljenika. Piroliza biomase se odvija u inertnoj atmosferi, odnosno dok nema kiseonika koji bi omogu io sagorevanje, a pri temperaturama višim od 250 °C. Gasifikacija koksnog ostatka, to jest konverzija vrstog gorivog dela u gasovito gorivo, odvija se nakon prethodne dve faze.

### 4.2.2. Postupak gasifikacije

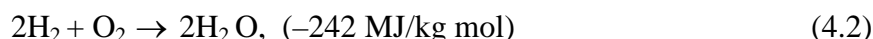
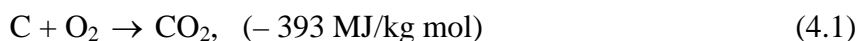
Postupak gasifikacije se odvija kroz etiri razli ite procesne zone:

- zona sušenja – proces u kome se vrši isparavanje vlage iz poljoprivredne biomase na temperaturi od ~100 °C ,
- zona pirolize – proces u kome se osloba aju ter i druge isparljive materije,
- zona sagorevanja – isparljive materije i deo vrstog ostatka reaguju sa kiseonikom i formiraju CO<sub>2</sub> i male koli ine CO,
- zona redukcije – proces u kome produkti nepotpunog sagorevanja (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> i nesagoreli produkti pirolize) reaguju sa vodenom parom i time smanjuju temperaturu nastalih produkata gasifikacije (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>). Temperatura redukcije je (~ 700– 950 °C).

#### 4.2.2.1. Reakcije u zonama sagorevanja i redukcije pri procesu gasifikacije

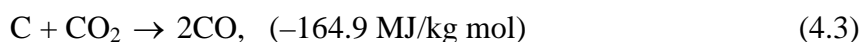
##### ➤ Zona sagorevanja

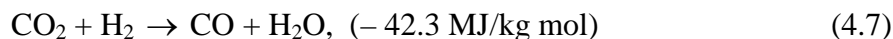
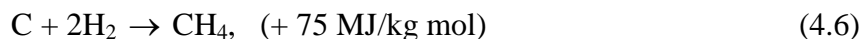
Sagorive materije vrstog goriva obi no sadrže ugljenik, vodonik i kiseonik. Pri potpunom sagorevanju CO<sub>2</sub> se dobija od ugljenika iz biomase, a voda se dobija iz vodonika, obi no u vidu vodene pare. Reakcija sagorevanja je egzotermna i daje teoretsku temperaturu oksidacije od 1450 °C [10]. Stoga, osnovne reakcije su:



##### ➤ Zona redukcije

U zoni redukcije nastaju produkti nepotpunog sagorevanja (voda, ugljen – dioksid i nesagoreli produkti pirolize) i odvijaju se slede e hemijske reakcije:





Reakcije (4.5) i (4.6) su glavne reakcije redukcije i pošto su endotermne imaju sposobnost redukcije temperature gasa. Zbog toga, temperature u zoni redukcije su normalno od 800 do 1000 °C [11]. Niža temperatura u zoni redukcije (~ 700–800 °C), dovodi do niže toplotne vrednosti gasa.

#### ➤ Zona pirolize

Proizvodi pirolize zavise od temperature, pritiska, vremena boravka i toplotnih gubitaka. Do 200 °C izbacuje se samo voda. Izme u 200 i 280 °C osloba aju se ugljen – dioksid i voda. Prava piroliza se odvija izme u 280 i 500 °C, pri emu nastaju velike koli ine tera i gasova koji sadrže ugljen – dioksid. Izme u 500 i 700 °C [11] proizvodnja gasa je mala i nastaje vodonik.

#### ➤ Zona sušenja

U zoni sušenja dolazi do isparavanja vlage iz poljoprivredne biomase na (~100 °C).

### 4.2.3. Stvaranje produkata procesom gasifikacije

Osnovni produkti gasifikacije su: CO, H<sub>2</sub>, i CH<sub>4</sub> ( kao negasifikovan produkt pirolize). Odnos gasovitih proizvoda zavisi od: tipa gasifikatora, karakteristika gorivog dela poljoprivredne biomase, sadržaja vlage u biomasi, temperature gasifikacije, vrste oksidanta, dodavanja vodene pare itd.

Udeo produkata gasifikacije zavisi od više parametara: tipa gasifikatora, karakteristike gorivog dela biomase, sadržaja vlage u biomasi, temperature pri kojoj se odvija gasifikacija, stepena oksidacije gorivih komponenti nastalih pri pirolizi, vrste oksidanta (vazduh ili kiseonik), dodavanja vodene pare.

Udeo tera koji e biti konvertovan u gas zavisi od konstruktivnih rešenja gasifikatora, tehnoloških rešenja i hemijskih ograni enja. Ter koji preostaje, nošen je strujom gasa i obi no se smatra se nepoželjnim. Ter nastao u procesu gasifikacije esto je vrlo slabo reaktivan i teško ga je ukloniti. Odstranjivanje tera iz struje proizvoda gasifikacije jedan je od najvažnijih zadataka u efikasnoj primeni tehnologija gasifikacije.

Toplotna mo tera varira izme u 20–40 MJ/kg [12], a osobine tera zavise od : vrste i osobine biomase, uslova gasifikacije i tipa gasifikatora.

Gasifikacija biomase nudi ve i stepen iskoriš enja pri proizvodnji elektri ne energije u gasnim turbinama u odnosu na klasi na postrojenja za sagorevanje biomase, i omogu ava znatno niže emisije štetnih gasova i estica.

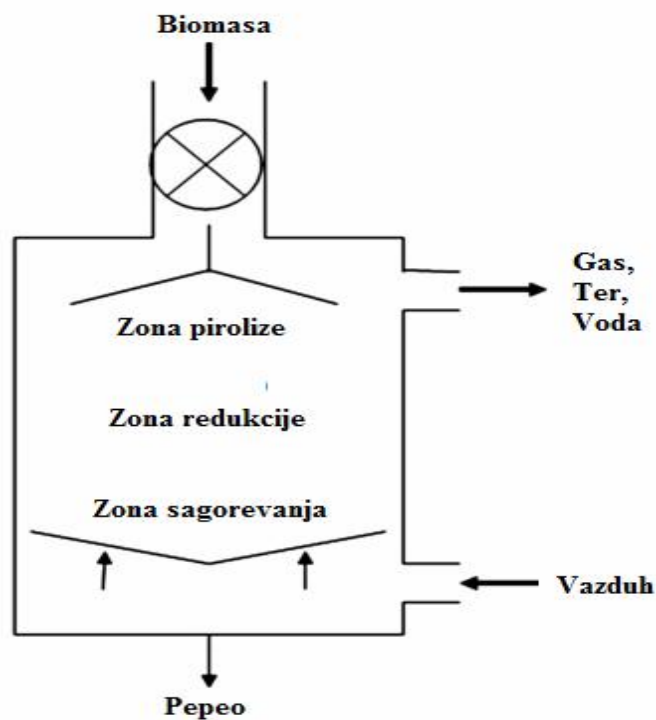
#### 4.2.4. Reaktori za gasifikaciju

Tipovi gasifikatora koji se naj eš e koriste su:

- Reaktori sa fiksnim slojem
- Reaktori sa barbotaznim fluidizovanim slojem
- Reaktori sa cirkulacionim fluidizovanim slojem
- Istosmerni proto ni reaktor

##### 4.2.4.1. Reaktori sa fiksnim slojem

U gasifikatorima sa fiksnim slojem biomasa se obra uje prolaze i kroz zone sušenja, pirolize i sagorevanja koksnog ostatka. Gasifikatori sa fiksnim slojem su najstariji tip gasifikatora i uglavnom se koriste u manjim postrojenjima. Kako su razvijeni pre savremenih sistema sa kompjuterskim upravljanjem, relativno su jednostavni za rad i održavanje. Usled visokih temperatura koje se postižu u zonama sagorevanja koksnog ostatka, gasifikatori sa fiksnim slojem imaju veliki potencijal za uklanjanje pepela i šljake, što uti e na njihovu pouzdanost. Gasifikatori sa fiksnim slojem mogu biti reaktori sa tokom nagore (Slika 4.7.) i reaktori sa tokom nadole (Slika 4.8.) koji imaju razli ite operativne karakteristike.

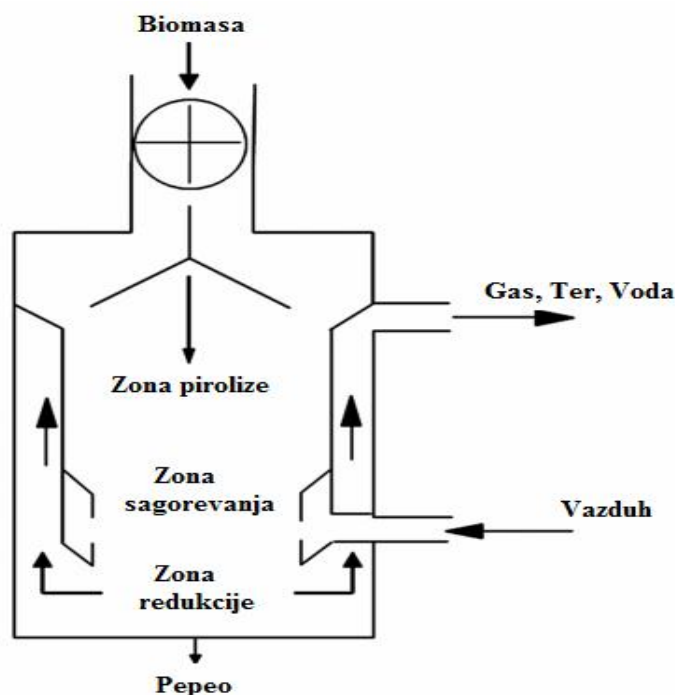


Slika 4.7. Reaktor sa fiksnim slojem sa tokom nagore [13]

Gasifikatori sa tokom nagore su najstariji i najjednostavniji gasifikatori. Kao što je prikazano na Slici 4.7. gorivo ulazi na vrhu gasifikatora. Kako se gorivo kre e suprotno od smera kretanja vazduha ili kiseonika, prolazi kroz faze sušenja, devolatilizacije i sagorevanja koksnog ostatka, pri emu nesagoreli kokсни ostatak i pepeo izlaze pomo u rotiraju e rešetke na dnu gasifikatora. Vazduh ili kiseonik koji ulaze na dnu gasifikatora reaguju sa koksnim ostatkom u zoni sagorevanja i formiraju CO, CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O na temperaturama visokim ak do

1200 °C [13]. Vreo gas obezbe uje energiju potrebnu za zagrevanje, sušenje i pirolizu biomase. U zoni pirolize vrela gasovi dolaze u dodir sa suvom biomasom u opsegu temperature od 400–800 °C i usled toga dolazi do devolatilizacije biomase ime nastaju produkti pirolize i koksni ostatak. Iznad zone pirolize, gasovi i piroliti ke pare suše ulaze u biomasu. Uglavnom su izlazne temperature produkata relativno niske (80–100 °C). Konfiguracija sa suprotnosmernim tokom kod gasifikatora sa tokom na gore dovodi do velike koli ine tera u proizvedenom gasu koji može da stvori naslage na odvodu gasova iz gasifikatora. Iz tog razloga, sintezni gas iz gasifikatora sa tokom na gore uglavnom se odvodi direktno u kotlove za proizvodnju pare ili zagrevanje vode, kojima ter ne predstavlja zna ajan problem.

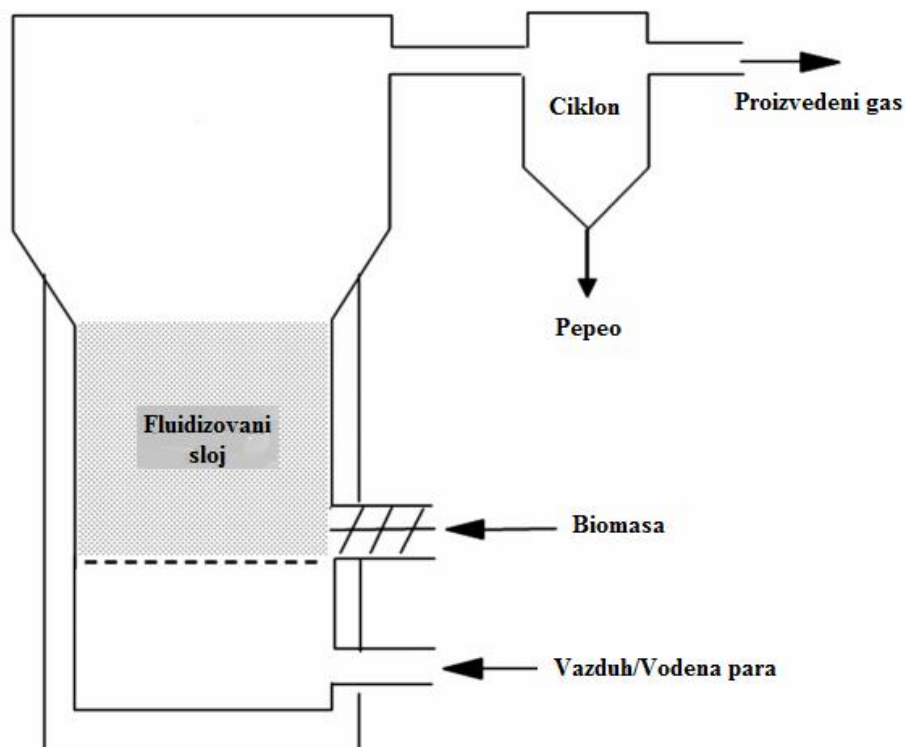
Kao što je prikazano na Slici 4.8., u gasifikatorima sa tokom nadole, gorivo i gasovi teku u istom smeru. Prednost istosmernog toka jeste što volatili oslobo eni tokom postepenog zagrevanja biomase moraju da pro u kroz zonu sagorevanja koksno g ostatak u kojoj usled visoke temperature (800–1200 °C) brzo dolazi do reakcija krekovanja tera. Zagrejani koksni ostatak reaguje sa CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O koji se osloba aju tokom sagorevanja i dobijaju se CO i H<sub>2</sub>. Temperatura gasa na izlazu je visoka (~700 °C). Trebalo bi koristiti gorivo sa niskim sadržajem pepela i visokom temperaturom topljenja pepela kako bi se spre ilo nastajanje šljake u zoni sagorevanja. Tako e, gorivo bi trebalo da ima manje od 20 % vlage (maseni udeo) kako bi se postigle dovoljno visoke temperature za krekovanje tera [13].



**Slika 4.8.** Reaktor sa fiksnim slojem sa tokom nadole [13]

U gasifikatoru sa barbotажnim fluidizovanim slojem, kao što je prikazano na Slici 4.9., gas se kre e na gore kroz sloj zrnastog materijala sa slobodnim tokom pri brzini gasa dovoljno velikoj da pretvori materijal u mešavinu lebde ih estica i mehurova gasa. Barbotажni fluidizovani sloj podse a na te nost koja vri i ima mnoge fizi ke karakteristike sli ne fluidu. Kao materijal u sloju u glavnom se koriste pesak, olivin (ortosilikat gvož a i magnezijuma), kre njak, dolomit ili glina. Sloj se fluiduzuje vazduhom, kiseonikom i/ili vodenom parom. U gasifikatoru sa barbotажnim fluidizovanim slojem, površinska brzina gasa u donjem delu gasifikatora se kontroliše kako bi se održao u fluidizovanom stanju. U gornjem delu

gasifikatora, površina popre nog preseka je uglavnom pove ana kako bi se smanjila površinska brzina gasa u odnosu na brzinu fluidizacije što pomaže esticama da se vrate u sloj. Površina popre nog preseka je ve a kako bi postiglo željeno vreme boravka u gasnoj fazi koje je potrebno za potpunu devolatilizaciju. Da bi se fluidizuju i gas uveo u sloj, koristi se cevovod za dovod gasa ili više prskaju ih cevi.

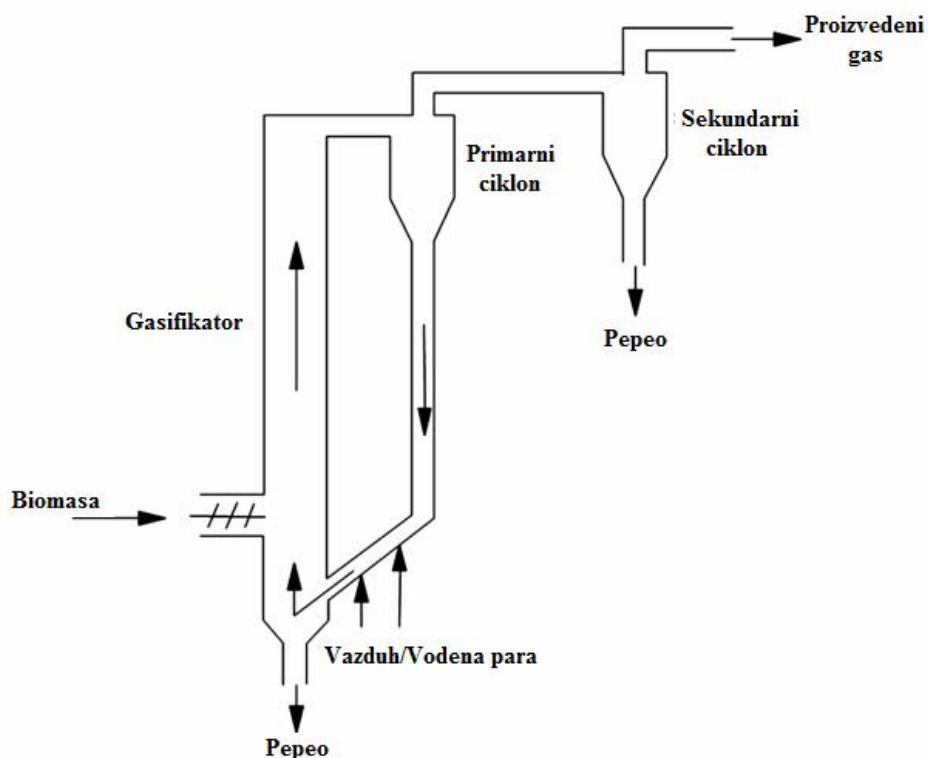


**Slika 4.9.** Reaktor sa barbotaznim fluidizovanim slojem [13]

Biomasa koja ulazi u zagrejeni barbotazni fluidizovani sloj se gotovo trenutno devolatilizuje. Može do i do delimi nog krekovanja tera i delimi ne gasifikacije koksnog ostatka, ali vreme boravka i za gasove i za estice koksnog ostatka je relativno kratko tako da se sastav gasa ne približava ravnotežnom stanju. U gasifikatorima sa fluidizovanim slojem u kojima se vrši delimi na oksidacija, sagorevanje koksnog ostatka u sloju obezbe uje toplotu potrebnu da se održi temperatura u sloju i devolatilizuje biomasa. U indirektno zagrevanim gasifikatorima sa fluidizovanim slojem, toplota se uvodi razmenom toplote kroz zidove gasifikatora ili kroz cevi za razmenu toplote u sloju.

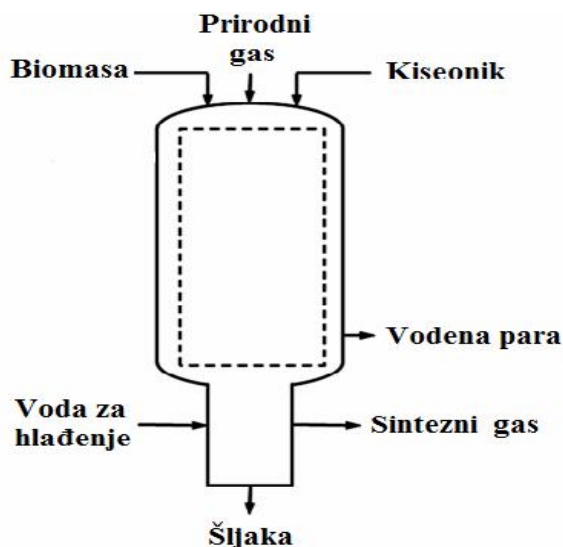
Kod reaktora sa cirkulacionim fluidizovanim slojem (Slika 4.10.), površinske brzine gasa su uglavnom 3 do 5 puta ve e nego kod reaktora sa barbotaznim fluidizovanim slojem. Cirkulacioni fluidizovani sloj može se koristiti za gasifikatore i sa delimi nom oksidacijom i sa indirektnim zagrevanjem. U sistemima sa delimi nom oksidacijom, zona oksidacije je u delu u kome se gas vra a u gasifikator, a gasoviti produkti postaju deo sinteznog gasa. U sistemima sa indirektnim zagrevanjem, kokсни ostatak sagoreva izvan reaktora, dimni gasovi se odvajaju od vrstih estica i u gasifikator se vra aju samo zagrejane vrste estice. Na taj na in se menja sastav sinteznog gasa. Brzina cirkulacije vrstih estica u cirkulacionom fluidizovanom sloju zavisi od koli ine energije koja je potrebna da se gasifikuje biomasa i da se održi maksimalna vrednost temperature koja ne dovodi do nastajanja šljake.





**Slika 4.10.** Cirkulacioni gasifikator sa fluidizovanim slojem [13]

Kao što je prikazano na Slici 4.11., kod istosmernih proto nih gasifikatora, odvojene vrste materije i atomizirane te nosti se injektiraju u struju kiseonika ili vodene pare koji se kre u velikom brznom, gde se brzo gasifikuju pri temperaturi u opsegu 1300–1400 °C. Navedena temperatura je dovoljno visoka da istopi neorganske materije u biomasi, koje izlaze iz zone reakcije u vidu te ne šljake. Izuzetno visoka temperatura dovodi do skoro potpune destrukcije tera, a sastav gasa se uglavnom približava ravnotežnom stanju i ima veoma mali udeo CH<sub>4</sub> i drugih lakih ugljovodonika. Razmatrani gasifikatori se naj eš e koriste za ugalj, a veoma retko za biomasu. Osnovni razlog su visoki troškovi smanjivanja udela vlage i sitnjenja estica (na veli inu 100 μm do 1 mm).



**Slika 4.11.** Istosmerni proto ni gasifikator [13]

## 4.3. Sagorevanje

### 4.3.1. Uvod

U gorivima se sagorevanjem sa kiseonikom osloba a unutrašnja hemijska energija koja se prenosi na molekule pove avaju i njihovu kineti ku energiju. Time se pove ava unutrašnja energija radne materije, a zbog toga i temperatura. Kiseonik se gorivu po pravilu dovodi sa vazduhom u kome ga ima oko 21 % (zapreminski udeo).

Sagorevanje može biti potpuno i nepotpuno. Potpuno sagorevanje je ono kod koga svi gorivi sastojci u potpunosti izgore. U slu aju nedostatka kiseonika za sagorevanje ili slabog mešanja goriva i vazduha, proizvodi sagorevanja mogu sadržavati još uvek gorive materije ili gasove. To je nepotpuno sagorevanje koje je po pravilu nepoželjno jer predstavlja gubitak. Gorivo se sastoji od: gorivih materija, vode i pepela. Sagorevanjem goriva materija prelazi u gasovitu, voda u paru, a pepeo ostaje u vrstom stanju.

Uz gorivo i kiseonik za po etak procesa sagorevanja potrebno je osigurati i tre i uslov, a to je temperatura zapaljenja. Zanimljivo je da se proces oksidacije (spajanje s kiseonikom) javlja na svim temperaturama pri emu se osloba a toplota, ali je kod niskih temperatura proces oksidacije tako spor da se odvo enje toplote lako ostvaruje. Kako temperatura raste, proces oksidacije, a time i osloba anje toplote se intenzivira s naro itim ubrzanjem na temperaturi zapaljenja.

Potpunost procesa sagorevanja zavisi od uslova i kvaliteta obrazovanja gorive smeše, i shodno tome minimalna koli ina kiseonika esto nije u mogu nosti da obezbedi potpuno sagorevanje. Pri idealnim uslovima kod gasovitog goriva je mogu e obezbediti potpuno sagorevanje, dok kod te nog i naro ito vrstog goriva uslovi obrazovanja gorive smeše su daleko od idealnih zbog ega se u ložište uvodi ve a koli ina vazduha od teorijski potrebnog. Veza izme u stvarne i teorijski potrebne koli ine vazduha je linearno proporcionalna. Koeficijent njihove proporcionalnosti naziva se koeficijent viška vazduha.

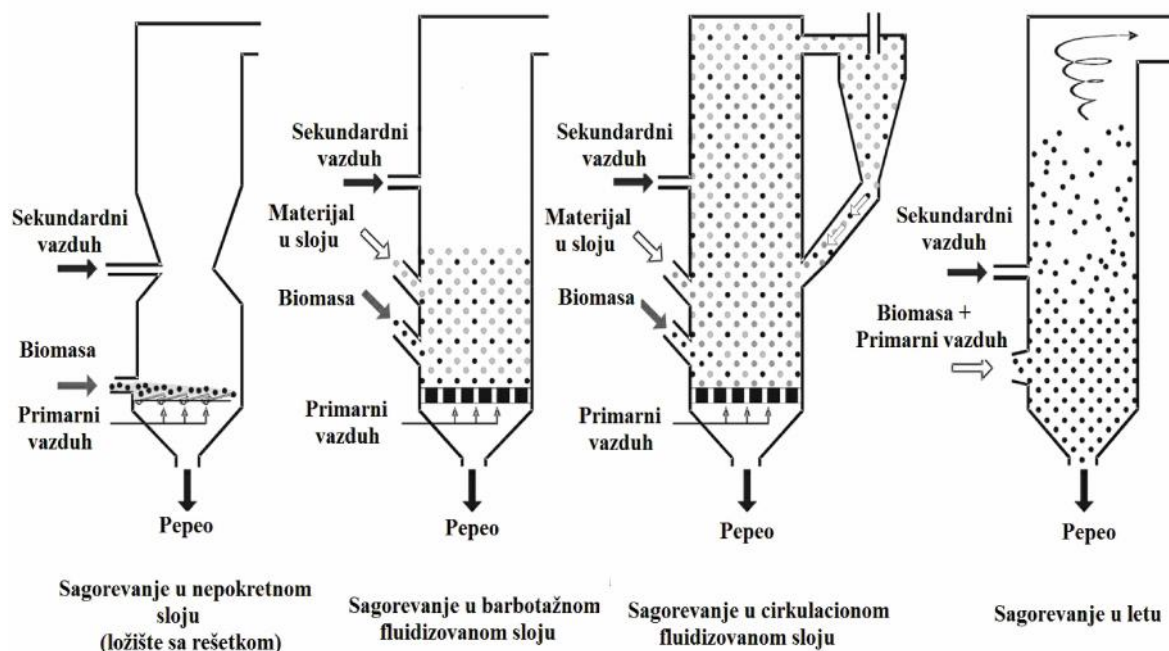
Ekonomi no sagorevanje se postiže pri optimalnim vrednostima koeficijenta viška vazduha koje su definisane:

- Vrstom goriva
- Na inom sagorevanja
- Vrstom ložišta

### 4.3.2. Tehnologije sagorevanja i njihova primena

Tehnologije sagorevanja obuhvataju sagorevanje u nepokretnom sloju, u fluidizovanom sloju, i u letu (Slika 4.12.). Sagorevanje u nepokretnom sloju obuhvata sagorevanje na rešetki i sagorevanje u sloju uz dodavanje goriva odozdo. Primarni vazduh prolazi kroz fiksni sloj, u kome se odvijaju sušenje, gasifikacija i sagorevanje koksnog ostatka. Nakon dodavanja sekundarnog vazduha, dolazi do sagorevanja proizvedenih sagorljivih gasova. Kod sagorevanja u fluidizovanom sloju, dolazi do sagorevanja biomase u mešavini gasa i vrstog materijala u sloju u koji vazduh za sagorevanje ulazi odozdo. U zavisnosti od brzine fluidizacije, razlikuju se barbotožni i cirkulacioni sloj. Sagorevanje u letu pogodno je za gorivo koje je usitnjeno (pre nika manjeg od 2 mm). Mešavina goriva i primarnog vazduha za

sagorevanje uvodi se u komoru za sagorevanje. Do sagorevanja dolazi dok je gorivo u mešavini, a nakon dodavanja sekundarnog vazduha, sagoreva i gas.



**Slika 4.12.** Sagorevanje u nepokretnom sloju, barbotažnom i cirkulacionom fluidizovanim slojem i sagorevanje u letu [14]

#### 4.3.2.1. Sagorevanje na rešetki

Sagorevanje na nepokretnoj rešetki se koristi za postrojenja male snage (< 1 MW), a na pokretnoj rešetki za postrojenja srednje snage (do 10 MW, pa i više). Sagorevanje na rešetki je pogodno za biomasu sa povišenim sadržajem vlage i pepela, kao i za širok opseg veli ina i oblika estica (ali bez sitnih frakcija < 5 mm). Veoma je zna ajno da se gorivo ravnomerno dozira po širini rešetke i da postoji kontrola visine sloja goriva na rešetki. Tako e je vrlo važno da se kontroliše i reguliše koli ina vazduha po dužini rešetke, tj. po zonama koje odgovaraju sušenju, gasifikaciji i sagorevanju koksnog ostatka. Kontrola distribucije vazduha omogu ava rad postrojenja i na snagama od oko 25% od nominalne. Regulacijom koli ine vazduha kroz rešetku (tzv. primarni vazduh) mogu e je održavati redukcione uslove u ložištu, sa ciljem smanjenja emisije azotnih oksida.

#### 4.3.2.2. Sagorevanje u sloju uz doziranje goriva odozdo

Ložišta sa dodavanjem goriva odozdo naj eš e se koriste za usitnjenu biomasu dimenzija manjih od 50 mm, koja u sebi ima malo pepela. Gorivo se uglavnom potiskuje odozdo pužnim transporterima. Najbolje karakteristike razmatrana ložišta pokazuju do snage od 6 MW [15]. Važno je ista i da su do navedene snage investicioni troškovi za realizaciju opisanog postrojenja niži u odnosu na postrojenja gde se primenjuju druge tehnologije, npr. ložišta za sagorevanje goriva na rešetkama.

#### 4.3.2.3. Sagorevanje u barbotажnom fluidizovanom sloju

Tehnologija sagorevanja u barbotажnom fluidizovanom sloju se koristi za snage ve e od 5 MW. Doziranje biomase je poželjno vršiti u sloju koji se obi no sastoji od peska dimenzija približno 1 mm. U slu aju koriš enja biomase sa visokim sadržajem alkalnih metala, trebalo bi koristiti druge materijale za ispunu sloja, jer silicijum reaguje sa alkalnim metalima stvaraju i niskotopljiva eutekti ka jedinjenja. Primarni vazduh se snabdeva preko distribucione rešetke na dnu sloja i brzine fluidizacije su obi no u opsegu 1–2,5 m/s, a temperature sloja 800–900 °C. Sekundarni vazduh se dodaje u zonu iznad sloja, ime se ostvaruje dvostepeno sagorevanje u cilju smanjenja emisije štetnih azotnih oksida. Tehnologija sagorevanja u barbotажnom fluidizovanom sloju ima prednosti nad drugim tehnologijama u slu aju koriš enja biomase sa širokim opsegom veli ina estica ili sa visokim sadržajem vlage, kao i u slu aju koriš enja mešavina raznovrsnih biomasa ili mešavina biomase sa drugim gorivima, npr. ugljem.

#### 4.3.2.4. Sagorevanje u cirkulacionom fluidizovanom sloju

Pove anjem brzine fluidizacije, obi no do opsega od 5 do 10 m/s, sistem barbotажnog ali stacionarnog fluidizovanog sloja se prevodi u cirkulacioni fluidizovani sloj u kome se sve inertne estice sloja i gorivo kre u kroz ložište. Recirkulacija se ostvaruje izdvajanjem vrstih estica u toplom ciklonu i njihovom vra anju u donji deo ložišta. Temperature u ložištu se obi no kre u u opsegu 800–900 °C, što se kontroliše spoljnim izmenjiva em toplote ili membranskim zidovima u samom ložištu. Kod razmatranog sistema sagorevanja ostvaruje se još ve i stepen turbulentnosti i mešanja i to u celoj zapremini ložišta, nego kod sistema sa barbotажnim fluidizovanim slojem. Zbog toga se kod ove tehnologije sagorevanja postižu i ve e efikasnosti sagorevanja i niže emisije štetnih gasova nego u barbotажnom fluidizovanom sloju. Mane ove tehnologije sagorevanja se ogledaju pre svega u relativno ve im potrebnim investicionim ulaganjima pa se ona koristi za relativno ve e snage (> 30 MW). Poželjno je da biomasa bude usitnjena ispod 20 mm.

#### 4.3.2.5. Sagorevanje u letu

Tehnologija sagorevanja vrstog goriva u letu je široko rasprostranjena za sagorevanje uglja u velikim postrojenjima za proizvodnju elektri ne energije. Za efikasno sagorevanje u letu gorivo mora biti dovoljno usitnjeno iz dva razloga: da bi ga struja gasa mogla nositi sa sobom, i kako bi uspelo potpuno da izgori tokom svog relativno kratkog boravka u zoni visokih temperatura. S obzirom da je sitnjenje biomase na veli inu pogodnu za sagorevanje u letu relativno skup proces, ova tehnologija se primenjuje samo u slu ajevima kada ve postoji pripremljena biomasa pogodna za sagorevanje u letu. To je na primer piljevina drveta, a tako e mogu biti i ljuške suncokreta ili pirin a. Da bi usitnjena biomasa imala što duži put kroz ložište obi no se organizuje struja gasova tako da kretanje estice bude vrtložno. Razmatranom tehnologijom bi se mogle ostvariti visoke temperature sagorevanja, preko 1000°C, što bi pove alo brzinu sagorevanja i omogulo ve i stepen sagorelosti estice goriva. Me utim, pri sagorevanju biomase, potrebno je proces sagorevanja tako organizovati da se izbegnu visoke temperature sagorevanja, pošto je za neke vrste biomase pepeo topiv na temperaturama ispod 800 °C.

### 4.3.3. Tehnologije sagorevanja biomase u Republici Srbiji

U Srbiji se koriste sve gore navedene tehnologije sagorevanja biomase, osim sagorevanja u cirkulacionom fluidizovanom sloju. Nažalost, uglavnom se koriste zastarela tehnološka rešenja bez posebne regulacije procesa, kako sa aspekta ostvarivanja optimalnog stepena korisnosti, tako i sa aspekta emisije štetnih gasovitih produkata.

Ure aji za doma instva koji se proizvode u Srbiji imaju niz ozbiljnih nedostataka. To se u prvom redu odnosi na neprihvatljivo mali ukupni stepen korisnosti koji retko prelazi 50% kod šporeta i 60% kod kotlova (u razvijenim evropskim zemljama ve i od 70%, odnosno 80%). Može se re i da konstruktivnih rešenja ovih ure aja specijalno namenjenih koriš enju biomase u doma instvima prakti no i nema. Obi no su to rešenja koja proizvo a i nude za sva vrsta goriva a ustvari su pogodnija za koriš enje uglja nego za biomasu. U ložišnom prostoru esto nema uopšte ili nema dovoljno šamotnih opeka koje su neophodne za pravilno dogorevanje isparljivih materija, kojih u biomasi ima daleko više nego u uglju. Posledica toga su mala efikasnost sagorevanja i vrlo visoka emisija štetnih gasovitih produkata, u prvom redu CO i aromati nih ugljovodonika. Sli no je stanje i kod ložišta i kotlova u industriji, s tim što se može re i da je koriš enje biomase kao goriva u industrijskoj proizvodnji u Srbiji zanemarljivo u odnosu na druga goriva [16].

Razloga za pomenuto stanje u pogledu koriš enja biomase u Srbiji ima više. Najzna ajniji su: nedovoljno razvijeno tržište koje koristi biomasu i nedostatak investicionih sredstava u industriji i male kupovne mo i stanovništva. Kada bi potražnja za ure ajima na biomasu bila velika, doma i proizvo a i bi se potrudili da imaju kvalitetniju ponudu da bi opstali na tržištu, a ujedno bi imali sredstava za razvoj modernijih koncepcija ovakvih ure aja. Kao razloge za nedovoljno razvijeno tržište koje koristi biomasu mogu se navesti slede i: nepovoljan paritet cena energenata koji i dalje ini koriš enje biomase neprivla nim u odnosu na druge energente, nedovoljno razvijena svest o biomasi kao obnovljivom izvoru energije i njenom zna aju za energetiku Srbije, nedostatak podsticajnih mera vlade Srbije koje bi pospešile koriš enje biomase, kao što su posebni investicioni fondovi (uklju ivši i donatorska sredstva), osloba anje od poreza i sl. [16].

### 4.3.4. Stehiometrijske jedna ine sagorevanja poljoprivredne biomase

Hemijskom analizom se utvr uje hemijski sastav goriva. Pored sagorljivih komponenata (ugljenik (C), vodonik (H), sumpor (S)) u gorivu ima i nesagorljivih komponenata. Nesagorljive komponente ine balast goriva i u njih se ubrajaju: vlaga (W), pepeo (A) i azot (N). Najviše nesagorljivih komponenata ima u vrstom a najmanje u gasovitom gorivu.

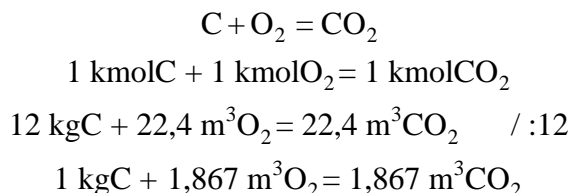
Kod vrstog i te nog goriva se hemijski sastav odre uje u odnosu na jedinicu radne mase goriva. Ako se sastav goriva izrazi masenim udelima komponenata tada jedan kilogram radne mase ima slede i sastav:

$$C + H + S + O + N + W + A = 1 \quad (4.8)$$

gde su:

C, H, S, O, N, W, A - maseni udeli ugljenika, vodonika, sumpora, kiseonika, azota, vlage i pepela u biomasi (gorivu B),  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right)$

**Reakcija potpunog sagorevanja** ugljenika prikazuje se na slede i na in:



Da bi 1 kg ugljenika da bi potpuno sagoreo potrebno je dovesti 1,867 m<sup>3</sup> kiseonika pri emu e se dobiti 1,867 m<sup>3</sup> ugljen-dioksida pri normalnim uslovima (1,013·10<sup>5</sup> Pa i 0 °C). Ako je C maseni udeo ugljenika u gorivu dobija se:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,667 \cdot C, \quad \left(\frac{\text{kg}(\text{CO}_2)}{\text{kg B}}\right) \quad (4.9)$$

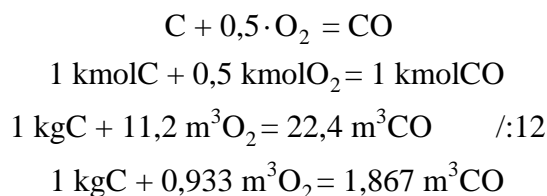
$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \cdot C, \quad \left(\frac{\text{m}^3(\text{CO}_2)}{\text{kg B}}\right) \quad (4.10)$$

gde su:

$m_{\text{CO}_2}$  - masa ugljen-dioksida u dimnim gasovima,  $\left(\frac{\text{kg}(\text{CO}_2)}{\text{kg B}}\right)$

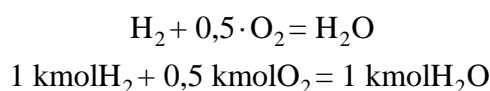
$V_{\text{CO}_2}$  - zapremina ugljen-dioksida u dimnim gasovima,  $\left(\frac{\text{m}^3(\text{CO}_2)}{\text{kg B}}\right)$

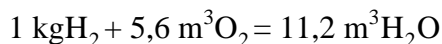
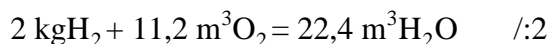
Zbog manjka kiseonika ugljenik delimi no **sagoreva u ugljen-monoksid** prema hemijskoj reakciji:



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

**Vodonik sagoreva** prema reakciji :





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

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot \text{H} + \text{W}, \quad \left( \frac{\text{kg}(\text{H}_2\text{O})}{\text{kg B}} \right) \quad (4.11)$$

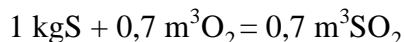
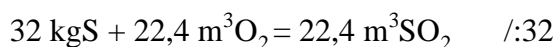
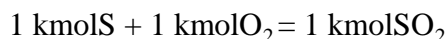
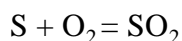
$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot \text{H} + \text{W}), \quad \left( \frac{\text{m}^3(\text{H}_2\text{O})}{\text{kg B}} \right) \quad (4.12)$$

gde su:

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

$$V_{\text{H}_2\text{O}} - \text{zapremina vode u dimnim gasovima}, \quad \left( \frac{\text{m}^3(\text{H}_2\text{O})}{\text{kg B}} \right)$$

**Sagorevanje sumpora** odvija se prema reakciji:



Ako je S maseni udeo sumpora u gorivu dobija se:

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot \text{S} = 2 \cdot \text{S}, \quad \left( \frac{\text{kg}(\text{SO}_2)}{\text{kg B}} \right) \quad (4.13)$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot \text{S} = 0,7 \cdot \text{S}, \quad \left( \frac{\text{m}^3(\text{SO}_2)}{\text{kg B}} \right) \quad (4.14)$$

gde su:

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

$$V_{\text{SO}_2} - \text{zapremina sumpor dioksida u dimnim gasovima}, \quad \left( \frac{\text{m}^3(\text{SO}_2)}{\text{kg B}} \right)$$

U dimnim gasovima prisutni su azot i kiseonik. Obe komponente poti u od vazduha dovedenog za sagorevanje goriva. Za poznati koeficijent viška vazduha i pri potpunom sagorevanju goriva ukupno e biti azota i kiseonika po formuli:

$$m_{\text{N}_2} = 0,77 \cdot L + N = 0,77 \cdot L_{\text{min}} + N, \quad \left( \frac{\text{kg}(\text{N}_2)}{\text{kg B}} \right) \quad (4.15)$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L + \frac{22,4}{28} \cdot N, \left( \frac{m^3(N_2)}{kg B} \right) \quad (4.16)$$

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot (-1) \cdot L_{min}, \left( \frac{kg(O_2)}{kg B} \right) \quad (4.17)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (-1) L_{min}, \left( \frac{m^3(O_2)}{kg B} \right) \quad (4.18)$$

gde su:

$$m_{N_2} - \text{masa azota u dimnim gasovima}, \left( \frac{kg(N_2)}{kg B} \right)$$

$$V_{N_2} - \text{zapremina azota u dimnim gasovima}, \left( \frac{m^3(N_2)}{kg B} \right)$$

$$m_{O_2} - \text{masa kiseonika u dimnim gasovima}, \left( \frac{kg(O_2)}{kg B} \right)$$

$$V_{O_2} - \text{zapremina kiseonika u dimnim gasovima}, \left( \frac{m^3(O_2)}{kg B} \right)$$

- koeficijent viška vazduha, (-)

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0,23} - \text{minimalna (teorijska) potrošnja vazduha}, \left( \frac{kg(vazduha)}{kg B} \right)$$

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0,21} - \text{minimalna (teorijska) potrošnja vazduha}, \left( \frac{m^3(vazduha)}{kg B} \right)$$

$$O_{min} = 2,667 \cdot C + 8 \cdot H + S - O - \text{minimalna (teorijska) potrošnja kiseonika}, \left( \frac{kg(O_2)}{kg B} \right)$$

$$O_{min} = 1,867 \cdot C + 5,6 \cdot H + 0,7 \cdot (S - O) - \text{minimalna (teorijska) potrošnja kiseonika}, \left( \frac{m^3(O_2)}{kg B} \right)$$

$$L = \cdot L_{min} - \text{stvarna potrošnja vazduha}, \left( \frac{kg(vazduha)}{kg B} \right), \left( \frac{m^3(vazduha)}{kg B} \right)$$

$$N_2 - \text{maseni udeo azota u gorivu}, \left( \frac{kg(N_2)}{kg B} \right)$$

Potpuno sagorevanje goriva u ložištu organizuje se tako da koeficijent viška vazduha bude ve i od jedinice. Usled toga u dimnim gasovima ima viška kiseonika. Ako se hemijskom analizom odredi ovaj višak kiseonika i uporedi sa udelom azota u dimnim gasovima tada je mogu e izra unati koeficijent viška vazduha.

Koeficijent viška vazduha je odnos izme u stvarne (L) i teorijske ( $L_{min}$ ) potrošnje vazduha pri sagorevanju goriva. Koeficijent viška vazduha utvr uje se eksperimentalnim putem. Pri projektovanju ložišnog prostora koeficijent viška vazduha se bira prema vrsti goriva, na inu sagorevanja i konstruktivnim karakteristikama ložišta. Orije tacione vrednosti koeficijenta viška vazduha za razli ite vrste goriva i ložišta su: gasovito gorivo ( $=1,0-1,2$ ), te no gorivo



( $\lambda = 1,15-1,30$ ), ugalj – ru no loženje/nepokretna rešetka ( $\lambda = 1,50-1,70$ ), ugalj – pokretna rešetka ( $\lambda = 1,20-1,40$ ). Kod savršenijih ložišta i ložišta sa boljim mešanjem i sagorevanjem goriva stvarna potrošnja je bliska i ne mnogo ve a od teorijske potrošnje vazduha.

Usled sagorevanja goriva, pomo u atmosferskog vazduha, u dimnim gasovima se nalaze  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$  i neiskoriš eni  $\text{O}_2$ . Kada je koeficijent viška vazduha jednak jedinici, a gorivo potpuno sagorilo, u dimnim gasovima nema neiskoriš enog niti viška vazduha. Kada se voda isklju i iz razmatranja kaže se da su dimni gasovi suvi a dimni gasovi u kojima je prisutna voda nazivaju se vlažni.

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

$$m_{\text{vdg.}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2}, \quad \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg B}} \right) \quad (4.19)$$

a masa suvih dimnih gasova:

$$m_{\text{sdg.}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2}, \quad \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg B}} \right) \quad (4.20)$$

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

$$V_{\text{vdg.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}, \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg B}} \right) \quad (4.21)$$

$$V_{\text{sdg.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}, \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg B}} \right) \quad (4.22)$$

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

$$i_{\text{vdg.}} = \frac{V_i}{V_{\text{vdg.}}} \quad (4.23)$$

ili izraženi u procentima:

$$i_{\text{vdg.}} = \frac{V_i}{V_{\text{vdg.}}} \cdot 100, \quad (\%) \quad (4.24)$$

gde je:

$V_i$  – zapremina i - te komponente u u vlažnim dimnim gasovima,  $\left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg B}} \right)$

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

#### 4.3.4.1. Primer prora una materijalnog bilansa procesa sagorevanja mešavine navedenih biomasa

Za sastav mešavine navedenih biomasa (maseni udeli) koji su preduzeti iz Tabele 3.5. u kojoj je prikazana tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase koriš ene pri eksperimentalnom ispitivanju procesa pirolize su: A=0,0813 kg/kg, C=0,4224 kg/kg, H=0,0698 kg/kg, O=0,2857 kg/kg, N=0,0087 kg/kg, S=0,0015 kg/kg, W=0,1306 kg/kg i koriš enjem izraza (4.2) – (4.17) prora un pojedinih veli ina iznosi:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,667 \cdot C = 3,667 \cdot 0,4224 = 1,5489 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2)}{\text{kg B}}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \cdot C = 1,867 \cdot 0,4224 = 0,7886 \frac{\text{m}^3(\text{CO}_2)}{\text{kg B}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot H + W = 9 \cdot 0,0698 + 0,1306 = 0,7588 \frac{\text{kg}(\text{H}_2\text{O})}{\text{kg B}}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot H + W) = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot 0,0698 + 0,1306) = 0,9443 \frac{\text{m}^3(\text{H}_2\text{O})}{\text{kg B}}$$

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot S = 2 \cdot S = 2 \cdot 0,0015 = 0,0030 \frac{\text{kg}(\text{SO}_2)}{\text{kg B}}$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S = 0,7 \cdot S = 0,7 \cdot 0,0015 = 0,0010 \frac{\text{m}^3(\text{SO}_2)}{\text{kg B}}$$

$$O_{\text{min.}} = 2,667 \cdot C + 8 \cdot H + S - O = 2,667 \cdot 0,4224 + 8 \cdot 0,0698 + 0,0015 - 0,2857 = 1,4007 \frac{\text{kg}(\text{O}_2)}{\text{kg N}}$$

$$O_{\text{min.}} = 1,867 \cdot C + 5,6 \cdot H + 0,7 \cdot (S - O) = 1,867 \cdot 0,4224 + 5,6 \cdot 0,0698 + 0,7 \cdot (0,0015 - 0,2857) = 0,9806 \frac{\text{m}^3(\text{O}_2)}{\text{kg B}}$$

$$L_{\text{min.}} = \frac{O_{\text{min.}}}{0,23} = \frac{1,4007}{0,23} = 6,0902 \frac{\text{kg}(\text{vazduha})}{\text{kg B}}$$

$$L_{\text{min.}} = \frac{O_{\text{min.}}}{0,21} = \frac{0,9806}{0,21} = 4,6693 \frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg B}}$$

$$L = \cdot L_{\text{min.}} = 1 \cdot 6,0902 = 6,0902 \frac{\text{kg}(\text{vazduha})}{\text{kg B}}, \quad z_a = 1$$

$$L = \cdot L_{\text{min.}} = 1 \cdot 4,6693 = 4,6693 \frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg B}}, \quad z_a = 1$$

$$m_{\text{N}_2} = 0,77 \cdot L + N = 0,77 \cdot 6,0902 + 0,0087 = 4,6981 \frac{\text{kg}(\text{N}_2)}{\text{kg B}}, \quad z_a = 1$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L + \frac{22,4}{28} \cdot N = 0,79 \cdot 4,6693 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,0087 = 3,6957 \frac{\text{m}^3(\text{N}_2)}{\text{kg B}}$$

$$m_{\text{O}_2} = 0,23 \cdot (-1) \cdot L_{\text{min.}} = 0,23 \cdot (1-1) \cdot 6,0902 = 0,0000 \frac{\text{kg}(\text{O}_2)}{\text{kg B}}, \quad z_a = 1$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (-1) \cdot L_{\min.} = 0,21 \cdot (1-1) \cdot 4,6693 = 0,0000 \frac{m^3(O_2)}{kg B}, \quad za = 1$$

$$m_{sdg.} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = 1,5489 + 0,0030 + 4,6981 + 0,0000 = 6,2501 \frac{kg \text{ sdg.}}{kg B}, \quad za = 1$$

$$V_{sdg.} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 0,7886 + 0,0010 + 3,6957 + 0,0000 = 4,4854 \frac{m^3 \text{ sdg.}}{kg B}, \quad za = 1$$

$$m_{vdg.} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = 1,5489 + 0,7588 + 0,0030 + 4,6981 + 0,0000 =$$

$$= 7,0089 \frac{kg \text{ vdg.}}{kg B}, \quad za = 1$$

$$V_{vdg.} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 0,7886 + 0,9443 + 0,0010 + 3,6957 + 0,0000 =$$

$$= 5,4297 \frac{m^3 \text{ vdg.}}{kg B}, \quad za = 1$$

Prema bilansu mase (Sika 4.13.) masa vlažnih dimnih gasova iznosi:

$$m_B + L = m_{vdg.} + m_A$$

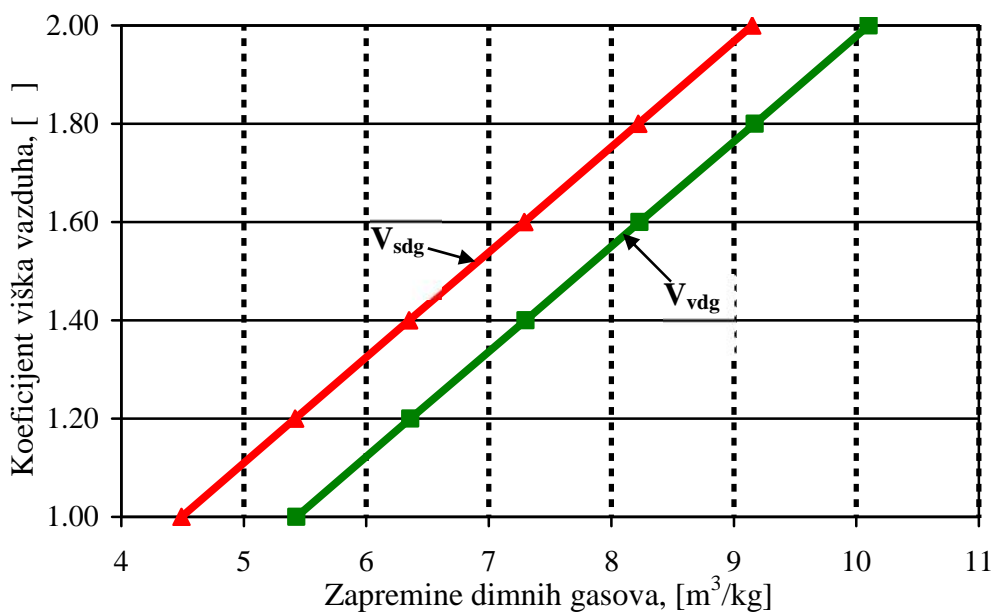
$$m_{vdg.} = m_B + L - m_A = 1 + 6,0902 - 0,0813 = 7,0089 \frac{kg \text{ vdg.}}{kg B}, \quad za = 1$$

a izra unata vrednost iznosi  $m_{vdg.} = 7,0089 \frac{kg \text{ vdg.}}{kg B}$ . Neuskla enost bilansa iznosi nula što je veoma bitno za prakti ne inženjerske prora une.



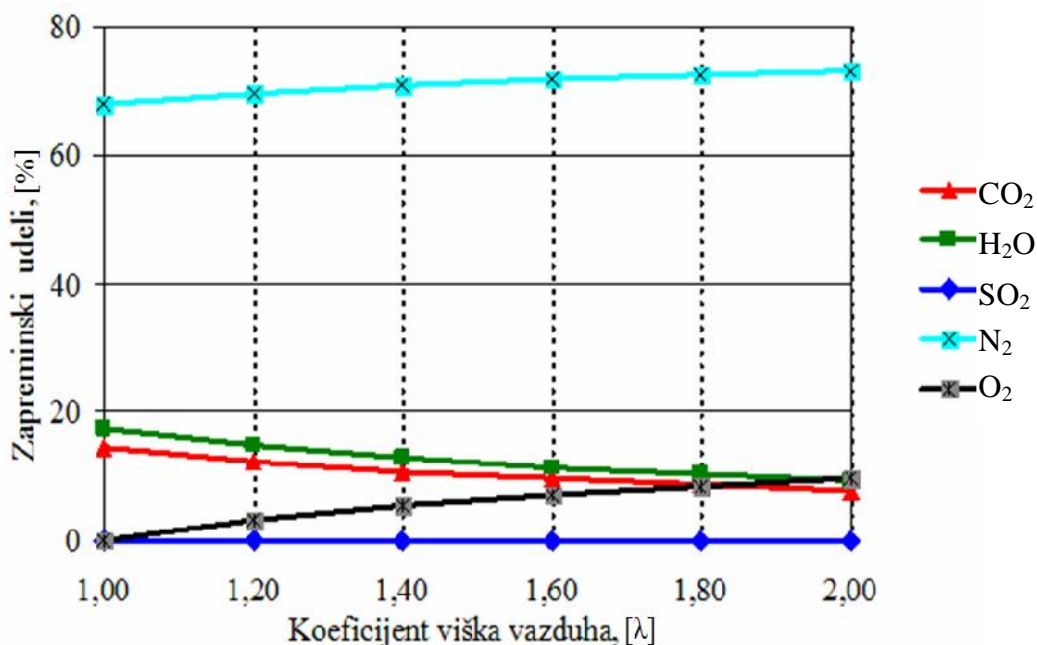
**Slika 4.13.** Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja mešavine navedenih biomasa

Podaci materijalnog bilansa procesa sagorevanja mešavine navedenih biomasa u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha prikazan je u priložima P1 i P2, a dijagram produkata sagorevanja (zapremine suvih dimnih gasova, ( $V_{sdg.}$ ) i zapremine vlažnih dimnih gasova, ( $V_{vdg.}$ )) od koeficijenta viška vazduha, prikazan je na Slici 4.14.



**Slika 4.14.** Zapremina dimnih gasova u zavisnosti od koeffcijenta viška vazduha

Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu prikazani su u prilogu P3 a dijagram zavisnosti zapreminskih udela u vlažnim dimnim gasovima od koeffcijenta viška vazduha prikazan je na Slici 4.15.



**Slika 4.15.** Sastav vlažnih dimnih gasova u zavisnosti od koeffcijenta viška vazduha

### 4.3.5. Odre ivanje adijabatske temperature sagorevanja mešavine navedenih biomasa

Teorijska temperatura sagorevanja goriva može se odrediti iz toplotnog bilansa procesa sagorevanja, po kome je suma toplotne mo i 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:

$$H_d + c_{pg} \cdot t_g + \cdot L_{min} \cdot c_{pL} \cdot t_L = (1 - A + \cdot L_{min}) \cdot c_{pvdg} \cdot t_{teor} + A \cdot c_{pA} \cdot t_A \quad (4.25)$$

odakle se dobija izraz za odre ivanje teorijske temperature sagorevanja goriva:

$$t_{teor} = \frac{H_d}{(1 - A + \cdot L_{min}) \cdot c_{pvdg}} + \frac{\cdot L_{min} \cdot c_{pL} \cdot t_L + c_{pg} \cdot t_g}{(1 - A + \cdot L_{min}) \cdot c_{pvdg}} - \frac{A \cdot c_{pA} \cdot t_A}{(1 - A + \cdot L_{min}) \cdot c_{pvdg}}, \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.26)$$

gde su:

$$c_{pvdg} = \sum_i g_i c_{pi} = \frac{1}{m} \sum_i m_i c_{pi} \quad \text{specifi ni toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right)$$

$$c_{pL} \quad \text{specifi ni toplotni kapacitet vazduha} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right)$$

$$c_{pg} \quad \text{specifi ni toplotni kapacitet goriva} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right)$$

$$c_{pA} \quad \text{specifi ni toplotni kapacitet pepela} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right)$$

$t_L$  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 h - t dijagrama za dimne gasove gde je  $h = f(t)$  i  $c_p = f(t)$ . 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:

$$h = m_{vdg} \cdot c_{pvdg} \cdot t, \quad \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad (4.27)$$

ili pomo u izraza:

$$h = V_{vdg} \cdot c_{vvdg} \cdot t, \quad \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad (4.28)$$

gde su:

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

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

Jedna ine (4.20) i (4.21) važe pod pretpostavkom da je entalpija dimnih gasova pri temperaturi  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  jednaka nuli.

Toplotni kapaciteti odre uju se pomo u izraza:

$$c_{p_{vdg}} = \sum_{i=1}^5 g_i \cdot c_{p_i} = \frac{1}{m_{vdg}} \cdot \sum_{i=1}^5 m_i \cdot c_{p_i}, \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \quad (4.29)$$

$$c_{v_{vdg}} = \sum_{i=1}^5 v_i \cdot c_{v_i} = \frac{1}{V_{vdg}} \cdot \sum_{i=1}^5 V_i \cdot c_{v_i}, \left( \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \right) \quad (4.30)$$

gde su:

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

$v_i$  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 ( $\text{m}^3$ )

Specifi ni toplotni kapaciteti komponenata definisani izrazima (4.29) i (4.30) koriste se kao srednje vrednosti u temperaturskom intervalu  $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  i temperature dimnih gasova (prilog P4).

#### 4.3.5.1. 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  $t = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Prema broj anim vrednostima iz priloga P1, P2 i koriš enjem izraza (4.29) i (4.27) dobija se:

$c_{P_{vdg}}$  specifi ni toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova (pri temperaturi od 100 °C):

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

$$= \frac{1}{7,0089} \cdot (1,5489 \cdot 0,8689 + 0,7588 \cdot 1,8740 + 0,0030 \cdot 0,6370 + 4,6981 \cdot 1,0310 + 0 \cdot 0,9218) =$$

$$= 1,0863 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

gde su:

$$m_{CO_2} = 1,5489 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa ugljen dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } = 1$$

$$m_{H_2O} = 0,7588 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa vode u vlažnim dimnim gasovima za } = 1$$

$$m_{SO_2} = 0,0030 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa sumpor dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } = 1$$

$$m_{N_2} = 4,6981 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa azota u vlažnim dimnim gasovima za } = 1$$

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

$$m_{vdg} = 7,0089 \frac{kg}{kg} \quad \text{masa vlažnih dimnih gasova za } = 1$$

$$c_{PCO_2} = 0,8689 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet ugljen dioksida pri temperaturi od 100 } ^\circ C$$

$$c_{PH_2O} = 1,8740 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet vodene pare pri temperaturi od 100 } ^\circ C$$

$$c_{PSO_2} = 0,6370 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet sumpor dioksida pri temperaturi od 100 } ^\circ C$$

$$c_{PN_2} = 1,0310 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet azota pri temperaturi od 100 } ^\circ C$$

$$c_{PO_2} = 0,9218 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \quad \text{izobarski specifi ni toplotni kapacitet kiseonika pri temperaturi od 100 } ^\circ C$$

entalpija dimnih gasova:

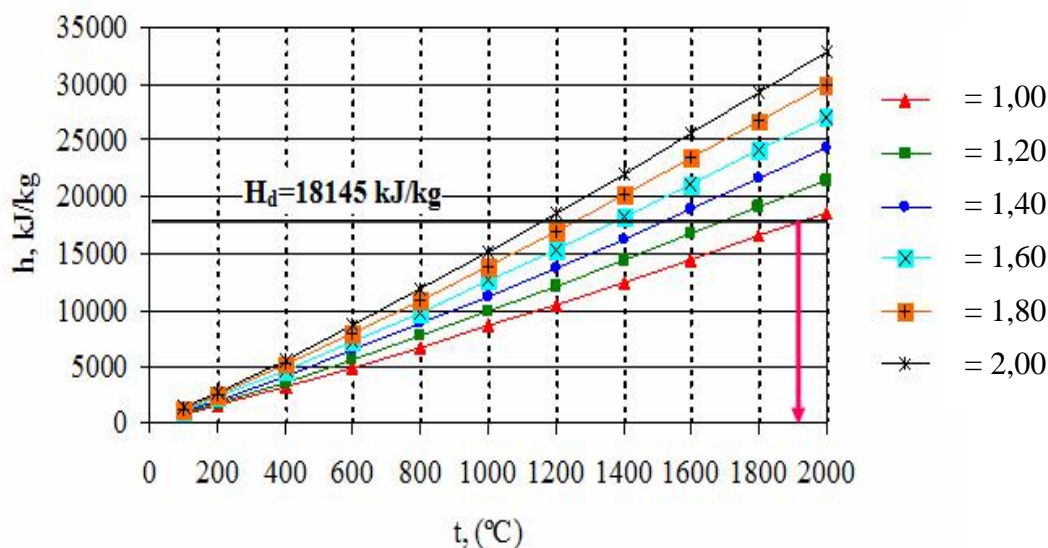
$$h = m_{vdg} \cdot c_{P_{vdg}} \cdot t = 7,0089 \cdot 1,0863 \cdot 100 = 761 \frac{kJ}{kg}$$

Na slici an na in mogu se izra unati entalpije dimnih gasova za razli ite vrednosti temperatura i za razli ite vrednosti koeficijenta viška vazduha (prilog P5). Donja toplotna mo poljoprivredne biomase odre uje se pomo u slede eg izraza [18]:

$$\begin{aligned}
 H_d &= 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W = \\
 &= 33900 \cdot 0,4224 + 121400 \cdot \left(0,0698 - \frac{0,2857}{8}\right) + 10460 \cdot 0,0015 - 2510 \cdot 0,1306 = \\
 &= 18145 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

Grafi ka zavisnost entalpije dimnih gasova od temperature i koeficijenta viška vazduha prikazana je na Slici 4.16. Pri teorijskoj (minimalnoj) potrošnji vazduha ( $\lambda = 1$ ) i pri normalnim uslovima teorijska (pirometrijska) temperatura sagorevanja iznosi 1930 °C za date karakteristike drvene biomase toplotne mo i  $H_d = 18145 \text{ kJ/kg}$ . 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 (Slika 4.16.). Ako se uzme u obzir toplotna energija koja se troši za disocijaciju produkata sagorevanja dobija se teorijska (adijabatska) temperatura koja se odre uje pomo u izraza (4.26) ili pomo u h–t dijagrama (Slika 4.16.) za poznati koeficijent viška vazduha .

Adijabatska temperatura raste sa pove anjem temperature predgrevanja goriva i vazduha odnosno pada porastom koli ine dimnih gasova sagorevanja. Poznavanjem adijabatske temperature sagorevanja goriva mogu e je proceniti temperaturu plamena u ložištu. 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. U slu aju za odabrano gorivo (poljoprivrednu biomasu), iznosi 1.1–1.2.



**Slika 4.16.** Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja poljoprivredne biomase i koeficijenta viška vazduha



**Tabela 4.1.** Zavisnost konstanti ravnoteža hemijskih reakcija od temperature [18]

	$\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{OH} + \frac{1}{2}\text{H}_2$	$\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$	$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}$
T (K)	$K_p \left( \text{Pa}^{\frac{1}{2}} \right)$	$K_p \left( \text{Pa}^{\frac{1}{2}} \right)$	$K_p \left( \text{Pa}^{\frac{1}{2}} \right)$	$K_p \text{ (Pa)}$	$K_p \text{ (Pa)}$
<b>500</b>	$0,3030 \cdot 10^{-22}$	$0,4144 \cdot 10^{-20}$	$0,1120 \cdot 10^{-23}$	$0,2982 \cdot 10^{-40}$	$0,4963 \cdot 10^{-35}$
<b>1000</b>	$0,1980 \cdot 10^{-7}$	$0,2700 \cdot 10^{-7}$	$0,1147 \cdot 10^{-7}$	$0,3678 \cdot 10^{-14}$	$0,5215 \cdot 10^{-12}$
<b>1500</b>	$0,1634 \cdot 10^{-2}$	$0,5999 \cdot 10^{-3}$	$0,1278 \cdot 10^{-3}$	$0,2140 \cdot 10^{-5}$	$0,3127 \cdot 10^{-4}$
<b>2000</b>	0,4484	$0,4386 \cdot 10^{-1}$	$0,4386 \cdot 10^{-1}$	$0,5446 \cdot 10^{-1}$	0,2665
<b>2500</b>	$0,1213 \cdot 10^2$	$0,1921 \cdot 10^1$	$0,1472 \cdot 10^1$	$0,2454 \cdot 10^4$	$0,6366 \cdot 10^2$
<b>3000</b>	$0,1088 \cdot 10^3$	$0,1473 \cdot 10^2$	$0,1541 \cdot 10^2$	$0,1460 \cdot 10^4$	$0,2507 \cdot 10^4$
<b>3500</b>	$0,5124 \cdot 10^3$	$0,6366 \cdot 10^2$	$0,8278 \cdot 10^2$	$0,2715 \cdot 10^5$	$0,3504 \cdot 10^5$

U realnim uslovima u reakcionom prostoru (ložištu) kinetika hemijskih 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 smeše. Gasovi disosuju stvaraju i pritom veliki broj jednostavnijih hemijskih komponenata koje dalje u nizu elementarnih hemijskih reakcija reaguju međusobno. Na primer, produkti sagorevanja ugljovodonika sa vazduhom ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  i  $\text{N}_2$ ) disosuju pa se kao rezultat pojavljuju nove hemijske materije  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{NO}$  i dr. (Tabela 4.1.).

## LITERATURA

- [1] Brki M., Jani T.: Briketiranje i peletiranje biomase, monografija, Poljoprivredni fakultet, s. 277, Novi Sad. 2009.
- [2] Miti D., Stankovi M., Proti M.: Biomasa za toplotnu energiju, Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu, Niš.2009.
- [3] Sadaka S. Pyrolysis, in Center for Sustainable Environmental Technologies. Iowa State University, Nevada. 2008.
- [4] Goyal H. B., Diptendu S., Saxena R. C. Biofuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. Renewable and sustainable energy reviews 12: 504 517. 2008.
- [5] Zajec L. 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. 2009.
- [6] Marshall A. J. Commercial Application of Pyrolysis Technology in Agriculture, project by Ontario Federation of Agriculture. 2013.
- [7] Gade P. Investigation of Volatile Products from Wood Pyrolysis, Master Thesis. Faculty of the Department of Chemistry, Western Kentucky University, Bowling Green, Kentucky. 2010.
- [8] Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Second Edition. Elsevier, USA, 2013.
- [9] \*\*\*,Technologies for Converting Waste Agrigultural Biomass to Energy. UnitedNations Environment Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre, Osaka. 2013.
- [10] Ili M., i ostali.: Energetski potencijal i Karakteristike ostataka biomase i Tehnologije za njenu pripremu i Energetsko iskorišćenje u Srbiji, Studija. Ev. broj projekta NP EE611–113A, Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije, Beograd. 2003.
- [11] Rajvanshi A. Biomass Gasification, In Alternative Energy in Agriculture, eds. Goswami D. Y., CRC Press, Florida.1986.
- [12] Eri A., Nemoda S., Komatina M.: Odre ivanje sadržaja tera u produktima gasifikacije biomase, 13. Simpozijum termi ara srbije, Sokobanja, 2007.
- [13] Bain R. L., Broer K. Gasification, In Thermochemical Processing of Biomass, Conversion into Fuels, Chemicals and Power, ed. Brown R. C., A John Wiley and sons, Ltd, United Kingdom. 2011.

- [14] Van Loo S., Koppejan J. Combustion Technologies for Industrial and District Heating Systems. In The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, eds. Van Loo S, Koppejan J., Earthscan, London. 2008.
- [15] Fletcher T. H. Handbook of Biomass and Co-Firing. Brigham Young University, Provo, Utah. 2012.
- [16] Grubor B., Oka S., Ili M. Tehnologije sagorevanja biomase. Energetski potencijal i karakteristike ostataka biomase i tehnologije za njenu pripremu i energetsko iskoriš enje u Srbiji, studija, rukovodilac studije: Ili M., projekat NP EE611-113A Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije, Beograd. 2003.
- [17] Bridgwater A.V., An Overview of Thermochemical Biomass Conversion Technologies, Proceedings of Wood. Fuel for Thought Conference, Bristol, United Kingdom, 23-25 October, 1991.
- [18] or evi B., Valent V., Šerbanovi S. Termodinamika i termotehnika, drugo dopunjeno izdanje, DIP "Gra evinska knjiga", Beograd. 1990.

## 5. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE PROCESA PIROLIZE POLJOPRIVREDNE BIOMASE

### 5.1. Uzorkovanje i priprema poljoprivredne biomase

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja procesa pirolize poljoprivredne biomase, uzorci poljoprivredne biomase sakupljani su sa poljoprivrednog dobra "PLANTA" u Futogu. Sakupljeno je po 5 kg slede ih poljoprivrednih kultura: slame od kukuruzovine, pšenice, soje i ovsu (Slika 5.1.). Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja utrošeno je 62,5 g od svake poljoprivredne kulture.



**Slika 5.1.** Fotografski prikaz poljoprivredne biomase koriš enje pri eksperimentalnom ispitivanju procesa pirolize

U cilju dobijanja uzoraka frakcije 5-10 mm vršeno je usitnjavanje biomase mlinom (model TFS-420) koji je prikazan na Slici 5.2. Nakon sitnjenja, uzorci mase 10 g stavljani su u specijalne plasti ne kese koje se zatvaraju hermeti ki, da ne bi došlo do gubitka ili upijanja vlage iz vazduha. Svaka kes a sa uzorkom je ozna ena spolja. Oznaka sadrži: mesto uzorkovanja, vrstu biomase, vremenske prilike ( kiša, vetar, sunce), ime uzorkiva a.



Silka 5.2. Mlin za usitnjavanje poljoprivredne biomase

## 5.2. Tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase

Tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase ura ena je u Institutu za nizijsko šumarstvo i životnu sredinu Univerziteta u Novom Sadu. Rezultati tehni ke i elementarne analize sastava biomase prikazani su u Tabeli 5.1. Analiza je izvršena u skladu sa ASTM standardima [1, 2]. Tehni ka i elementarna analiza (svedena na suhu osnovu) prikazana je u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Tehni ka i elementarna analiza poljoprivredne biomase

Poljoprivredna biomasa	Tehni ka analiza					Elementarna analiza				
	(wt%)				(kJ/kg)	Suva osnova (wt%)				
	Vlaga (W)	Pepeo (A)*	Fiksni ugljenik (C <sub>fix</sub> )	Volatili (VM)	Donja toplotna mo , (Hd)	Ugljenik (C)	Vodonik (H)	Azot (N)	Ukupan sumpor (S)	Kiseonik (O)**
Slama od kukuruzovine	13,17	11,52	16,60	60,23	16291	48,23	8,18	0,81	0,18	31,08
Pšeni na slama	14,77	7,80	16,35	62,23	16590	48,23	8,30	1,09	0,19	34,38
Sojina slama	12,08	3,02	18,74	66,52	17465	53,05	7,78	0,89	0,16	35,10
Ovsena slama	12,22	15,06	15,38	59,18	16676	44,82	7,88	1,20	0,14	30,89
Mešavina navedenih slama	13,06	9,35	16,77	62,04	16756	48,58	8,04	1,00	0,17	32,86

\* Suva osnova

\*\* Udeo kiseonika odre en je prora unom

U Tabeli 5.2 prikazani su publikovani rezultati elementarne i tehni ke analize drugih istraživa kih grupa.

**Tabela 5.2.** Elementarna i tehni ka analiza razli itih vrsta poljoprivredne biomase iz literature

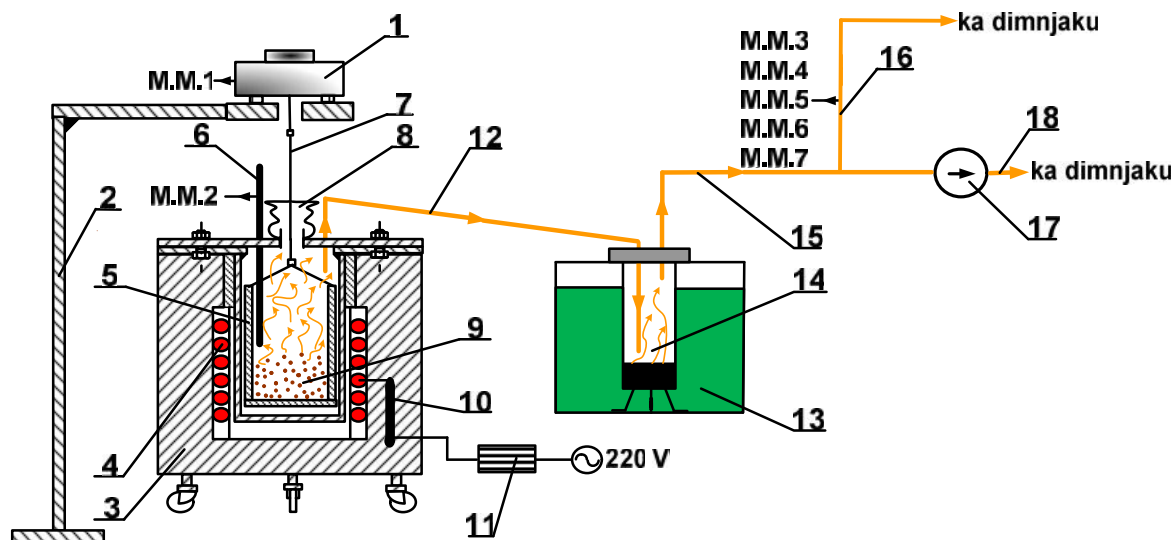
Poljoprivredna biomasa	Elementarna analiza					Tehni ka analiza				
	C	H	N	S	O	VM	C <sub>fix</sub>	W	A	H <sub>d</sub>
	Maseni udeo (%)					Maseni udeo (%)				(kJ/kg)
Kukuruzna slama [3]	41,64	5,47	0,60	0,07	37,71	67,70	17,80	7,40	7,10	14855,63
Kukuruzna slama [4]	42,20	5,50	0,70	0,10	35,00	68,60	14,90	10,70	5,80	15413,44
Kukuruzna stabljika [5]	37,95	6,47	0,77	0,59	40,76	69,86	16,68	7,39	6,06	14410,52
Pšeni na slama [3]	41,25	5,09	0,58	0,14	36,41	67,20	16,30	10,10	6,40	14398,93
Pšeni na slama [6]	41,63	4,67	1,65	0,00	31,20	57,64	21,50	8,50	12,35	14834,00
Ovsena slama [3]	42,16	5,18	0,43	0,07	38,53	73,90	12,50	8,20	5,40	14535,33
Sojina Ljuska [3]	40,22	5,94	0,80	0,09	41,55	69,60	19,00	6,30	5,10	14391,81
Sojina slama [7]	36,88	5,71	0,41	0,00	38,60	60,73	20,91	11,35	7,05	13291,82
Je mena slama [3]	41,40	5,20	0,59	0,11	36,54	67,40	16,40	11,50	4,70	14525,31
Pirin ana slama [3]	36,97	4,21	0,74	0,12	31,73	59,40	14,40	7,60	18,60	12650,53

Pregledom literaturnih podataka mogu se uo iti odre ena odstupanja masenih udela komponenata navedenih poljoprivrednih biomasa. Postoje e razlike mogu biti posledica kvaliteta zemljišta u raznim geografskim podru jima gde je uzgajana biomasa.

### 5.3. Šema i opis laboratorijskog postrojenja za pirolizu poljoprivredne biomase

Šema laboratorijskog postrojenja koriš ena za pirolizu poljoprivredne biomase i spisak mernih mesta (M.M) prikazana je na Slici 5.3. U okviru izrade doktorske disertacije projektovano je laboratorijsko postrojenje za ispitivanje pirolize i gasifikacije biomase. Rezultati dobijeni u okviru disertacije publikovani su u dva me unarodna asopisa kategorije M22 i M23 [8, 9]. Tehni ko rešenje postrojenja verifikovano je na Nastavno – nau nom ve u Fakulteta tehni kih nauka u Novom Sadu i predstavlja originalan doprinos razvoju nauke u oblasti termi kih procesa konverzije poljoprivredne biomase. Pri izgradnji eksperimentalnog postrojenja koriš eni su materijali otporni pri visokim temperaturama i materijali otporni na temperaturnu koroziju. Konstrukcija pe i i reaktora omogu ava ispitivanje šaržnih procesa pirolize, gasifikacije i sagorevanja biomase na radnoj temperaturi do 700 °C. Laka izolacija pe i i mala masa reaktora omogu ava i merenje promene mase uzorka tokom ispitivanja. Izbor mernih mesta je ura en tako da realno oslikavaju stanje merenih parametara tokom procesa pirolize. Elektri na pe je visine 389 mm, spoljašnjeg pre nika 320 mm i unutrašnjeg

pre nika 150 mm, obložena je izolacionim materijalom (kamena mineralna vuna) i okružena je sa tri zasebno kontrolisana elektri na greja a 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 pre nika 72 mm.



Slika 5.3. Šema eksperimentalnog postrojenja za pirolizu poljoprivredne biomase i prikaz mernih mesta

1 digitalna vaga, 2 stalak za vagu, 3 pe , 4 elektri ni greja i, 5 posuda za uzorak poljoprivredne biomase, 6 termoelement (mera temperature u posudi za biomasu), 7 fleksibilna veza izme u vage i posude za biomasu, 8 fleksibilni teflonski omota , 9 uzorak poljoprivredne 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 produkti pirolize, 16 uzorkovani gas (gas koji se analizira), 17 pumpa, 18 odvod gasa ka atmosferi

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

- M.M.1 – Masa uzorka biomase, (g)
- M.M.2 – Temperatura piroliti kog gasu u posudi za biomasu, (°C)
- M.M.3 – Zapreminski udeo CO u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora, (%)
- M.M.4 – Zapreminski udeo H<sub>2</sub> u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora, (%)
- M.M.5 – Zapreminski udeo CO<sub>2</sub> u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora, (%)
- M.M.6 – Zapreminski udeo O<sub>2</sub> u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora, (%)
- M.M.7 – Zapreminski udeo CH<sub>4</sub> u piroliti kom gasu na izlazu iz reaktora, (%)

Za merenje navedenih procesnih veli ina koriš eni su merni instrumenti iji je opis prikazan u Tabeli 5.3.

**Tabela 5.3.** Opis mernih instrumenata koriš enih tokom eksperimentalnog postupka

MERNI INSTRUMENT	OPIS MERENJA	OPSEG MERENJA	GREŠKA MERENJA
<b>Digitalna precizna vaga METTLER P1000</b>	Merenje mase uzorka poljoprivredne biomase	0–1000 g	1000 g ± 1 g
<b>Digitalni pokaziva temperature Testo 925 sa sondom tipa K (NiCr – Ni)</b>	Merenje temperature piroliti kog gasa	–50–1000 °C	±0,2%
<b>Gasni analizator G 750 POLYTECTOR II</b>	Merenje zapreminskog udela CO na izlazu iz reaktora	0–0,05%	±0,0003%
	Merenje zapreminskog udela H <sub>2</sub> na izlazu iz reaktora	0–4%	±0,03%
	Merenje zapreminskog udela CO <sub>2</sub> na izlazu iz reaktora	0–100%	±0,03%
	Merenje zapreminskog udela O <sub>2</sub> na izlazu iz reaktora	0–25%	±0,2%
	Merenje zapreminskog udela CH <sub>4</sub> na izlazu iz reaktora	0–100%	±1,0%

Fotografski izgled mernih instrumenata koriš enih pri eksperimentalnom ispitivanju procesa pirolize prikazan je na Slikama 5.4. – 5.6.



**Slika 5.4.** Digitalna vaga METTLER P 1000



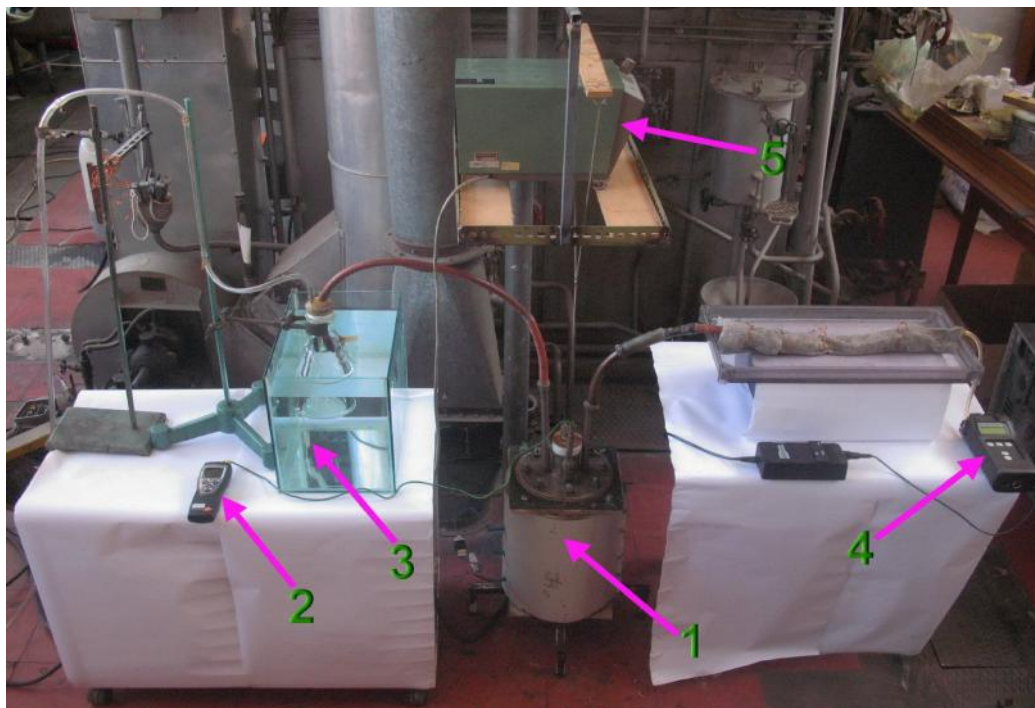


Slika 5.5. Digitalni pokaziva temperature Testo 925



Slika 5.6. Gasni analizator G 750 POLYTECTOR II

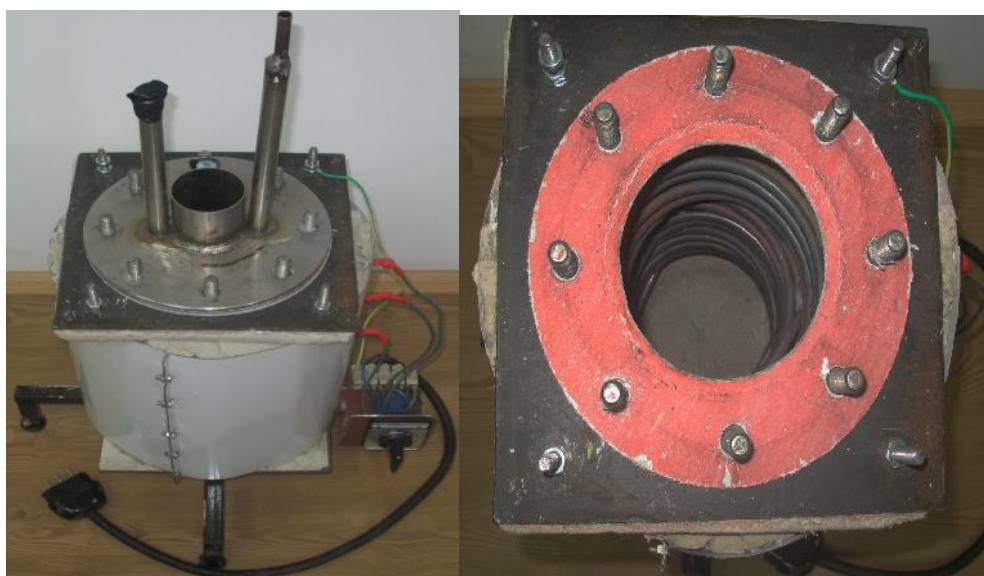
Na Slici 5.7. prikazana je fotografija eksperimentalnog postrojenja za ispitivanje pirolize poljoprivredne biomase.



**Slika 5.7.** Eksperimentalno postrojenje za ispitivanje pirolize poljoprivredne biomase

1 – reaktor za pirolizu, 2 – termometar, 3 – kondenzator, 4 – gasni analizator, 5 – vaga za merenje promene mase uzorka u reaktoru

Slika 5.8. prikazuje fotografski izgled elektri ne pe i i reaktorske posude.



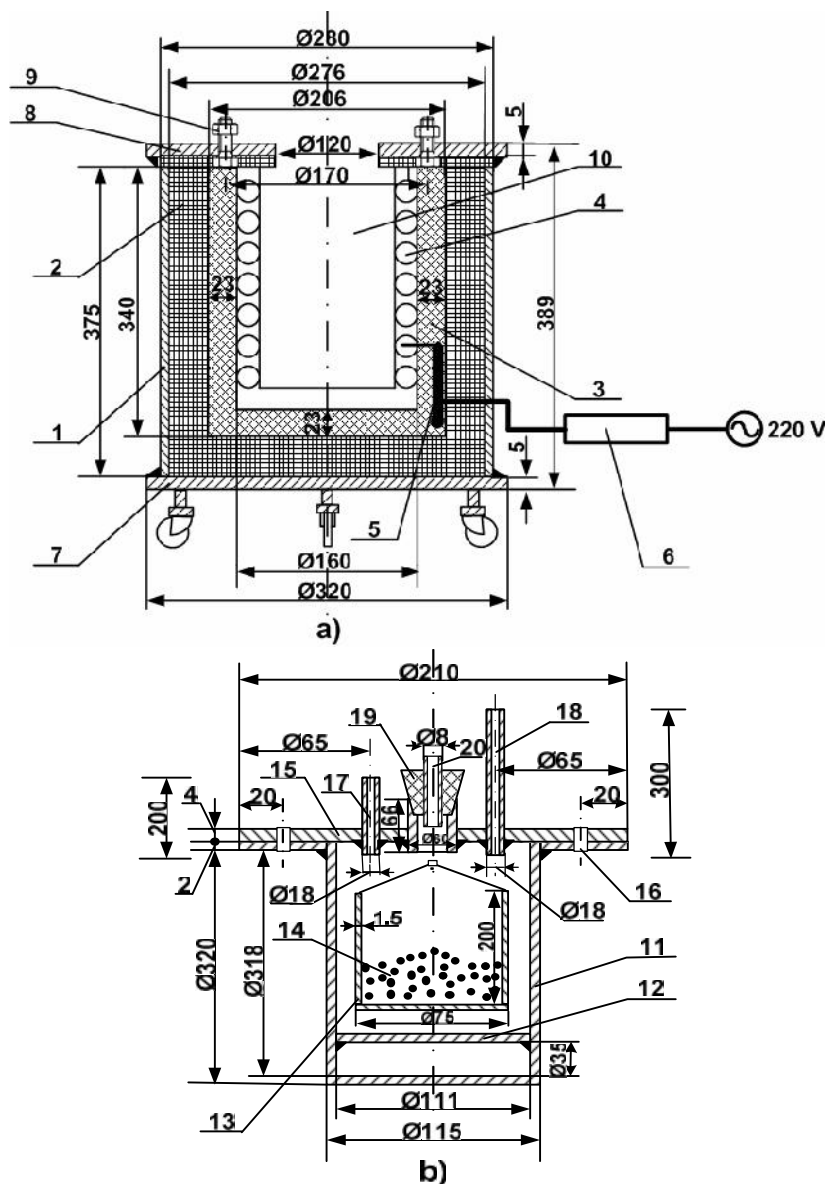


**Slika 5.8.** Fotografski prikaz elektri ne pe i i reaktorske posude

Pri izradi elektri ne pe i i reaktorske posude koriš eni su slede i materijali:

- Crni lim – materijal . 0461, dimenzije 879 mm×375 mm, debljine 2 mm
- Kamena mineralna vuna – površine 1m<sup>2</sup>
- Šamotna cev, Ø206 mm, debljine zida 3 mm, dužine 340 mm
- eli na plo a – materijal . 1531, dimenzije 320 mm×320 mm, debljina plo e 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

Slika 5.9. prikazuje podatke potrebne za projektovanje elektri ne pe i i reaktorske posude za pirolizu i gasifikaciju raznih vrsta biomase kao i za odre ivanje procesnih parametara pirolize i gasifikacije.



Slika 5.9. Šema elektri ne pe i a) i reaktorske posude b)

1 – elini cilindar, 2 – kamena mineralna vuna (toplotna izolacija), 3 – šamot, 4 – elektri ni greja i, 5 – senzor regulatora temperature, 6 – regulator temperature, 7 – postolja elektri ne pe i, 8 – poklopac elektri ne pe i, 9 – vijci za stezanje poklopca reaktorske posude, 10 – mesto za reaktorsku posudu, 11 – cilindri na posuda, 12 – dno reaktorske posude, 13 – posuda za poljoprivrednu biomasu, 14 – uzorak biomase, 15 – poklopac reaktorske posude, 16 – otvor za vijke, 17 – cev za termoelement, 18 – cev za gasovite produkte pirolize, 19 – ep, 20 – cev za prolaz fleksibilne veze između vage i posude za uzorak biomase

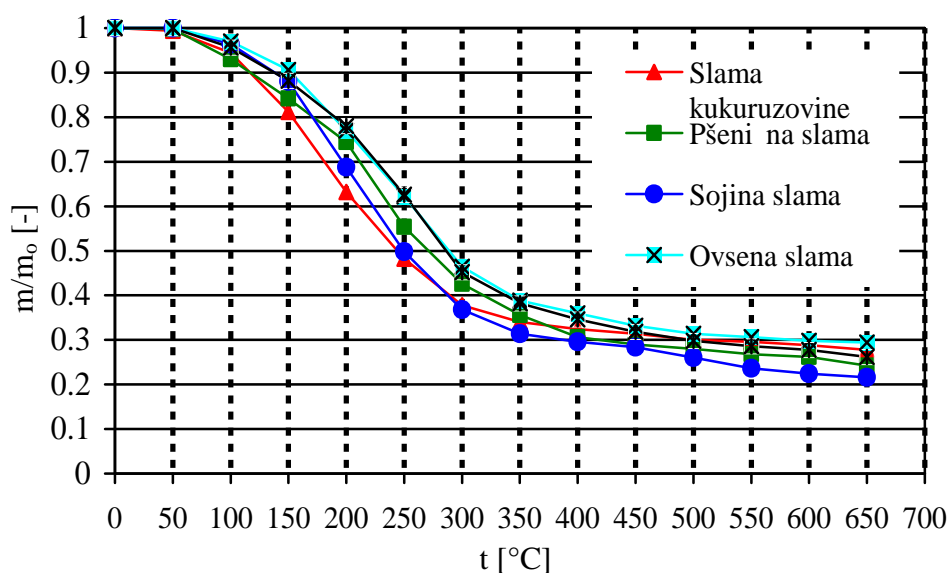
## 5.4. Rezultati i analiza eksperimentalnog ispitivanja pirolize poljoprivredne biomase

Tokom eksperimentalnog ispitivanja procesa pirolize koriš eni su uzorci pet razli itih vrsta poljoprivredne biomase: slama kukuruzovine, pšeni na slama, sojina slama, ovsena slama i mešavina navedenih slama u jednakoj razmeri. Inicijalna masa uzorka je iznosila 10g, sa više frakcija dužine uzorka biomase od 5-10 mm. Pomenuti uzorci su stavljeni u posudu za uzorak biomase, a potom zajedno sa posudom u reaktor. Zagrevanje je vršeno elektri nim greja ima, a nakon postizanja temperature od 650 °C, temperatura je održavana na 650 °C odre eno vreme, dok se ne ustali masa uzorka u reaktoru. Posuda sa uzorkom poljoprivredne biomase je oka ena za vagu pomo u fleksibilne veze izme u vage i posude. Tokom procesa zagrevanja, beležena je veza izme u promene mase, temperature i vremena. Nakon eksperimenta, vršeno je merenje mase koksnog ostatka, kao i mase te ne faze. Eksperiment je ponavljan pet puta za svaku vrstu biomase. Rezultati su prikazani u priložima od P6 do P10.

### 5.4.1 Uticaj temperature na prinos produkata pirolize

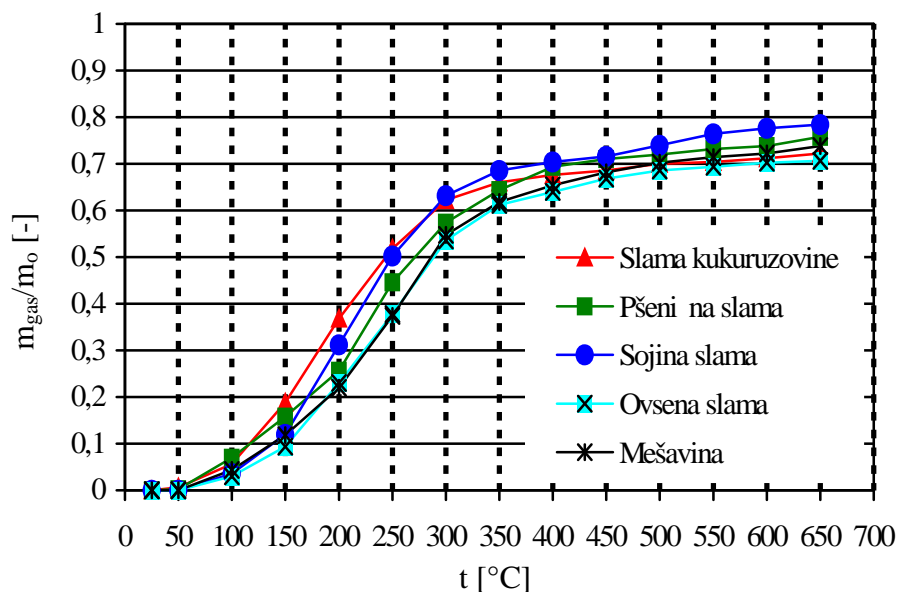
Proces pirolize biomase se odvija uz kontrolisanje temperature i mase uzorka. Uzorci biomase su izloženi temperaturama u opsegu 25–650 °C, a brzina zagrevanja je u proseku 21 °C/min.

Promena masenog udela  $m/m_0$ , gde je  $m$  masa uzorka nakon termi ke konverzije u reaktoru, a  $m_0$  po etna masa uzorka koja je prikazana na Slici 5.10. Pri nižim temperaturama (<100 °C) proces razgradnje uzorka te e sporije i vrsti ostatak je glavni proizvod. Pri višim temperaturama (100–500 °C) razgradnja uzorka te e brže uz zna ajnu redukciju vrstog ostatka i pove anje prinosa gasa. Iznad 500 °C dolazi do stabilizacije prinosa vrstog ostatka. Najmanji prinos vrstog ostatka dobijen je za uzorak sojine slame pri temperaturi pirolize od 650 °C i iznosi 21,6%



**Slika 5.10.** Kriva gubitka mase uzorka razli itih vrsta poljoprivredne biomase u opsegu temperature 25-650 °C (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)

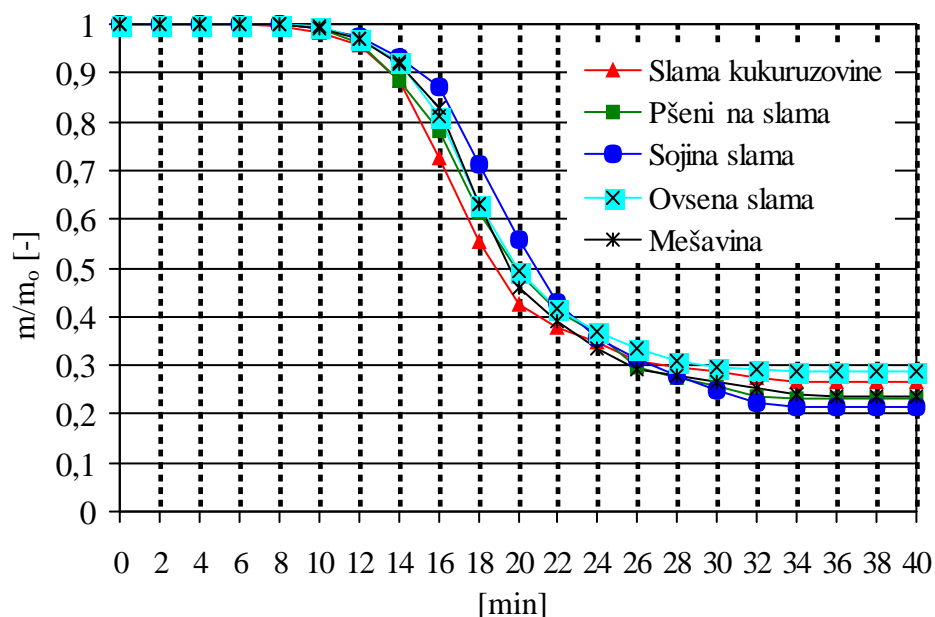
Uticaj temperature pirolize biomase na prinos gasa prikazan je na Slici 5.11. Može se uo iti da je pri temperaturama nižim od 150 °C prinos gasa nizak. Sa pove anjem temperature dolazi do porasta prinosa piroliti og gasa, tako da su najve e promene zabeležene u opsegu temperature od 150–500 °C. Najve i prinos gasa ostvaren je pri 650 °C za sojinu slamu (78%), a najniži za ovsenu slamu (71%).



**Slika 5.11.** Prinos piroliti kog gasa u zavisnosti od temperature pirolize (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)

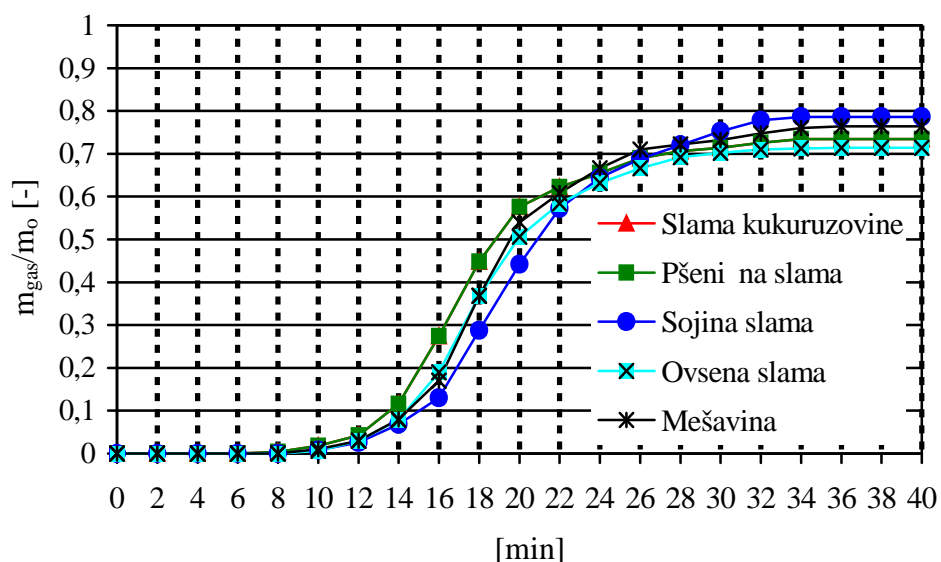
#### 5.4.2. Uticaj reakcionog vremena na prinos produkata pirolize

Na Slici 5.12. prikazana je promena masenog udela  $m/m_0$  u zavisnosti od reakcionog vremena. U toku prvih 8 minuta ispitivanja procesa pirolize nije uo ena promena masenog udela  $m/m_0$ . Masa uzorka u reaktoru ostaje nepromenjena i iznosi 10 g. Daljim tokom procesa pirolize zabeležen je zna ajniji gubitak mase uzorka poljoprivredne biomase u reaktoru. Najve i gubitak mase uzorka od 88,6 % (najve a promena  $m/m_0$ ) zabeležen je u 40 minutu trajanja procesa pirolize za uzorak sojine slame i pri temperaturi pirolize od 650°C, a najmanji gubitak mase za isto vreme od 81,6 % zabeležen je za uzorak ovsene slame. Nakon toga dolazi do stabilizacije masenog udela  $m/m_0$ . Na kraju procesa pirolize odnos mase vrstog (koksno) ostatka i mase uzorka poljoprivredne biomase kre e se u rasponu od 0,214–0,286 g/g. Odnos zavisi u prvom redu od masenog udela ugljenika i vodonika u uzorku.



**Slika 5.12.** Kriva gubitka mase uzorka poljoprivredne biomase u zavisnosti od reakcionog vremena (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21°C/min)

Na Slici 5.13. prikazan je prinos gasa  $m_{gas}/m_0$  u zavisnosti od reakcionog vremena. Sa slike se može uo iti da je tokom prvih 8 minuta prinos gasa zanemarljiv. Nakon 8 minuta prinos gasa po inje da raste, tako da je najve a promena zabeležena od 8–26 minuta. Maksimalni prinos piroliti kog gasa dobijen je u 36 minutu za sojinu slamu i iznosi 78,6 %, a najniži prinos dobijen je za ovsenu slamu i iznosi 71,4 %.



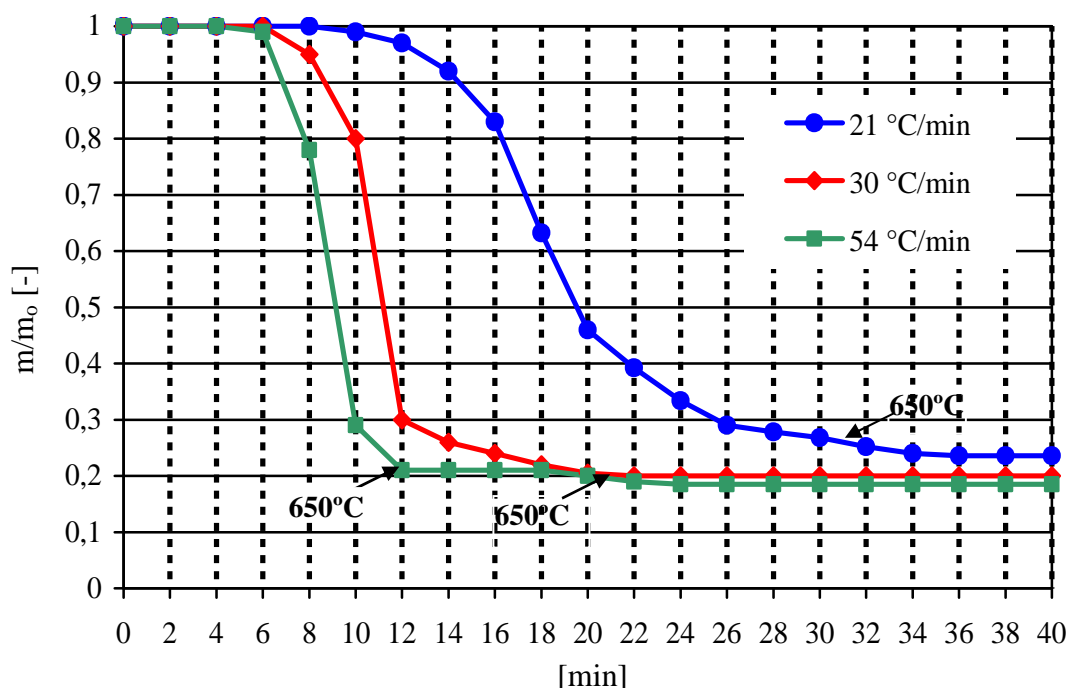
**Slika 5.13.** Prinos piroliti kog gasa u zavisnosti od reakcionog vremena (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)

### 5.4.3. Uticaj brzine zagrevanja na prinos produkata pirolize

Pri ispitivanju uticaja brzine zagrevanja na prinos produkata, uzorci mešavine navedenih biomasa bili su izloženi temperaturama u opsegu 22–650 °C, a brzina zagrevanja u proseku je iznosila 21, 30 i 54 °C/min. Brzina zagrevanja utvr ena je prora unom nakon eksperimenta. Rezultati brzine zagrevanja za mešavinu navedenih slama od 21°C/min prikazana je u prilogu P10, koji je ponavljan pet puta a brzina zagrevanja od 30 i 54 °C/min prikazani su u priložima P11 i P12. koji su ponavljani po dva puta za navedene brzine zagrevanja. Svi eksperimenti vršeni su pri atmosferskom pritisku.

Eksperimentalno ispitivanje uticaja brzine zagrevanja uzorka u reaktoru na prinos produkata pirolize prikazano je na Slici 5.14. Ispitivane su tri različite brzine zagrevanja u reaktoru: 21, 30 i 54 °C/min. Dobijeni rezultati ukazuju da porast brzine zagrevanja uzorka mešavine u reaktoru tokom trajanja procesa pirolize dovodi do smanjenja prinosa vrstog ostatka i povećanja prinosa piroliti kog gasa. Ve i prinosi koksnog ostatka pri manjim brzinama zagrevanja uzorka mešavine u reaktoru su posledice sporih reakcija koje se odvijaju u reaktoru. Krajnja temperatura pirolize postignuta je na 12-om, 21-om i 31-om minutu pri brzinama zagrevanja uzorka od 54, 30 i 21 °C/min, respektivno. Nakon toga dolazi do stabilizacije masenog udela m/m<sub>0</sub>. Masa piroliti kog gasa, koksnog ostatka i te ne faze dobijena merenjem posle procesa pirolize mešavine biomase kretala se u granicama 7,6–8,2 g, 1,8–2,4 g, 1,3–1,8 g, respektivno. Srednja brzina izdvajanja piroliti kog gasa iznosi 0,25, 0,39 i 0,66 g/min pri brzinama zagrevanja uzorka mešavine biomase od 21, 30 i 54 °C/min. Odnos mase koksnog ostatka i mase uzorka mešavine biomase kre e se u granicama 0,18–0,24 kg/kg pri temperaturama pirolize od oko 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. Smanjenje prinosa vrstog ostatka porastom brzine zagrevanja moglo bi se objasniti time što brzo zagrevanje uzorka u reaktoru dovodi do brže depolimerizacije vrstog materijala na primarne volatile, dok je pri nižim brzinama zagrevanja dehidratacija stabilnija.





**Slika 5.14.** Kriva gubitka mase uzorka mešavine poljoprivredne biomase u zavisnosti od reakcionog vremena i brzine zagrevanja uzorka

U Tabeli 5.4. prikazane su srednje vrednosti masenog udela piroliti kog ulja dobijenog pri razli itim brzinama zagrevanja na kraju procesa pirolize za mešavinu poljoprivredne biomase.

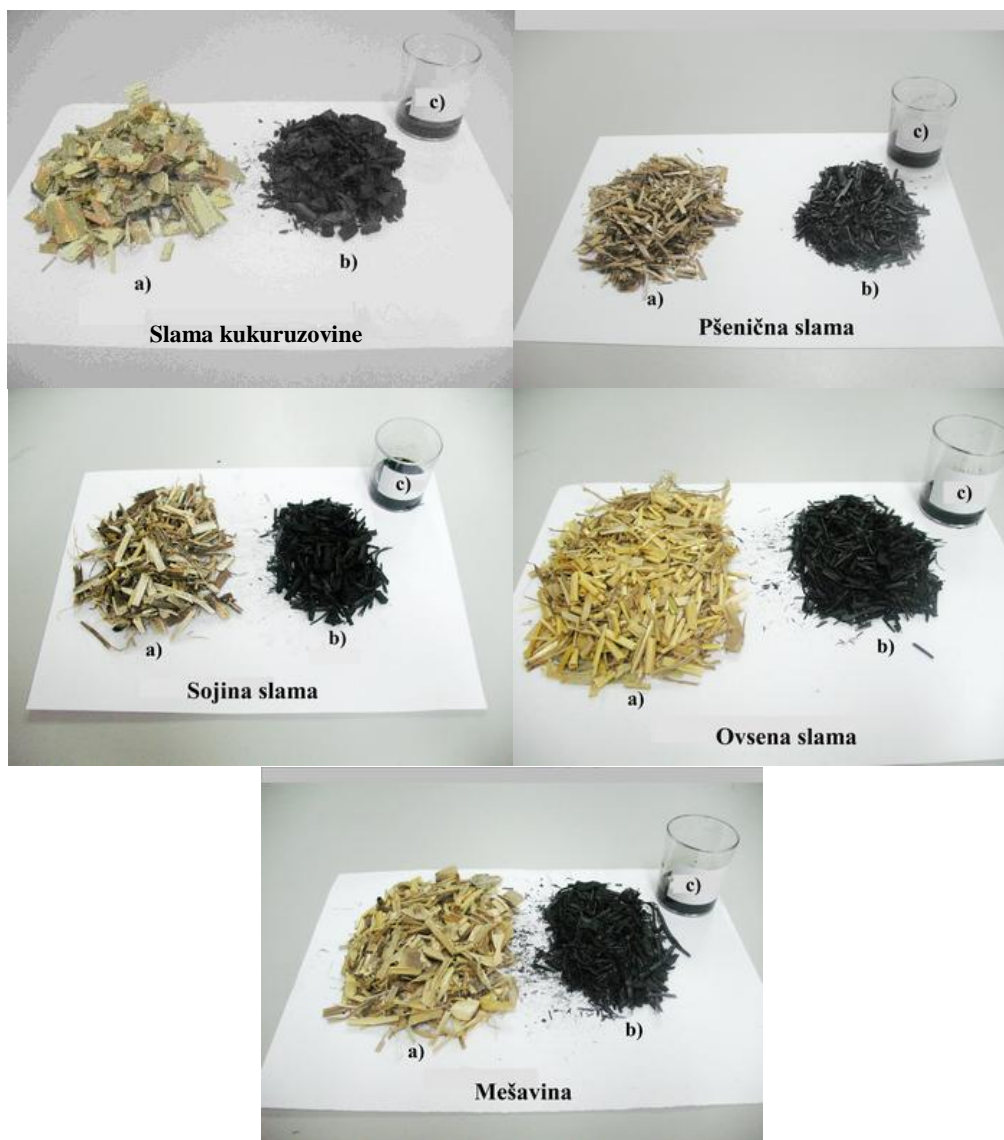
**Tabela 5.4.** Prinos piroliti kog ulja pri razli itim brzinama zagrevanja na kraju procesa pirolize

Brzina zagrevanja (°C/min)	Maseni udeo (%)
21	13,0
30	16,5
54	18,0

Analizom dobijenih rezultata može se zaklju iti da prinos piroliti kog ulja raste sa porastom brzine zagrevanja. Maksimalan prinos piroliti kog ulja dobijen je pri brzini zagrevanja 54 °C/min i iznosi 18%.

#### 5.4.4. Uticaj vrste poljoprivredne biomase na prinos produkata pirolize

Proces pirolize eksperimentalno je ispitivan na uzorcima etiri vrste poljoprivredne biomase (slama kukuruzovine, pšenice, soje, ovasa) i na uzorku dobijenom mešanjem jednakih masenih udela sve etiri navedene vrste poljoprivredne biomase. Na Slici 5.15. prikazani su uzorci poljoprivredne biomase pre procesa pirolize, koksni ostatak i piroliti ko ulje.



**Slika 5.15.** Fotografski prikaz promene biomase tokom procesa pirolize  
a) Uzorak biomase pre procesa pirolize, b) Koksni ostatak nakon procesa pirolize,  
c) Piroliti ko ulje  
(prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)

Prinos piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize se kretao u opsegu od 51,8% (slama kukuruzovine) do 67,4% (sojina slama). Prinos piroliti kog ulja na kraju procesa pirolize iznosio je od 11,2% (sojina slama) do 22,8% (pšeni na slama), dok se prinos koksno ostaka na kraju procesa pirolize kretao u rasponu od 21,4% (sojina slama) do 28,6% (ovsena slama). Odstupanja u raspodeli produkata pirolize mogu sa objasniti razlikama u rezultatima tehni ke i elementarne analize za razli ite vrste poljoprivredne biomase (Tabela 5.1).

### 5.4.5. Pore enje prinosa produkata pirolize sa podacima iz literature

U Tabeli 5.5. prikazani su prinos koksno g ostataka, piroliti kog ulja i gasa dobijeni na kraju procesa pirolize poljoprivredne biomase i pore enje sa rezultatima prisutnim u literaturi. Vrednosti prinosa koksno g ostataka dobijene eksperimentalnim ispitivanjem uporedive su sa vrednostima prinosa koksno g ostataka u literaturi [8] i sa rezultatima koje je dobio Duku pri pirolizi oklasaka kukuruza [10]. Odstupanja prinosa piroliti kog ulja i gasa mogu se objasniti razli itim uslovima odvijanja procesa pirolize, brzinom zagrevanja ili vrstom piroliti kog reaktora.

**Tabela 5.5.** Pore enje prinosa produkata pirolize poljoprivredne biomase sa podacima iz literature

Vrsta biomase		Temperatura (°C)	Brzina zagrevanja (°C/min)	Maseni udeo (%)		
				Koksni ostatak	Piroliti ko ulje	Gas
Eksperiment	Slama kukuruzovine	650	21	26,6	21,6	51,8*
	Pšeni na slama			23,0	22,8	54,2*
	Sojina slama			21,4	11,2	67,4*
	Ovsena slama			28,6	17,4	54,0*
	Mešavina datih slama			23,6	15,6	60,8*
Crombie i Mašek [10]	Pšeni na slama	650	100	29,4	43,8	27,9
	Peleti pšeni ne slame			27,8	38,1	32,1
Mullen i saradnici [11]	Kukuruzovina	500	-	17,0	61,6	21,9
	Oklasak kukuruza			18,9	61,0	20,3
Duku [12]	Kukuruzna stabljika	600	-	11,0	63,5	25,5
	Oklasak kukuruza	650		26,0	55,0	19,0

\*Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa

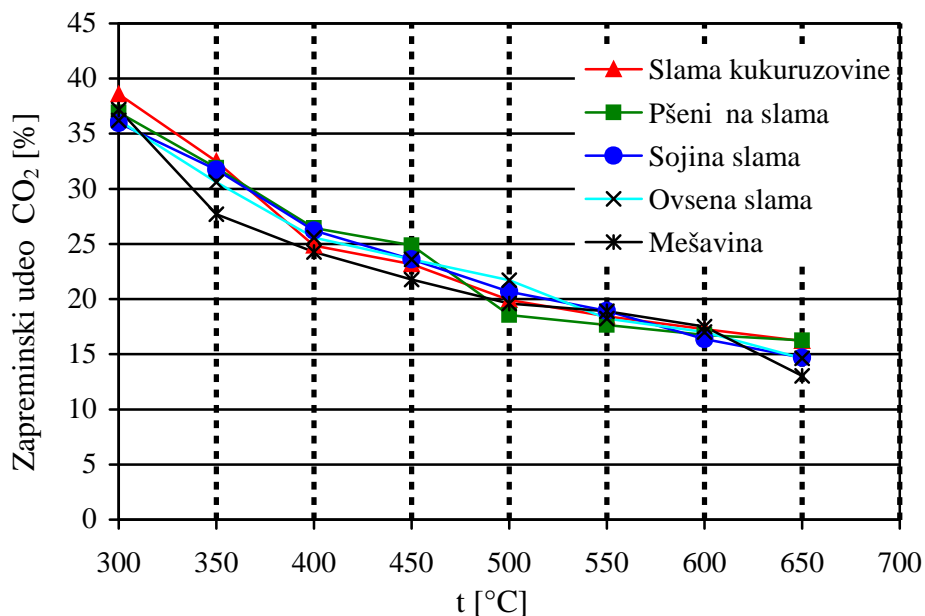
### 5.4.6. Sastav produkata pirolize dobijenih eksperimentalnim putem

Procesom pirolize nastaju tri vredna produkta: piroliti ko ulje, piroliti ki gas i vrsti ostatak. Sastav navedenih produkata zavisi od više faktora kao što su brzina zagrevanja, temperatura pirolize, reakciono vreme i sastav goriva.

#### 5.4.6.1. Sastav piroliti kog gasa

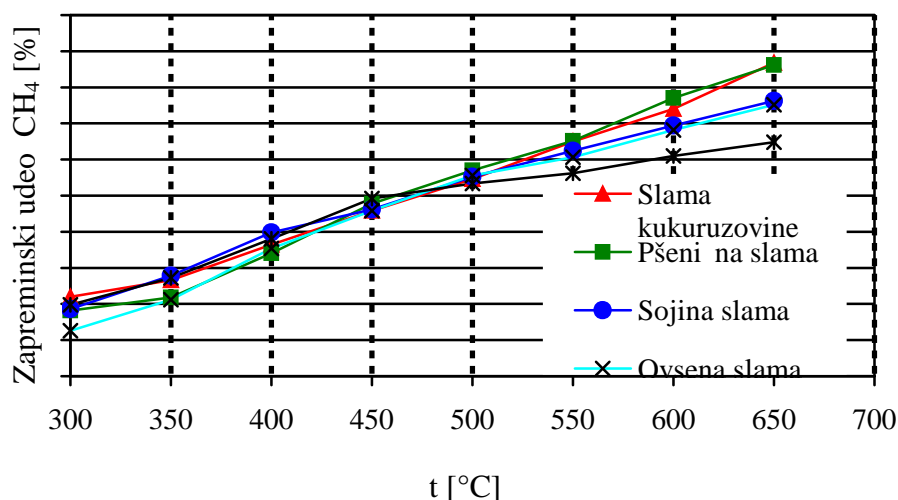
Piroliti ki gas u najve o j meri ine CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> i manjoj meri nezasi eni laki ugljovodonici. Eksperimentalnim ispitivanjem procesa pirolize razli itih vrsta poljoprivredne biomase u šaržnom reaktoru odre en je sastav piroliti kog gasa pri prose noj brzini

zagrevanja od 21 °C/min. Kada temperatura u reaktoru dostigne vrednost od 300 °C, glavni produkt gasa iz procesa pirolize biomase je CO<sub>2</sub> iji se zapreminski udeo kre e u intervalu od 36% (ovsena slama) do 38% (slama kukuruzovine). Pri porastu reakcione temperature (iznad 300 °C) vrednost zapreminskog udela CO<sub>2</sub> opada. Pri najve oj vrednosti temperature od 650 °C zapreminski udeo CO<sub>2</sub> se kretao u intervalu od 13% (mešavina) do 16,3% (pšeni na slama) (Slika 5.16.). Može se uo iti da vrsta navedenih poljoprivrednih biomasa nema zna ajan uticaj na prinos zapreminskog udela CO<sub>2</sub>.



**Slika 5.16.** Promene zapreminskih udela CO<sub>2</sub> tokom procesa pirolize razli itih vrsta biomase u zavisnosti od reakcione temperature (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21°C/min)

Na Slici 5.17. prikazane su srednje vrednosti zapreminskog udela CH<sub>4</sub> u zavisnosti od temperature za ispitivane poljoprivredne biomase tokom procesa pirolize u šaržnom reaktoru pri prose noj brzini zagrevanja od 21 °C/min. Pri temperaturi od 300 °C, zapreminski udeo CH<sub>4</sub> se kretao u opsegu od 6% (ovsena slama) do 11% (slama od kukuruzovine). Pri porastu reakcione temperature (iznad 300 °C) vrednost zapreminskog udela CH<sub>4</sub> raste. Najve a vrednost zapreminskog udela CH<sub>4</sub> dobijena je za kukuruznu stabljiku i iznosila je 43,4%, pri temperaturi od 650 °C.



**Slika 5.17.** Promene zapreminskih udela CH<sub>4</sub> tokom procesa pirolize razli itih vrsta biomase u zavisnosti od reakcione temperature (prose na brzina zagrevanja uzorka biomase je 21 °C/min)

U Tabeli 5.6. prikazano je pore enje sastava piroliti kog gasa dobijenog eksperimentom za razli ite vrste poljoprivredne biomase i mešavine sa sastavom piroliti kog gasa drugih istraživa a.

**Tabela 5.6.** Pore enje sastava piroliti kog gasa dobijenog pirolizom poljoprivredne biomase sa podacima iz literature

Vrsta biomase	Temperatura (°C)	Brzina zagrevanja (°C/min)	Zapreminski udeo (%)					
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	
Eksperiment	Razli ite vrste poljoprivredne biomase i njihova mešavina	21	300	35,98-38,58	6,30-11,00	>4,00	n.o.	n.o.
			350	27,70-32,50	10,60-13,90	>4,00	n.o.	n.o.
			400	24,28-26,46	17,00-19,90	>4,00	n.o.	n.o.
			450	21,76-24,88	22,90-24,60	>4,00	n.o.	n.o.
			500	18,54-21,72	26,70-28,50	>4,00	n.o.	n.o.
			550	17,64-18,92	28,10-32,60	>4,00	n.o.	n.o.
			600	16,36-17,52	30,50-38,50	>4,00	n.o.	n.o.
			650	13,04-16,26	32,40-43,40	>4,00	n.o.	n.o.
Wang i saradnici [13]	Kukuruzna slama	n.o.	300	37,2	11,7	8,0	36,8	0,8
			350	33,9	14,5	10,1	34,0	1,5
			400	26,0	21,0	13,2	33,1	1,6
			450	24,8	23,2	17,0	29,8	1,4
			500	17,6	27,1	26,9	24,3	0,7
			650	14,4	31,7	33,8	17,6	0,6
Zhao i saradnici [14]	Kukuruzna slama	~625°C	n.o.	18,4	23,0	35,2	18,4	1,93
	Pšeni na slama			20,6	21,7	37,1	17,5	1,50
Yang i saradnici [15]	Je mena slama	450°C	n.o.	60,13	10,48	1,54	21,74	n.o.

n.o. - nije odre eno

Analizom podataka iz Tabele 5.6. može se zaključiti da su eksperimentalno ispitivani zapreminski udeli sastavnih komponenata piroliti kog gasa u saglasnosti sa podacima iz literature.

Wang i saradnici [13] su eksperimentalnim ispitivanjem odredili sastav gasa koji nastaje procesom pirolize kukuruzne stabljike. Utvrdili su da kada temperatura pirolize dostigne 300 °C glavni produkti piroliti kog gasa su CO<sub>2</sub> i CO ( 37,2 i 36,8 %, respektivno). Nakon 300 °C zapreminski udeli H<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> rastu, dok zapreminski udeli CO<sub>2</sub> i CO opadaju. Kada je temperatura dostigla 800 °C zapreminski udeli H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> i CO iznosili su 35,4, 32,7, 12,7 i 16,7 %, respektivno. Tako e pokazali su da zapreminski udeli CO<sub>2</sub> i CO naglo opadaju u prvoj fazi pirolize (300–500 °C) i sporije u završnoj fazi pirolize ( 600–800 °C). Pore enjem zapreminskih udela CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> na temperaturama od 300–800 °C sa eksperimentalno dobijenim podacima za pirolizu razli itih vrsta biomasa, može se primetiti da su zapreminski udeli CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> dobijeni eksperimentom u dobroj saglasnosti sa ovim istraživa ima.

Zhao i saradnici [14] su ispitivali pirolizu kukuruzne i pšeni ne slame na temperaturi ~ 625 °C. Za posmatrane zapreminske udele za CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> sa eksperimentalnim podacima može se uo iti da zapreminski udeli CO<sub>2</sub> pri posmatranoj temperaturi su u dobroj saglasnosti sa eksperimentalnim podacima dok CH<sub>4</sub> pri datoj temperaturi ima niže vrednosti od vrednosti dobijenim eksperimentom.

Yang i saradnici [15] su ispitivali pirolizu je mene slame pri temperaturi od 450 °C. Posmatrani zapreminski udeli CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> imaju odstupanja od eksperimentalnih podataka, što se može objasniti posmatranom drugom vrstom poljoprivredne biomase od poljoprivrednih biomasa obuhva enih eksperimentom.

#### **5.4.6.2. Sastav piroliti kog ulja**

Proizvodnja te nog goriva (bio-ulja) brzom pirolizom je tehnologija za koju se veruje da može predstavljati rešenje u potrazi za odgovaraju om alternativom fosilnim gorivima. Visok prinos bio-ulja može se posti i optimizacijom uslova odvijanja procesa pirolize. Piroliti kog ulje (bio-ulje) sastoji se od vode (~15-35%, maseni udeo) i složene mešavine organskih komponenata. Po sastavu bio-ulje je sli no osnovnom sastavu biomase od koje nastaje. Gustina bio-ulja iznosi oko 1200 kg/m<sup>3</sup>, i ve a je u odnosu na lož-ulje, a naro ito u odnosu na prvobitnu biomasu. Viskozitet bio-ulja varira od 0,025 Pa·s do 1,0 Pa·s zavisno od sadržaja vode. Detaljne karakteristike bio-ulja dobijene pirolizom poljoprivredne biomase date su u Tabeli 5.7.

**Tabela 5.7.** Karakteristike piroliti kog ulja dobijenog pirolizom poljoprivredne biomase [16]

Fizi ke karakteristike	Karakteristi ne vrednosti
Maseni udeo vlage	15 – 30%
pH	2,8 – 4,0
<b>Elementarna analiza</b>	
C	55 – 64%
H	5 – 8%
O	27 – 40%
N	0,05 – 1,0%
Pepeo(A)	0,03 – 0,30%
H <sub>g</sub> (gornja toplotna mo )	16 – 26 MJ/kg
Viskoznost	0,025 – 1,0 Pa·s

U Tabeli 5.8. prikazani su rezultati tehni ke i elementarne analize piroliti kog ulja dobijenog pirolizom razli itih vrsta poljoprivredne biomase. Podaci su preuzeti iz literature.

**Tabela 5.8.** Osnovne karakteristike piroliti kog ulja dobijenog pirolizom poljoprivredne biomase

Vrsta biomase		Temperatura (°C)	Vlaga	Elementarni sastav					Gornja toplotna mo	Donja toplotna mo
				C	H	N	S	O		
			Maseni udeo (%)	Maseni udeo (%)					(MJ/kg)	
Ate i Isikdag [17]	Pšeni na slama	600	n.o.	71,1	8,5	0,5	n.o.	19,8	27,09	n.o.
	Ovsena slama		n.o.	65,0	6,9	1,3	n.o.	26,9	32,74	n.o.
Mullen i saradnici [18]	Oklasak kukuruza	500	n.o.	55,14	7,56	0,56	n.o.	36,9	19,5	n.o.
	Kukuruzovina		n.o.	53,97	6,92	1,18	n.o.	37,94	22,1	n.o.
Mullen i saradnici [19]	Je mena slama	~500	26,7	50,78	3,2	1,37	n.o.	44,42	24,2	n.o.
Maximino [20]	Pšeni na slama	n.o.	58	57	7	1,5	n.o.	34,5	11,1	10,2
Yu i saradnici [21]	Kukuruzovina	n.o.	15,2	60,66	7,7	2,02	0,15	n.o.	17,51	n.o.

n.o. - nije određeno

Zna ajni napori usmereni su na istraživanje i razvoj kako bi se bio-ulje moglo uspešno koristiti za proizvodnju toplotne i elektri ne enegije i za upotrebu kao transportno gorivo. Nažalost, bio-ulje još uvek nije zadovoljilo standarde za komercijalnu primenu, zbog zna ajnih problema koji nastaju tokom koriš enja bio-ulja kao goriva. Glavni razlozi za to su nestabilnost, visoka viskoznost i korozivnost. PH vrednost piroliti kog ulja ini ga nestabilnim i korozivnim. Poboljšavanjem karakteristika bio-ulja može se pove ati njegova stabilnost što podrazumeva obradu do stabilnog me uproizvoda ili potpuno konvertovanje u

ugljovodoni na goriva nakon završetka pirolize. Poboljšanje karakteristika bio-ulja naj eš e ima za cilj smanjenje viskoznosti koja se pove ava sa starenjem bio-ulja.

Uklanjanje kiseonika u obliku karboksilnih kiselih grupa smanjuje kiselost što poboljšava stabilnost bio-ulja. Postoje i druge tehnike stabilizacije koje podrazumevaju spre avanje dospevanja ili uklanjanje suspendovanih estica koksnog ostatka u piroliti kom ulju [22]. Iz navedenih razloga veoma je zna ajno stalno razvijati tehnologije za unapre ivanje piroliti kog ulja, kako bi se prevazišla pomenuta ograni enja.

#### 5.4.6.3. Sastav koksnog ostatka

Na fizi ke osobine koksnog ostatka zna ajno uti u procesni parametri, kao što su tip i oblik piroliti kog reaktora, vrsta biomase i odabrani predtretman, veli ina estica goriva, hemijska aktivacija, brzina zagrevanja, vreme boravka, pritisak, brzina protoka inertnog gasa itd. [23–28]. Na primer, uslovi odvijanja procesa pirolize kao što su ve a brzina zagrevanja (105-500 °C/s), kra e vreme boravka i manja veli ina estica proizvode finiji kokсни ostatak, dok spora piroliza ve ih estica proizvodi oštriji kokсни ostatak. Pirolizom drvne biomase uglavnom se dobija oštar kokсни ostatak. Sa druge strane, pirolizom poljoprivrednih ostataka i ubriva nastaje kokсни ostatak fine i krte strukture [29].

Kokсни ostatak uglavnom se sastoji iz ugljenika, uz kiseonik i razli ite neorganske vrste koje formiraju dve strukture: kristalne grafitne rešetke i nasumi no raspore ene amorfne aromati ne strukture [30]. U aromati nim prstenovima, H, O, N, P i S, u vidu heteroatoma, imaju zna ajan uticaj na fizi ke i hemijske osobine koksnog ostatka [31]. Me utim, sastav, raspodela i udeo ovih molekula u koksnom ostatku zavisi od više faktora koji uklju uju vrstu ulazne biomase i metod pirolize koji je koriš en [32-35]. U zavisnosti od sastava i fizi kih osobina, kokсни ostatak se može koristiti u raznim industrijskim procesima kao vrsto gorivo u boilerima, za proizvodnju aktivnog uglja, pravljenje ugljeni nih nanocevi, proizvodnju gasa bogatog vodonikom itd. [36].

Tabela 5.9. prikazuje rezultate elementarne i tehni ke analize koksnog ostatka dobijenog procesom pirolize mešavine poljoprivredne biomase koriš ene u eksperimentalnom istraživanju, kao i rezultate drugih istraživaca za kokсни ostatak nastao pirolizom razli itih vrsta poljoprivredne biomase.



**Tabela 5.9.** Osobine koksnog ostatka dobijenog pirolizom razli itih vrsti poljoprivredne biomase

Vrsta poljoprivredne biomase	Elementarna analiza vrstog ostatka					Tehni ka analiza vrstog ostatka				Gornja toplotna mo (MJ/kg)	
	C	H	N	S	O	W	A	VM	FC		
	Maseni udeo (%)					Maseni udeo (%)					
Mešavina navedenih slama (eksperiment)	65,99	3,87	0,30	0,08	12,15	n.o.	18,92	n.o.	n.o.	26,10	
Brewer i saradnici [37]	Kukuruzovina	62,8	2,9	1,3	0,05	n.o.	1,8	32,4	11,1	54,7	21,60
Mullen i saradnici [38]	Kukuruzovina	57,26	2,86	1,47	n.o.	5,45	n.o.	32,78	n.o.	n.o.	21,00
Mulligan i saradnici [39]	Pšeni na slama	71,10	2,99	0,29	n.o.	25,62	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	28,05
Mullen i saradnici [40]	Pšeni na slama	73,6	2,34	2,58	n.o.	8,00	4,6	13,3	n.o.	n.o.	28,10
Mullen i saradnici [40]	Oklasak kukuruza	77,60	3,05	0,85	n.o.	5,11	n.o.	13,34	n.o.	n.o.	30,00

n.o. - nije odre eno

Na osnovu sastava koksnog ostatka dobijenog nakon procesa pirolize poljoprivredne biomase potvr eno je da je kokсни ostatak produkt bogat ugljenikom (65,99%). Maseni udeo ugljenika u ulaznoj biomasi iznosio je 55,88% (suva osnova). Kokсни ostatak ima ve u donju toplotnu mo (25229 kJ/kg) u odnosu na ulaznu biomasu (16756 kJ/kg). Pore enje navedenih osobina koksnog ostatka sa osobinama koksnog ostatka poljoprivredne biomase iz literature prikazano je u Tabeli 5.9. Razlike u sastavu koksnog ostatka mogu se objasniti razli itim uslovima odvijanja procesa i razli itim sastavom ulazne biomase.

## 5.5. Obrada rezultata ispitivanja procesa pirolize mešavine navedenih slama (kukuruzne, pšeni ne, sojine i ovsene)

### 5.5.1. Karakteristike proizvedenog gasa

Gasna smeša proizvedena procesom pirolize poljoprivredne biomase sastojala se od: CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i N<sub>2</sub>. Za prora un su koriš eni zapreminski udeli CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>, dok su vrednosti zapreminskih udela CO i H<sub>2</sub> preuzete iz literature [13, 41]. Zbir navedenih zapreminskih udela u gasu manji je od 100%, te je u cilju vršenja analize proizvedenog gasa pretpostavljeno da ostatak gasa ini N<sub>2</sub>. Zapreminski udeli komponenata u proizvedenom vlažnom kondenzibilnom gasu pri temperaturi od 650 °C (Prilog P10-uzete su srednje vrenosti svih pet merenja) su:

$$CO = 17,6\% \text{ (literatura)}$$

$$CO_2 = 13,04\% \text{ (mereno)}$$

$$O_2 = 0,56\% \text{ (mereno)}$$

$$H_2 = 7,5\% \text{ (literatura)}$$

$$CH_4 = 32,4\% \text{ (mereno)}$$

$$N_2 = 28,9\% \text{ (iz bilansa)}$$

Gustina piroliti kog gasa (vlažnog kondenzibilnog):

$$\begin{aligned} \rho_{wg} &= \sum_i \rho_i \cdot V_i = \rho_{CO} \cdot V_{CO} + \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2} + \rho_{O_2} \cdot V_{O_2} + \rho_{H_2} \cdot V_{H_2} + \rho_{CH_4} \cdot V_{CH_4} + \rho_{N_2} \cdot V_{N_2} = \\ &= 0,176 \cdot 1,250 + 0,1304 \cdot 1,976 + 0,0056 \cdot 1,429 + 0,075 \cdot 0,08985 + 0,324 \cdot 0,717 + \\ &\quad + 0,289 \cdot 1,251 = 1,0863 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

gde su:

$$\begin{aligned} \rho_{CO} &= 1,250 \text{ kg/m}^3 - \text{gustina CO pri normalnim uslovima} \\ \rho_{CO_2} &= 1,976 \text{ kg/m}^3 - \text{gustina CO}_2 \text{ pri normalnim uslovima} \\ \rho_{O_2} &= 1,429 \text{ kg/m}^3 - \text{gustina O}_2 \text{ pri normalnim uslovima} \\ \rho_{H_2} &= 0,08985 \text{ kg/m}^3 - \text{gustina H}_2 \text{ pri normalnim uslovima} \\ \rho_{CH_4} &= 0,717 \text{ kg/m}^3 - \text{gustina CH}_4 \text{ pri normalnim uslovima} \\ \rho_{N_2} &= 1,251 \text{ kg/m}^3 - \text{gustina N}_2 \text{ pri normalnim uslovima} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} M_{wg} &= \sum_i V_i \cdot M_i = V_{CO} \cdot M_{CO} + V_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + V_{O_2} \cdot M_{O_2} + V_{H_2} \cdot M_{H_2} + V_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + V_{N_2} \cdot M_{N_2} = \\ &= 0,176 \cdot 28 + 0,1304 \cdot 44 + 0,0056 \cdot 32 + 0,075 \cdot 2 + 0,324 \cdot 16 + 0,289 \cdot 28 = 24,27 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \end{aligned}$$

gde su:

$$\begin{aligned} M_{CO} &= 28 \text{ kg/kmol} - \text{molarna masa CO} \\ M_{CO_2} &= 44 \text{ kg/kmol} - \text{molarna masa CO}_2 \\ M_{O_2} &= 32 \text{ kg/kmol} - \text{molarna masa O}_2 \\ M_{H_2} &= 2 \text{ kg/kmol} - \text{molarna masa H}_2 \\ M_{CH_4} &= 16 \text{ kg/kmol} - \text{molarna masa CH}_4 \\ M_{N_2} &= 28 \text{ kg/kmol} - \text{molarna masa N}_2 \end{aligned}$$

Donja toplotna moć gasa (vlažnog, kondenzibilnog) iznosi:

$$\begin{aligned} H_{d_{wg}} &= 12644 \cdot V_{CO} + 10760 \cdot V_{H_2} + 35797 \cdot V_{CH_4} = 12644 \cdot 0,176 + 10760 \cdot 0,075 + \\ &\quad + 35797 \cdot 0,324 = 14630,57 \text{ kJ/m}^3 \\ H_{d_{wg}} &= \frac{14630,57}{1,0863} = 13468,26 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

### 5.5.2. Materijalni bilans u piroliti kom reaktoru

Šema bilansa materije u piroliti kom reaktoru prikazana je na Slici 5.18.

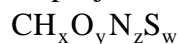
Sastav goriva mešavine  
navedenih slama (maseni udeli):

C = 42,24 %  
H = 6,98 %  
O = 28,57 %  
N = 0,87 %  
S = 0,15 %  
W = 13,06 %  
A = 8,13 %

Sastav koksnog ostatka (maseni udeli):

C = 65,99 %  
H = 3,87 %  
O = 10,22 %  
N = 0,92 %  
S = 0,08 %  
W = 0,00 %  
A = 18,92 %

Empirijska formula goriva:



$$x = \frac{H}{C} \cdot \frac{M_C}{M_H} = \frac{6,98}{42,24} \cdot \frac{12}{1} = 1,9830$$

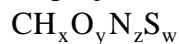
$$y = \frac{O}{C} \cdot \frac{M_C}{M_O} = \frac{28,57}{42,24} \cdot \frac{12}{16} = 0,5073$$

$$z = \frac{N}{C} \cdot \frac{M_C}{M_N} = \frac{0,87}{42,24} \cdot \frac{12}{14} = 0,0177$$

$$w = \frac{S}{C} \cdot \frac{M_C}{M_S} = \frac{0,15}{42,24} \cdot \frac{12}{32} = 0,0013$$

Empirijska formula goriva:  $\text{CH}_{1,9830}\text{O}_{0,5073}\text{N}_{0,0177}\text{S}_{0,0013}$

Empirijska formula koksa:



$$x = \frac{H}{C} \cdot \frac{M_C}{M_H} = \frac{3,87}{65,99} \cdot \frac{12}{1} = 0,7037$$

$$y = \frac{O}{C} \cdot \frac{M_C}{M_O} = \frac{10,22}{65,99} \cdot \frac{12}{16} = 0,1162$$

$$z = \frac{N}{C} \cdot \frac{M_C}{M_N} = \frac{0,92}{65,99} \cdot \frac{12}{14} = 0,0119$$

$$w = \frac{S}{C} \cdot \frac{M_C}{M_S} = \frac{0,08}{65,99} \cdot \frac{12}{32} = 0,0005$$

Empirijska formula koksa:  $\text{CH}_{0,7037}\text{O}_{0,1162}\text{N}_{0,0119}\text{S}_{0,0005}$

#### Bilans ugljenika

Koli ina ugljenika u gorivu:

$$C_B = 0,4224 \text{ kgC/kgB} = 0,4224 \cdot 0,0100 = 0,0042 \text{ kgC}$$

Koli ina ugljenika u koksu:

$$C_K = 0,6599 \text{ kgC/kgK} = 0,6599 \cdot 0,00236 = 0,0016 \text{ kgC}$$

Koli ina ugljenika u koksu svedeno po 1 kg goriva:

$$C_{KB} = 0,0016/0,010 = 0,1600 \text{ kgC/kgB}$$

gde su:

0,010 kg – masa goriva (mešavine) u piroliti kom reaktoru,

0,00236 kg – masa koksa ( vrstog ostatka) posle procesa pirolize.

Koli ina ugljenika u piroliti kom gasu (vlažnom):

$$C_{wg} = C_B - C_K = 0,0042 - 0,0016 = 0,0026 \text{ kgC}$$

Koli ina ugljenika u piroliti kom gasu svedeno po 1kg goriva.

$$C_{wgb} = 0,0026/0,010 = 0,26 \text{ kgC/kgB}$$

Stepen konverzije ugljenika:

$$c = \left(1 - \frac{C_K}{C_B}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{0,0016}{0,0042}\right) \cdot 100 = 61,90\%$$

### **Bilans vodonika**

Koli ina vodonik u gorivu:

$$H_B = 0,0698 \text{ kgH/kgB} = 0,0698 \cdot 0,0100 = 0,0007 \text{ kgH}$$

Koli ina vodonika u koksu:

$$H_K = 0,0387 \text{ kgH/kgK} = 0,0387 \cdot 0,0028 = 0,0001 \text{ kgH}$$

Koli ina vodonika u koksu svedeno po 1 kg goriva:

$$H_{KB} = 0,0001/0,010 = 0,0100 \text{ kgH/kgB}$$

Koli ina vodonika u piroliti kom gasu (vlažnom):

$$H_{wg} = H_B - H_K = 0,0007 - 0,0001 = 0,0006 \text{ kgH}$$

Koli ina vodonika u piroliti kom gasu svedeno po 1kg goriva.

$$H_{wgb} = 0,0006/0,010 = 0,0600 \text{ kgH/kgB}$$

### **Bilans kiseonika**

Koli ina kiseonika u gorivu:

$$O_B = 0,2857 \text{ kgO/kgB} = 0,2857 \cdot 0,010 = 0,0029 \text{ kgO}$$

Koli ina kiseonika u koksu:

$$O_K = 0,1022 \text{ kgO/kgK} = 0,1022 \cdot 0,0028 = 0,0003 \text{ kgO}$$

Koli ina kiseonika u koksu svedeno po 1 kg goriva:

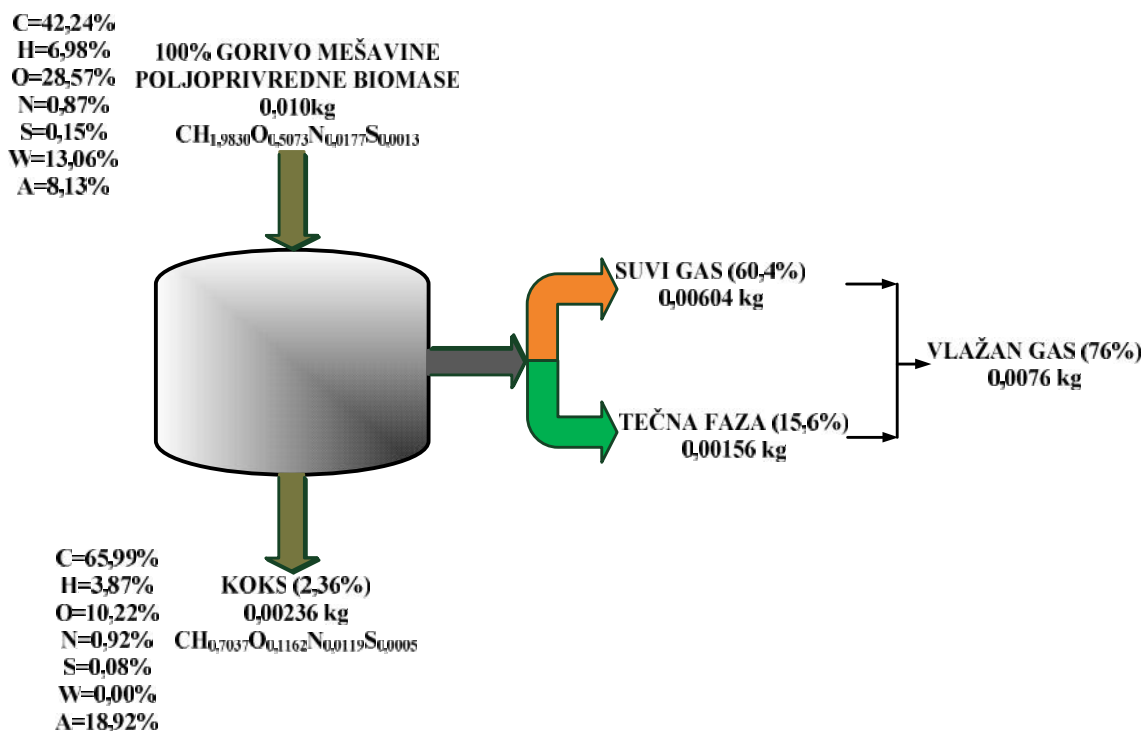
$$O_{KB} = 0,0003/0,010 = 0,0300 \text{ kgO/kgB}$$

Koli ina kiseonika u piroliti kom gasu (vlažnom kondenzibilnom):

$$O_{wg} = O_B - O_K = 0,0029 - 0,0003 = 0,0026 \text{ kgO}$$

Koli ina kiseonika u piroliti kom gasu svedeno po 1kg goriva.

$$O_{wgB} = 0,0026/0,010 = 0,2600 \text{ kgO/kgB}$$



Slika 5.18. Šema materijalnog bilansa u piroliti kom reaktoru

### 5.5.3. Toplotni bilans u piroliti kom reaktoru

Sastav goriva mešavine navedenih slama (maseni udeli):

C = 42,24 %  
 H = 6,98 %  
 O = 28,57 %  
 N = 0,87 %  
 S = 0,15 %  
 W = 13,06 %  
 A = 8,13 %

Sastav koksnog ostatka (maseni udeli):

C = 65,99 %  
 H = 3,87 %  
 O = 10,22 %  
 N = 0,92 %  
 S = 0,08 %  
 W = 0,00 %  
 A = 18,92 %

Sastav piroliti kog gasa (vlažnog):

$$CO = CO = 17,6\%$$

$$CO_2 = CO_2 = 13,04\%$$

$$O_2 = O_2 = 0,56\%$$

$$H_2 = H_2 = 7,5\%$$

$$CH_4 = CH_4 = 32,4\%$$

$$N_2 = N_2 = 28,9\%$$

Šema bilansa toplote prikazana je na Slici 5.19.

Toploptna mo goriva:

$$H_{dB} = 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W = 33900 \cdot 0,4224 + 121400 \cdot \left(0,0698 - \frac{0,2857}{8}\right) + 10460 \cdot 0,0015 - 2510 \cdot 0,1306 = 18145,47 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{dB} = 18145,47 \cdot 0,010 = 181,45 \text{ kJ}$$

**Toplota (energija) greja a u reaktoru:**

Snaga jednog greja a je 1,5kW, eksperimentalna analiza je ra ena sa dva greja a, vreme trajanja procesa pirolize u reaktoru 40 min.

$$E_G = 1,5 \cdot 2 \cdot 40 \cdot 60 = 7200 \text{ kJ}$$

Toplotna mo koksa:

$$H_{dK} = 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W = 33900 \cdot 0,6599 + 121400 \cdot \left(0,0387 - \frac{0,1022}{8}\right) + 10460 \cdot 0,0008 - 2510 \cdot 0 = 25526,27 \text{ kJ/kgK}$$

$$H_{dK} = 25526,27 \cdot 0,00236 = 60,24 \text{ kJ}$$

Toplotna mo koksa svedena na jedinicu mase goriva:

$$H_{dKB} = \frac{25526,27 \cdot 0,00236}{0,010} = 6024,20 \text{ kJ/kgB}$$

gde su:

0,00236 kg– masa koksa

0,010 kg– masa goriva

Toplotna mo gasa (vlažnog, kondenzibilnog, izra unata ranije):

$$H_{d_{wg}} = 14630,57 \text{ kJ/m}^3$$

$$H_{d_{wg}} = \frac{14630,57}{1,0863} = 13468,26 \text{ kJ/kg}$$

Toplotna mo gasa svedena na jedinicu mase goriva:

$$H_{d_{wgB}} = \frac{13468,26 \cdot 0,0076}{0,010} = 10235,88 \text{ kJ/kgB}$$

gde je:

0,0076 kg – masa gasa

Fizi ka toplota piroliti kog gasa pri temperaturi od 650 °C:

$$\begin{aligned} h_{f_{wg}} &= \sum_i i \cdot h_i = CO \cdot h_{CO} + CO_2 \cdot h_{CO_2} + O_2 \cdot h_{O_2} + H_2 \cdot h_{H_2} + CH_4 \cdot h_{CH_4} + N_2 \cdot h_{N_2} = \\ &= 0,176 \cdot 887,39 + 0,1304 \cdot 1343,30 + 0,0056 \cdot 926,96 + 0,075 \cdot 851,60 + 0,324 \cdot 1510,15 + \\ &\quad + 0,289 \cdot 879,23 = 1143,79 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned}$$

$$h_{f_{wg}} = \frac{1143,79}{1,0863} = 1052,92 \text{ kJ/kg}$$

gde su:

$$h_{CO} = 887,39 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija CO pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{CO_2} = 1343,20 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija CO}_2 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{O_2} = 926,96 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija O}_2 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{H_2} = 851,60 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija H}_2 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{CH_4} = 1510,15 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija CH}_4 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{N_2} = 879,23 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad - \text{specifi na entalpija N}_2 \text{ pri temperaturi od } 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizi ka toplota piroliti kog gasa svedena na jedinicu mase goriva:

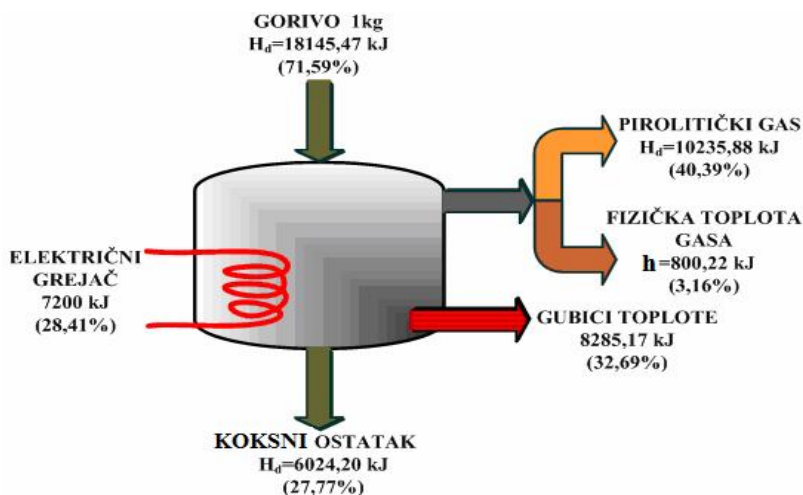
$$h_{f_{wgB}} = \frac{1052,92 \cdot m_{wg}}{m_B} = \frac{1052,92 \cdot 0,0076}{0,010} = 800,22 \text{ kJ/kgB}$$

Gubici toplote:

$$\text{Ulaz: } 18145,47 + 7200 = 25345,47 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Izlaz: } 10235,88 + 800,22 + 6024,20 = 17060,30 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Gubici: Ulaz - Izlaz} = 25345,47 - 17060,30 = 8285,17 \text{ kJ/kg}$$



Slika 5.19. Šema bilansa toplote u piroliti kom reaktoru

#### 5.5.4. Stepen korisnosti piroliti kog reaktora

Odnos energije na izlazu iz reaktora i uložene energije na ulazu u reaktor (Slika 5.19):

$$\eta_1 = \frac{\text{IZLAZ}}{\text{ULAZ}} = \frac{10235,88 + 800,22 + 6024,20}{18145,47 + 7200} = \frac{17060,30}{25345,47} = 0,6731 \cdot 100 = 67,31 \%$$

Odnos hemijske energije na izlazu iz reaktora i uložene hemijske energije na ulazu u reaktor (Slika 5.19):

$$\eta_2 = \frac{10235,88 + 6024,20}{18145,47} = \frac{16260,76}{18145,47} = 0,8961 = 89,61 \%$$

Toplotno optere enje popre nog preseka reaktora:

$$Q = \frac{m_B \cdot H_d}{A} = \frac{m_B \cdot H_d}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{0,01 \cdot 18145,47}{\frac{(160 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3,14}{4}} = \frac{181,4547}{0,020096} = 0,90 \cdot 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

gde su:

$H_d = 18145,47 \text{ kJ/kg}$  donja toplotna mo goriva

$A$  – popre ni presek reaktora,  $\text{m}^2$

$d = 160 \text{ mm}$  – unutrašnji pre nik reaktora



## LITERATURA

- [1] ASTM Standard. ASTM standards-D5142-04 standard test methods for proximate analysis of the analysis sample of coal and coke by instrumental procedures. In: Annual book of ASTM standards, Section 5, Vol. 05.06. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials. 2002.
- [2] ASTM Standard. ASTM standards-D3176-89 standard practice for ultimate analysis of coal and coke. In: Annual book of ASTM standards, Section 5, Vol. 05.06. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials. 2002.
- [3] Brewer C. E., Schmidt-Rohr K., Satrio J.A., Brown R. C. Characterization of Biochar from Fast Pyrolysis and Gasification Systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28(3): 386-396. 2009.
- [4] \*\*\*, Technologies for Converting Waste Agricultural Biomass to Energy, Reading Material, Compiled by United Nations Environmental Programme Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre Osaka. 2013.
- [5] Wang Q., Xu H., Liu H., Jia C., Zbao W. Co-combustion Performance of Oil Shale Semi-coke with Corn Stalk. *Energy Procedia* 17 (Part A): 861-868. 2012.
- [6] Demirbas A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuels* 76 (5): 431 - 434. 1997.
- [7] Stojanovi A., Nemoda S., Eri A., Repi B., Daki D., urovi D. Procena efikasnosti konverzije koksnog ostatka u zoni sagorevanja balirane poljoprivredne biomase. Laboratorija za termotehniku i energetiku, Institut za nuklearne nauke Vin a, 2010.
- [8] uri S., Brankov S., Kosani T., erani M, Nakom i Smaragdakis B. The Composition of Gaseous Products from Corn Stalk Pyrolysis Process. *Thermal Science* 18(2): 573-582. 2014.
- [9] uri S., Kalu erovi Ž., Kosani T., erani M., Miloti M., Brankov S. Experimental Investigation of Pyrolysis Process of Agricultural Biomass Mixture. *Periodica Polytechnica – Chemical Engineering* 58(2): 141-147. 2014.
- [10] Crombie K., Mašek O. Investigating the potential for a self-sustaining slow pyrolysis system under varying operating conditions. *Bioresource Technology* 162: 148-156. 2014.
- [11] Mullen C. A., Boateng A. A., Goldberg N. M., Lima I. M., Laird D. A., Hicks K. B. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy* 34: 67-74. 2010.

- [12] Duku M. H. Bio-oil production from lignocellulosic biomass using fast pyrolysis in a fluidized-bed reactor. Ph.D. Thesis, Faculty of Renewable Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, Kumasi, Ghana. 2014.
- [13] Wang L., Shen S., Yang S., Shi X. Experimental investigation of pyrolysis process of corn straw. *International Journal of Low – Carbon Technologies* 5: 182 – 185. 2010.
- [14] Zhao X., Zhang J., Song Z., Liu H., Li L., Ma C. Microwave pyrolysis of straw bale and energy balance analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 92(1): 43 – 49. 2011.
- [15] Yang Y., Brammer G. J., Mahmood N. S. A., Hornung A. Intermediate pyrolysis of biomass energy pellets for producing sustainable liquid, gaseous and solid fuels. *Bioresource Technology* 169: 794 – 799. 2014.
- [16] Sadaka S, Boateng A. A. Pyrolysis and Bio-oil. University of Arkansas publication-FS A1052, [http://www.uaex.edu/Other\\_Areas/publications/PDF/FSA1052.pdf](http://www.uaex.edu/Other_Areas/publications/PDF/FSA1052.pdf) (4.05.2015.). 2009.
- [17] Ate F., I ikda M. A. Evaluation of the role of the pyrolysis temperature in straw biomass samples and characterization of the oils by GC/MS. *Energy and Fuels* 22(3): 1936–1943. 2008.
- [18] Mullen C. A., Boateng A. A., Goldberg N. M., Lima I. M., Laird D.A., Hicks K. B. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy* 34(1): 67–74. 2010.
- [19] Mullen C. A., Boateng A. A., Hicks K. B., Goldberg N. M., Moreau R. A. Analysis and comparison of bio-oil produced by fast pyrolysis from three barley biomass/byproduct streams. *Energy and Fuels* 24(1):699–706. 2010.
- [20] Maximino R. Pyrolysis of Biomass Residues in a Screw Reactor. Master thesis, Técnico Lisboa, Portugal. 2013.
- [21] Yu F., Deng P., Chen P., Liu Y., Wan Y., Olson A., Kittelson D., Ruan R. Physical and chemical properties of bio – oils from microwave pyrolysis of corn stover. *Applied biochemistry and biotechnology* 136 – 140: 957 – 970. 2007.
- [22] Schwietzke S., Ladisch M., Russo L., Kwant K., Makinen T., Kavalov B., Maniatia K., Zwart R., Shananan G., Sipila K., Grabowowski P., Telenius B., White M., Brown A. Analysis and identification of gaps in research for the production of second-generation liquid transportation biofuels. Report of the IEA Bioenergy Task 41, Project 2, IEA Bioenergy Secretariat, Rotorua. 2008.
- [23] González J.F., Román S., Encinar J.M., Martínéz G. Pyrolysis of various biomass residues and char utilization for the production of activated carbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 85:134–141.2009.

- [24] Downie A., Crosky A., Munroe P. Physical Properties of Biochar. In *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Lehmann J., Joseph S., Eds. Earthscan, London, UK. 2009.
- [25] Brown R. Biochar Production Technology. In *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Lehmann J., Joseph S., Eds. Earthscan: London, UK. 2009.
- [26] Cetin E., Moghtaderi B., Gupta R., Wall T.F. Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars. *Fuel* 83:2139–2150.2004.
- [27] Lua A.C., Yang T., Guo J. Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 72:279–287.2004.
- [28] Dawei A., Zhimin W., Shuting Z., Hongxing Y. Low-temperature pyrolysis of municipal solid waste: Influence of pyrolysis temperature on the characteristics of solid fuel. *Int. J. Energy Res.* 30:349–357.2006.
- [29] Sohi S., Lopez-Capel E., Krull E., Bol R. Biochar, Climate Change and Soil: A Review to Guide Future Research; CSIRO Land and Water Science Report; CSIRO: Canberra, Australia.2009.
- [30] Verheijen F., Jeffery S., Bastos A.C., Van der Velde M., Diafas I. Biochar Application to Soils: A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. European Commission Report No. EUR 24099 EN, European Communities, Ispra, Italy. 2010.
- [31] Bourke J., Manley-Harris M., Fushimi C., Dowaki K., Nunoura T., Antal M.J., Jr. Do all carbonised charcoals have the same structure. A model of the chemical structure of carbonized charcoal. *Ind. Eng. Chem. Res.* 46: 5954–5967.2007.
- [32] Chen J., Zhu D., Sun C. Effect of heavy metals on the sorption of hydrophobic organic compounds to wood charcoal. *Environ. Sci. Technol.* 41: 2536–2541.2007.
- [33] Van Zwieten L., Kimber S., Morris S., Chan K.Y., Downie A., Rust J., Joseph S., Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant. Soil*:1–12. 2009.
- [34] Amonette J.E., Joseph S. Characteristics of Biochar: Microchemical Properties. In *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Lehmann J., Joseph S., Eds. Earthscan: London, UK. 2009.
- [35] Gaskin J.W., Steiner C., Harris K., Das K.C., Bibens B. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Trans. ASABE* 51: 2061–2069. 2008.
- [36] Goyal H.B., Seal D., Saxena R.C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*12: 504–517.2008.

- [37] Brewer E. C., Schmidt – Rohr K., Satrio A. J., Brown C. R., Characterization of Biochar from Fast Pyrolysis and Gasification Systems, *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28 (3): 386 – 396. 2009.
- [38] Mullen C. A., Boateng A. A., Hicks K. B., Goldberg N. M., and Moreau R. A. “Analysis and comparison of bio-oil produced by fast pyrolysis from three barley biomass/byproduct streams. *Energy and Fuels* 24(1): 699–706. 2010.
- [39] Mulligan C. J., Strezov L., and Strezov V. Thermal decomposition of wheat straw and mallee residue under pyrolysis conditions. *Energy and Fuels* 24(1): 46–52. 2010.
- [40] Mullen C. A., Boateng A. A., Goldberg N. M., Lima I. M., Laird D. A., and Hicks K. B. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy* 34(1): 67–74. 2010.
- [41] Cao Q., Xie K. C., Bao W. R., Shen S. G. Pyrolytic behavior of waste corn cob. *Bioresource Technology* 94 (1): 83 - 89. 2004.

## 6. ZAKLJU AK

Cilj doktorske disertacije predstavljalo je eksperimentalno ispitivanje procesa pirolize razli itih vrsta poljoprivredne biomase kao potencijalnih izvora energije. Izvršena je tehni ka i elementarna analiza sastava uzoraka slame od kukuruzovine, pšenice, ovsas, soje i mešavine navedenih slama. Eksperimentalno istraživanje u doktorskoj disertaciji obuhvatalo je ispitivanje uticaja procesnih parametara (piroliti ke temperature, reakcionog vremena i brzine zagrevanja) na prinos koksnog ostatka i piroliti kog gasa. Tehni kom i elementarnom analizom koksnog ostatka dobijeni su podaci potrebni za prora un materijalnog bilansa procesa pirolize.

U okviru izrade doktorske disertacije projektovano je laboratorijsko postrojenje za ispitivanje pirolize i gasifikacije biomase. Tehni ko rešenje postrojenja verifikovano je na Nastavno – nau nom ve u Fakulteta tehni kih nauka u Novom Sadu i predstavlja originalan doprinos razvoju nauke u oblasti termi kih procesa konverzije poljoprivredne biomase.

Ispitivanjem uticaja temperature pirolize biomase na prinos produkata, došlo se do zaklju ka da sa pove anjem temperature dolazi do porasta prinosa piroliti kog gasa i do smanjenja prinosa koksnog ostatka. Najmanji prinos vrstog ostatka dobijen je za uzorak sojine slame pri temperaturi pirolize od 650 °C i iznosi 21,6 %.

Do zna ajnog gubitka mase uzorka u reaktoru dolazi zbog isparavanja katrana i drugih gasovitih produkata. Masa vrstog (koksnog) ostatka dobijena merenjem posle procesa pirolize biomase (pet merenja) kretala se u intervalu 2,14 g (sojina slama) do 2,86 g (ovsena slama) a masa te ne faze u intervalu 1,8 g (ovsena slama) do 2,4 g (slama kukuruzovine).

Kada se posmatra uticaj temperature na udeo CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>, može se zaklju iti slede e: pri porastu reakcione temperature (iznad 300 °C) vrednost zapreminskog udela CH<sub>4</sub> raste, dok vrednost zapreminskog udela CO<sub>2</sub> opada, uz konstantno opadanje zapreminskog udela kiseonika.

Uticaj reakcionog vremena ispitivan je tokom 40 minuta trajanja procesa pirolize. U toku prvih 8 minuta ispitivanja procesa pirolize nije uo ena promena masenog uzorka za sve ispitivane vrste poljoprivredne biomase. Najve i gubitak mase uzorka od 88,6 % zabeležen je u 40 minutu trajanja procesa pirolize za uzorak sojine slame i pri temperaturi pirolize od 650°C, a najmanji gubitak mase, za isto vreme, od 81,6 % zabeležen je za uzorak ovsene slame.

Eksperimentalno ispitivanje uticaja brzine zagrevanja uzorka u reaktoru na prinos produkata pirolize vršeno je za tri različite brzine zagrevanja u reaktoru: 21, 30 i 54 °C/min. Dobijeni rezultati ukazuju da porast brzine zagrevanja uzorka mešavine u reaktoru tokom trajanja procesa pirolize dovodi do smanjenja prinosa vrstog ostatka i povećanja prinosa piroliti kog gasa. Veći prinosi koksnog ostatka pri manjim brzinama zagrevanja uzorka mešavine datih slama u reaktoru su posledice sporih reakcija koje se odvijaju u reaktoru.

Na osnovu elementarnog sastava ulaznog goriva, koksnog ostatka dobijenog nakon procesa pirolize i zapreminskog udela komponenata u piroliti kom gasu, određen je toplotni bilans piroliti kog reaktora. Utvrđeno je da gubici toplote do kojih dolazi tokom procesa pirolize iznose 8285,17 kJ/kg. Odnos energije na izlazu iz reaktora i uložene energije na ulazu u reaktor iznosi 67,31 %, dok je toplotno opterećenje poprečnog preseka reaktora  $0,90 \cdot 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ .

Rezultati dobijeni u okviru istraživanja koja su bila predmet doktorske disertacije trebalo bi da koriste u daljem razvoju sistema za termičku konverziju biomase.

Visoki prinosi piroliti kog gasa (71–78%) dobijeni procesom pirolize poljoprivredne biomase pri 650°C pružaju mogućnost da Republika Srbija nadoknadi svoj deficit iz obnovljivih izvora energije, naročito poljoprivredne biomase. Cilj Republike Srbije i jeste da se povećaju udeo energije iz obnovljivih izvora u potrošnji, što je i njena obaveza koja proističe iz članstva u Energetskoj zajednici u jugoistočnoj Evropi kao okvira za integraciju u energetska tržišta Evropske unije. Ako uzmemo u obzir da poljoprivredna biomasa ima najveći potencijal u odnosu na ostale obnovljive izvore energije u Republici Srbiji, jasno je zašto je istraživanje bilo usmereno i realizovano u datom pravcu.

Potpunija tehno-ekonomska analiza, a na osnovu toga i konkretan predlog rešenja korišćenja produkata pirolize poljoprivredne biomase može se dati tek nakon ispitivanja procesa termičke prerade biomase na poluindustrijskim i industrijskim postrojenjima. Izgradnju komercijalnih postrojenja trebalo bi vezati za domaće u industriju, bez inostranih licenci i uvoza, jer se samo tako mogu naći i najprihvatljivija rešenja koja odgovaraju domaćim energetskim potrebama.

Upotrebom poljoprivredne biomase smanjila bi se potreba države za uvozom energenata, zaštita životne sredine bi se podigla na veći nivo, privreda bi napredovala, smanjila bi se nezaposlenost u seoskim sredinama i sprečena migracija stanovništva iz ruralnih krajeva.

## PRILOZI

**PRILOG [P1]:** Mase produkata sagorevanja mešavine navedenih biomasa u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

	Mase produkata sagorevanja, [kg/kg]									
	$O_{min.}$	$L_{min.}$	$L$	$m_{CO_2}$	$m_{H_2O}$	$m_{SO_2}$	$m_{N_2}$	$m_{O_2}$	$m_{sdg.}$	$m_{vdg.}$
<b>1,0</b>	1,4007	6,0902	6,0902	1,5489	0,7588	0,0030	4,6981	0,0000	6,2501	7,0089
<b>1,2</b>	1,4007	6,0902	7,3082	1,5489	0,7588	0,0030	5,6360	0,2801	7,4681	8,2269
<b>1,4</b>	1,4007	6,0902	8,5262	1,5489	0,7588	0,0030	6,5739	0,5603	8,6861	9,4449
<b>1,6</b>	1,4007	6,0902	9,7443	1,5489	0,7588	0,0030	7,5118	0,8404	9,9042	10,6630
<b>1,8</b>	1,4007	6,0902	10,9623	1,5489	0,7588	0,0030	8,4497	1,1206	11,1222	11,8810
<b>2,0</b>	1,4007	6,0902	12,1804	1,5489	0,7588	0,0030	9,3876	1,4007	12,3403	13,0991

**PRILOG [P2]:** Zapremine produkata sagorevanja mešavine navedenih biomasa u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

	<b>Zapremine produkata sagorevanja, [m<sup>3</sup>/kg]</b>									
	<b>O<sub>min.</sub></b>	<b>L<sub>min.</sub></b>	<b>L</b>	<b>V<sub>CO<sub>2</sub></sub></b>	<b>V<sub>H<sub>2</sub>O</sub></b>	<b>V<sub>SO<sub>2</sub></sub></b>	<b>V<sub>N<sub>2</sub></sub></b>	<b>V<sub>O<sub>2</sub></sub></b>	<b>V<sub>sdg.</sub></b>	<b>V<sub>vdg.</sub></b>
<b>1,0</b>	0,9806	4,6693	4,6693	0,7886	0,9443	0,0010	3,6957	0,0000	4,4854	5,4297
<b>1,2</b>	0,9806	4,6693	5,6032	0,7886	0,9443	0,0010	4,4335	0,1961	5,4193	6,3636
<b>1,4</b>	0,9806	4,6693	6,5371	0,7886	0,9443	0,0010	5,1712	0,3922	6,3531	7,2974
<b>1,6</b>	0,9806	4,6693	7,4709	0,7886	0,9443	0,0010	5,9090	0,5883	7,2870	8,2313
<b>1,8</b>	0,9806	4,6693	8,4048	0,7886	0,9443	0,0010	6,6468	0,7844	8,2209	9,1652
<b>2,0</b>	0,9806	4,6693	9,3387	0,7886	0,9443	0,0010	7,3845	0,9806	9,1547	10,0990



**PRILOG [P3]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu

	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>	<b>1,4</b>	<b>1,6</b>	<b>1,8</b>	<b>2,0</b>
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	14,52	12,39	10,81	9,58	8,60	7,81
<b>H<sub>2</sub>O (%)</b>	17,39	14,84	12,94	11,47	10,30	9,35
<b>SO<sub>2</sub> (%)</b>	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>N<sub>2</sub> (%)</b>	68,06	69,67	70,86	71,79	72,52	73,12
<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	0,00	3,08	5,37	7,15	8,56	9,71

**PRILOG [P4]:** Srednja masena specifi na toplota nekih gasova  $|c_p|_0^t$ , kJ/(kg · K)<sup>\*)</sup>

t, [°C]	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> ist	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Vazduh	N <sub>2</sub> iz vazduha
<b>0</b>	14,38	1,039	0,9084	1,039	1,858	0,8205	0,607	1,004	1,026
<b>100</b>	14,40	1,041	0,9218	1,041	1,874	0,8689	0,637	1,007	1,031
<b>200</b>	14,42	1,044	0,9355	1,046	1,894	0,9122	0,663	1,013	1,035
<b>400</b>	14,48	1,057	0,9646	1,064	1,946	0,9852	0,707	1,029	1,048
<b>600</b>	14,55	1,076	0,9926	1,087	2,008	1,043	0,740	1,050	1,067
<b>800</b>	14,64	1,098	1,016	1,110	2,074	1,089	0,765	1,072	1,088
<b>1000</b>	14,78	1,118	1,035	1,131	2,142	1,126	0,784	1,092	1,108
<b>1200</b>	14,94	1,137	1,051	1,150	2,208	1,157	0,798	1,109	1,126
<b>1400</b>	15,12	1,153	1,065	1,166	2,271	1,183	0,810	1,124	1,142
<b>1600</b>	15,30	1,168	1,077	1,180	2,331	1,206	0,821	1,138	1,157
<b>1800</b>	15,48	1,181	1,089	1,193	2,386	1,225	0,829	1,151	1,169
<b>2000</b>	15,65	1,192	1,099	1,204	2,437	1,241	0,837	1,162	1,180
<b>2200</b>	15,82	1,202	1,109	1,214	2,485	1,256	-	1,172	1,191
<b>2400</b>	15,99	1,211	1,118	1,222	2,530	1,269	-	1,181	1,200
<b>2600</b>	16,14	1,219	1,127	1,230	2,573	1,281	-	1,189	1,207
<b>2800</b>	16,28	1,227	1,135	1,237	2,614	1,292	-	1,196	1,215
<b>3000</b>	16,42	1,233	1,143	1,243	2,652	1,301	-	1,203	1,221

<sup>\*)</sup>  $|c_v|_0^t = |c_p|_0^t - R_u$

**PRILOG [P5]:** Entalpija dimnih gasova pri sagorevanju mešavine poljoprivredne biomase

<b>Entalpija dimnih gasova, [kJ/kg]</b>											
	<b>100° C</b>	<b>200° C</b>	<b>400° C</b>	<b>600° C</b>	<b>800° C</b>	<b>1000° C</b>	<b>1200° C</b>	<b>1400° C</b>	<b>1600° C</b>	<b>1800° C</b>	<b>2000° C</b>
<b>1.0</b>	761	1543	3171	4893	6699	8577	10512	12493	14520	16564	18635
<b>1.2</b>	884	1789	3673	5660	7743	9906	12133	14410	16739	19087	21464
<b>1.4</b>	1006	2036	4174	6427	8788	11236	13753	16327	18958	21610	24294
<b>1.6</b>	1129	2283	4675	7194	9832	12565	15374	18244	21177	24132	27123
<b>1.8</b>	1251	2529	5176	7962	10876	13894	16994	20161	23396	26655	29952
<b>2.0</b>	1374	2776	5678	8729	11920	15223	18615	22079	25615	29178	32781

**PRIOLOG [P6]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Slame kukuruzovine

ISPITIVANJE BR: 1

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,5

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,5

MASA KOKSA (g): 2,5

Datum merenja:			5.05.2012.													
Vreme merenja, h			9:28 - 10:09													
Redni broj merenja			1													
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica														
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10													
2	Temperatura u reaktoru	°C	27	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,02	12,05	14,50	16,56	18,97	23,02	24,98	26,20	26,97	28,02	29,33	30,47	32,18
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	9,9	9,2	8,1	6,1	4,9	3,6	3,2	3,2	3,1	3,0	3,0	2,8	2,5
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0,1	0,8	1,9	3,9	5,1	6,4	6,8	6,8	6,9	7,0	7,0	7,2	7,5
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,008	0,0186	0,0624	0,0624	0,0624	0,0624	0,0623	0,0623	0,0623	0,0623	0,0623	0,0623	0,0623
		H <sub>2</sub>	%	0,14	0,14	0,52	2,13	2,12	2,11	2,10	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,0550	0,750	15,6	34,5	36,5	37,0	28,5	22,0	21,8	20,9	18,7	18,1
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,8	18,9	6,7	2,6	2,4	2,3	1,9	1,6	1,2	1,0	0,5	0,3
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,0	9,5	11,5	13,0	16,0	23,5	29,0	36,5	39,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,5													
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,4													
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,1													

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.1 – nastavak

Datum merenja:		5.05.2012.																																												
Vreme merenja, h		9:28 - 10:09																																												
Redni broj merenja		1																																												
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																												
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10																																											
2	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			
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,7	9,5	9,2	9,0	8,5	7,2	6,8	6,1	5,2	4,9	4,2	4,0	3,8	3,6	3,3	3,2	3,2	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0	1,5	2,8	3,2	3,9	4,8	5,1	5,8	6,0	6,2	6,4	6,7	6,8	6,8	6,9	7,0	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [6]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Slame kukuruzovine

ISPITIVANJE BR: 1 – nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,6

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,4

MASA KOKSA (g): 2,6

Datum merenja:			5.05.2012.															
Vreme merenja, h			19:26 - 20:05															
Redni broj merenja			2															
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10															
2	Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650		
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,10	13,52	15,57	17,27	19,40	22,93	25,20	26,20	27,00	27,88	28,83	30,10	31,08		
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,3	8,0	6,7	5,0	3,6	3,3	3,1	3,0	2,9	2,9	2,9	2,8		
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,7	2,0	3,3	5,0	6,4	6,7	6,9	7,0	7,1	7,1	7,1	7,2		
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0166	0,0197	>0,0629	>0,0629	>0,0628	>0,0628	0,0628	0,0628	0,0628	0,0628	0,0628	0,0628	0,0628	0,0627	
		H <sub>2</sub>	%	0,19	0,19	0,62	0,92	>2,20	>2,20	2,19	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,17
		CO <sub>2</sub>	%	0,1300	0,2050	1,76	14,2	33,5	39	39,9	28,0	24,2	24,0	23,0	21,6	19,4	18,0	
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,3	18,1	7,3	2,9	2,5	2,0	1,8	1,7	1,3	1,2	0,9	0,6	0,5	
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	3,0	11,0	11,5	14,5	18,0	21,5	26,5	31,5	37,5	44,5	
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,6															
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3															
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,1															

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

merenje br.2 – nastavak

Datum merenja:		5.05.2012.																																												
Vreme merenja, h		19:26 - 20:05																																												
Redni broj merenja		2																																												
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																												
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10																																											
2	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			
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,6	9,0	8,3	7,8	6,9	5,9	5,1	4,5	4,0	3,6	3,6	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,9	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,4	1,0	1,7	2,2	3,1	4,1	4,9	5,5	6,0	6,4	6,4	6,5	6,7	6,9	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,3	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4

\*) Vrednosti odredene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [P6]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Slame kukuruzovine

ISPITIVANJE BR: 1- nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,7

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,3

MASA KOKSA (g): 2,7

Datum merenja:			7.05.2012.														
Vreme merenja, h			20:05 - 20:45														
Redni broj merenja			3														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	23	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7,97	12,47	14,88	16,90	18,98	22,15	24,67	25,58	26,25	27,50	29,00	30,47	32,43	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	9,9	9,2	7,6	5,9	4,5	3,7	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0,1	0,8	2,4	4,1	5,5	6,3	6,8	6,9	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0075	0,0189	>0,0642	>0,0642	>0,0643	>0,0643	0,0642	0,0642	0,0642	0,0642	0,0642	0,0642	0,0642	0,0641
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,18	0,42	>2,22	>2,22	>2,21	2,21	2,20	2,20	2,20	2,20	2,19	2,19	2,19
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1250	1,45	18,9	34,0	35,5	39,5	3,0	26,5	22,5	18,9	1,9	17,1	16,3
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,6	19,1	6,8	3,1	2,8	2,2	1,8	1,5	1,3	0,9	0,8	0,6	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	2,0	10,5	11,0	13,5	19,0	23,0	25,5	31,0	36,0	41,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,7														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,1														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,2														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$



merenje br.3 – nastavak

Datum merenja:		7.05.2012.																																												
Vreme merenja, h		20:05 - 20:45																																												
Redni broj merenja		3																																												
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																												
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10																																											
2	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			
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,5	9,3	9,0	8,5	7,6	6,6	5,9	5,2	4,5	4,0	3,8	3,7	3,5	3,4	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,4	3,4	4,1	4,8	5,5	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,0	7,1	7,1	7,2	7,2	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRIOLOG [P6]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Slame kukuruzovine

ISPITIVANJE BR: 1- nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,8

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,2

MASA KOKSA (g): 2,8

Datum merenja:			8.05.2012.														
Vreme merenja, h			9:43 - 10:22														
Redni broj merenja			4														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,32	12,27	15,05	17,17	19,02	21,28	23,45	24,52	25,25	26,15	27,12	28,22	29,77	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,8	8,5	6,5	4,8	4,0	3,7	3,4	3,2	3,0	3,0	3,0	2,9	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,2	1,5	3,5	5,2	6,0	6,3	6,6	6,8	7,0	7,0	7,0	7,1	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0068	0,0193	>0,0641	>0,0641	>0,0641	>0,0640	0,0640	0,0639	0,0639	0,0639	0,0639	0,0638	0,0638	0,0638
		H <sub>2</sub>	%	0,19	0,20	0,36	>2,32	>2,42	>2,41	2,40	2,39	2,39	2,38	2,38	2,38	2,37	2,37
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1050	0,8350	18,2	28,8	36,5	38,5	34,5	25,6	24,2	18,2	16,8	15,4	14,8
		O <sub>2</sub>	%	21,0	21,0	19,6	14,2	5,8	2,9	2,3	1,8	1,5	1,3	0,8	0,8	0,4	0,3
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,5	9,5	10,5	13,0	19,5	24,0	29,5	33,0	37,5	41,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,8														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,9														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,3														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.4 – nastavak

Datum merenja:		8.05.2012.																																											
Vreme merenja, h		9:43 - 10:22																																											
Redni broj merenja		4																																											
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,8	9,6	9,1	8,5	7,6	6,5	5,7	4,8	4,3	4,0	3,9	3,8	3,6	3,2	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,9	1,5	2,4	3,5	4,3	5,2	5,7	6,0	6,1	6,2	6,4	6,8	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [P6]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Slame od kukuruzovine

ISPITIVANJE BR: 1- nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,7

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,3

MASA KOKSA (g): 2,7

Datum merenja:			8.05.2012														
Vreme merenja, h			19:12 - 19:51														
Redni broj merenja			5														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	24	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,25	12,17	14,97	17,00	18,92	21,27	23,33	24,48	25,2	25,98	27,13	28,25	30,03	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	9,9	9,7	8,4	6,4	4,9	4,0	3,6	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0,1	0,3	1,6	3,6	5,1	6,0	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,1	7,2	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0120	0,0240	>0,0644	>0,0644	>0,0644	>0,0643	0,0643	0,0642	0,0642	0,0642	0,0642	0,0641	0,0641	0,0641
		H <sub>2</sub>	%	0,17	0,22	0,42	>2,36	>2,44	>2,43	2,42	2,41	2,41	2,40	2,40	2,40	2,39	2,39
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1150	0,9400	19,6	29,8	35,5	38,0	36,5	26,0	23,4	18,6	17,2	16,4	14,6
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,8	15,1	4,3	2,6	2,1	2,1	1,9	1,6	1,4	1,0	0,9	0,7	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	2,0	10,0	10,5	12,5	18,5	22,5	26,0	30,5	34,5	39,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,7														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,1														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,2														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_0 - m$

merenje br.5 – nastavak

Datum merenja:		8.05.2012																																										
Vreme merenja, h		19:12 - 19:51																																										
Redni broj merenja		5																																										
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																										
1	Masa uzorka slame kukuruzovine	g	10																																									
2	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	
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,8	9,7	9,5	9,1	8,4	7,5	6,4	5,6	4,9	4,2	4,1	3,9	3,7	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,9	1,6	2,5	3,6	4,4	5,1	5,8	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,0	7,1	7,2	7,2	7,2	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRIOLOG [P7]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Pšeni na slama

ISPITIVANJE BR: 2

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,3

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,7

MASA KOKSA (g): 2,3

Datum merenja:			9.05.2012.														
Vreme merenja, h			11:14 - 11:53														
Redni broj merenja			1														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,58	12,37	15,18	17,20	19,58	22,65	25,13	26,17	27,03	27,87	28,87	30,03	31,40	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	9,9	9,7	8,8	7,2	5,3	4,2	3,4	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,5	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0,1	0,3	1,2	2,8	4,7	5,8	6,6	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	7,5	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0060	0,0397	0,0633	0,0633	0,0633	0,0633	0,0633	0,0632	0,0632	0,0632	0,0632	0,0632	0,0632	
		H <sub>2</sub>	%	0,17	0,22	0,31	1,32	2,28	2,27	2,27	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,25
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,2350	0,7300	3,80	24,8	34,0	36,9	29,8	24,2	23,4	18,9	17,9	17,2	16,9
		O <sub>2</sub>	%	21,0	21,0	19,8	16,4	5,9	3,1	2,1	1,9	1,7	1,5	1,1	0,9	0,8	0,8
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,0	3,5	10,0	11,0	16,0	22,5	28,5	34,5	39,5	41,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,4														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

merenje br.1 – nastavak

Datum merenja:		9.05.2012.																																											
Vreme merenja, h		11:14 - 11:53																																											
Redni broj merenja		1																																											
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,8	9,7	9,4	9,2	8,8	8,1	7,2	6,5	5,8	5,0	4,8	4,4	4,1	3,9	3,4	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,2	1,9	2,8	3,5	4,2	5,0	5,2	5,6	5,9	6,1	6,6	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRIOLOG [P7]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Pšeni na slama

ISPITIVANJE BR: 2 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,3

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,7

MASA KOKSA (g): 2,3

Datum merenja:			10.05.2012.														
Vreme merenja, h			11:52 - 12:31														
Redni broj merenja			2														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	21	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,23	13,27	15,02	16,37	18,45	21,50	24,12	25,25	26,08	27,02	28,15	29,68	31,63	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,0	8,4	7,7	5,8	4,3	3,5	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,5	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	1,0	1,6	2,3	4,2	5,7	6,5	6,9	7,0	7,1	7,2	7,2	7,5	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0062	0,0557	0,0636	0,0636	0,0636	0,0635	0,0635	0,0634	0,0634	0,0634	0,0634	0,0634	0,0633	0,0633
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,22	0,32	1,32	2,32	2,32	2,31	2,30	2,30	2,29	2,29	2,28	2,28	2,28
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1900	0,9500	3,5	10,9	33,5	36,5	32,5	27,2	25,0	18,8	17,9	16,6	16,2
		O <sub>2</sub>	%	21,0	21,0	19,8	17,6	11,8	2,8	2,3	2,0	1,2	1,5	0,9	0,9	0,7	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,0	1,5	7,0	12,0	18,5	25,0	29,0	32,5	38,5	45,0
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,4														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$



merenje br.2 – nastavak

Datum merenja:			10.05.2012.																																										
Vreme merenja, h			11:52 - 12:31																																										
Redni broj merenja			2																																										
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksno ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,6	9,0	8,9	8,4	7,9	7,0	6,0	5,2	4,9	4,7	4,1	4,0	3,6	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,4	1,0	1,1	1,6	2,1	3,0	4,0	4,8	5,1	5,3	5,9	6,0	6,4	6,9	7,0	7,1	7,2	7,2	7,3	7,4	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRIOLOG [P7]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Pšeni na slama

ISPITIVANJE BR: 2 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,4

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,6

MASA KOKSA (g): 2,4

Datum merenja:			10.05.2012.														
Vreme merenja, h			19:46 - 20:25														
Redni broj merenja			3														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	24	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,10	12,93	14,75	16,20	18,33	21,37	23,83	25,62	26,42	27,28	29,65	31,45	32,60	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,1	8,5	7,7	6,0	4,5	3,7	2,9	2,9	2,8	2,7	2,7	2,4	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,9	1,5	2,3	4,0	5,5	6,3	7,1	7,1	7,2	7,3	7,3	7,6	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0060	0,0642	0,0642	0,0642	0,0641	0,0641	0,0640	0,0640	0,0639	0,0639	0,0639	0,0638	0,0638	0,0638
		H <sub>2</sub>	%	0,16	0,22	0,33	1,32	2,31	2,31	2,30	2,29	2,29	2,28	2,28	2,27	2,27	2,27
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,2250	0,9450	3,60	18,2	32,5	35,9	31,2	26,5	24,4	18,2	17,6	16,9	16,2
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,6	19,2	16,8	9,6	3,0	2,4	2,1	1,8	1,6	1,1	0,8	0,6	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,5	2,5	9,5	10,5	16,5	24,5	29,5	34,0	38,0	43,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,4														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,1														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,5														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.3 – nastavak

<b>Datum merenja:</b>		<b>10.05.2012.</b>																																											
<b>Vreme merenja, h</b>		<b>19:46 - 20:25</b>																																											
<b>Redni broj merenja</b>		<b>3</b>																																											
<b>Redni broj</b>	<b>Naziv veli ina</b>	<b>Jedinica</b>																																											
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksno g ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,8	9,6	9,1	8,8	8,3	7,8	7,1	6,2	5,3	5,0	4,6	4,1	3,9	3,7	3,2	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,9	1,2	1,7	2,2	2,9	3,8	4,7	5,0	5,4	5,9	6,1	6,3	6,8	7,1	7,2	7,2	7,3	7,4	7,5	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [P7]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Pšeni na slama

ISPITIVANJE BR: 2 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,2

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,8

MASA KOKSA (g): 2,2

Datum merenja:			11.05.2012.														
Vreme merenja, h			20:32 - 21:12														
Redni broj merenja			4														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	27	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7,97	12,77	14,67	16,18	18,33	21,25	23,17	25,08	26,02	27,20	28,98	30,77	31,87	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,1	8,5	7,7	5,9	4,5	3,8	3,2	2,8	2,7	2,5	2,4	2,3	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,9	1,5	2,3	4,1	5,5	6,2	6,8	7,2	7,3	7,5	7,6	7,7	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0060	0,0633	0,0633	0,0633	0,0633	0,0632	0,0632	0,0631	0,0631	0,0631	0,0631	0,0631	0,0630	0,0630
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,20	0,48	1,36	2,36	2,36	2,35	2,35	2,34	2,34	2,33	2,33	2,32	2,32
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,2750	0,8650	3,6	18,8	32,5	37,8	33,2	26,8	24,0	18,2	17,6	16,2	16,0
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,6	19,6	17,2	6,4	2,6	2,2	2,1	1,6	1,4	1,2	0,9	0,7	0,7
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,5	2,5	9,0	10,5	16,5	23,5	28,0	31,5	39,0	43,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,2														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,4														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,4														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.4 – nastavak

Datum merenja:		11.05.2012.																																											
Vreme merenja, h		20:32 - 21:12																																											
Redni broj merenja		4																																											
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,8	9,5	9,0	8,6	8,4	7,8	7,0	6,1	5,2	5,0	4,6	4,2	3,8	3,6	3,2	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,5	1,0	1,4	1,6	2,2	3,0	3,9	4,8	5,0	5,4	5,8	6,2	6,4	6,8	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,7	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRIOLOG [P7]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Pšeni na slama

ISPITIVANJE BR: 2 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,3

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,7

MASA KOKSA (g): 2,3

Datum merenja:			12.05.2012														
Vreme merenja, h			19:28 - 20:07														
Redni broj merenja			5														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	27	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,42	12,20	15,00	16,85	19,50	22,52	24,97	25,95	27,17	28,03	29,08	30,18	31,47	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,6	7,9	6,9	4,7	3,8	3,4	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,4	2,1	3,1	5,3	6,2	6,6	7,0	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0064	0,0644	0,0644	0,0644	0,0644	0,0643	0,0643	0,0643	0,0643	0,0642	0,0642	0,0642	0,0641	0,0641
		H <sub>2</sub>	%	0,16	0,26	0,43	1,38	2,38	2,38	2,37	2,37	2,36	2,36	2,36	2,35	2,35	2,35
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,2250	0,9650	3,5	16,8	32,0	37,6	32,8	27,6	25,2	18,6	17,2	16,8	16,0
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,8	19,2	17,4	8,4	3,2	2,4	2,2	1,4	1,3	1,3	1,0	0,7	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	2,0	2,5	10,0	10,5	17,5	24,0	27,5	30,5	37,5	42,0
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,4														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.5 – nastavak

Datum merenja:		12.05.2012																																											
Vreme merenja, h		19:28 - 20:07																																											
Redni broj merenja		5																																											
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka pšeni ne slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksno ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,3	8,6	7,9	7,5	6,8	5,8	4,9	4,5	4,2	3,9	3,7	3,5	3,4	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,7	1,4	2,1	2,5	3,2	4,2	5,1	5,5	5,8	6,1	6,3	6,5	6,6	7,0	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRIOLOG [P8]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Sojina slama

ISPITIVANJE BR: 3

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,1

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,9

MASA KOKSA (g): 2,1

Datum merenja:			4.06.2012.														
Vreme merenja, h			9:15 - 9:56														
Redni broj merenja			1														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka sojine slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	24	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,58	12,65	15,80	18,08	20,65	20,45	25,75	26,82	27,58	28,43	29,52	30,65	32,45	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,4	8,4	6,5	4,5	3,2	2,9	2,8	2,7	2,5	2,1	2,1	2,1	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,6	1,6	3,5	5,5	6,8	7,1	7,2	7,3	7,5	7,9	7,9	7,9	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0061	0,0182	>0,0628	>0,00629	>0,00629	>0,00629	0,0629	0,00628	0,00628	0,00628	0,0628	0,00628	0,00628	0,00628
		H <sub>2</sub>	%	0,17	0,19	0,28	>1,72	>2,20	>2,20	2,20	2,19	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18	2,18
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,0900	0,3700	5,2	27,0	34,5	36,0	32,5	26,4	23,2	18,4	17,6	15,4	14,8
		O <sub>2</sub>	%	21,0	21,0	20,4	14,6	2,8	2,4	2,1	1,8	1,4	1,3	1,0	0,7	0,6	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1	8,5	11,5	13,5	19,5	23,0	26,5	29,0	34,5	38,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,1														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,2														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,7														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$



merenje br.1 – nastavak

Datum merenja:		4.06.2012.																																												
Vreme merenja, h		9:15 - 9:56																																												
Redni broj merenja		1																																												
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																												
1	Masa uzorka sojine slame	g	10																																											
2	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			
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,5	9,2	9,0	8,8	8,1	7,3	6,5	5,7	5,0	4,2	3,8	3,4	3,0	3,0	2,8	2,8	2,6	2,4	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
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,9	2,7	3,5	4,3	5,0	5,8	6,2	6,6	7,0	7,0	7,2	7,2	7,4	7,6	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 materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [P8]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Sojina slama

ISPITIVANJE BR: 3 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,2

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,8

MASA KOKSA (g): 2,2

Datum merenja:			4.06.2012.														
Vreme merenja, h			20:13 - 20:53														
Redni broj merenja			2														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka sojine slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	9,05	12,98	16,32	19,03	21,58	24,67	26,92	27,93	28,93	29,85	30,68	31,97	33,57	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,7	8,5	6,5	4,2	3,4	3,0	2,9	2,7	2,7	2,6	2,4	2,2	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,3	1,5	3,5	5,8	6,6	7,0	7,1	7,3	7,3	7,4	7,4	7,8	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0062	0,0171	>0,0540	>0,0649	>0,0648	>0,0648	0,0647	0,0647	0,0646	0,0646	0,0646	0,0646	0,0646	
		H <sub>2</sub>	%	0,20	0,21	0,28	>1,90	>2,56	>2,55	2,54	2,54	2,53	2,53	2,53	2,53	2,52	2,52
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1850	0,9000	7,2	29,0	33,5	35,5	31,0	26,5	24,0	20,0	18,2	15,8	15,0
		O <sub>2</sub>	%	21,0	21,0	19,4	12,8	3,2	2,6	2,1	2,0	1,6	1,4	1,2	0,9	0,7	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,0	10,5	12,5	13,5	16,5	21,5	28,5	30,0	33,5	38,0
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,2														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,0														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,8														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.2 – nastavak

Datum merenja:		4.06.2012.																																											
Vreme merenja, h		20:13 - 20:53																																											
Redni broj merenja		2																																											
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka sojine slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,8	9,7	9,3	9,0	8,7	8,0	7,4	6,5	5,8	4,8	4,0	3,9	3,6	3,3	3,1	3,1	3,0	2,9	2,7	2,7	2,6	2,4	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,7	1,0	1,3	2,0	2,6	3,5	4,2	5,2	6,0	6,1	6,4	6,7	6,9	6,9	7,0	7,1	7,3	7,3	7,4	7,6	7,7	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_0 - m$

**PRILOG [P8]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Sojina slama

ISPITIVANJE BR: 3 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,2

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,8

MASA KOKSA (g): 2,2

Datum merenja:			5.06.2012.														
Vreme merenja, h			9:23 - 10:03														
Redni broj merenja			3														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka sojine slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	24	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,12	12,20	15,12	17,53	19,28	21,58	23,65	24,58	25,43	26,28	27,17	28,27	29,63	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,9	9,1	7,9	5,9	4,0	3,2	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,3	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,1	0,9	2,1	4,1	6,0	6,8	7,0	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0063	0,0193	0,0403	>0,0631	>0,0631	>0,0631	0,0631	0,0631	0,0630	0,0630	0,0630	0,0630	0,0630	
		H <sub>2</sub>	%	0,17	0,18	0,21	0,57	>2,24	>2,23	2,23	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22	
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,0250	0,2950	1,45	14,4	30,5	36,4	32,2	25,8	24,0	23,6	22,8	17,6	15,2
		O <sub>2</sub>	%	21,0	21,0	19,9	18,2	6,5	2,4	1,9	1,6	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,0	6,0	10,0	15,0	22,5	24,0	28,5	35,5	38,5	40,0
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,2														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,0														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,8														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

merenje br.3 – nastavak

Datum merenja:		5.06.2012.																																												
Vreme merenja, h		9:23 - 10:03																																												
Redni broj merenja		3																																												
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																												
1	Masa uzorka sojine slame	g	10																																											
2	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			
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,6	9,3	9,1	8,9	8,1	7,0	6,0	5,1	4,2	3,9	3,5	3,1	3,0	2,8	2,6	2,5	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,4	0,7	0,9	1,1	1,9	3,0	4,0	4,9	5,8	6,1	6,5	6,9	7,0	7,2	7,4	7,5	7,7	7,7	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [P8]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Sojina slama

ISPITIVANJE BR: 3 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,1

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,9

MASA KOKSA (g): 2,1

Datum merenja:			5.06.2012.														
Vreme merenja, h			20:10 - 20:51														
Redni broj merenja			4														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka sojine slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	24	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,83	12,80	15,97	18,70	21,50	24,57	26,65	27,68	28,63	30,52	31,87	33,48	34,37	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,6	8,8	6,5	5,0	3,8	3,2	3,0	2,9	2,5	2,2	2,1	2,1	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,4	1,2	3,5	5,0	6,2	6,8	7,0	7,1	7,5	7,8	7,9	7,9	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0061	0,0177	>0,0585	>0,0633	>0,0634	>0,0634	0,0634	0,0634	0,0634	0,0633	0,0633	0,0633	0,0632	0,0632
		H <sub>2</sub>	%	0,16	0,18	0,28	>1,76	>2,40	>2,40	2,40	2,39	2,39	2,39	2,39	2,38	2,38	2,38
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,0950	0,8840	6,4	28,0	33,0	36,5	31,5	25,9	23,6	19,6	17,8	15,2	14,2
		O <sub>2</sub>	%	21,0	21,0	19,2	14,4	5,5	2,8	2,0	1,9	1,6	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,5	9,5	11,0	14,0	18,5	22,5	27,5	31,0	34,0	37,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,1														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,2														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,7														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.4 – nastavak

Datum merenja:		5.06.2012.																																												
Vreme merenja, h		20:10 - 20:51																																												
Redni broj merenja		4																																												
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																												
1	Masa uzorka sojine slame	g	10																																											
2	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			
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,6	9,5	9,3	8,8	8,0	7,1	6,4	6,0	5,3	4,8	4,4	4,0	3,7	3,3	3,1	3,0	2,8	2,6	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
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	1,2	2,0	2,9	3,6	4,0	4,7	5,2	5,6	6,0	6,3	6,7	6,9	7,0	7,2	7,4	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

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [P8]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Sojina slama

ISPITIVANJE BR: 3 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,1

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,9

MASA KOKSA (g): 2,1

Datum merenja:			6.06.2012															
Vreme merenja, h			9:35 - 10:15															
Redni broj merenja			5															
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																
1	Masa uzorka sojine slame	g	10															
2	Temperatura u reaktoru	°C	19	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650		
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,78	12,50	15,58	18,48	21,25	24,37	26,47	27,50	28,37	30,48	31,75	33,35	34,33		
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10	10	9,6	9,2	7,0	5,3	4,0	3,4	3,1	3,0	2,5	2,3	2,1	2,1		
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,4	0,8	3,0	4,7	6,0	6,6	6,9	7,0	7,5	7,7	7,9	7,9		
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0078	0,0136	>0,0641	>0,0641	>0,0641	>0,0641	0,0641	0,0640	0,0640	0,0640	0,0640	0,0640	0,0639	0,0639	
		H <sub>2</sub>	%	0,20	0,20	0,21	0,67	>2,43	>2,43	2,43	2,42	2,42	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,0900	0,3300	1,42	12,4	29,5	35,5	31,5	26,5	23,2	21,8	18,2	17,8	14,2	14,2
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,5	19,8	18,4	11,2	3,6	2,2	1,7	1,2	1,1	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	1,0	7,5	10,5	13,5	22,5	24,5	27,0	30,5	33,0	36,5	36,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,1															
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,2															
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,7															

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_0 - m$



merenje br.5 – nastavak

<b>Datum merenja:</b>		<b>6.06.2012</b>																																											
<b>Vreme merenja, h</b>		<b>9:35 - 10:15</b>																																											
<b>Redni broj merenja</b>		<b>5</b>																																											
<b>Redni broj</b>	<b>Naziv veli ina</b>	<b>Jedinica</b>																																											
<b>1</b>	<b>Masa uzorka sojine slame</b>	<b>g</b>	<b>10</b>																																										
<b>2</b>	<b>Vreme odvijanja procesa pirolize</b>	<b>min</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>		
<b>3</b>	<b>Promena mase uzorka (koksno g ostatka)</b>	<b>g</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,6	9,5	9,4	9,0	8,5	7,6	6,3	6,0	5,0	4,9	4,5	4,1	3,9	3,6	3,3	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
<b>4</b>	<b>Prinos piroliti kog gasa*</b>	<b>g</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0	1,5	2,4	3,7	4,0	5,0	5,1	5,5	5,9	6,1	6,4	6,7	7,0	7,1	7,3	7,6	7,8	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRIOLOG [P9]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Ovsena slama

ISPITIVANJE BR: 4

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,8

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,2

MASA KOKSA (g): 2,8

Datum merenja:			6.06.2012.														
Vreme merenja, h			20:22 - 21:02														
Redni broj merenja			1														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	24	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	6,48	9,67	12,30	14,47	16,37	18,68	21,17	22,08	22,95	23,90	24,87	25,95	27,58	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,9	9,4	8,8	7,1	5,0	4,0	3,5	3,2	3,0	3,0	2,9	2,9	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,1	0,6	1,2	2,9	5,0	6,0	6,5	6,8	7,0	7,0	7,1	7,1	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0094	0,0260	0,0474	0,0631	0,0632	0,0632	0,0632	0,0631	0,0631	0,0631	0,0631	0,0631	0,0631	
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,18	0,20	0,24	0,88	2,25	2,25	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1300	0,5000	0,8600	2,65	16,4	35,0	30,5	26,8	24,6	21,2	18,6	17,2	14,8
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,6	19,8	17,6	10,5	5,8	2,0	1,7	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	1,0	5,5	10,5	18,5	23,5	28,0	31,5	34,0	37,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,8														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,8														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,4														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.1 – nastavak

Datum merenja:		6.06.2012.																																													
Vreme merenja, h		20:22 - 21:02																																													
Redni broj merenja		1																																													
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																													
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10																																												
2	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				
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,5	9,2	9,0	8,2	7,2	6,4	5,5	4,8	4,4	4,0	3,5	3,2	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	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	2,8	
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0	1,8	2,8	3,6	4,5	5,2	5,6	6,0	6,5	6,8	7,0	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRIOLOG [P9]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Ovsena slama

ISPITIVANJE BR: 4 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,9

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,1

MASA KOKSA (g): 2,9

Datum merenja:			7.06.2012.														
Vreme merenja, h			10:48 - 11:30														
Redni broj merenja			2														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,75	13,32	15,37	17,77	20,82	23,98	26,23	27,25	28,20	29,03	30,05	31,32	33,15	
4	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10,0	10,0	9,3	8,2	6,2	4,7	3,9	3,6	3,4	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,7	1,8	3,8	5,3	6,1	6,4	6,6	6,8	6,9	6,9	7,0	7,0	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0058	0,0395	0,0635	0,0635	0,0635	0,0635	0,0635	0,0634	0,0633	0,0633	0,0633	0,0633	0,0633	
		H <sub>2</sub>	%	0,17	0,21	0,41	2,31	2,30	2,30	2,30	2,29	2,28	2,28	2,28	2,27	2,27	2,26
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,2400	1,06	3,80	8,60	18,4	36,5	29,5	25,2	23,2	26,0	18,2	17,0	14,6
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,5	19,1	16,2	9,5	4,8	2,1	1,8	1,2	0,9	0,8	0,6	0,6	0,5
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	1,5	6,0	11,0	17,5	24,0	27,5	30,0	34,5	38,0
7	Masa koksnoog ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,9														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,6														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,5														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.2 – nastavak

Datum merenja:		7.06.2012.																																									
Vreme merenja, h		10:48 - 11:30																																									
Redni broj merenja		2																																									
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																									
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10																																								
2	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
3	Promena mase uzorka (koksog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,5	9,1	8,7	7,9	7,0	6,0	5,6	5,0	4,6	4,1	4,0	3,9	3,8	3,6	3,5	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,5	0,9	1,3	2,1	3,0	4,0	4,4	5,0	5,4	5,9	6,0	6,1	6,2	6,4	6,5	6,8	6,9	6,9	7,0	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1

\*) Vrednosti odredene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_0 - m$

**PRILOG [P9]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Ovsena slama

ISPITIVANJE BR: 4 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,8

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,2

MASA KOKSA (g): 2,8

Datum merenja:			7.06.2012.															
Vreme merenja, h			19:30 - 20:11															
Redni broj merenja			3															
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10															
2	Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650		
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,08	11,83	13,77	17,08	19,50	20,92	24,18	25,28	27,47	28,52	29,62	30,70	32,13		
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,6	9,2	7,0	5,4	4,5	3,9	3,7	3,4	3,1	3,0	2,9	2,9		
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,4	0,8	3,0	4,6	5,5	6,1	6,3	6,6	6,9	7,0	7,1	7,1		
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0062	0,0322	0,0645	0,0645	0,0645	0,0645	0,0645	0,0644	0,0644	0,0644	0,0644	0,0643	0,0643	0,0643	
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,20	0,68	2,26	2,26	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,24
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1650	0,9520	1,80	4,40	17,2	36,0	30,5	25,8	23,8	20,8	18,0	16,9	14,6	
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,8	19,2	16,8	9,0	4,4	2,2	1,9	1,1	0,9	0,7	0,7	0,5	0,4	
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	2,0	6,5	10,0	18,0	22,5	28,5	29,5	33,5	37,0	
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,8															
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,8															
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,4															

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.3 – nastavak

Datum merenja:		7.06.2012.																																											
Vreme merenja, h		19:30 - 20:11																																											
Redni broj merenja		3																																											
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,6	9,4	9,2	8,8	8,1	7,0	6,3	5,7	5,1	4,5	4,1	3,9	3,9	3,8	3,7	3,5	3,2	3,0	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,9	3,0	3,7	4,3	4,9	5,5	5,9	6,1	6,1	6,2	6,3	6,5	6,8	7,0	7,0	7,1	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [P9]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Ovsena slama

ISPITIVANJE BR: 4 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,9

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,1

MASA KOKSA (g): 2,9

Datum merenja:			8.06.2012.														
Vreme merenja, h			9:16 - 9:58														
Redni broj merenja			4														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7,55	11,47	14,17	16,23	17,83	20,68	23,20	24,23	25,13	26,03	27,13	28,27	29,95	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,9	9,2	8,3	7,0	4,9	4,0	3,7	3,4	3,2	3,1	3,1	3,0	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,1	0,8	1,7	3,0	5,1	6,0	6,3	6,6	6,8	6,9	6,9	7,0	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0057	0,0188	0,0387	0,0627	0,0627	0,0626	0,0626	0,0626	0,0626	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	
		H <sub>2</sub>	%	0,16	0,17	0,39	2,25	2,25	2,25	2,25	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,23
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1260	0,8650	1,60	5,20	18,8	37,0	31,5	25,2	23,4	20,2	18,4	17,2	14,8
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,8	19,3	16,4	10,5	3,8	2,0	1,9	1,2	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	1,5	6,5	11,0	17,0	23,0	27,0	30,5	34,0	37,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,9														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,8														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,3														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$



merenje br.4 – nastavak

<b>Datum merenja:</b>		<b>8.06.2012.</b>																																											
<b>Vreme merenja, h</b>		<b>9:16 - 9:58</b>																																											
<b>Redni broj merenja</b>		<b>4</b>																																											
<b>Redni broj</b>	<b>Naziv veli ina</b>	<b>Jedinica</b>																																											
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksno ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,3	9,0	8,5	7,9	6,9	5,9	5,1	4,9	4,5	4,0	3,8	3,4	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,7	1,0	1,5	2,1	3,1	4,1	4,9	5,1	5,5	6,0	6,2	6,6	6,8	6,9	6,9	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [P9]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Ovsena slama

ISPITIVANJE BR: 4 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,9

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,1

MASA KOKSA (g): 2,9

Datum merenja:			8.06.2012.														
Vreme merenja, h			20:10 - 20:51														
Redni broj merenja			5														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	7,80	11,58	14,42	16,50	18,08	20,95	23,45	24,48	25,52	26,25	27,32	28,37	30,18	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,8	9,3	8,2	6,9	4,9	3,9	3,7	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,2	0,7	1,8	3,1	5,1	6,1	6,3	6,6	6,7	6,9	7,0	7,1	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0062	0,0168	0,0634	0,0634	0,0634	0,0634	0,0634	0,0634	0,0633	0,0633	0,0633	0,0633	0,0633	
		H <sub>2</sub>	%	0,16	0,20	0,72	2,41	2,41	2,41	2,41	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,39
		CO <sub>2</sub>	%	0	0,1850	0,9255	1,68	5,40	18,20	36,5	31,0	24,9	23,0	20,4	18,0	16,8	14,4
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,6	19,4	16,6	9,5	4,0	2,1	1,8	1,1	0,8	0,8	0,6	0,6	0,4
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	1,0	7,0	10,5	17,5	21,5	28,0	30,0	34,5	38,0
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,9														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,7														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	5,4														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.5 – nastavak

Datum merenja:		8.06.2012.																																											
Vreme merenja, h		20:10 - 20:51																																											
Redni broj merenja		5																																											
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka ovsene slame	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksno ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,8	9,7	9,5	9,1	8,8	7,9	6,9	6,0	5,1	4,9	4,6	4,1	3,8	3,6	3,3	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,9	1,2	2,1	3,1	4,0	4,9	5,1	5,4	5,9	6,2	6,4	6,7	6,9	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [P10]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Mešavina navedenih biomasa

ISPITIVANJE BR: 5

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,3

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,7

MASA KOKSA (g): 2,3

Datum merenja:			9.06.2012.														
Vreme merenja, h			9:50 - 10:33														
Redni broj merenja			1														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	28	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,33	12,82	15,52	16,98	18,50	22,53	24,80	25,80	26,70	27,52	28,58	29,87	31,37	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,6	8,6	7,2	5,5	3,8	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,6	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,4	1,4	2,8	4,5	6,2	6,8	6,9	7,0	7,1	7,2	7,2	7,4	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0062	0,0500	>0,0628	>0,0628	>0,0628	>0,0628	0,0628	0,0627	0,0627	0,0627	0,0626	0,0626	0,0626	0,0626
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,22	0,43	1,89	>2,19	>2,18	2,18	2,17	2,17	2,16	2,16	2,16	2,16	2,15
		CO <sub>2</sub>	%	0,1300	0,3450	1,14	5,5	17,0	30,5	38,5	26,5	24,4	21,6	19,8	19,2	17,6	13,0
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,5	19,2	14,0	4,7	2,8	2,0	1,9	1,6	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	2,0	10,0	13,5	18,0	23,5	27,0	28,5	30,5	31,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,4														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,3														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.1 – nastavak

Datum merenja:		9.06.2012.																																										
Vreme merenja, h		9:50 - 10:33																																										
Redni broj merenja		1																																										
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																										
1	Masa uzorka mešavine navedenih bioimasa	g	10																																									
2	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	
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,8	9,5	9,2	8,9	8,2	7,2	6,1	5,0	4,4	4,1	3,9	3,7	3,5	3,2	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,8	2,8	3,9	5,0	5,6	5,9	6,1	6,3	6,5	6,8	7,0	7,1	7,1	7,2	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [10]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Mešavina navedenih biomasa

ISPITIVANJE BR: 5 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,3

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,7

MASA KOKSA (g): 2,3

Datum merenja:			9.06.2012.														
Vreme merenja, h			19:15 - 19:58														
Redni broj merenja			2														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	29	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,25	12,75	15,43	16,75	18,35	22,37	24,63	25,67	26,53	27,35	28,42	29,62	31,25	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,6	8,7	7,8	5,6	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,4	1,3	2,2	4,4	6,3	6,7	6,9	7,1	7,2	7,2	7,3	7,4	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0058	0,0450	>0,0632	>0,0632	>0,0632	>0,0632	0,0632	0,0631	0,0631	0,0631	0,0630	0,0630	0,0630	>0,0630
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,28	0,56	>2,22	>2,22	>2,22	2,22	2,21	2,21	2,21	2,20	2,20	2,20	2,19
		CO <sub>2</sub>	%	0,0950	0,4550	1,6	6,2	17,8	28,5	37,5	27,0	24,2	21,8	19,6	19,0	17,8	12,5
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,6	19,4	14,8	5,0	2,8	2,1	2,0	1,7	1,3	1,0	0,9	0,7	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	1,5	10,5	14,0	18,5	24,0	27,5	29,5	31,0	32,5
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,3														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,4														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,3														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

merenje br.2 – nastavak

Datum merenja:		9.06.2012.																																									
Vreme merenja, h		19:15 - 19:58																																									
Redni broj merenja		2																																									
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																									
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10																																								
2	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
3	Promena mase uzorka (koksno g ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,5	9,2	8,9	8,4	7,5	6,2	5,1	4,5	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,6	2,5	3,8	4,9	5,5	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,1	7,2	7,3	7,3	7,4	7,5	7,5	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [10]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Mešavina navedenih biomasa

ISPITIVANJE BR: 5 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,4

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,6

MASA KOKSA (g): 2,4

Datum merenja:			10.06.2012.														
Vreme merenja, h			8:07 - 8:59														
Redni broj merenja			3														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	27	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,10	12,57	14,88	16,33	17,58	19,00	21,15	22,27	23,17	24,00	24,97	26,10	27,42	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,6	8,9	8,0	7,0	5,5	4,6	3,9	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,4	1,1	2,0	3,0	4,5	5,4	6,1	6,8	7,0	7,1	7,2	7,3	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0058	0,0354	>0,0626	>0,0626	>0,0626	>0,0626	0,0626	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,19	0,33	1,32	>2,15	>2,15	2,15	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,13
		CO <sub>2</sub>	%	0,0850	0,1600	1,2	5,2	15,8	26,8	36,5	29,5	24,0	22,2	19,8	18,8	17,4	12,6
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,6	19,6	15,4	5,6	2,9	2,0	1,8	1,5	1,1	0,8	0,6	0,6	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	1,0	9,5	12,5	19,0	25,5	26,5	27,5	30,5	33,0
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,4														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,2														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,4														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$



merenje br.3 – nastavak

<b>Datum merenja:</b>		<b>10.06.2012.</b>																																											
<b>Vreme merenja, h</b>		<b>8:07 - 8:59</b>																																											
<b>Redni broj merenja</b>		<b>3</b>																																											
<b>Redni broj</b>	<b>Naziv veli ina</b>	<b>Jedinica</b>																																											
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,5	9,2	8,9	8,3	7,6	6,6	5,5	4,9	4,7	4,0	3,4	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,7	2,4	3,4	4,5	5,1	5,3	6,0	6,6	7,0	7,1	7,2	7,2	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [10]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Mešavina navedenih biomasa

ISPITIVANJE BR: 5 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,4

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,6

MASA KOKSA (g): 2,4

Datum merenja:			10.06.2012.														
Vreme merenja, h			19:40 - 20:21														
Redni broj merenja			4														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	28	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,02	12,40	14,70	16,18	17,42	18,85	21,00	22,15	23,02	23,87	24,78	25,92	27,33	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,4	8,9	8,2	7,0	5,6	4,4	3,8	3,6	3,2	2,9	2,8	2,6	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,6	1,1	1,8	3,0	4,4	5,6	6,2	6,4	6,8	7,1	7,2	7,4	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0064	0,0550	>0,0642	>0,0642	>0,0642	>0,0642	0,0642	0,0641	0,0641	0,0641	0,0641	0,0640	0,0640	0,0640
		H <sub>2</sub>	%	0,18	0,22	1,68	>2,28	>2,28	>2,28	2,28	2,27	2,27	2,27	2,26	2,26	2,26	2,25
		CO <sub>2</sub>	%	0,0980	0,3650	1,38	5,8	16,8	29,0	37,0	27,5	24,2	21,4	19,6	18,9	17,4	13,4
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,8	19,2	14,6	4,6	2,6	2,1	1,9	1,7	1,4	0,9	0,7	0,6	0,6
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	2,0	10,0	14,5	19,5	25,5	27,5	28,5	31,5	33,0
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,4														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,2														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,4														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.4 – nastavak

Datum merenja:		10.06.2012.																																													
Vreme merenja, h		19:40 - 20:21																																													
Redni broj merenja		4																																													
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																													
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10																																												
2	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				
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,6	9,3	9,1	8,8	8,3	7,5	6,5	5,5	4,8	4,4	3,9	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	1,7	2,5	3,5	4,5	5,2	5,6	6,1	6,4	6,8	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [10]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE**

UZORAK: Mešavina navedenih slama

ISPITIVANJE BR: 5 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638

MASA PUNOG SUDA (g): 648

MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,4

MASA UZORKA (g): 10

MASA VOLATILA (g): 7,6

MASA KOKSA (g): 2,4

Datum merenja:			11.06.2012														
Vreme merenja, h			19:33 - 20:15														
Redni broj merenja			5														
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica															
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10														
2	Temperatura u reaktoru	°C	28	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	8,25	12,67	15,25	16,65	18,00	21,95	24,13	25,05	25,87	26,92	27,87	29,03	30,53	
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,6	9,0	7,8	6,2	4,0	3,6	3,4	3,2	3,0	2,9	2,8	2,6	
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,4	1,0	2,2	3,8	6,0	6,4	6,6	6,8	7,0	7,1	7,2	7,4	
6	Zapreminski udeo piroliti kih gasova u reaktoru	CO	%	0,0068	>0,0642	>0,0642	>0,0642	>0,0642	>0,0642	0,0642	0,0641	0,0641	0,0641	0,0641	0,0640	0,0640	0,0640
		H <sub>2</sub>	%	0,20	0,32	0,68	>2,36	>2,36	>2,36	2,36	2,35	2,35	2,35	2,35	2,34	2,34	2,34
		CO <sub>2</sub>	%	0,0950	0,4650	1,82	6,40	17,2	29,5	36,5	28,0	24,6	21,8	19,2	18,6	17,4	13,7
		O <sub>2</sub>	%	21,0	20,5	19,0	14,2	4,2	2,8	2,2	1,9	1,8	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5
		CH <sub>4</sub>	%	0	0	0	0	0	2,0	9,5	13,5	20,0	24,5	25,0	26,5	29,0	32,0
7	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,4														
8	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,3														
9	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650 °C*	g	6,3														

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

merenje br.5 – nastavak

Datum merenja:		11.06.2012																																											
Vreme merenja, h		19:33 - 20:15																																											
Redni broj merenja		5																																											
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																											
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10																																										
2	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		
3	Promena mase uzorka (koksno ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,5	9,3	9,1	8,3	7,3	6,2	5,1	4,4	4,1	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,7	2,7	3,8	4,9	5,6	5,9	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [11]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE PRI BRZINI ZAGREVANJA OD 30 °C/min**

UZORAK: Mešavina navedenih biomasa  
ISPITIVANJE BR: 6

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638  
MASA PUNOG SUDA (g): 648  
MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,0

MASA UZORKA (g): 10  
MASA VOLATILA (g): 8,0  
MASA KOKSA (g): 2,0

Datum merenja:			18.06.2012													
Vreme merenja, h			11:52 - 12:31													
Redni broj merenja			1													
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica														
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10													
2	Temperatura u reaktoru	°C	22	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	6,35	7,22	8,10	8,45	9,15	10,25	11,26	12,41	13,02	15,07	16,11	17,10	21,10
4	Promena mase uzorka (koksno g ostatka)	g	10,0	10,0	9,7	9,4	8,9	8,2	7,1	4,2	2,8	2,7	2,5	2,4	2,2	2,0
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,3	0,6	1,1	1,8	2,9	5,8	7,2	7,3	7,5	7,6	7,8	8,0
6	Masa koksno g ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,0													
7	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,6													
8	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650°C*	g	6,4													

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_0 - m$

merenje br.1 – nastavak

Datum merenja:		18.06.2012																																													
Vreme merenja, h		11:52 - 12:31																																													
Redni broj merenja		1																																													
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																													
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10																																												
2	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				
3	Promena mase uzorka (koksnoog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	9,7	9,4	8,5	7,9	5,1	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	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	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,6	1,5	2,1	4,9	7,1	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	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	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [11]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE PRI BRZINI ZAGREVANJA OD 30 °C/min**

UZORAK: Mešavina navedenih slama  
ISPITIVANJE BR: 6 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638  
MASA PUNOG SUDA (g): 648  
MASA SUDA SA KOKSOM (g): 640,0

MASA UZORKA (g): 10  
MASA VOLATILA (g): 8,0  
MASA KOKSA (g): 2,0

Datum merenja:			20.06.2012.													
Vreme merenja, h			9:43 - 10:22													
Redni broj merenja			2													
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica														
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10													
2	Temperatura u reaktoru	°C	21	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	6,05	6,40	7,02	7,30	8,41	10,45	10,60	11,40	13,30	15,10	18,03	19,10	21,01
4	Promena mase uzorka (koksnoeg ostatka)	g	10,0	10,0	9,9	9,8	9,7	9,2	6,7	4,4	3,2	2,7	2,5	2,2	2,1	2,0
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0,1	0,2	0,3	0,8	3,3	5,6	6,8	7,3	7,5	7,8	7,9	8,0
6	Masa koksnoeg ostatka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	2,0													
7	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,7													
8	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650°C*	g	6,3													

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_0 - m$



merenje br.2 – nastavak

Datum merenja:		20.06.2012.																																										
Vreme merenja, h		9:43 - 10:22																																										
Redni broj merenja		2																																										
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																										
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10																																									
2	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	
3	Promena mase uzorka (koksno g ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	10	9,8	9,6	8,7	8,1	4,3	3,1	2,8	2,6	2,5	2,4	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	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	1,3	1,9	5,7	6,9	7,2	7,4	7,5	7,6	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	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 materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$

**PRILOG [12]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE PRI BRZINI ZAGREVANJA OD 54 °C/min**

UZORAK: Mešavina navedenih biomasa  
ISPITIVANJE BR: 7

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638  
MASA PUNOG SUDA (g): 648  
MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639,9

MASA UZORKA (g): 10  
MASA VOLATILA (g): 8,1  
MASA KOKSA (g): 1,9

Datum merenja:			21.06.2012													
Vreme merenja, h			09:16 - 09:54													
Redni broj merenja			1													
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica														
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10													
2	Temperatura u reaktoru	°C	22	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	3,51	4,53	5,20	6,10	6,25	6,40	6,52	7,53	8,41	9,22	9,41	9,54	11,58
4	Promena mase uzorka (koksno ostataka)	g	10,0	10,0	10,0	9,9	9,9	9,8	9,1	8,8	7,6	6,3	5,1	3,3	3,1	2,1
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,9	1,2	2,4	3,7	4,9	6,7	6,9	7,9
6	Masa koksno ostataka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,9													
7	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,8													
8	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650°C*	g	6,3													

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

merenje br.1 – nastavak

Datum merenja:		21.06.2012.																																												
Vreme merenja, h		09:16 - 09:54																																												
Redni broj merenja		1																																												
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica																																												
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10																																											
2	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			
3	Promena mase uzorka (koksog ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	9,9	8,5	7,6	6,0	3,0	2,4	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	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	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0,1	1,5	2,4	4,0	7,0	7,6	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	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	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gasa}} = m_o - m$

**PRILOG [12]: PIROLIZA POLJOPRIVREDNE BIOMASE PRI BRZINI ZAGREVANJA OD 54 °C/min**

UZORAK: Mešavina navedenih biomasa  
ISPITIVANJE BR: 7 - nastavak

MASA PRAZNOG SUDA (g): 638  
MASA PUNOG SUDA (g): 648  
MASA SUDA SA KOKSOM (g): 639,8

MASA UZORKA (g): 10  
MASA VOLATILA (g): 8,2  
MASA KOKSA (g): 1,8

Datum merenja:			23.06.2012.													
Vreme merenja, h			16:50 - 17:30													
Redni broj merenja			2													
Redni broj	Naziv veli ina	Jedinica														
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10													
2	Temperatura u reaktoru	°C	23	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
3	Vreme odvijanja procesa pirolize	min	0	3,42	4,33	5,31	5,53	6,41	6,45	6,58	7,46	8,21	9,22	9,46	10,43	11,60
4	Promena mase uzorka (koksno ostataka)	g	10,0	10,0	10,0	9,9	9,9	9,8	9,3	9,0	8,1	7,2	4,7	2,7	2,5	2,2
5	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,7	1,0	1,9	2,8	5,3	7,3	7,5	7,8
6	Masa koksno ostataka na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,8													
7	Masa te ne faze na kraju procesa pirolize pri 650 °C	g	1,8													
8	Masa piroliti kog gasa na kraju procesa pirolize pri 650°C*	g	6,4													

\*) Vrednosti odre ene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_0 - m$

merenje br.2 – nastavak

<b>Datum merenja:</b>		<b>23.06.2012.</b>																																												
<b>Vreme merenja, h</b>		<b>16:50 - 17:30</b>																																												
<b>Redni broj merenja</b>		<b>2</b>																																												
<b>Redni broj</b>	<b>Naziv veli ina</b>	<b>Jedinica</b>																																												
1	Masa uzorka mešavine navedenih biomasa	g	10																																											
2	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			
3	Promena mase uzorka (koksno g ostatka)	g	10	10	10	10	10	10	9,9	8,9	8,0	7,1	2,8	2,4	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	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	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	
4	Prinos piroliti kog gasa*	g	0	0	0	0	0	0	0,1	1,1	2,0	2,9	7,2	7,6	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	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	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2

\*) Vrednosti određene iz materijalnog bilansa,  $m_{\text{gas}} = m_o - m$