



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Zoran Čepić

**Matematičko modelovanje
sagorevanja pšenične slame u
nepokretnom sloju sa aspekta uticaja
promene parametara procesa**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2017.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	М.Сц. Зоран Чепић
Ментор, МН:	Др Бранка Накмчић-Смарагдакис, ванредни професор
Наслов рада, НР:	Математичко моделовање сагоревања пшеничне сламе у непокретном слоју са аспекта утицаја промене параметара процеса
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски/ Енглески
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна Покрајина Војводина
Година, ГО:	2017
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	6 / 196 / 253 / 15 / 68 / - / 2
Научна област, НО:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Научна дисциплина, НД:	Инжењерство заштите животне средине
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Математичко моделовање, експериментална мерења, пшенична слама, сагоревање, непокретни слој.
УДК	
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, ВН:	-
Извод, ИЗ:	<p>Циљ докторске дисертације је да повеже теоријска знања из области математичког моделовања са експерименталним испитивањем сагоревања пшеничне сламе у непокретном слоју, у циљу формирања математичког модела који ће кроз рачунарске симулације омогућити анализу утицаја радних параметара (густине слоја, количине ваздуха за сагоревање) на одвијање процеса сагоревања, односно одређивање брзине сагоревања, температурског профила у слоју и концентрације појединих гасова у слоју.</p> <p>Такође, кроз експериментална мерења, осим валидације модела, урађена је анализа и описивање појава и феномена који се одвијају при сагоревању пшеничне сламе у непокретном слоју.</p>
Датум прихватања теме, ДП:	26.03.2015.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Дејан Убавин, ванр. проф. Члан: Др Александар Анђелковић, доц. Члан: Др Славко Ђурић, ред. проф. Члан: Др Дамир Шљивац, ред. проф. Члан, ментор: Др Бранка Накмчић-Смарагдакис, ванр. проф.
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Monographic Publication
Contents code, CC :	Textual Printed Material
Author, AU :	Ph.D Dissertation
Mentor, MN :	Zoran Čepić, M.Sc
Title, TI :	Mathematical modeling of wheat straw combustion in a fixed bed from the aspect of the influence of process parameters change
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/ English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomus Provance of Vojvodina
Publication year, PY :	2017
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6 / 196 / 253 / 15 / 68 / - / 2
Scientific field, SF :	Environmental Engineering and Occupational Safety and Health
Scientific discipline, SD :	Environmental Engineering
Subject/Key words, S/KW :	Mathematical modeling, experimental investigation, wheat straw, combustion, fixed bed
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of technical sciences, Novi Sad
Note, N :	-
Abstract, AB :	<p>The goal of doctoral dissertation is to bring together theoretical knowledge in the field of mathematical modelling and experimental investigation of wheat straw combustion in fixed bed, with the aim of developing a mathematical model which will, through computer simulation, enable the analysis of effects of operational parameters (bed density, amount of combustion air) on the combustion process, as well as the determination of burning rate, bed temperature profile and concentration of certain gases in the bed.</p> <p>Also, through experimental measurements, in addition to validating the mathematical model, the analysis and description of the phenomena that occur during the combustion of wheat straw in a fixed bed, was performed.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	26.03.2015.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: PhD Dejan Ubavin, assoc. prof.
	Member: PhD Aleksandar Anđelković, assist. prof.
	Member: PhD Slavko Đurić, full prof.
	Member: PhD Damir Šljivac, full prof.
	Member, Mentor: PhD Branka Nakomčić-Smaragdakis, assoc. prof.
	Menthor's sign

Ovaj rad posvećujem svojoj ćerki Sofiji, supruzi Sonji i majci Vukici.

Sadržaj:

Rezime	4
Abstract	6
Spisak korišćenih simbola i skraćenica	8
Spisak slika	15
Spisak tabela.....	18
1. UVOD.....	19
1.1 Predmet, problem i cilj istraživanja.....	21
1.2 Hipoteza, koncepcija i metodologija istraživanja	23
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	25
2.1 Biomasa kao obnovljiv izvor energije	25
2.2 Termohemijski procesi prerade biomase	27
2.3 Priprema poljoprivredne biomase za korišćenje u energetske svrhe	29
2.4 Energetski potencijal poljoprivredne biomase	31
2.5 Pšenična slama kao gorivo	35
2.5.1 Sastav pšenične slame	35
2.5.2 Toplotna moć pšenične slame	44
2.6 Statika sagorevanja biomase	47
2.6.1 Količina vazduha i zapremine produkata sagorevanja	47
2.6.2 Entalpija i teorijska temperatura produkata sagorevanja	54
2.7 Emisija gasova pri sagorevanju biomase.....	56
2.7.1 Emisija ugljen-dioksida	56
2.7.2 Emisija sumpor-dioksida	57
2.7.3 Emisija praškastih materija	58
2.7.4 Emisija azotnih oksida	59
2.7.5 Emisija ostalih gasova	61
2.8 Pregled tipova ložišta za sagorevanje biomase	62
2.8.1 Ložišta za sagorevanje na rešetki.....	63
2.8.2 Ložišta sa loženjem odozdo.....	68

2.8.3 Ložišta sa fluidizovanim slojem.....	68
2.8.4 Ložišta za sagorevanje u letu	70
2.8.5 Retrospektivno poređenje tipova ložišta za sagorevanje biomase.....	72
2.9 Pregled literature matematičkog modelovanja i eksperimentalnog istraživanja sagorevanja biomase	74
3. MATEMATIČKI MODEL PROCESA SAGOREVANJA PŠENIČNE SLAME U NEPOKRETNOM SLOJU.....	84
3.1 Matematički opis procesa sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju	86
3.1.1 Kinetika sušenja.....	88
3.1.2 Devolatilizacija slame.....	92
3.1.3 Sagorevanje volatila.....	94
3.1.4 Sagorevanje koksnog ostatka	97
3.2 Bilansne jednačine - konzervacija mase i energije.....	99
3.2.1 Konzervacija mase za gasnu fazu	99
3.2.2 Konzervacija mase za čvrstu fazu.....	101
3.2.3 Konzervacija energije za gasnu fazu	101
3.2.4 Konzervacija energije za čvrstu fazu.....	102
3.3 Numerički postupak rešavanja jednačina modela	105
3.3.1 Metoda konačnih zapremina	105
3.3.2 Početni uslovi.....	108
3.3.3 Granični uslovi	108
4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE SAGOREVANJA PŠENIČNE SLAME U NEPOKRETNOM SLOJU.....	109
4.1 Opis laboratorijskog postrojenja.....	110
4.2 Opis opreme korišćene u eksperimentu.....	112
4.3 Opis pripreme uzorka i postupka izvođenja eksperimenta	118
5. RUZULTATI I DISKUSIJA	120
5.1 Brzina sagorevanja	120
5.2 Temperaturni i koncentracioni profil	127
6. ZAKLJUČAK	148

LITERATURA.....	153
PRILOZI	175
Biografija autora sa bibliografijom	191

Rezime

Republika Srbija raspolaže energetske potencijalom od oko 1,56 Mten u biomasi poljoprivrednog porekla. Skoro dve trećine, odnosno oko 1 Mten, nalazi u Vojvodini, kao izrazito poljoprivrednoj regiji. Ova energija bila bi dovoljna da se u Vojvodini podmire gotovo sve potrebe za niskotemperaturnom energijom stacionarnih energetskih sistema. Međutim, i pored toga upotreba poljoprivredne biomase u energetske svrhe je na zanemarljivom nivou u našoj zemlji.

Pšenična slama je, posle kukuruza, najzastupljenija ratarska kultura i čini 20% (0,2 Mten) energetskog potencijala poljoprivredne biomase na području Vojvodine. Pšenična slama kao gorivo ima svojih specifičnosti, ali svakako jedna od najvažnijih karakteristika, njena kalorijska vrednost, se kreće oko 14MJ po kilogramu radnog goriva, što je više nego kod većine domaćih ugljeva. Takođe, jedan od vrlo značajnih efekata korišćenja pšenične slame kao goriva, a i biomase uopšte, je smanjeno zagađenje životne sredine, u odnosu na upotrebu fosilnih goriva.

Kako je proces sagorevanja pšenične slame složen termo-hemijski proces, od ključne važnosti je dobro razumevanje različitih mehanizama i subprocesa koji se odvijaju tokom procesa sagorevanja. Cilj doktorske disertacije je upravo da poveže teorijska znanja iz oblasti matematičkog modelovanja sa eksperimentalnim ispitivanjem sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju, a u cilju formiranja matematičkog modela koji će kroz računarske simulacije omogućiti analizu uticaja radnih parametara (gustine sloja, količine vazduha za sagorevanje) na odvijanje procesa sagorevanja, odnosno određivanje brzine sagorevanja, temperaturnog profila u sloju i koncentracije pojedinih gasova u sloju.

Za potrebe analize i opisivanja pojava koje se odvijaju pri sagorevanju pšenične slame u nepokretnom sloju, ali i za potrebe validacije formiranog matematičkog modela, realizovana su merenja kombinacijom četiri gustine sloja (40, 50, 60 i 70 kg/m³) i četiri protoka vazduha (565, 1112, 1306 i 1853 kg/m²h). Pored ovih, realizovana su još tri merenja za gustinu sloja 60 kg/m³ i protok vazduha 1152, 1332 i 1872 kg/m²h, pri kojima je vršeno i merenje sastava produkata sagorevanja.

I prema eksperimentalnim i prema rezultatima računarskih simulacija, zaključeno je da je za sve četiri gustine sloja brzina sagorevanja najveća pri protoku vazduha od 1306 kg/m²h, kome odgovara koeficijent viška vazduha oko 1,5. Ako se posmatra brzina sagorevanja u funkciji gustine sloja, primetan je opadajući trend

brzine sagorevanja sa povećanjem gustine sloja. Međutim i pored toga, ne daje se prednost balama sa malom gustinom iz energetskih i ekonomskih razloga.

Sa druge strane, temperaturni profil u sloju pokazuje da u režimima sa najvećom gustinom sloja (70 kg/m^3), pri porastu protoka vazduha iznad pomenute vrednosti ($1306 \text{ kg/m}^2\text{h}$) temperatura i dalje raste, što indikuje da se sagorevanje odvijalo u uslovima bogate smeše, odnosno da je distribucija primarnog vazduha kroz sloj bila nedovoljno efikasna, pa bi kao rešenje svakako trebalo razmotriti mogućnost uvođenja i sekundarnog vazduha.

Kada je reč o koncentracionim profilima O_2 , CO i CO_2 , treba imati u vidu da računarska simulacija matematičkog modela daje koncentracioni profili u sloju, a da su eksperimentalna merenja vršena u dimnjaku postrojenja. Svejedno, pokazalo se da formirani model može služiti kao dobar alat za nalaženje veze između koncentracija u sloju i na izlazu iz postrojenja, pa je i na ovaj način potvrđeno da bi režim sagorevanja sa koeficijentom viška vazduha od 1,5 bio najbolji izbor u okolnostima malog ložišnog prostora i bez mogućnosti dovođenja sekundarnog vazduha.

Ključne reči: Matematičko modelovanje, Eksperimentalna merenja, Pšenična slama, Sagorevanje, Nepokretni sloj.

Abstract

Biomass potential of Serbia, generated in agricultural activities, amounts to 1,56 Mtoe. Almost two thirds, i.e. 1 Mtoe, are generated in Vojvodina, which is a predominantly agricultural region. This energy would be sufficient to meet almost all low-temperature energy requirements of stationary energy systems. However, in spite of the above mentioned, utilisation of biomass for energy purposes is insignificant in our country.

Wheat straw is the second most common agricultural crop in Vojvodina, after corn, and its potential amounts to 20% (0,2 Mtoe) of total energy potential from agricultural biomass in this region. Wheat straw as fuel has its unique properties; however, its calorific value, as one of the most important properties, averages around 14 MJ per kg of fuel, which is higher than for most locally sourced coals. Moreover, one of particularly important benefits of wheat straw utilisation as a fuel, and of biomass in general, is reduced environmental impact, in comparison to fossil fuel utilisation.

Solid understanding of different mechanisms and sub-processes taking place during combustion process is of crucial importance, since combustion of wheat straw is a complex thermo-chemical process. The goal of doctoral dissertation is to bring together theoretical knowledge in the field of mathematical modelling and experimental investigation of wheat straw combustion in fixed bed, with the aim of developing a mathematical model which will, through computer simulation, enable the analysis of effects of operational parameters (bed density, amount of combustion air) on the combustion process, as well as the determination of burning rate, bed temperature profile and concentration of certain gases in the bed.

Experimental investigations were conducted by combining four different bed densities (40, 50, 60 and 70 kg/m³) and four airflows (565, 1112, 1306 and 1853 kg/m²h), in order to analyse and describe the phenomena present during wheat straw combustion in fixed bed, as well as to validate generated mathematical model. In addition to this, another three experiments were performed, for bed density of 60 kg/m³ and airflows of 1152, 1332 and 1872 kg/m²h, during which composition of flue gas is measured as well.

According to both experimental and computer simulation results, it was concluded that for all four bed densities, burning rate is the highest with airflow of 1306 kg/m²h, which corresponds to excess air ratio of 1,5. If burning rate is observed

as function of bed density, it becomes evident that burning rate decreases with increasing bed density. Nonetheless, low-density bales are not preferred due to economic and energy related reasons.

On the other side, bed temperature profile suggests that in regimes with the highest bed density (70 kg/m^3), and with the increase of airflow above the mentioned value ($1306 \text{ kg/m}^2\text{h}$) temperature continues to rise. This indicates that the combustion was taking place in the conditions of rich mixture, i.e. that the primary air distribution in the bed was not sufficiently efficient; therefore, introduction of secondary air should be considered.

It should be noted, concerning O_2 , CO and CO_2 concentration profiles, that computer simulation calculated concentration profiles in bed, whereas experimental measurements were conducted in the flue gas stack. Nevertheless, it has been shown that generated model can serve as a good tool for finding a relation between concentrations in fixed bed and at the experimental rig exit (flue gas stack). Thus, it has been confirmed that the combustion regime with the excess air ratio of 1,5 would be the best choice in the case of small combustion chambers without the possibility for secondary air supply.

Keywords: Mathematical modeling, Experimental investigation, Wheat straw, Combustion, Fixed bed.

Spisak korišćenih simbola i skraćenica

A - površina stranice kontrolne zapremine [m^2],

c - toplotni kapacitet kalorimetarskog sistema [$J/^\circ C$],

C_i - koncentracije reaktanata i -te hemijske reakcije [mol/m^3],

C_{pf} - specifična toplota gasne faze [$J/molK$],

C_{ps} - specifična toplota čvrste faze [$J/molK$],

$C_{w,s}$, $C_{w,f}$ - koncentracija vlage na površini materijala i u okolnom gasu [kg/m^3],

C_{O_2} - koncentracija kiseonika u gasu [mol/m^3],

$C_{CH_{1,84}O_{0,96}}$ - koncentracija tara u gasu [mol/m^3],

$C_{p_{vps}}$ - specifična toplota vlažnih produkata sagorevanja pri konstantnom pritisku

$$\left[\frac{kJ}{kg^\circ C} \right],$$

$C_{v_{vps}}$ - specifična toplota vlažnih produkata sagorevanja pri konstantnoj zapremini

$$\left[\frac{kJ}{m^3^\circ C} \right],$$

C_{p_g} - specifični toplotni kapacitet goriva $\left[\frac{kJ}{kg^\circ C} \right]$,

C_{p_A} - specifični toplotni kapacitet pepela $\left[\frac{kJ}{kg^\circ C} \right]$,

C_{p_L} - specifični toplotni kapacitet vazduha $\left[\frac{kJ}{kg^\circ C} \right]$,

dA - Infinitesimalna površina stranice kontrolne zapremine [m^2],

$D_{a,eff}$ - koefijent efektivne aksijalne disperzije [m^2/s],

D_i - koeficijent molekularne difuzije i -te komponente [m^2/s],

d_p - spoljašnji prečnik slamčice slame [m],

$d_{p,in}$ - unutrašnji prečnik slamčice slame [m],

f - fluks fizičke veličine kroz stranicu kontrolne zapremine,

F - aproksimacija površinskog integrala,

g_i - maseni udeo i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$,

$\text{grad}\phi$ - gradijent varijable,

H_d - donja toplotna moć goriva [kJ/kg],

H_{ds} - donja toplotna moć suvog goriva [kJ/kg],

h_f - entalpija gasne faze [J/kg],

H_g - gornja toplotna moć goriva [kJ/kg],

H_{gs} - gornja toplotna moć suvog goriva [kJ/kg],

h_{ps} - entalpija produkata sagorevanja $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgB}} \right]$,

h_{rs} - konvektivni koeficijent prenosa toplote zračenjem [W/m²K],

h_{rv} - koeficijent efektivnog prenosa toplote zračenjem šupljina [W/m²K],

h_s - entalpija čvrste faze (sloja) [J/kg],

k - koeficijent prolaza toplote [W/m²K],

k_c - kinetička konstanta sagorevanja [1/s·Pa],

k_d - koeficijent prenosa mase [m/s],

k_{eff} - efektivna toplotna provodljivost čvrste faze (sloja) [W/mK],

$k_{\text{eff},0}$ - efektivna toplotna provodljivost nepokretne čvrste faze (sloja) [W/mK],

k_f - toplotna provodljivost gasne faze [W/mK],

k_i - konstanta brzine i-te hemijske reakcije [s⁻¹],

k_{koks} - konstanta brzine sagorevanja koksa [1/s·Pa],

k_s - toplotna provodljivost čiste čvrste materije (zida slame) [W/mK],

k_{tar} - konstanta brzine sagorevanja tara [s⁻¹],

k_{vazd} - toplotna provodljivost vazduha [W/mK],

k_{vol} - konstanta brzine devolatilizacije [s⁻¹],

L_{min_m} - minimalna masena (teorijska) potrošnja vazduha $\left[\frac{\text{kgVazduha}}{\text{kgB}} \right]$,

L_{\min_v} - minimalna zapreminska (teorijska) potrošnja vazduha $\left[\frac{\text{m}^3 \text{Vazduha}}{\text{kgB}} \right]$,

l_s - ekvivalentna debljina čvrste faze [m],

L_{s_m} - stvarna masena potrošnja vazduha $\left[\frac{\text{kgVazduha}}{\text{kgB}} \right]$,

L_{s_v} - stvarna zapreminska potrošnja vazduha $\left[\frac{\text{m}^3 \text{Vazduha}}{\text{kgB}} \right]$,

l_f - ekvivalentna debljina gasne faze [m],

m_{N_2} - masa azota u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}} \right]$,

m_{O_2} - masa kiseonika u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

m_{SO_2} - teorijska masa sumpor-dioksida u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

m_{CO_2} - teorijska masa ugljen-dioksida u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

m_{H_2O} - teorijska masa vodene pare u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right]$,

m_i - masa i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right]$,

m_{koks} - masa preostalog nesagorelog koksa u slami [kg/m^3],

M_{koks} - molarna masa ugljenika [kg/mol],

m_{sps} - masa suvih produkata sagorevanja $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right]$,

m_{vps} - masa vlažnih produkata sagorevanja $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right]$,

m_u - masa uzorka goriva [g],

\dot{m}_{vazd} - maseni protok primarnog vazduha [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$].

m_{vol} - masa volatila preostalih u slami specificirana po jedinici zapremine [kg/m^3],

n - empirijski koeficijent koji zavisi od sabijenosti sloja [-],

N - maseni udeo azota u biomasi $\left[\frac{\text{kgN}}{\text{kgB}} \right]$,

O_{min_m} - minimalna masena (teorijska) potrošnja kiseonika $\left[\frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

O_{min_v} - minimalna zapreminska (teorijska) potrošnja kiseonika $\left[\frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}} \right]$,

p_{b,O_2} - parcijalni pritisak kiseonika u gasu [Pa],

Pr - Prandt-lov broj [-],

Q - toplota oslobođena sagorevanjem konca/žice [J],

Q_f - dobitak toplote usled sagorevanja gasne faze [W/m^3],

Q_{if} - gubitak toplote usled kondukcije kroz zid reaktora [W/m^3],

Q_s - dobitak toplote usled sagorevanja koksa [W/m^3],

$Q_{\text{H}_2\text{O}}$ - gubitak toplote usled isparavanja vlage [W/m^3],

Q_{is} - gubitak toplote usled kondukcije kroz zid reaktora [W/m^3],

R - univerzalna gasna konstanta [$\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$],

$r_{2(1)}$ - spoljašnji (unutrašnji) poluprečnik reaktora [m],

r_c - odnos nastalog CO i CO₂ [-],

Re - Reynolds-ov broj [-],

r_f - brzina konverzije čvrste u gasnu fazu usled isparavanja vlage, devolatilizacije slame i sagorevanja koksa, specificirana po jedinici zapremine [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$],

r_i - brzina i-te hemijske reakcije [$\text{mol}/\text{m}^3\text{s}$],

r_i - brzina stvaranja i-te komponente usled isparavanja vlage, devolatilizacije slame i sagorevanja volatila i koksa, specificirana po jedinici zapremine [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$],

$r_p, r_{p,\text{in}}$ - spoljašnji i unutrašnji prečnik slamčice slame [m],

r_{tar} - brzina sagorevanja tara [$\text{mol}/\text{m}^3\text{s}$],

r_{vol} - brzina devolatilizacije slame specificirana po jedinici zapremine [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$],

$r_{\text{H}_2\text{O}}$ - brzina isparavanja vlage specificirana po jedinici zapremine [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$],

r_{koks} - brzina sagorevanja koksa [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$],

S - površina čestice slame specificirana po jedinici zapremine [m^2/m^3],

S_ϕ - izvorni član varijable,

t - vreme [s],

T_a - temperatura okoline [K],

t_A - temperatura pepela [$^\circ\text{C}$],

T_e - srednja temperatura [K],

T_f - temperatura gasa (gasne faze) [K].

t_g - temperatura goriva [$^\circ\text{C}$],

t_L - temperatura vazduha [$^\circ\text{C}$],

t_{ps} - temperatura produkata sagorevanja [$^\circ\text{C}$],

T_s - Temperatura slame (čvrste faze) [K],

t_{teor} - teorijska temperatura produkata sagorevanja [$^\circ\text{C}$],

v_f - brzina gasa [m/s],

V_i - zapremina i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right]$,

V_{CO_2} - teorijska zapremina ugljen-dioksida u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

$V_{\text{H}_2\text{O}}$ - teorijska zapremina vodene pare u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3\text{H}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right]$,

V_{N_2} - zapremina azota u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3\text{N}_2}{\text{kgB}} \right]$,

V_{O_2} - zapremina kiseonika u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}} \right]$,

V_{SO_2} - teorijska zapremina sumpor-dioksida u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3\text{SO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

V_{sps} - zapremina suvih produkata sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right]$,

V_{vps} - zapremina vlažnih produkata sagorevanja $\left[\frac{m^3}{kgB} \right]$,

x - vertikalna koordinata, merena od rešetke [m],

Y_i - maseni udeo i -te komponente u gasnoj fazi [-].

Grčka slova

α - koeficijent prelaza toplote [W/m^2K],

α_1 , β_1 i γ_i - maseni udeli različitih produkata devolatilizacije [%],

Δl - karakteristična razdaljina između dve čestice [m],

Δt - porast temperature kalorimetarskog sistema [$^{\circ}C$],

Γ_{ϕ} - koeficijent difuzije [m^2/s],

ε_b - poroznost sloja [-],

ζ - emisivnost [-],

Θ - stehiometrijski odnos pri sagorevanju koksa [-],

λ - koeficijent viška vazduha [-],

μ_f - dinamička viskoznost gasa [$Pa \cdot s$],

ρ - gustina [kg/m^3],

ρ_f - gustina gasne faze [kg/m^3],

ρ_{koks} - inicijalna gustina koksa u zidu slame [kg/m^3],

ρ_s - gustina sloja slame [kg/m^3],

ρ_{slame} - gustina zida slame [kg/m^3],

v - vektor brzine [m/s],

φ_i - zapreminski udeo i -te komponente u vlažnim produktima sagorevanja $\left[\frac{m^3}{m^3} \right]$

ϕ - varijabla (fizička veličina koja se bilansira),

Gornji indeksi

g - goriva masa goriva,

o - organska masa goriva,

ps - produkti sagorevanja,

r - radna masa goriva,

s - suva masa goriva.

Donji indeksi

e - istočna strana kontrolne zapremine,

eff - efektivan,

f - gas (gasna faza),

fix - fiksni,

in - unutrašnji,

ne - severnoistočna strana kontrolne zapremine,

s - sloj (čvrsta faza),

se - jugoistočna strana kontrolne zapremine,

vol - volatili,

wt - težinski (maseni).

Skraćenice

CFD - računarska dinamika fluida (eng. computational fluid dynamics),

CFS - cirkulacioni fluidizovani sloj,

exp. - eksperiment,

MFS - mehurasti fluidizovani sloj,

OIE - obnovljivi izvori energije,

PDE - parcijalna diferencijalna jednačina,

PS - pšenična slama,

sim. - simulacija.

Spisak slika

Slika 2.1: Tehnologije za konverziju biomase.....	28
Slika 2.2: Tipovi bala slame.....	30
Slika 2.3: Sastav žitne slame	35
Slika 2.4: Grafički prikaz sastava goriva.....	36
Slika 2.5: Van Krevelenov dijagram	41
Slika 2.6: Emisije ugljen-monoksida u produktima sagorevanja kotlova na biomasu u periodu 1980 - 2000. godina	62
Slika 2.7: Sagorevanje u nepokretnom sloju, sagorevanje u mehurastom i cirkulacionom fluidizovanom sloju i sagorevanje u letu	63
Slika 2.8: Nepokretna rešetka (Gulič et al., 1991).....	64
Slika 2.9: Pokretna kosa i horizontalna rešetka.....	65
Slika 2.10: Putujuća rešetka.....	66
Slika 2.11: Vibrirajuća rešetka.....	67
Slika 2.12: Rotirajuća rešetka.....	67
Slika 2.13: Ložišta sa loženjem odozdo	68
Slika 2.14: Ložište sa mehurastim fluidizovanim slojem.....	69
Slika 2.15: Ložište sa cirkulacionim fluidizovanim slojem.....	70
Slika 2.16: Vrtložno sagorevanje (.....)	71
Slika 2.17 Ciklonsko sagorevanje (.....)	72
Slika 3.1: Šema potpunog i nepotpunog sagorevanja	85
Slika 3.2: Tok krive temperatura-vreme procesa sagorevanja biomase	86
Slika 3.3: Faze procesa sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju	87
Slika 3.4: Kriva sušenja vlažnog materijala sa vremenom.....	91
Slika 3.5: Maseni udeli produkata devolatilizacije slame	94
Slika 3.6: Sagorevanje volatila	95
Slika 3.7: Primer 2D kontrolne zapremine.....	106
Slika 4.1: Šematski i fotografski prikaz eksperimentalnog postrojenja	111
Slika 4.2: Merenje gasova na postrojenju.....	112

Slika 4.3: Data logger Testo 177-T4.....	113
Slika 4.4: Data logger Testo 735-2.....	113
Slika 4.5: Termopar Testo 0602 5693	114
Slika 4.6: Anemometar Testo 425	115
Slika 4.7: Anemometar Testo 416	115
Slika 4.8: Gasni analizator ProtIR 204M.....	116
Slika 4.9: Električni grejač Elektrorad	116
Slika 4.10: Regulacioni transformator Iskra.....	117
Slika 4.11: Vaga Shollex SHYH	117
Slika 4.12: Vaga Gorenje KT05.....	118
Slika 5.1: Brzina sagorevanja pri gustini sloja 40 kg/m ³ (exp.)	122
Slika 5.2: Brzina sagorevanja pri gustini sloja 50 kg/m ³ (exp.)	122
Slika 5.3: Brzina sagorevanja pri gustini sloja 60 kg/m ³ (exp.)	123
Slika 5.4: Brzina sagorevanja pri gustini sloja 70 kg/m ³ (exp.)	123
Slika 5.5: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i koeficijenta viška vazduha od protoka vazduha pri gustini sloja 40 kg/m ³ (exp. i sim.).....	124
Slika 5.6: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i koeficijenta viška vazduha od protoka vazduha pri gustini sloja 50 kg/m ³ (exp. i sim.).....	125
Slika 5.7: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i koeficijenta viška vazduha od protoka vazduha pri gustini sloja 60 kg/m ³ (exp. i sim.).....	125
Slika 5.8: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i koeficijenta viška vazduha od protoka vazduha pri gustini sloja 70 kg/m ³ (exp. i sim.).....	126
Slika 5.9: Temperaturni profil za gustinu sloja 40 kg/m ³ (exp.)	128
Slika 5.10: Temperaturni profil za gustinu sloja 50 kg/m ³ (exp.)	129
Slika 5.11: Temperaturni profil za gustinu sloja 60 kg/m ³ (exp.)	130
Slika 5.12: Temperaturni profil za gustinu sloja 70 kg/m ³ (exp.).....	131
Slika 5.13: Zavisnost srednje maksimalne temperature od protoka vazduha i gustine sloja.....	133
Slika 5.14: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i srednje maksimalne temperature od gustine sloja pri protoku vazduha 565 kg/m ² h (exp. i sim.)	134

Slika 5.15: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i srednje maksimalne temperature od gustine sloja pri protoku vazduha 1112 kg/m ² h (exp. i sim.)	134
Slika 5.16: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i srednje maksimalne temperature od gustine sloja pri protoku vazduha 1306 kg/m ² h (exp. i sim.)	135
Slika 5.17: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i srednje maksimalne temperature od gustine sloja pri protoku vazduha 1853 kg/m ² h (exp. i sim.)	135
Slika 5.18: Temperaturni profil u sloju (exp. i sim.) za režim PSG60/1152.....	137
Slika 5.19: Temperaturni profil u sloju (exp. i sim.) za režim PSG60/1332.....	138
Slika 5.20: Temperaturni profil u sloju (exp. i sim.) za režim PSG60/1872.....	139
Slika 5.21a: Koncentracije CO ₂ , O ₂ i CO izmerene u dimnjaku postrojenja za režim PSG60/1152.....	140
Slika 5.21b: Koncentracija CO ₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1152	141
Slika 5.21c: Koncentracija O ₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1152	141
Slika 5.21d: Koncentracija CO u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1152	142
Slika 5.22a: Koncentracije CO ₂ , O ₂ i CO izmerene u dimnjaku postrojenja za režim PSG60/1332.....	143
Slika 5.22b: Koncentracija CO ₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1332	143
Slika 5.22c: Koncentracija O ₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1332	144
Slika 5.22d: Koncentracija CO u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1332	144
Slika 5.23a: Koncentracije CO ₂ , O ₂ i CO izmerene u dimnjaku postrojenja za režim PSG60/1872.....	145
Slika 5.23b: Koncentracija CO ₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1872	146
Slika 5.23c: Koncentracija O ₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1872	146
Slika 5.23d: Koncentracija CO u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1872	147

Spisak tabela

Tabela 2.1: Količine i energetska potencijal poljoprivredne biomase u R. Srbiji (prosek za 2010-2016. godinu)	32
Tabela 2.2: Količine i energetska potencijal poljoprivredne biomase u Vojvodini (prosek za 2010-2016. godinu)	33
Tabela 2.3: Obrasci za preračunavanje sa jedne uslovne mase na drugu	38
Tabela 2.4: Tehnička i elementarna analiza nekih vrsta poljoprivredne biomase.....	38
Tabela 2.5: Uporedni pregled rezultata tehničke analize pšenične slame po autorima	39
Tabela 2.6: Uporedni pregled rezultata elementarne analize pšenične slame po autorima	39
Tabela 2.7: Topivost pepela pšenične slame	44
Tabela 2.8: Donja toplotna moć suve mase i radnog goriva pšenične slame prema raznim autorima	47
Tabela 2.9: Specifična emisija ugljen-dioksida za različita goriva	57
Tabela 2.10: Pregled tipova ložišta prema obliku i veličini čestica biomase.....	72
Tabela 2.11: Poređenje prednosti i nedostataka tipova ložišta za sagorevanje biomase.....	73
Tabela 4.1: Specifikacija opreme korišćene u eksperimentu.....	112
Tabela 4.2: Tehnička i elementarna analiza pšenične slame	118
Tabela 4.3: Režimi eksperimentalnih ispitivanja.....	119
Tabela 5.1: Parametri sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju	126

1. UVOD

Pouzdanost snabdevanje energijom je jedan od najvažnijih aspekata napretka i održivog razvoja modernih društava. Porast broja stanovnika, povećanje životnog standarda i stalni tehnološki napredak su ključni razlozi sve veće potrebe za energijom. U tom kontekstu uloga energije je direktno vezana za ekonomski, socijalni i ekološki razvoj zemlje.

U dvadesetom veku dominantan izvor energije predstavljala su fosilna goriva. U svetu postoje različite procene njihovih rezervi, ali većina prognoza govori da će pri trenutnoj dinamici potrošnje ona biti iscrpljena u bliskoj budućnosti.

Sa jedne strane, istovremena sve veća potreba za energijom i ograničenost rezervi fosilnih goriva, a sa druge, porast cene fosilnih goriva i povećanje koncentracije CO₂ u atmosferi kao posledica njihovog korišćenja, dovelo je do potrebe za istraživanjem i razvojem u domenu obnovljivih izvora energije (OIE), kao za sada jedinom prepoznatom načinu održivog razvoja.

Iako su u teorijskim razmatranjima zastupljeni dugo vremena, obnovljivi izvori energije su svoje mesto u analizi energetske potencijala i praktičnoj primeni počeli da dobijaju tek u vreme naftnih kriza, sredinom sedamdesetih godina prošlog veka. Međutim, ulaganja u razvoj sistema za korišćenje energije vetra, sunca, biomase, geotermalne i energije malih vodotokova do punog izražaja dolazi tek u današnje vreme.

Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora (ne računajući velike hidroelektrane, koje same obezbeđuju oko 16% ukupne proizvodnje električne energije) jednaka je tek desetini električne energije dobijene korišćenjem fosilnih goriva, odnosno polovini električne energije dobijene iz nuklearnih elektrana (IEA, 2016). Navedeni podaci jasno govore koliko se još mora ulagati u OIE da bi se ovi odnosi promenili.

Početak XXI veka, u razvijenim zemljama u potrošnji primarne energije, fosilna goriva učestvovala su sa 82%, a OIE i nuklearna energija sa po 9%, dok su u zemljama u razvoju, fosilna goriva učestvovala sa 67%, a OIE i nuklearna energija sa po 32% i 1%, respektivno (Prins, 2005).

U 2010. godini, ukupna svetska potrošnja primarne energije bila je 532,2 EJ, u čemu je biomasa participirala sa 9,8% (Statistics, 2012). Najveći deo te biomase, naročito u zemljama u razvoju, korišćen je na tradicionalan način, odnosno kao

gorivo u procesu direktnog sagorevanja, za potrebe kuvanja, grejanja, osvetljenja i u industrijske svrhe. Samo mali deo ove biomase korišćen je na moderan način, odnosno za proizvodnju električne energije ili kao gorivo u transportnom sektoru (Kaygusuz, 2012). Svakako je cilj u budućnosti povećati savremen način korišćenja energije biomase (Faaij, 2006b).

Biomasa je široko rasprostranjen resurs, koji se kroz velik broj procesa za njenu konverziju, može koristiti za dobijanje toplotne i električne energije, tečnih i gasovitih goriva, ili kao izvor hemijskih sirovina. Međutim, usled tada velikih zaliha i niskih cena fosilnih goriva razvoj tehnologija za korišćenje biomase u energetske svrhe nije ispratio proces industrijalizacije. Kako je već navedeno, tek od nedavno, usled sve veće energetske nestabilnosti i zagađenosti atmosfere gasovima sa efektom staklene bašte, dolazi do porasta interesovanja za OIE i razvoja tehnologija za dobijanje energije iz biomase. Upravo bi korišćenje biomase u energetske svrhe moglo značajno doprineti smanjenju emisije CO₂, najznačajnijeg gasa sa efektom staklene bašte (Gao et al., 2012; Li et al., 2004) i istovremeno socio-ekonomskom razvoju ruralnih sredina, u skladu sa principima održivog razvoja (Nakomčić-Smaragdakis et al., 2016).

Srbija spada u zemlje siromašne fosilnim gorivima, pa korišćenje biomase ima značaj ne samo za kratkoročno rešavanje problema deficita energije, već strateški značaj povećanja energetske nezavisnosti zemlje i istovremenog smanjenja emisije ugljen-dioksida. Međutim, uprkos značajnom potencijalu i dugoj tradiciji u korišćenju čvrste biomase kao energenta (najviše u svrhu grejanja), u Srbiji se i dalje pretežno koriste uvozna i skupa fosilna goriva.

Ostaci poljoprivredne biomase mogu predstavljati značajan izvor energije u svim regijama čiji se razvoj bazira na poljoprivrednoj proizvodnji. Najčešći oblik energije koji se dobija iz biomase je toplotna energija koja nastaje njenim sagorevanjem. Kod nas, biomasa se najčešće koristi u sistemima direktnog sagorevanja, kao što su ložišta sa sagorevanjem na rešetki, u letu, u fluidizovanom sloju, potisnom ložištu i sl.

U Srbiji postoje mnogi primeri korišćenja poljoprivredne biomase u energetske svrhe. To su uglavnom mala postrojenja na poljoprivrednim gazdinstvima koja raspolažu velikim količinama poljoprivrednih ostataka. Mnoga od tih postrojenja izgrađena su sedamdesetih i osamdesetih godina prošlog veka, kao posledica energetske krize. Neka od tih postrojenja više nisu u funkciji, a za ona koja jesu, s obzirom na njihovu starost od preko 30 godina, može se reći da rade neefikasno.

1.1 Predmet, problem i cilj istraživanja

Veće učešće obnovljivih izvora energije, samim tim i biomase, u energetske bilansu ima svoj značaj u energetske, socio-ekonomskom i ekološkom smislu. Omogućava povećanje energetske nezavisnosti jedne zemlje od uvoza energenata. Obezbeđuje otvaranje novih radnih mesta i razvoj prateće infrastrukture. Sa aspekta zaštite životne sredine omogućava smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte.

Autonomna Pokrajina Vojvodina kao izrazito poljoprivredna regija raspolaže sa značajnim potencijalima poljoprivredne biomase. Energetski potencijal poljoprivredne biomase Vojvodine je oko 1 Mten, a pšenična slama u tom iznosu participira sa oko 20%. Međutim, primarna prednost biomase nije u njenoj količini, već u njenoj obnovljivosti, što joj daje suštinsku prednost nad neobnovljivim (fosilnim) gorivima, koja kao takva ne mogu biti osnov za planiranje održivog razvoja.

Najčešći oblik energetske korišćenja biomase je njeno sagorevanje u cilju dobijanja toplotne energije. Prilikom sagorevanja biomase neophodno je voditi računa da celokupan proces bude usaglašen sa tri osnovna uslova: zaštita životne sredine, efikasnost procesa i održivi razvoj. Prvi uslov je ispunjen samim izborom goriva, jer se biomasa smatra CO₂ neutralnim gorivom. Drugi uslov podrazumeva vođenje procesa sagorevanja tako da se ostvaruju što je moguće manji gubici. Poslednji uslov podrazumeva da se za proizvodnju energije mogu koristiti samo ostaci primarne proizvodnje, odnosno da proizvodnje hrane ni na koji način nije ugrožena.

Predmet istraživanja u doktoratu je proces sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju. To je složen proces koji se sastoji iz nekoliko subprocessa (sušenje, devolatilizacija, sagorevanje volatila i sagorevanje koksa), čije je detaljno razumevanje neophodno u cilju postizanja optimalnih radnih uslova, visokog stepena efikasnosti i kontrole emisije produkata sagorevanja.

Sušenje, odnosno isparavanje vlage je neizbežno prvi stadijum sagorevanja. Podvrgnuta zagrevanju pšenična slama se, kao i ostala biomasa vegetativnog porekla, suši i potom razlaže uz emisiju smeše gasova i kondenzabilnih ugljovodonika ostavljajući nakon završetka ove reakcije čvrsti ostatak – koks.

Isparavanje vlage je praktično čisto fizički proces, a u procesu sagorevanja učestvuje tako što apsorbuje energiju koja se oslobađa prilikom procesa

sagorevanja, smanjujući srednju temperaturu plamena i time usporavajući reakciju, tako da vlaga u slami predstavlja balastnu isparljivu materiju.

Volatili izdvojeni pri procesu termičke razgradnje pšenične slame mogu se okarakterisati kao posebno gorivo. Kako se kod pšenične slame osnovno termičko razlaganje obavlja pri temperaturama od 250-300°C, tj. na temperaturama koje su niže od temperature paljenja praktično svih prisutnih komponenata, za zagrevanje ove smeše do temperature paljenja potrebna je određena količina toplote. Za ovu svrhu, a takođe i za zagrevanje, sušenje i pirolizu svežeg goriva koristi se toplota oslobođena pri egzotermnim reakcijama sagorevanja. Kada se u ložištu dostignu temperature od 300-350°C dolazi do paljenja i sagorevanja izdvojenih volatila u gasnoj sredini iznad sloja (u homogenoj reakciji), a zatim i koksa u sloju (u heterogenoj reakciji). Da bi se nakon paljenja omogućio stabilan proces sagorevanja izdvojenih volatila u gasnoj sredini iznad sloja, potrebno je ostvariti takvo fluidno polje koje će sa jedne strane ostvariti dovođenje toplote u fazi paljenja, a odvođenje toplote i produkata sagorevanja u ostalim fazama sagorevanja.

Nakon procesa devolatilizacije, u čvrstoj fazi preostaje koks (ugljenik vezan sa nesagorljivim mineralnim materijama). Dok se homogena reakcija sagorevanja volatila odvija u celokupnoj zapremini koju zauzimaju reaktanti, heterogena reakcija sagorevanja koksa vezana za površinu čvrstog sloja. Dok je za sagorevanje volatila potrebno ostvariti povoljno fluidno polje i na taj način mešanje i transport toplote i gasova, za sagorevanje koksa u sloju, kako nije moguće ostvariti homogenu mešavinu reaktanata, potrebno je ostvariti stalni dovod vazduha u sloj da bi se kiseonik difuzijom transportovao ka česticama goriva, a ugljen-dioksid transportovao od sagorelih čestica goriva kroz granični sloj u okolni gasni prostor, sve dok sagorljive materije u gorivu u potpunosti ne sagore.

Problem i ujedno cilj doktorske disertacije jeste formiranje analitičkog matematičkog modela, koji setom međusobno spregnutih jednačina, opisuje odvijanje hemijskih i termičkih procesa pri sagorevanju pšenične slame u nepokretnom sloju, a zatim njegova računarska simulacija primenom programskog jezika Matlab. Kako su ključni parametri za sagorevanje pšenične slame gustina sloja i količina vazduha za sagorevanje, to je cilj doktorata da primenom modela utvrdi uticaj promene navedenih parametara na brzinu sagorevanja, na formiranje temperaturnog profila, kao i na koncentracije pojedinih gasova u sloju. Validacija modela, kao i analiza pojava koje se dešavaju pri sagorevanju pšenične slame u nepokretnom sloju biće realizovani kroz eksperimentalna merenja relevantnih parametara procesa i sastava produkata sagorevanja.

1.2 Hipoteza, koncepcija i metodologija istraživanja

Razvijeni matematički model za računarsku simulaciju sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju omogućava analizu uticaja varijacije parametara procesa (gustine sloja i količine vazduha za sagorevanje) na kvalitet sagorevanja, koji se ogleda u brzini sagorevanja, temperaturi i koncentraciji pojedinih gasova u sloju. Kao takav, razvijeni model moći će da služi kao inženjerski alat za dalje razumevanje pojava koje se javljaju pri sagorevanju slame u nepokretnom sloju, kao i za analizu postojećih i razvoj novih uređaja za sagorevanje poljoprivredne biomase.

Koncepcija izrade disertacije je obuhvatala je: prikupljanje i proučavanje literature sa aktuelnim dostignućima u oblasti sagorevanja u kotlovima loženim slamom i upoznavanje sa matematičkim modelima procesa sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju; matematičko modelovanje (analitičko i numeričko) sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju sa aspekta uticaja promene parametara procesa; rekonstrukciju i dogradnju postojećeg eksperimentalnog postrojenja za sagorevanje slame; izbor uzorka i definisanje radnih parametara merenja; eksperimentalna merenja, obradu, tumačenje i analiza dobijenih rezultata i validaciju modela; kao i publikovanje dobijenih rezultata u časopisima sa SCI liste.

Prvo poglavlje predstavlja uvod u kojem je kandidat ukazano na značaj sigurnog snabdevanja energijom i istovremenog smanjenja zagađenja životne sredine. Dat je kratak prikaz dosadašnjeg odnosa proizvodnje energije iz konvencionalnih i obnovljivih izvora, sa posebnim osvrtom na biomasu i stanje u Srbiji. Takođe, definisani su predmet i cilj istraživanja, sa naglaskom na očekivane rezultate.

U poglavlju dva dat je pregled literature gde je urađena analiza energetskog potencijala biomase u R. Srbiji i AP Vojvodini, sa posebnim osvrtom na pšeničnu slamu kao gorivo, njen sastav i toplotnu moć. Data je statika sagorevanja biomase sa analizom emisije gasova pri njenom sagorevanju, kao i pregled tipova ložišta za njeno sagorevanje. Takođe, je urađen sveobuhvatan pregled literature iz oblasti eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modelovanja sagorevanja slame u nepokretnom sloju.

U poglavlju tri je dat detaljan matematički opis subprocesa (sušenje, devolatilizacija, sagorevanje volatila i sagorevanje koksa) koji se odvijaju pri procesu sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju. Zajedno sa bilansnim jednačinama konzervacije mase i energije i početnim i graničnim uslovima definisanim za konkretan slučaj, ovaj set spregnutih jednačina predstavlja

matematički model sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju, koji kroz rešavanje u programskom jeziku Matlab daje sliku o temperaturnom profilu u sloju, brzini sagorevanja, kao i koncentraciji pojedinih gasova u sloju u funkciji promene gustine sloja i protoka vazduha za sagorevanje, što je i bila hipoteza disertacije.

U četvrtom poglavlju dat je opis izvođenja eksperimentalnih merenja, sa opisom laboratorijskog postrojenja i opreme korišćene u eksperimentu. Eksperimentalna ispitivanja su imala dvojak cilj, validaciju razvijenog matematičkog modela i unapređenje razumevanja složenih pojava koje se odvijaju tokom procesa sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju.

Peto poglavlje su rezultati i diskusija, gde su analizirani i međusobno poređeni rezultati dobijeni računarskom simulacijom matematičkog modela i eksperimentalno dobijeni rezultati. Poređenje je napravljeno po svim parametrima datim u hipotezi disertacije. Osim toga dato je detaljno objašnjenje svih specifičnosti i fenomena koje prate sagorevanje pšenične slame u nepokretnom sloju.

Šesto poglavlje je zaključak rada, gde je sublimirano najvažnije iz celokupne disertacije, sa posebnim akcentom na zaključcima izvedenim u poglavlju rezultati i diskusija. Takođe su date preporuke za dalji razvoj modela i eksperimentalnih ispitivanja koje bi ispratile razvoj modela.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

2.1 Biomasa kao obnovljiv izvor energije

Upotrebom fosilnih goriva u atmosferi dolazi do neprestanog povećanja koncentracije ugljen-dioksida, ugljen-monoksida, sumpor-dioksida, azotnih i drugih oksida koji dovode do pojave globalnog zagrevanja tj. efekta "staklene bašte". Efekat staklene bašte je posledica osobine troatomnih gasova da apsorbuju infracrveno (toplotno) zračenje viših talasnih dužina, a propuštaju infracrveno zračenje niskih talasnih dužina, usled čega se povećava količina apsorbovanog zračenja u Zemljinoj atmosferi, što uzrokuje globalan porast temperature površine Zemlje i nižih slojeva atmosfere. U cilju smanjenja ovog efekta, u Japanskom gradu *Kyoto* potpisan je 1997. godine (a na snagu stupio tek 2005. godine ratifikacijom Rusije), protokol o smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte, pre svega ugljen-dioksida. Zemlje potpisnice Kjoto protokola (Srbija je potpisnik od 2007. godine) su se time obavezale da će svoju industriju bazirati na tehnologijama sa smanjenom emisijom ugljen-dioksida, te u tom smislu, korišćenje obnovljivih izvora energije, kao što su energija vetra, hidro energija, solarna energija i naravno energija biomase, dobija poseban značaj.

Po definiciji biomasa je: *biorazgradivi deo proizvoda, otpada i ostataka biološkog porekla iz poljoprivrede (uključujući i biljne i životinjske materije), šumarstva i drvne industrije, kao i biorazgradivi deo komunalnog i industrijskog otpada (Zakon o energetici R. Srbije, 2012)*. Biomasa se prema (Panwar et al., 2012, Gvozdenac et al., 2010a; Demirbas et al., 2009) može podeliti na:

- drvena biomasa (ostaci iz šumarstva, otpadno drvo),
- drvena uzgojena biomasa (brzorastuće drveće),
- nedrvna uzgojena biomasa (brzorastuće alge i trave),
- ostaci i otpaci iz poljoprivrede,
- životinjski otpad i ostaci,
- gradski i industrijski otpad.

Biomasa, kao jedan od obnovljivih izvora, je izvor energije sa najdužom tradicijom korišćenja (Kanevče et al., 2016), i prema Dhillonu (Dhillon et al., 2013) ima potencijal da postane jedan od najznačajnijih izvora primarne energije u 21. veku. Trenutno je bioenergija izvor primarne energije za skoro 2.7 milijardi ljudi na planeti (Bildirici et al., 2016), dok prema podacima Međunarodne agencije za energetiku ukupna godišnja potrošnja biomase i otpada je porasla sa 617 Mten u 1973. godini na oko 1311 Mten u 2011. godini (Khodaei et al., 2015). Osim toga,

energija biomase participira sa 15% u ukupnoj svetskoj potrošnji primarne energije, odnosno sa oko 38% u potrošnji primarne energije u zemljama u razvoju. Štaviše, potrošnja energije biomase čini više od 90% ukupne potrošnje energije u ruralnim područjima zemalja u razvoju (Bildirici et al., 2013). Međutim, udeo biomase kao energenta je takođe na visokom nivou i u razvijenim zemljama, tako da na primjer u EU doprinos biomase u primarnoj proizvodnji iz obnovljivih izvora energije iznosi 64% (Kanevče et al., 2016; Turanjanin et al., 2010).

Korišćenje biomase kao energenta je kako u EU, tako i na globalnom nivou, u porastu i u sektoru proizvodnje toplotne energije i u sektoru proizvodnje električne energije. U 2013. godini, u EU je 26% električne energije dobijeno iz obnovljivih izvora, a cilj je da to bude najmanje 34% do 2020. godine, odnosno 45% do 2030. godine. Korišćenje biomase u proizvodnji električne energije raslo je prosečnom stopom od 11% godišnje tokom perioda od 2005-2012. godine, da bi u 2013. dostiglo 18.7% finalne potrošnje električne energije dobijene iz OIE. Takođe se prognozira da će električna energija dobijena iz biomase premašiti 839 PJ do 2020. godine (Giuntoli et al., 2016).

Porast interesa za energiju biomase uslovljen je sledećim činjenicama (Vaezi et al., 2012; Bapat et al., 1997; Radmanesh et al., 2006; Faaij, 2006a,b):

- Obnovljiva je u kratkom vremenskom periodu, i na taj način osigurava pouzdano snabdevanje energentom, a samim tim smanjenje zavisnosti od fosilnih goriva,
- U različitim oblicima dostupna je na globalnom nivou,
- CO₂ je neutralna,
- Može poboljšati upravljanje resursima i otpadom,
- Može povećati poljoprivrednu proizvodnju,
- Može unaprediti ruralni razvoj stvaranjem radnih mesta i prihoda.

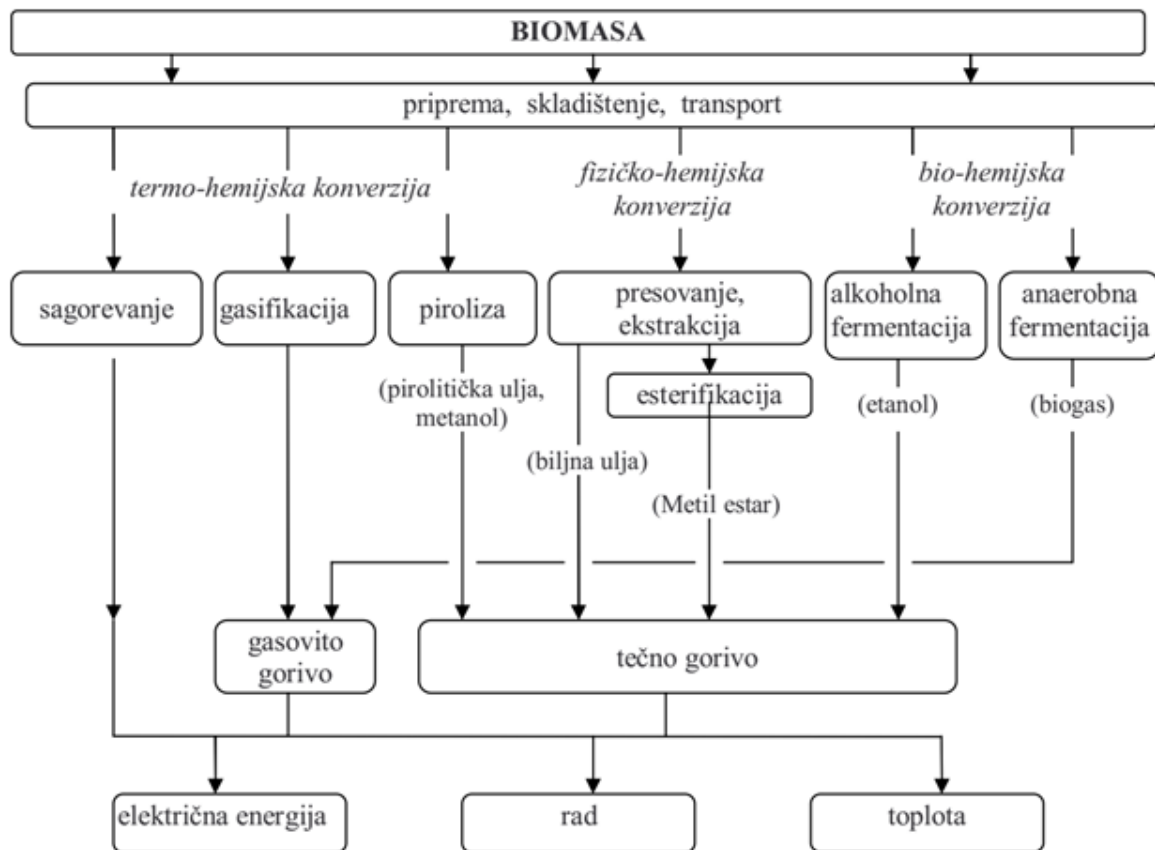
Pod specifičnim fizičkim i hemijskim uslovima sva fosilna goriva nastaju od biomase. Ta konverzija traje stotinama, pa čak i hiljadama godina, međutim, biomasa ima određene nedostatke u odnosu na fosilna goriva. Nedostaci se ogledaju u maloj toplotnoj moći, velikom sadržaju kiseonika i vlage koja snižava adijabatsku (teorijsku) temperaturu sagorevanja, maloj nasipnoj gustini što povećava dimenzije ložišta i poskupljuje transport, manipulaciju i skladištenje. Osim toga, za razliku od fosilnih goriva, biomasa ima visok sadržaj volatila (oko 70 – 80%), mali sadržaj fiksnog ugljenika (15 – 25%), što iziskuje veću potrošnju goriva i produkuje veću količinu pepela (Demirbas, 2005; Blasi, 2008; Kaewluan & Pipatmanomai, 2011; Badger & Fransham, 2006; Miljkovic et al., 2013; Gokcol et al., 2009; Dragutinović et al., 2016).

Kao što je već pomenuto, oko 2,7 milijardi ljudi, tj. oko 40% svetske populacije, se oslanja na tradicionalnu upotrebu čvrste biomase za svakodnevne potrebe kuvanja i grejanja, a oko polovine ove populacije živi u zemljama u razvoju. Takođe, najnovija statistika pokazuje trend rasta korišćenja biomase u energetske svrhe, pa je tako zabeležen porast od 38 miliona novih korisnika u poređenju sa prethodnom godinom (Sakthivadivel et al., 2017). Međutim, najveći deo ove biomase se koristi u veoma neefikasnim štednjacima i pećima, naročito kada je reč o zemljama u razvoju. Uobičajena efikasnost ovih tradicionalnih štednjaka na čvrstu biomasu je u opsegu 5-20% (Bhattacharya et al., 2002). Osim toga, njihovom upotrebom dolazi do prekomerne emisije produkata nepotpunog sagorevanja, kao što su CO, N₂O, PAH-ovi i naročito opasne po zdravlje ljudi u neposrednom okruženju PM_{2,5}, čak i ultra fine PM koje imaju diameter manji od 0,1 mikrona (Bhattacharya et al., 2000; Miah et al., 2009). Prema Hassanu (Hassan et al., 2009) domaćice koje se izlažu ovim polutantima imaju značajno veći potencijal za oboljevanje od respiratornih bolesti i karcinoma pluća. Zato je u cilju povećanja energetske efikasnosti i smanjenja zagađenja životne sredine, imperativ unapređenje procesa sagorevanja, a i ostalih procesa konverzije biomase u druge oblike energije.

U domenu sagorevanja biomase do sada su vršena brojna istraživanja, ali ni približno u obimu kao kada je reč o sagorevanju fosilnih goriva. Problematika sagorevanja fosilnih goriva i biomase su donekle slične, ali imaju izvesnih specifičnosti, koje pre svega proizilaze iz različitih fizičko-hemijskih, pa samim tim i termičkih, karakteristika ovih goriva. Iako postoji mogućnost teorijskog istraživanja procesa sagorevanja biogoriva mnogo je češće primenjivan metod eksperimentalnog istraživanja. Postrojenja za sagorevanje šumske biomase su, u svetu, dovedena do visokog nivoa, dok su postrojenja za korišćenje poljoprivredne biomase još uvek u razvoju, ne samo kod nas nego i šire.

2.2 Termohemijski procesi prerade biomase

Biomasa može biti konvertovana u druge oblike energije primenom različitih procesa za njenu konverziju. Izbor procesa za konverziju zavisi od oblika i svojstava sirove biomase, uslova pri konverziji i naravno željenog oblika finalnog produkta. Postupci za konverziju biomase mogu se podeliti u tri grupe: termo-hemijska konverzija (sagorevanje, gasifikacija i piroliza), bio-hemijska konverzija (anaerobna i alkoholna fermentacija) i fizičko-hemijska konverzija (presovanje i ekstrakcija) (slika 2.1).



Slika 2.1: Tehnologije za konverziju biomase (Živković et al., 2008)

Piroliza je termo-hemijski proces konverzije biomase koji se odvija na temperaturi 300 - 650 °C pri potpunom odsustvu oksidanta (vazduha). Produkti pirolize su: volatili (gasovi i ter) i koks. Piroliza se praktično može posmatrati kao prvi korak pri sagorevanju i gasifikaciji biomase, pri kojima se odvija potpuna, odnosno delimična oksidacija primarnih produkata, respektivno (Bridgwater, 2003). Kako se konstituenti biomase termički razlažu na različitim temperaturama i različitim brzinom, prinosi pojedinih produkata pirolize zavisice od hemijskog sastava biomase i od uslova vođenja procesa pirolize (Demirbas, 2001). Tako, ako je cilj pirolize dobijanje maksimalnog prinosa pirolitičkog ulja (tara), piroliza treba da se odvija na niskim temperaturama, pri velikim brzinama zagrevanja i sa kratkim vremenom boravka pirolizovane biomase u reakcionoj zoni. Za veliki prinos koksa, piroliza treba da se odvija na niskim temperaturama i pri malim brzinama zagrevanja, a za veliki prinos pirolitičkog gasa, piroliza treba da se odvija na visokim temperaturama, pri malim brzinama zagrevanja i sa dugim vremenom boravka pirolizovane biomase u reakcionoj zoni (Demirbas, 2001; Karaosmanoglu et al., 1999).

Gasifikacija se može posmatrati kao nastavak procesa pirolize (Dupont et al., 2007; Mousques et al., 2001; De Jong et al., 2003). Gasifikacija biomase je složeni termo-hemijski proces koji obuhvata brojne hemijske reakcije. Proces gasifikacije

biomase može se podeliti na dve faze: pirolizu i gasifikaciju. Nakon pirolize biomase, koja se odvija u inertnoj atmosferi, odnosno bez prisustva kiseonika koji bi omogućio sagorevanje, nastali produkti dalje reaguju, obrazujući mešavinu vodonika, ugljen monoksida, lakih ugljovodonika, kao što je metan i drugih nesagorljivih gasova, kao što su ugljen dioksid, vodena para i azot, kao i različite nečistoće kao što su čestice, katran, azotna jedinjenja, sumporna jedinjenja i alkalni metali (McKendry, 2002a). Temperatura na kojoj se odvija proces gasifikacije predstavlja jedan od najuticajnijih faktora, koji utiče na količinu i sastav proizvedenog gasa, a samim tim i na njegovu toplotnu moć. Proces gasifikacije odvija se na relativno visokim temperaturama, 700 - 1000 °C (Ilić et al., 2003), a sastav proizvedenog gasa osim što zavisi od uslova odvijanja procesa gasifikacije (temperature, pritiska i oksidacionog agensa, brzine zagrevanja i vremena boravka u uređaju za gasifikaciju), takođe zavisi i od vrste biomase, sadržaja vlage, tipa gasifikatora i mnogih drugih (Basu, 2006).

Sagorevanje predstavlja složen termo-hemijski proces pri kom se hemijska energija sadržana u biomasi kao gorivu, konvertuje u toplotnu energiju, kao i materijalne produkte sagorevanja, dimne gasove i pepeo. Pri sagorevanju, biomasa se, kao i svako drugo čvrsto gorivo, izloženo visokoj temperaturi, prvo zagreva i suši, a potom razlaže (pirolizuje) oslobađajući volatile – smešu gasova i kondenzabilnih ugljovodonika, ostavljajući nakon završetka ove reakcije čvrsti ostatak – koks. Potpunom oksidacijom volatila i koks oslobađa se toplotna energija sadržana u biomasi kao gorivu (McKendry, 2002b). Proces sagorevanja biomase biće detaljnije objašnjen u nastavku rada.

2.3 Priprema poljoprivredne biomase za korišćenje u energetske svrhe

Pod poljoprivrednom biomasom, odnosno žetvenim ostacima, podrazumevaju se samo delovi biljke koji preostaju na njivi nakon žetve, odnosno nakon odvajanja delova biljke zbog kojih je proizvodnja te biljne vrste i realizovana. Po nekim definicijama to su nusproizvodi, ostaci, pa i otpaci, a po nekim samo nedovoljno korišćeni delovi biljaka.

Podzemni deo biljke, odnosno korenov sistem, koji u zavisnosti od biljne vrste, može da ima udeo i do 50% u ukupnoj biljnoj masi i nadzemni deo biljke koji ostaje vezan za koren, se ne ubrajaju u žetvene ostatke, jer su ovi delovi biljke nedostupni za dalje korišćenje. Osim toga, oni se u cilju poboljšanja kvaliteta, strukture i plodnosti zemljišta zaoravaju.

Priprema poljoprivredne biomase za korišćenje u energetske svrhe podrazumeva lanac operacija od mesta njenog prikupljanja, pa do mesta odakle će ona kao gorivo biti spremna za doziranje. Za poljoprivrednu biomasu je karakteristično da je kabasta i nepravilnog oblika, odnosno da ima malu nasipnu gustinu pa zauzima veliku zapreminu prilikom skladištenja. U cilju lakšeg prikupljanja, manipulacije, skladištenja i eksploatacije poljoprivredne biomase najčešće se vrši njeno presovanje baliranjem (Richards et al., 2012; Kaliyan et al., 2009).

Kada je reč o postupcima za pripremu poljoprivredne biomase (slame) mogu se podeliti u nekoliko operacija (Ninić et al., 1994):

- prikupljanje-baliranje,
- utovar i transport,
- istovar i skladištenje i
- priprema za loženje.

Ovaj lanac operacija je manje više isti bez obzira koja tehnologija sagorevanja poljoprivredne biomase će biti korišćena. Međutim, najmanji utrošak energije za pripremu biomase za doziranje, imaju tehnologije sagorevanja kod kojih se u ložište uvodi balirana poljoprivredna biomasa.

Baliranje se može vršiti u bale različitog oblika i gustine, pa se mogu razlikovati: konvencionalne bale (Slika 2.2a), valjkaste bale (Slika 2.2b) i velike četvrtaste bale (Slika 2.2c).



Slika 2.2: Tipovi bala slame

(a - konvencionalne bale; b - valjkaste bale; c - velike četvrtaste bale)

Konvencionalne bale su najstarija forma presovanja slame, a u Srbiji i najzastupljenija, zbog najniže cene prese i veziva za baliranje. Konvencionalne bale imaju poprečni presek od 0,3x0,4 m do 0,4x0,5 m, sa mogućnošću podešavanja dužine od oko 0,6 do najčešće 1,2 m, i gustinu presovanja od 40 do 120 kg/m³. Ukoliko se u postupku spremanja poljoprivredne biomase pojavljuje ručna manipulacija, masa bala ne bi smela da prelazi 11 do 12 kg, jer bi bile preteške za

kontinualan rad. Osim toga, konvencionalne bale su najpogodnije za transport i skladištenje.

Valjkaste bale, zbog svog oblika, imaju nisku skladišnu gustinu i nepovoljne su za transport, ali im je cena prese relativno niska. Međutim, zbog visoke cene baliranja i neophodnosti automatske manipulacije, ove vrste bala kod nas nisu zastupljene u velikoj meri.

Velike četvrtaste bale imaju visok pritisak presovanja, što uslovljava veliku skladišnu gustinu i mali utrošak veziva, ali znatno povećava cenu prese. Pored visoke cene uređaja za baliranje, manipulacija ovim balama, zbog njihove velike težine, mora biti potpuno automatizovana, što ovaj način baliranja čini neatraktivnim u Srbiji.

2.4 Energetski potencijal poljoprivredne biomase

Potrošnja energenata u Republici Srbiji je na nivou od oko 15 Mten, od čega je 7,4 Mten neto potrošnja i 3 Mten potrošnja električne energije. Od ukupne potrošnje 7,9 Mten (52%) je iz uglja, 4 Mten (27%) iz tečnog goriva, 2,1 Mten (14%) iz prirodnog gasa i 1 Mten (7%) je dobijeno iz hidro energije. Vidi se da je od ukupne potrošnje samo 7% iz obnovljivih izvora, koji se odnose na velike hidroelektrane. Sa druge strane procenjeno je da Srbija raspolaže sa 3,2 Mten u obnovljivim izvorima energije, koji se koriste u zanemarljivoj meri. Od ukupnog potencijala OIE procene su da 2,6 Mten čini biomasa, 0,15 Mten male hidroelektrane, 0,18 Mten geotermalna energija, 0,17 Mten energija vetra i 0,1 Mten sunčeva energija. Od procenjene količine biomase 60% (1,56 Mten) se odnosi na biomasu poljoprivrednog porekla, dok se 40% (1,04 Mten) odnosi na šumsku biomasu. Iz navedenih podataka lako se može se zaključiti da je poljoprivredna biomasa glavni potencijal Republike Srbije u domenu obnovljivih izvora energije (Erić, 2010).

I prema podacima prikazanim u studiji (Ilić et al., 2003) koja analizira upravo energetski potencijal i karakteristike ostataka biomase, navodi se da je ukupni godišnji energetski potencijal raspoložive biomase u Srbiji oko 108 000 TJ (cca 2,6 Mten), gde u ovaj potencijal nije uračunata biomasa koja se već koristi ili će se koristiti u druge svrhe. Dakle, realan, iskoristiv, energetski potencijal čini: šumska biomasa sa oko 43 000 TJ godišnje i poljoprivredna biomasa sa oko 65 000 TJ godišnje, od čega je 90% biomasa iz ratarstva i 10% biomasa (orezina) iz voćarske i vinogradske proizvodnje. U ostacima ratarske proizvodnje najveći udeo imaju ostaci kukuruza i slama pšenice.

Značaj energetskeg potencijala raspoložive biomase najbolje je pokazati poređenjem sa godišnjom potrošnjom tečnih goriva u Srbiji, koja iznosi oko 3 miliona tona, odnosno izraženo u energetskim jedinicama oko 120 000 TJ. S obzirom na činjenicu da se veliki deo tečnog goriva koristi u sektoru saobraćaja, proizilazi da bi se preostali deo tečnog goriva, koja se koriste za proizvodnju toplotne energije u industriji i domaćinstvima, moglo u potpunosti substituisati biomasom (Ilić et al., 2003).

Pri proizvodnji ratarskih kultura dobija se ista ili čak do dva puta veća količina biljnih ostataka. Ovi biljni ostaci, koji praktično predstavljaju nusproizvod primarne poljoprivredne proizvodnje, u nekim slučajevima imaju svoje mesto u nastavku procesa proizvodnje, a u nekim slučajevima predstavljaju sirovinski balast. Recimo pri proizvodnji pšenice, nastala pšenična slama, ukoliko se ne bi koristila u vezanoj stočarskoj proizvodnji, predstavljala bi balast koji opterećuje primarnu proizvodnju. Kao najčešće rešenje ovog problema u Srbiji se praktikuje njeno spaljivanje i zaoravanje. Ovo rešenje je neprihvatljivo, jer se uništava fauna na poljoprivrednom zemljištu i time narušava ekosistem, zagađuje životna sredina, a poljoprivrednici i poljoprivredna mehanizacija izlaže velikoj opasnosti.

Da bi se sagledao značaj poljoprivredne biomase kao goriva, potrebno je sagledati postojeću situaciju u poljoprivrednoj proizvodnji Srbije i Vojvodine i proanalizirati potencijal i zastupljenost ratarskih kultura od kojih se očekuje da se koriste kao gorivo. Potencijalne količine poljoprivredne biomase i njen energetski potencijal dati su respektivno u tabelama 2.1 i 2.2 za Republiku Srbiju i AP Vojvodinu. Treba samo napomenuti da u cilju očuvanja kvaliteta i plodnosti zemljišta nije preporučljivo celokupnu količinu biomase proizvedene u ratarstvu ukloniti sa zemljišta, već taj procenat prema brojnim istraživanjima (Alimpić, 1983; Šefčić, 1990; Powlson, 2006; Rosentrater et al., 2009; Gvozdenac et al., 2010b; Nakomčić-Smaragdakis et al., 2015; Nakomčić-Smaragdakis et al., 2016 i dr.) iznosi 25 do 50%.

Tabela 2.1: Količine i energetski potencijal poljoprivredne biomase u R. Srbiji (prosek za 2010-2016. godinu) (Statistički godišnjak R. Srbije, 2010-2016; Brkić et al., 2007)

Poljoprivredna kultura	Ukupan prinos [1000 t]	Odnos masa*	Ukupno biomase [1000 t]	Biomasa za sagorevanje (37,5% od ukupne) [1000 t]	Donja toplotna moć [MJ/kg]	Ekvivalentno EL ulja za loženje** [1000 t]
Pšenica	2497,7	1:1	2497,7	936,7	14,9	332,3
Ječam	324,9	1:1	324,9	121,8	14,2	41,2
Kukuruz	6266,7	1:1	6266,7	2350,0	13,5	755,4

Ovas	81,6	1:1	81,6	30,6	14,5	10,6
Raž	12,4	1:1,2	14,9	5,6	14	1,9
Tritikale	72,2	1:1	72,2	27,1	14,5	9,4
Uljana repica	31,5	1:2	62,9	23,6	17,4	9,8
Suncokret	465,2	1:2	930,5	348,9	14,5	120,5
Soja	460,6	1:2	921,2	345,5	15,7	129,1
Duvan	8,2	1:0,35	2,9	1,1	13,9	0,4
Voće	1089,8	1:0,33	354,2	354,2	14,2	119,7
Vinova loza	164,9	1:0,46	75,3	75,3	14	25,1
Ukupno			11605	4620		1555

*Odnos mase primarnih i sekundarnih proizvoda koji su raspoloživi za korišćenje u neprehranbene svrhe

**Usvojena toplotna moć ekstra lakog ulja za loženje je 42 MJ/kg

Tabela 2.2: Količine i energetski potencijal poljoprivredne biomase u Vojvodini (prosek za 2010-2016. godinu) (Statistički godišnjak R. Srbije, 2010-2016; Brkić et al., 2007)

Poljoprivredna kultura	Ukupan prinos [1000 t]	Odnos masa*	Ukupno biomase [1000 t]	Biomasa za sagorevanje (37,5% od ukupne) [1000 t]	Donja toplotna moć [MJ/kg]	Ekvivalentno EL ulja za loženje** [1000 t]
Pšenica	1464,5	1:1	1464,5	549,2	14,9	194,8
Ječam	159,9	1:1	159,9	60,0	14,2	20,3
Kukuruz	4128,1	1:1	4128,1	1548,0	13,5	497,6
Ovas	10,3	1:1	10,3	3,9	14,5	1,3
Raž	3,3	1:1,2	3,9	1,5	14	0,5
Tritikale	24,3	1:1	24,3	9,1	14,5	3,2
Uljana repica	25,5	1:2	51,0	19,1	17,4	7,9
Suncokret	433,4	1:2	866,8	325,0	14,5	112,2
Soja	428,9	1:2	857,8	321,7	15,7	120,2
Duvan	5,4	1:0,35	1,9	0,7	13,9	0,2
Voće	272,7	1:0,33	90,0	90,0	14,2	30,4
Vinova loza	39,7	1:0,46	18,3	18,3	14	6,1
Ukupno			7677	2946		995

*Odnos mase primarnih i sekundarnih proizvoda koji su raspoloživi za korišćenje u neprehranbene svrhe

**Usvojena toplotna moć ekstra lakog ulja za loženje je 42 MJ/kg

Kao što se iz tabela 2.1 i 2.2 vidi Republika Srbija svake godine raspolaže sa oko 4,6 miliona tona biomase iz ratarstva, od čega bi se mogla dobiti energija ekvivalentna 1,56 Mten. Vojvodina kao izrazito poljoprivredna regija raspolaže sa skoro 3 miliona tona poljoprivredne biomase, odnosno skoro 1 Mten, što čini gotovo dve trećine (64%) ukupnih potencijala. Ova energija je dovoljna da bi se podmirile gotovo sve potrebe za niskotemperaturnom energijom stacionarnih energetskih sistema (grejanje, dorada proizvoda u procesnim postrojenjima, sušenje u malim sušarama i dr.). Osim toga, na ovaj način je korišćenje biljnih ostataka u poljoprivrednoj proizvodnji i ekonomski isplativo, pošto se celokupna biomasa nalazi u blizini korisnika, tako da se najveći problemi koji su vezani za potrebe transporta i skladištenja mogu na zadovoljavajući način rešiti (Miljković, 2012; Čepić et al., 2016a).

Ako bi se izuzeli biljni ostaci poljoprivredne proizvodnje koji nastaju industrijskom preradom, kao što su oklasak od kukuruza, ljuska od suncokreta i sl., za dobijanje toplotne energije sagorevanjem najinteresantnije je korišćenje pšenične slame.

Prednosti korišćenja pšenične slame su:

- posle kukuruza, pšenica je najzastupljenija ratarska kultura,
- pšenica se ubira leti, što je sa aspekta vremenskih prilika najpovoljnije,
- način njenog ubiranja, baliranja, transporta i skladištenja su tehnički dobro rešeni,
- kalorijska vrednost suve pšenične slame je približno jednaka kalorijskoj vrednosti fosilnih goriva i
- njenim sagorevanjem se ne povećava ekološko opterećenje atmosfere, a razvoj čini održivim.

Godišnji raspoloživi energetski potencijal pšenične slame u Srbiji je oko 330 hiljada tona ekvivalentne nafte. Ako se taj podatak uporedi sa ukupnim raspoloživim potencijalom poljoprivredne biomase dolazi se do zaključka da pšenična slama čini petinu ukupnih potencijala biomase u ratarstvu u Srbiji. Kada je reč o Vojvodini pšenična slama koja bi se mogla koristiti u energetske svrhe ima godišnji potencijal od oko 195 hiljada tona ekvivalentne nafte, što takođe čini petinu ukupnog energetskog potencijala kojim Vojvodina raspolaže.

Ali kao što je već napomenuto, primarna prednost biomase ogleda se u njenoj obnovljivosti, što joj daje suštinsku prednost nad neobnovljivim (fosilnim) gorivima, koja kao takva ne mogu biti osnov za planiranje održivog razvoja.

2.5 Pšenična slama kao gorivo

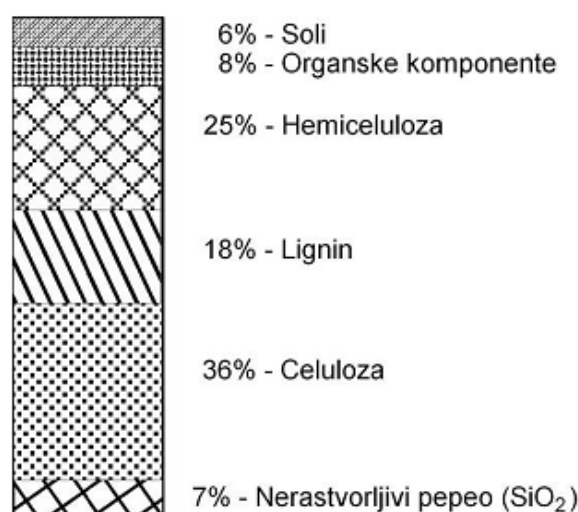
2.5.1 Sastav pšenične slame

I pored činjenice da je biomasa najstarije gorivo koje je čovečanstvo koristilo za dobijanje toplotne energije i dalje se sprovode istraživanja (Dragutinović et al., 2017a; Dragutinović et al., 2017b; Kaltschmitt et al., 2016; Wang et al., 2014; Vassilev et al., 2010; Vassilev et al., 2012; Vassilev et al., 2013; Vassilev et al., 2014) o osobinama biomase i proučava način na koji one utiču na proces sagorevanja.

Biomasa kao gorivo, svakako, ima svojih specifičnosti u pogledu: hemijskog sastava, temperature sagorevanja, temperature sinterovanja pepela, toplotne moći i stepena zagađenja okoline.

Iako hemijski sastav biomase zavisi od njene vrste, klimatskih i zemljišnih uslova, korišćenog đubriva, trenutka ubiranja i drugih faktora, biomasa svedena na gorivu materiju ima praktično isti sastav, definisan formulom $CH_{1,4}O_{0,6}N_{0,1}$ (Overend, 1996; Radovanović et al., 1997). Razlike u osobinama biomase potiču od različite prirode polimera koje ulaze u njen sastav, pre svega celuloze, hemiceluloze, lignina i ekstraktivnih ulja (Gani et al., 2007; Lv et al., 2010; Pereira et al., 2012).

Hemijski sastav pšenične slame je sličan sastavu ostalih vrsta biomase (Pešenjanski, 2000), tako da se za pšeničnu slamu može reći da je ligno-celulozni materijal, čiju građu čine sledeće materije: celuloza 36%, hemiceluloza 25%, lignin 18%, organske komponente 8%, soli 6% i mineralne materije 7% (Slika 2.3) (Janić, 2000).



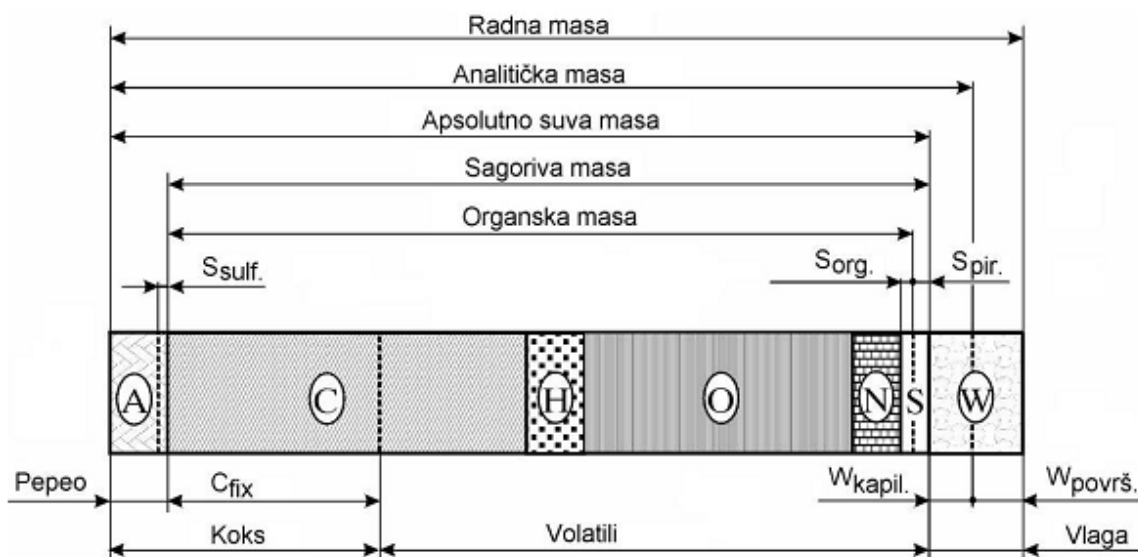
Slika 2.3: Sastav žitne slame (Janić, 2000)

Osnovni podaci o kvalitetu biomase kao goriva dobijaju se tehničkom i elementarnom analizom (Radovanović, 1994). Tehnička analiza određuje karakteristike goriva važne sa aspekta njegove primene, odnosno sagorevanja. Pod tehničkom analizom goriva podrazumeva se određivanje masenih udela vlage, isparljivih materija, fiksnog ugljenika, pepela i gornje i donje toplotne moći (po mogućstvu za: radnu, suhu i sagorivu masu goriva) (Brkić i Živanović, 2006), a prema Nikoliću i Miletiću (1985), još i osobine pepela. Elementarna analiza daje podatke o masenim udelima sledećih elemenata u gorivu: ugljenika (C), vodonika (H), kiseonika (O), azota (N) i sumpora (S) (Đurić et al., 1981).

Sastav pšenične slame takođe u mnogome određuju način i karakteristike njenog sagorevanja. Ono što pšeničnu slamu, kao gorivo, bitno razlikuje od fosilnih goriva su:

- manji udeo ugljenika i vodonika, što uzrokuje nižu toplotnu moć,
- velik udeo kiseonika, što takođe snižava toplotna moć,
- mali udeo azota i sumpora, što je izuzetno povoljno sa ekološkog aspekta,
- relativno mali udeo pepela, koji zbog niske temperature topljenja u značajnoj meri otežava proces sagorevanja,
- relativno velik udeo vlage, što za posledicu ima snižavanje adijabatske temperature sagorevanja i povećanje zapremine produkata sagorevanja (Pešenjanski et al, 1995).

U zavisnosti od elementarnog sastava, uslovno se definišu i različite mase goriva (Gulič et al, 1991; Radovanović, 1994), što je prikazano na slici 2.4.



Slika 2.4: Grafički prikaz sastava goriva (Gulič et al, 1991; Radovanović, 1994)

($S_{sulf.}$ – udeo sulfatnog sumpora, $S_{org.}$ – udeo organskog sumpora, $S_{pir.}$ – udeo piritnog sumpora, $C_{fix.}$ – udeo fiksnog ugljenika, $W_{kapil.}$ – udeo kapilarne vlage (tzv. higroskopna vlaga) i $W_{površ.}$ – udeo površinske vlage (tzv. gruba vlaga))

Gorivo koje sagoreva u kotlovima ili pećima naziva se radno gorivo. Ako se odredi njegova elementarna analiza dobija se (Gulič et al., 1991):

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r + A^r + W^r = 100\% \quad (2.1)$$

gde su:

$C^r, H^r, O^r, N^r, S^r, A^r, W^r$ - maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, azota, sumpora, pepela i vlage, respektivno, u radnoj masi goriva, izraženi u [%].

Ako se radnom gorivu oduzme vlaga, dobija se suva masa goriva. Elementarna analiza suvog goriva definiše hemijski sastav sveden na suhu masu goriva (Gulič et al., 1991):

$$C^s + H^s + O^s + N^s + S^s + A^s = 100\% \quad (2.2)$$

gde su:

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

Ako bi se od suve mase goriva oduzeo i pepeo dobila bi se sagoriva masa goriva. U sagorivoj masi inertni azot i kiseonik predstavljaju balastne materije jer njihovo prisustvo smanjuje stvarno sagorive sastojke goriva. Elementarna analiza sagorive mase goriva određena je izrazom (Gulič et al., 1991):

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g = 100\% \quad (2.3)$$

gde su:

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

Elementarna analiza organske mase goriva data je izrazom (Đorđević et al., 1987):

$$C^o + H^o + O^o + N^o = 100\% \quad (2.4)$$

gde su:

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

Preračunavanje sa jedne uslovne mase na drugu vrši se izrazima datim u tabeli 2.3.

Tabela 2.3: Obrasci za preračunavanje sa jedne uslovne mase na drugu (Gulić et al., 1991)

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

U tabeli 2.4 dati su rezultati tehničke i elementarne analize za različite vrste poljoprivredne biomase. Iz navedenih podataka može se zaključiti da biomasa u odnosu na ugalj ima vrlo visok sadržaj kiseonika, relativno visok sadržaj ugljenika i nešto viši sadržaj vodonika. Sadržaj vlage je relativno nizak i kreće se 7-12%, ali može biti i znatno viši u zavisnosti od atmosferskih uslova i uslova skladištenja.

Tabela 2.4: Tehnička i elementarna analiza nekih vrsta poljoprivredne biomase

Vrsta biomase	Tehnička analiza (radna masa)				Elementarna analiza (goriva masa)					Referenca
	Vol. [%]	C _{fix} [%]	W [%]	A [%]	C [%]	O [%]	H [%]	N [%]	S [%]	
Ječmena slama	67,4	16,4	11,5	4,7	49,4	43,6	6,2	0,7	0,13	Risnes et al., 2003; Moilanen, 2006
Kukuruzna slama	67,6	17,8	7,4	7,1	48,7	44,1	6,4	0,7	0,08	Masia et al., 2007
Ovsena slama	73,9	12,5	8,2	5,4	48,8	44,6	6,0	0,5	0,08	Theis et al., 2006a; Theis et al., 2006b
Slama uljane repice	70,7	16,3	8,7	4,3	48,5	44,5	6,4	0,5	0,10	Masia et al., 2007

Pirinčana slama	59,4	14,4	7,6	18,6	50,1	43,0	5,7	1,0	0,16	Miles et al., 1995; Thy et al., 2000; Thy et al., 2006
Sojina slama	60,7	20,9	11,3	7,1	45,0	47,3	7,0	0,7	0,01	Erić, 2010
Pšenična slama	67,2	16,3	10,1	6,4	49,4	43,6	6,1	0,7	0,17	Demirbas, 2004; Miles et al., 1995; Risnes et al., 2003; Moilanen, 2006; Thy et al., 2006; Notalapati et al., 2007

Sa aspekta kinetike sagorevanja, svakako je najvažniji podatak o masenim udelima volatila i koksnog ostatka. Maseni udeo volatila u pšeničnoj slami kreće se oko 70 - 80% (računato na gorivu masu), što je oko dva puta više nego kod ugljeva. Relativno visoka vlažnost slame i visok sadržaj volatila ima za posledicu dugotrajniji proces sušenja i oslobadjanja volatila, pa se sagorevanje koksnog ostatka odvija kasnije, što nalaže potrebu za većim dimenzijama ložišnog prostora (Nikolić i Miletić, 1985). U tabelama 2.5 i 2.6, respektivno, dati su rezultati tehničke i elementarne analize pšenične slame prema nekim autorima.

Tabela 2.5: Uporedni pregled rezultata tehničke analize pšenične slame po autorima (Pešenjanski, 2002)

Autor	Radna masa					Sagoriva masa	
	Volatili [%]	C _{fix} [%]	Pepeo [%]	Vlaga [%]	Hd [MJ/kg]	Volatili [%]	Hd [MJ/kg]
Hofstetter, 1978	65,0	16,0	5,0	14,0	14,2	80,3	17,9
Strehler, 1978	66,0	16,0	4,0	14,0	15,0	80,0	18,7
Kostić, 1995	67,0	18,0	6,9	8,1*	15,4	78,8	18,3
Viglasky, 1995	63,5	15,4	5,7	15,8	15,4	80,9	19,4

*Analitička vlaga

Tabela 2.6: Uporedni pregled rezultata elementarne analize pšenične slame po autorima (Pešenjanski, 2002)

Autor	Maseni procenti u odnosu na sagorivu masu					
	C [%]	H [%]	S [%]	O [%]	N [%]	C/H [%]
Strehler, 1977	48,53	5,53	0,05	39,08	0,28	8,78
Strehler, 1978	46,4	5,7	0,1	47,3	0,5	8,14
Strehler, 1980	51,92	5,92	0,05	41,81	0,3	8,77
Gulić et al., 1980	46,8	5,7	0,1	46,9	0,5	8,21

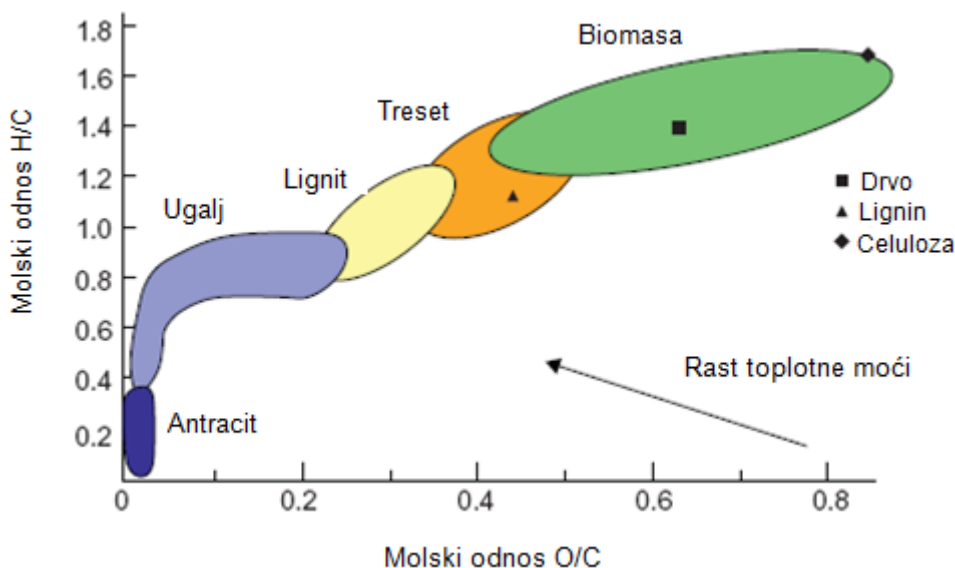
Kostić, 1995	44,6	5,9	-	47,2	2,3	7,56
Viglasky, 1999	49,8	6,5	0,36	42,7	0,7	7,6

Maseni udeo **ugljenika (C)** u pšeničnoj slami kreće se oko 50% (računato na gorivu masu). On se u slami nalazi u slobodnom i u vezanom obliku, gde sa vodonikom, kiseonikom i azotom ulazi u sastav organskih jedinjenja koja čine slamu. Količina ugljenika u gorivu određuje njegov kvalitet, a povećanjem sadržaja ugljenika, raste i kvalitet, jer se osobine goriva približavaju osobini čistog ugljenika. Toplotna moć čistog ugljenika iznosi 33900 kJ/kg, a adijabatska temperatura sagorevanja bez toplotnih gubitaka mu je 2240 °C (Gulič et al., 1991).

Vodonika (H) u pšeničnoj slami ima relativno mnogo, oko 6% (računato na gorivu masu), i nalazi se isključivo u vezanom obliku. Ako se ima u vidu da se potpunim sagorevanjem 1kg vodonika oslobađa 143200 kJ toplote, ako jproduktima sagorevanjae produkt sagorevanja (voda) u tečnoj fazi, odnosno 119600 kJ, ako je produkt sagorevaja u parnoj fazi, dolazi se do zaključka da vodonik zauzima značajno mesto pri energetskej valorizaciji pšenične slame. Temperatura sagorevanja čistog vodonika je približna temperaturi sagorevanja ugljenika i iznosi 2235 °C.

Kiseonik (O) u pšeničnoj slami predstavlja balast. Kiseonik ne gori, već samo potpomaže gorenje, ali što je značajnije "zauzima mesto" drugim gorivim materijama. U poređenju sa ugljevima kiseonika u pšeničnoj slami, i generalno u biomasi, ima mnogo više (oko 44% računato na gorivu masu), što za posledicu ima snižavanje temperature sagorevanja.

Za razliku od kiseonika porast masenih udela ugljenika i vodonika doprinose toplotnoj moći goriva. Različite vrednosti toplotnih moći, različitih vrsta biomase, direktno su povezane sa odnosom molskih odnosa kiseonika i ugljenika (O/C) i vodonika i ugljenika (H/C). Na slici 2.5 prikazani su odnosi molskih udela H/C i O/C za različite vrste goriva, od antracita bogatog ugljenikom do biomase siromašne ugljenikom.



Slika 2.5: Van Krevelenov dijagram (Jones et al., 2006)

Sa van Krevelenovog dijagrama (slika 2.5) može se uočiti da je odnos H/C i O/C kod biomase znatno viši u poređenju sa fosilnim gorivima. Veliki molni udeli kiseonika i vodonika u biomasi dovode do velikih prinosa volatila i smanjenja njene toplotne moći (Jones et al., 2006).

Azot (N) se u pšeničnoj slami nalazi u malim količinama, 0,5 do 1% (računato na gorivu masu) i kao i kiseonik predstavlja unutrašnji balast. On se u biomasi nalazi u obliku organskih jedinjenja i u procesu sagorevanja se izdvaja, i sa produktima sagorevanja odlazi u slobodnom obliku. Međutim, pri visokim temperaturama sagorevanja azot se jedini sa kiseonikom formirajući azotne okside (NO_x) koji su veoma otrovni.

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

$$S_{\text{ukupni}} = S_{\text{organski}} + S_{\text{piritni}} + S_{\text{sulfatni}} \quad (2.5)$$

Organski sumpor ulazi u sastav složenih visokomolekularnih organskih jedinjenja goriva. Piritni sumpor se nalazi u jedinjenjima sa metalima, pre svega sa gvožđem, gradeći gvožđe sulfid. Organski i piritni sumpor sagorevaju i čine sagorivi deo ukupnog sumpora. Sulfatni sumpor ulazi u mineralni deo goriva u obliku sulfata CaSO₄ i FeSO₄. Sulfati u procesu sagorevanja ne oksidišu, već završavaju u pepelu. Sagorivi sumpor, ako pri svom sagorevanju gradi SO₂ oslobađa se 10500 kJ/kg toplote, odnosno ako gradi SO₃ oslobađa se 13800 kJ/kg toplote. Sumpor-dioksid i sumpor-trioksid su anhidridi sumporaste i sumporne, respektivno, koje u određenoj

koncentraciji vrlo agresivno deluju na metal, te zbog toga sumpor, iako sagoriv, predstavlja vrlo nepoželjan sastojak goriva. Međutim, u svim vrstama biomase, pa i u pšeničnoj slami, sumpora ima gotovo "u tragovima" što je sa ekološkog aspekta čini jako povoljnom za korišćenje u energetske svrhe.

Isparljive materije (volatili) su lako isparljiva jedinjenja (CO , CO_2 , CH_4 , C_mH_n , H_2 , tar) dobijena termičkim razlaganjem suve mase goriva. Volatili zajedno sa fiksnim ugljenikom (C_{fix}) čine gorivu masu goriva. Maseni udeo volatila u gorivu ima veliki značaj za ocenu njegovih karakteristika i kvaliteta. Geološko poreklo i starost goriva utiču na maseni udeo volatila, kao i na temperaturu pri kojoj će se oslobađati. Što je gorivo starije to je maseni udeo volatila manji i viša je temperatura pri kojoj se izdvajaju. "Sveža goriva" kao što je biomasa, imaju, kao što je već napomenuto, vrlo visok sadržaj volatila (70-80%) i samim tim relativno nisku temperaturu njihovog izdvajanja i paljenja. Ta karakteristika biomasu čini lako zapaljivim gorivom. Kako se volatili relativno brzo oslobađaju pri termičkoj razgradnji biomase, njihov maseni udeo je značajan parametar pri projektovanju ložišta kotla. Nakon devolatilizacije suve mase goriva ono što ostaje je koks koji se sastoji iz fiksnog ugljenika i mineralnih materija - pepela.

Fiksni ugljenik (C_{fix}) predstavlja čvrsti (neisparljivi) ugljenik u biomasi, koji nakon procesa devolatilizacije, zajedno sa mineralnim materijama čini koks. Kako je ugljenik nosilac toplotne moći goriva poželjno je da njegov udeo bude što veći. U pšeničnoj slami se njegov maseni udeo kreće oko 16% (računato na radnu masu), dok je kod ugljeva 2 do 3 puta veći.

Vlaga (W) predstavlja štetnu komponentu goriva, kako zbog toga što smanjuje sadržaj sagorivih materija, tako i zbog trošenja toplote za njeno isparavanje pri sagorevanju (oko 2500 kJ/kg). Osim što vlaga gorivu snižava toplotnu moć, ona povećava zapreminu produkata sagorevanja, usporava proces sagorevanja i snižava temperaturu sagorevanja goriva.

Vlaga se u gorivu javlja u tri oblika: gruba, higroskopna i konstitucionalna. Gruba vlaga se gubi sušenjem na 20°C do ustaljenja težine ili nakon 2h na 50°C. Higroskopna vlaga (unutrašnja vlaga vezana za poroznu strukturu) se gubi nakon 2h sušenja na 105°C. Konstitucionalna vlaga je vlaga vezana u molekulima i ne prikazuje se u analizama.

Maseni udeo vlage u poljoprivrednoj biomasi može značajno da varira jer zavisi od klimatskih uslova, doba godine kada se vrši žetva, dužine i načina skladištenja,

itd. Ravnotežna (higroskopska) vlažnost pšenične slame se kreće u intervalu od 8 - 20% (Basu, 2013).

Mineralne materije (A) u biomasi takođe predstavljaju balast, jer zauzimaju mesto gorivim materijama, a same ne sagorevaju. Tokom procesa sagorevanja mineralne materije prolaze kroz niz termo-hemijskih promena koje dovode do njihovog razlaganja i oksidacije, a materija koja nastaje nakon toga naziva se pepeo. Dakle, pepeo je neorganski deo goriva koji ostaje nakon njegovog potpunog sagorevanja i sadrži najveći deo mineralnih frakcija koje su se nalazile u gorivu. Glavni elementi koji čine pepeo su: Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, K, S, Cl i P. Sadržaj Si, Ca, K, Na, Cl, Mg i P u gorivu, pa samim tim i u pepelu, određuje njegove karakteristike. Osim udela, glavna karakteristika pepela, od koje zavisi i mogućnost korišćenja neke materije kao goriva, kao i dizajn postrojenja za njegovo sagorevanje, je topljivost pepela. Temperatura topljenja pepela nastalog sagorevanjem poljoprivredne biomase je znatno niža od temperature topljenja pepela nastalog sagorevanjem uglja ili drvne biomase, što je posledica različitih hemijskih sastava ovih goriva (Jenkins et al., 1998) .

U odnosu na fosilna goriva sadržaj pepela u poljoprivrednoj biomasi je mali (Pešenjanski, 2000; Oka, 1998), i to nekih 2 do 7 puta manji od količine pepela u domaćem uglju (Brkić et al., 2007). Na udeo pepela u pšeničnoj slami utiče njena sorta, tip zemljišta, izbor mineralnog đubriva, meteorološki uslovi i dr. Različiti autori iznose različite podatke, ali se svi slažu da udeo pepela u pšeničnoj slami ne prelaze 10% u odnosu na suhu masu (Badger, 1999; Kostić et al., 1995; Hartmann et al., 2003; Gulić et al., 1980). Osim toga, sastav pepela pšenične slame je značajno drugačiji u odnosu na pepeo ugljeva ili drvne biomase. Za pepeo pšenične slame je karakterističan visoki sadržaj Si, K, Na i Cl, i nizak sadržaj Ca, Mg, Al, Fe i S (Sippula et al., 2008; Thy et al., 2006; Thy et al., 2004; Wei et al., 2005). Visok sadržaj alkalnih metala u pepelu pšenične slame za posledicu ima nisku temperaturu topljenja pepela (Tabela 2.7), što predstavlja jednu od najvećih problema pri sagorevanju pšenične slame. To se posebno odnosi na sagorevanja u sloju, gde se usled visokih temperatura u koksnoj zoni pepeo topi, a zatim u kontaktu sa vazduhom za sagorevanje hladi i očvršćava obrazujući poroznu, ali čvrstu šljaku. Pre očvršćavanja rastopljena šljaka se intenzivno lepi za rešetku za sagorevanje, izmenjivačke površine kotla ili dimne kanale što može dovesti do ozbiljnijih oštećenja ili velikih poteškoća u podešavanju rada kotla (Oka, 1992; Perunović et al, 1985). Osim toga, pšenična slama u većoj meri sadrži i hlor, koji nakon sagorevanja, u gasnoj fazi formira hlorovodoničnu kiselinu (HCl) i soli natrijum i kalijum hlorid (NaCl i KCl), jedinjenja koja imaju važnu ulogu u mehanizmu nastanka korozije (Erić, 2010).

Tabela 2.7: Topivost pepela pšenične slame (Erić, 2010)

Karakteristične temperature	Temperatura [°C]
Početak sinterovanja	850
Tačka omekšavanja	900
Tačka polulopte	1000
Tačka razlivanja	1240

Navedeni problemi se mogu rešiti na dva načina: termičkim putem ili hemijskim metodama. Prvi način podrazumeva regulaciju rada kotla takvu da temperatura u ložištu bude ispod granice sinterovanja pepela, čime bi gore opisan problem zašljakivanja bio sprečen. Međutim, usled niže temperature u ložištu došlo bi do povećanja koncentracije ugljen-monoksida u produktima sagorevanja i smanjenja stepena efikasnosti kotla. Drugi način podrazumeva tretman slame aditivima pre procesa sagorevanja, što svakako poskupljuje cenu finalnog proizvoda.

2.5.2 Toplotna moć pšenične slame

Osnovni pokazatelj upotrebljivosti neke materije kao goriva, i ujedno, jedna od njegovih najvažnijih karakteristika je toplotna moć (Brkić et al., 2007). Toplotna moć goriva je količina toplote koja se oslobodi pri potpunom sagorevanju jedinične mase (kod čvrstih i tečnih) ili zapremine (kod gasovitih) goriva (Gulić et al., 1986). Kako gorivo sadrži vlagu koja pri sagorevanju isprava i vodonik koji sagorevanjem stvara vodenu paru, razlikuju se donja i gornja toplotna moć.

Donja toplotna moć goriva (H_d) je količina toplote koja se oslobodi potpunim sagorevanjem jedinične mase goriva pod sledećim uslovima:

- voda, koja potiče od sagorevanja vodonika i vlage iz goriva, u produktima sagorevanja ostaje u gasovitom stanju,
- produkti sagorevanja su dovedeni na temperaturu okoline, 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.

Za poznati hemijski sastav goriva, donja toplotna moć može se odrediti izrazom (Đorđević et al., 1987):

$$H_d = 340 \cdot C^r + 1200 \cdot \left(H^r - \frac{O^r}{8} \right) + 105 \cdot S^r - 25 \cdot W^r \quad [\text{kJ/kg}], \quad (2.6)$$

gde su:

C^r, H^r, O^r, S^r, W^r - maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, sumpora i vlage u gorivu, respektivno, izraženi u [%].

Gornja toplotna moć goriva (H_g) je količina toplote koja se oslobodi potpunim sagorevanjem jedinične mase goriva pod sledećim uslovima:

- voda iz produkata sagorevanja, koja potiče od sagorevanja vodonika i vlage iz goriva, kondenzovana je i nalazi se u tečnom stanju,
- produkti sagorevanja su dovedeni na temperaturu okoline, 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.

Za poznatu donju, gornja toplotna moć može se odrediti izrazom (Đorđević et al., 1987):

$$H_g = H_d + 25 \cdot (9 \cdot H^r + W^r) \quad [\text{kJ/kg}], \quad (2.7)$$

gde su:

H^r, W^r maseni udeli vodonika i vlage u gorivu, izraženi u [%].

Gornja toplotna moć goriva (H_g) može se odrediti i eksperimentalnim putem, sagorevanjem goriva u kalorimetrijskoj bombi, pri čemu se produkti sagorevanja hlade na temperaturu okoline, a vodena para iz produkata sagorevanja se kondenzuje predajući okolini toplotu promene faze (latentnu toplotu).

Određivanje gornje toplotne moći goriva u kalorimetrijskoj bombi dato je izrazom:

$$H_g = \frac{c\Delta t - Q}{m_u} \quad [\text{kJ/kg}], \quad (2.8)$$

gde je:

c – toplotni kapacitet kalorimetarskog sistema [$J/^\circ C$],
 Δt – porast temperature kalorimetarskog sistema [$^\circ C$],
 Q – toplota oslobođena sagorevanjem konca/žice [J],
 m_u – masa uzorka goriva [g].

Poznavajući gornju toplotnu moć, donja se može dobiti izrazom:

$$H_d = H_g - 24,4 \cdot (W^{ps} + W^r) \quad [\text{kJ/kg}], \quad (2.9)$$

gde je:

W^{ps} - količina vodene pare u produktima sagorevanja (nastala sagorevanjem vodoničnih jedinjenja goriva) izražena u odnosu na apsolutno suhu masu goriva, izražen u [%].

W^r - maseni udeo vlage u gorivu, izražen u [%].

Ako nam je pak poznata gornja toplotna moć i sadržaj vodene pare u produktima sagorevanja apsolutno suvog goriva može se izračunati donja toplotna moć prema izrazu:

$$H_{ds} = H_{gs} - 24,4 \cdot W^{ps} \quad [\text{kJ/kg}], \quad (2.10)$$

Kako se dobijena vrednost donje toplotne moći goriva odnosi se na apsolutno suhu masu goriva, preračunavanje na masu vlažnog (radnog) goriva vrši se izrazom:

$$H_d = H_{ds} \frac{100 - W^r}{100} - 24,4 \cdot W^r \quad [\text{kJ/kg}], \quad (2.11)$$

Toplotna moć poljoprivredne biomase varira u zavisnosti od vrste i sastava, a najviše od sadržaja vlage. Quaaak u radu (Quaaak et al., 1999) iznosi podatak da ukoliko je sadržaj vlage u poljoprivrednoj biomasi oko 87%, donja toplotna moć je jednaka nuli. U praktičnoj primeni, sadržaj vlage može biti maksimalno 55%, kako bi se biomasa mogla koristiti kao gorivo i iz nje dobila energija (Quaaak et al., 1999). Teorijski gledano, jedini uticaj koji sadržaj vlage ima na gornju toplotnu moć jeste "zauzimanje mesta" sagorivim materijama, dok se toplota isparavanja vlage u potpunosti može regenerisati njenom kondenzacijom. U praksi, toplotne moći se prikazuju za vlažnu osnovu (radna masa), suhu osnovu (apsolutno suva masa) i suhu osnovu bez pepela (sagoriva masa). Za sve vrste poljoprivredne biomase, vrednost gornje toplotne moći za suhu osnovu bez pepela (sagoriva masa) je orijentaciono 20,4 MJ/kg ($\pm 15\%$) (Quaaak et al., 1999).

Martinov u (Martinov, 1980) navodi vrednost toplotne moći pšenične slame, svedene na suhu masu, 15,8 MJ/kg. Perunović u (Perunović et al., 1985) navodi podatak od 16,2 MJ/kg, a Preveden (Preveden, 1980) uzimajući u obzir mnogobrojne uticaje navodi vrednosti toplotne moći od 15,7 do 18,0 MJ/kg (suve mase), dok Pešenjanski (Pešenjanski, 2000) za donju toplotnu moć gorive mase (bez vlage i pepela) pšenične slame navodi vrednost oko 18,2 MJ/kg.

Sa porastom sadržaja vlage u pšeničnoj slami opada njena toplotna moć, pa Martinov (Martinov, 1980) navodi srednju vrednost donje toplotne moći, za uzorke sa 15% vlage, od 13,1 MJ/kg, dok Brkić (Brkić et al., 1998) za donju toplotnu moć

pšenične slame, pri skladišnoj (higroskopskoj) vlažnosti od 14%, navodi orijentacionu vrednost od 14 MJ/kg. Mitić (Mitić, 1998) za određivanje gornje i donje toplotne moći pšenične slame daje analitičke izraze:

$$H_g = 17,753 - 0,178 \cdot W^r \quad [\text{MJ/kg}] \quad (2.12)$$

$$H_d = 16,540 - 0,190 \cdot W^r \quad [\text{MJ/kg}] \quad (2.13)$$

U tabeli 2.8 može se videti literaturni pregled podataka donje toplotne moći suve mase i radnog goriva pšenične slame prema raznim autorima. Treba samo napomenuti da su prikazani rezultati za pšeničnu slamu sa ovih prostora.

Tabela 2.8: Donja toplotna moć suve mase i radnog goriva pšenične slame prema raznim autorima

Prema autoru	Donja toplotna moć suve mase, H_{ds}	Toplotna moć radnog goriva	
		Sadržaj vlage	Donja toplotna moć, H_d
	[MJ/kg]	[%]	[MJ/kg]
Martinov i Gemeš, 1980	15,83	15	13,09
Preveden, 1980	15,7-18	14	13,24
Tešić, 1981	16,21	-	-
Babić, 1986	-	14	13,85
Babić, 1990	-	14,3	13,79
Radovanović, 1994	16,9	-	-
Mitić i Manoilov, 1997	16,65	-	-
Brkić i Janić, 1998	-	14	14
Mitić, 1998	16,54	14	13,88
Viglasky, 1999	17,84-18,6	14	14,6-15,8
Igić et al., 2006	14,9	8,2	13,48

Iz svega navedenog može se zaključiti da je pšenična slama, u pogledu dobijanja toplotne energije, dobro gorivo, jednako ili čak bolje, od većine domaćih ugljeva.

2.6 Statika sagorevanja biomase

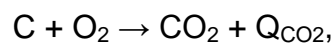
2.6.1 Količina vazduha i zapremine produkata sagorevanja

Sagorevanje je hemijski proces sjedinjavanja goriva sa kiseonikom uz intenzivno oslobađanje toplote. Po završenom procesu sagorevanja dobijaju se

produkti sagorevanja koji se mogu odrediti jednostavnim hemijskim jednačinama. Međutim, treba napomenuti da ove jednačine prikazuju samo konačno stanje produkata sagorevanja, iako se tokom sagorevanja odvijaju veoma složene hemijske reakcije koje odstupaju od konačnih jednačina.

Produkte potpunog sagorevanja biomase predstavljaju ugljen-dioksid, sumpor-dioksid i vodena para, koji nastaju sagorevanjem ugljenika, sumpora i vodonika, respektivno, odnosno sagorljivih elemenata goriva. Prema tome, sagorljivi elementi stupaju u hemijske reakcije sa kiseonikom u određenim odnosima. Potrošnja kiseonika i količina nastalih produkata sagorevanja određuju se iz stehiometrijskih jednačina sagorevanja, napisanih za 1 mol (ili češće kmol) svakog elementa. Naravno, za to je neophodno znati elementarni sastava biomase koja se sagoreva.

Potpuno sagorevanje ugljenika u biomasi odvija se prema sledećoj hemijskoj reakciji:



$$1 \text{ kmol C} + 1 \text{ kmol O}_2 \rightarrow 1 \text{ kmol CO}_2 + 406800 \text{ kJ},$$

$$12 \text{ kg C} + 22,4 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \rightarrow 22,4 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 + 406800 \text{ kJ},$$

$$1 \text{ kg C} + 1,867 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \rightarrow 1,867 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 + 33900 \text{ kJ/kg}.$$

Za potpuno sagorevanje 1 kg ugljenika, teorijski potrebna količina kiseonika je 1,867 m³ kiseonika, odnosno 8,89 m³ vazduha, pri čemu se dobija 1,867 m³ ugljen-dioksida, pri normalnim uslovima. Ako je C^r maseni udeo ugljenika u biomasi, izražen u %, izrazima 2.14 i 2.15 dobija se teorijska količina ugljen-dioksida koja nastaje sagorevanjem jedinične mase goriva (biomase):

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \cdot C^r \quad (2.14)$$

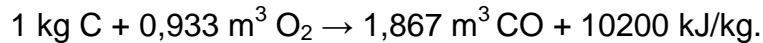
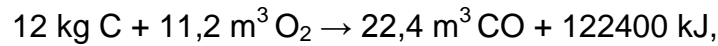
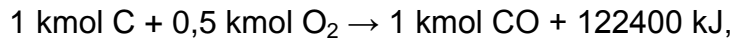
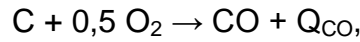
$$m_{\text{CO}_2} = 3,667 \cdot C^r \quad (2.15)$$

gde su:

$$V_{\text{CO}_2} - \text{teorijska zapremina ugljen-dioksida u produktima sagorevanja} \left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgB}} \right],$$

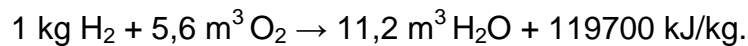
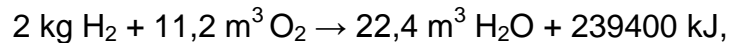
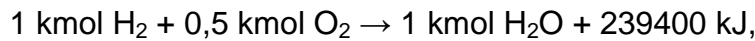
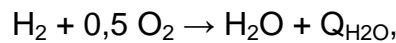
$$m_{\text{CO}_2} - \text{teorijska masa ugljen-dioksida u produktima sagorevanja} \left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgB}} \right].$$

Ukoliko prilikom sagorevanja ne bi bilo dovoljno kiseonika za potpuno sagorevanje ugljenika, došlo bi do njegovog nepotpunog sagorevanja, odnosno formiranja ugljen-monoksida, prema hemijskoj reakciji:



Količina ugljen-monoksida koja se dobija pri nepotpunom ista je kao i količina ugljen-dioksida koji se dobija pri potpunom sagorevanju ugljenika.

Voda, odnosno vodena para, u produktima sagorevanja potiče od sagorevanja vodonika i od isparavanja vlage sagržane u biomasi. Vodonik sagoreva prema reakciji:



Za potpuno sagorevanje 1 kg vodonika, teorijski potrebna količina kiseonika je 5,6 m³, odnosno 26,67 m³ vazduha, pri čemu se dobija 11,2 m³ vodene pare, pri normalnim uslovima. Ako su H^r i W^r maseni udeli vodonika i vlage u biomasi, respektivno, izraženi u %, teorijska količina vodene pare koja nastaje sagorevajnem jedinične mase goriva (biomase) dobija se izrazima 2.16 i 2.17:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot H^r + W^r) \quad (2.16)$$

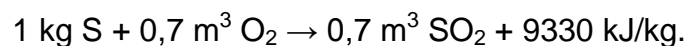
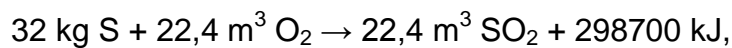
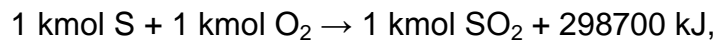
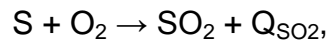
$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot H^r + W^r \quad (2.17)$$

gde su:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} - \text{teorijska zapremina vodene pare u produktima sagorevanja} \left[\frac{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right],$$

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ - teorijska masa vodene pare u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kgB}} \right]$.

Premda sumpora u biomasi ima vrlo malo, njegovo sagorevanje odvijaće se prema sledećoj hemijskoj reakciji:



Za potpuno sagorevanje 1 kg sumpora, teorijski potrebna količina kiseonika je $0,7 \text{ m}^3$, odnosno $3,33 \text{ m}^3$ vazduha, pri čemu se dobija $0,7 \text{ m}^3$ sumpor-dioksida, pri normalnim uslovima. Ako je S^r maseni udeo sumpora u biomasi, izražen u %, izrazima 2.18 i 2.19 dobija se teorijska količina sumpor-dioksida koja nastaje sagorevanjem jedinične mase goriva:

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S^r = 0,7 \cdot S^r \quad (2.18)$$

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot S^r = 2 \cdot S^r \quad (2.19)$$

gde su:

V_{SO_2} - teorijska zapremina sumpor-dioksida u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3\text{SO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

m_{SO_2} - teorijska masa sumpor-dioksida u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgB}} \right]$.

Dakle, teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje svih sagorivih elemenata biomase dobija se iz prikazanih stehiometrijskih jednačina. Kako je biomasa čvrsto gorivo ona se može izražavati u kg kiseonika po 1kg goriva ili u m^3 kiseonika po 1kg goriva. Međutim, od ovako dobijene potrebne količine kiseonika potrebno je oduzeti količinu kiseonika koja ulazi u sastav biomase, jer taj kiseonik takođe učestvuje u sagorevanju. Minimalno potrebna (teorijska) količina kiseonika za sagorevanje dobija se izrazima 2.20 i 2.21:

$$O_{\min_m} = 2,667 \cdot C^r + 8 \cdot H^r + S^r - O^r \quad (2.20)$$

$$O_{\min_v} = 1,867 \cdot C^r + 5,6 \cdot H^r + 0,7 \cdot (S^r - O^r) \quad (2.21)$$

gde su:

O_{\min_m} - minimalna masena (teorijska) potrošnja kiseonika $\left[\frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

O_{\min_v} - minimalna zapreminska (teorijska) potrošnja kiseonika $\left[\frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}} \right]$.

Imajući u vidu da je zapreminski udeo kiseonika u vazduhu 21%, a maseni udeo 23%, izrazima 2.22 i 2.23 može se odrediti i minimalna (teorijska) količina vazduha neophodna za potpuno sagorevanje:

$$L_{\min_m} = \frac{O_{\min_m}}{0,23} \quad (2.22)$$

$$L_{\min_v} = \frac{O_{\min_v}}{0,21} \quad (2.23)$$

gde su:

L_{\min_m} - minimalna masena (teorijska) potrošnja vazduha $\left[\frac{\text{kgVazduha}}{\text{kgB}} \right]$,

L_{\min_v} - minimalna zapreminska (teorijska) potrošnja vazduha $\left[\frac{\text{m}^3\text{Vazduha}}{\text{kgB}} \right]$.

Ovako, stehiometrijski određena, minimalno potrebna količina vazduha, u praksi nije dovoljna da se obezbedi potpuno sagorevanje. Zato je potrebno dovesti nešto veću količinu vazduha, koja se naziva stvarna količina vazduha, L_s . Odnos stvarne i teorijske potrebne količine vazduha se naziva koeficijent viška vazduha, λ , te važe sledeće relacije:

$$L_{s_m} = \lambda \cdot L_{\min_m} \quad (2.24)$$

$$L_{s_v} = \lambda \cdot L_{\min_v} \quad (2.25)$$

gde su:

L_{s_m} - stvarna masena potrošnja vazduha $\left[\frac{\text{kgVazduha}}{\text{kgB}} \right]$,

L_{s_v} - stvarna zapreminska potrošnja vazduha $\left[\frac{\text{m}^3\text{Vazduha}}{\text{kgB}} \right]$,

λ - koeficijent viška vazduha [-].

Osim gore navdenih gasova, u produktima sagorevanja će biti prisutni još i atmosferski azot i azot sadržan u biomasi kao gorivu, kao i kiseonik koji nije utrošen u procesu sagorevanja. Pri potpunom sagorevanju biomase i za poznati koeficijent viška vazduha, sadržaj azota i kiseonika u produktima sagorevanja dat je izrazima 2.26-2.29:

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L_{s_v} + \frac{22,4}{28} \cdot N^r \quad (2.26)$$

$$m_{N_2} = 0,77 \cdot L_{s_m} + N \quad (2.27)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\min_v} \quad (2.28)$$

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\min_m} \quad (2.29)$$

gde su:

V_{N_2} - zapremina azota u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3\text{N}_2}{\text{kgB}} \right]$,

m_{N_2} - masa azota u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgN}_2}{\text{kgB}} \right]$,

V_{O_2} - zapremina kiseonika u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{kgB}} \right]$,

m_{O_2} - masa kiseonika u produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kgO}_2}{\text{kgB}} \right]$,

N - maseni udeo azota u biomasi $\left[\frac{\text{kgN}}{\text{kgB}} \right]$.

Masa i zapremina vlažnih produkata sagorevanja pri potpunom sagorevanju jednog kilograma goriva čini sumu masa, odnosno zapremina, pojedinačnih gasova, kako je dato u izrazima 2.30 i 2.31:

$$m_{\text{vps}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} \quad (2.30)$$

$$V_{\text{vps}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad (2.31)$$

gde su:

$$m_{\text{vps}} - \text{masa vlažnih produkata sagorevanja} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right],$$

$$V_{\text{vps}} - \text{zapremina vlažnih produkata sagorevanja} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right].$$

Dok, masa i zapremina suvih produkata sagorevanja, prema izrazima 2.32 i 2.33 iznose:

$$m_{\text{sps}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} \quad (2.32)$$

$$V_{\text{sps}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad (2.33)$$

gde su:

$$m_{\text{sps}} - \text{masa suvih produkata sagorevanja} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right],$$

$$V_{\text{sps}} - \text{zapremina suvih produkata sagorevanja} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right].$$

Zapreminski udeo i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja određuje se pomoću izraza 2.34:

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V_{\text{vps}}} \quad (2.34)$$

gde je:

$$V_i - \text{zapremina i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right].$$

Analogno ovome mogu se odrediti i zapreminski udeli u suvim produktima sagorevanja.

2.6.2 Entalpija i teorijska temperatura produkata sagorevanja

Proces adijabatskog sagorevanja podrazumeva odsustvo bilo kakvog odavanja toplote okolini, odnosno takav sistem gde se sva toplota oslobođena sagorevanjem goriva troši samo na zagrevanje produkata sagorevanja. Temperatura koju bi u ovakvom sistemu imali produkti sagorevanja naziva se teorijska (adijabatska) temperatura produkata sagorevanja, dok entalpija produkata sagorevanja predstavlja onu količinu toplote koja se dovodi produktima sagorevanja jedinice mase ili zapremine goriva da bi se od temperature $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ doveli do teorijske temperature.

Teorijska temperatura produkata sagorevanja može se odrediti iz toplotnog bilansa, po kome je suma toplotne moći goriva, entalpije jedinične mase goriva i entalpije dovedenog vazduha jednaka entalpiji produkata sagorevanja. Kako nema toplotnih gubitaka, jer je proces adijabatan, toplotni bilans procesa sagorevanja ima oblik dat izrazom 2.35:

$$H_d + c_{p_g} \cdot t_g + L_{s_m} \cdot c_{p_L} \cdot t_L = (1 - A + L_{s_m}) \cdot c_{p_{vdg}} \cdot t_{teor} + A \cdot c_{p_A} \cdot t_A \quad (2.35)$$

Iz izraza 2.35 može se dobiti izraz za teorijsku temperaturu produkata sagorevanja:

$$t_{teor} = \frac{H_d}{(1 - A + L_{s_m}) \cdot c_{p_{vps}}} + \frac{L_{s_m} \cdot c_{p_L} \cdot t_L + c_{p_g} \cdot t_g}{(1 - A + L_{s_m}) \cdot c_{p_{vps}}} - \frac{A \cdot c_{p_A} \cdot t_A}{(1 - A + L_{s_m}) \cdot c_{p_{vps}}} \quad (2.36)$$

Određivanjem adijabatske temperature moguće je proceniti i temperaturu plamena u ložištu. U cilju sprečavanja pojave puzanja kotlovskog čelika treba voditi računa da maksimalna temperatura plamena ne prelazi 1700 - 1800 $^\circ\text{C}$, što se može postići odabirom odgovarajućeg koeficijenta viška vazduha.

Entalpija produkata sagorevanja može se odrediti pomoću izraza 2.37a odnosno 2.37b, pri čemu važi da je entalpija produkata sagorevanja za $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ jednaka nuli.

$$h_{ps} = m_{vps} \cdot c_{p_{vps}} \cdot t_{ps} \quad (2.37a)$$

$$h_{ps} = V_{vps} \cdot c_{v_{vps}} \cdot t_{ps} \quad (2.37b)$$

gde su:

$$h_{ps} - \text{entalpija produkata sagorevanja} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgB}} \right]$$

$$c_{p_g} - \text{specifični toplotni kapacitet goriva} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$$

$$c_{p_L} - \text{specifični toplotni kapacitet vazduha} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right],$$

$$c_{p_A} - \text{specifični toplotni kapacitet pepela} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right],$$

t_{teor} - teorijska temperatura produkata sagorevanja [$^\circ\text{C}$],

t_g - temperatura goriva [$^\circ\text{C}$],

t_L - temperatura vazduha [$^\circ\text{C}$],

t_A - temperatura pepela [$^\circ\text{C}$],

t_{ps} - temperatura produkata sagorevanja za koju se računa entalpija [$^\circ\text{C}$],

$$c_{p_{vps}} - \text{specifična toplota vlažnih produkata sagorevanja pri konstantnom pritisku} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right],$$

$$c_{v_{vps}} - \text{specifična toplota vlažnih produkata sagorevanja pri konstantnoj zapremini} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3^\circ\text{C}} \right].$$

Specifične toplote koriste se kao srednje vrednosti za temperaturni interval $t = 0$ $^\circ\text{C}$ i temperature produkata sagorevanja (Bogner, 2003), a izračunavaju prema izrazima 2.38 i 2.39:

$$c_{p_{vps}} = \sum_{i=1}^5 g_i \cdot c_{p_i} = \frac{1}{m_{vps}} \cdot \sum_{i=1}^5 m_i \cdot c_{p_i} \quad (2.38)$$

$$c_{v_{vps}} = \sum_{i=1}^5 \varphi_i \cdot c_{p_i} = \frac{1}{V_{vps}} \cdot \sum_{i=1}^5 V_i \cdot c_{v_i} \quad (2.39)$$

gde su:

m_i - masa i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kgB}} \right]$,

g_i - maseni udeo i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$,

V_i - zapremina i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgB}} \right]$,

φ_i - zapreminski udeo i-te komponente u vlažnim produktima sagorevanja $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right]$

2.7 Emisija gasova pri sagorevanju biomase

Jedan od vrlo značajnih efekata korišćenja biomase kao goriva je znatno manje zagađenje životne sredine. Ovo je izraženo kroz nultu emisiju ugljen-dioksida i kroz smanjenu emisiju sumpor-dioksida i praškastih materija u odnosu na emisije pri sagorevanju fosilnih goriva.

2.7.1 Emisija ugljen-dioksida

Među gasovima koji dovode do efekta staklene bašte najzastupljeniji, sa preko 83%, je ugljen-dioksid. Ugljen-dioksid je u atmosferi zastupljen sa svega 370 ppm, odnosno čini 0,037% zemljine atmosfere. Međutim, treba imati u vidu da je koncentracija ugljen-dioksida u atmosferi porasla za 31% u odnosu na 1750. godinu, i da je veća nego što je ikada bila (Živković, 2013).

Okolo 98% emisije ugljen-dioksida potiče od sagorevanja fosilnih goriva, međutim, ne doprinose sva goriva u istoj meri njegovoj emisiji. U zavisnosti od hemijskog sastava goriva koje se sagoreva, različita je i emisija ugljen-dioksida, pri ostvarenom istom toplotnom efektu. U tom smislu, da bi se različita goriva

međusobno mogla porediti, u tabeli 2.9 je data emisija ugljen-dioksida po jedinici oslobođene toplote.

Tabela 2.9: Specifična emisija ugljen-dioksida za različita goriva (Quaschnig, 2013)

Gorivo	Emisija $\left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}} \right]$
Biomasa	109.6
Treset	106.0
Kameni ugalj	101.2
Mrki ugalj	97.1
Lignit	96.4
Dizel	77.4
Sirova nafta	74.1
Kerozin	73.3
Benzin	71.5
Tečni naftni gas	63.1
Prirodni gas	56.1

Iako se iz tabele vidi da biomasa ima najveću emisiju ugljen-dioksida po jedinici energije, ona spada u obnovljive izvore energije i kao takva smatra se CO₂ neutralnom. Razlog tome je što se pri sagorevanju biomase emituje približno ista količina ugljen-dioksida kao ona koju je biljka u toku svog rasta vezala procesom fotosinteze. Međutim, na ovaj način se mogu posmatrati stvari samo ako seču šuma prati pošumljavanje (Larson et al., 2010; Urošević et al., 2012; Xie et al., 2013).

2.7.2 Emisija sumpor-dioksida

Prisustvo oksida sumpora u produktima sagorevanja posledica je oksidacije sagorivog sumpora ($S_{\text{gor}}=S_{\text{org}}+S_{\text{pir}}$) iz goriva. Sagorivi sumpor u procesu sagorevanja većim delom oksidiše u sumpor-dioksid - SO₂, a manjim delom u sumpor-trioksid - SO₃. Međutim, u atmosferi se SO₂ lako transformiše u SO₃, koji sa vlagom iz vazduha formira fine kapljice sumporne kiseline. Ove kapljice padaju na zemlju u vidu kiselih kiša, što dovodi do postepenog smanjenja njene pH vrednosti. Uobičajena pH vrednost kiše je oko 5,5, dok je pH vrednost kiselih kiša između 4 i 4,5. Povećanjem kiselosti zemljišta usporava se rast šuma i ostalog bilja, čime se indirektno utiče i na životinjski svet. Takođe, povećanje kiselosti površinskih voda negativno se odražava na rast flore i faune u vodama.

Sagorevanje fosilnih goriva, prevashodno uglja, daleko je najveći izvor emisije sumpor-dioksida. Mazut i lož ulje sadrže sumpor, ali u manjem procentu nego ugalj, tako da se njihovim sagorevanjem emituje manje SO₂ po jedinici proizvedene energije. Sagorevanjem prirodnog gasa ne dolazi do emisije SO₂, osim ukoliko ne sadrži H₂S.

Što se tiče sagorevanja biomase, može se reći da ona gotovo ne doprinosi emisiji SO₂, jer je sadržaj sumpora u biomasi znatno manji nego kod čvrstih i tečnih fosilnih goriva. Kod drvene biomase sadržaj sumpora je od 0,01-0,1% gorive mase, dok je kod slame nešto viši kreće se u intervalu 0,08-0,17% gorive mase (Vassilev et al., 2010).

2.7.3 Emisija praškastih materija

Pod emisijom praškastih materija se podrazumevaju emitovani čvrsti delovi produkata sagorevanja, odnosno pepela. Zavisno od vrste goriva i kvaliteta sagorevanja, osim pepela, u produktima sagorevanja može se naći katran i čađ (gar). Takođe, usled nepotpunog sagorevanja organskih materija iz goriva dolazi do formiranja policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH-ova) koji se lako "lepe" za površinu čestica pepela. Pri tom su, naročito, pogodne najsitnije čestice pepela, zbog velike adsorpcione površine (Shen et al., 2013; Zosima et al., 2016). One su sa aspekta uticaja na zdravlje ljudi koji ih aspiriraju i najopasnije, jer zbog malih dimenzija lako dospevaju u najdublje delove respiratornog trakta, odakle se PAH-ovi sa njih dalje prenose u krvotok i ceo organizam (Sarigiannis et al., 2015; Pongpiachan et al., 2015). Osim toga, praškaste materije iniciraju vezivanje i drugih materija iz atmosfere, utičući na stvaranje smoga u nižim slojevima atmosfere (Sarigiannis et al., 2014).

U poljoprivrednoj i šumskoj biomasi prosečan sadržaj pepela je oko 4% izraženo na suhu masu goriva, dok je u Kolubarskom uglju, koji se dominantno koristi u Srbiji, sadržaj pepela oko 20% takođe izraženo na suhu masu. Uzimajući u obzir prosečnu toplotnu moć ovih goriva, za dobijanje 1 kWh toplotne energije, sagorevanjem biomase nastane 8 grama pepela, dok sagorevanjem Kolubarskog lignita nastane 36 grama pepela. Osim što se sagorevanjem biomase emituje 4,5 puta manje pepela, manje je angažovanje sredstava za njegovu manipulaciju, čime se dodatno smanjuje zagađenje životne sredine (Ilić et al., 2003).

Kada bi se u Republici Srbiji u energetske svrhe umesto uglja i delom umesto tečnih fosilnih goriva koristila sva raspoloživa biomasa (108 000 TJ/god) smanjila bi se emisija zagađujućih materija u sledećem obimu:

- CO₂ za 10,2 milion tona/god,
- SO₂ za 62000 tona/god,
- pepela za 27000 tona/god.

Ova substitucija fosilnih goriva biomasom bi dovela do smanjenja ukupne emisije ugljen-dioksida i sumpor-dioksida u Srbiji za oko 15%.

Kao što je već spomenuto, biomasa može substituisati samo deo potrošnje tečnih fosilnih goriva (do 10%), odnosno onaj deo koji se koristi za proizvodnju toplotne energije za potrebe industrije i domaćinstava. Zbog toga je realno moguće smanjenje emisije zagađujućih materija oko 10% (Ilić et al., 2003).

Kada bi se biomasom kao gorivom, substituisala električna energija koja se koristi u svrhu proizvodnje tople potrošne vode ili tehnološke pare, ostvarilo bi se približno tri puta veće smanjenje emisije zagađujućih materija po svakom zamenjenom kWh električne energije.

2.7.4 Emisija azotnih oksida

Oksidi azota koji se emituju pri sagorevanju goriva pretežno (više od 90%) su u obliku azot-monoksida (NO), koji u atmosferi u prisustvu kiseonika vrlo lako oksiduje u azot-dioksid (NO₂). Pored azot-monoksida i azot-dioksida u procesu sagorevanja nastaje još i azot-suboksid (N₂O), međutim njegov sadržaj pri sagorevanju biomase je potpuno zanemariv, pa se pri merenju emisija oksida azota iz procesa sagorevanja određuju koncentracije samo NO i NO₂, ali se izražavaju zajednički kao NO₂ (Mladenović et al., 2016a). NO₂ u atmosferi reaguje sa vlagom i drugim gasovima i lako formira fotohemijski smog, kisele kiše i troposferski ozon, a istovremeno razara stratosferski ozon pojačavajući efekat staklene bašte (Turns, 2006). Takođe, NO₂ je otrovan gas sa jakim i oštrim mirisom, koji se čulom mirisa detektuje već pri koncentraciji od oko 1 ppm. U koncentraciji od oko 25 ppm prouzrokuje neprijatne nadražaje na očima, dok od 150 ppm izaziva ozbiljna oštećenja i oboljenja respiratornog trakta.

Postoje tri osnovna mehanizma formiranja oksida azota pri procesu sagorevanja:

- termički ili Zeldovich mehanizam,

- promptni mehanizam,
- mehanizam oksidacije azota vezanog u gorivu (Whitty et al., 2010).

Poznavanje uticajnih faktora za svaki od mehanizama formiranja oksida azota, može se delovati u smeru redukcije emisije.

Termički NO nastaje oksidacijom azota iz vazduha za sagorevanje pri visokim temperaturama ($>1370^{\circ}\text{C}$) sagorevanja (Whitty et al., 2010). Kako je za za razgradnju N_2 molekula iz vazduha potrebna velika aktivaciona energija, osim temperature važnu ulogu u formiranju termičkog NO_x igra i vreme izloženosti toj temperaturi (Göke et al., 2012, Richards et al., 2010). Osim toga, prisustvo gasova kao što su H_2 , CO i viši ugljovodonici u ložištu, povećava mogućnosti za formiranje NO_x , usled visokih temperatura sagorevanja ovih gasova (Richards et al., 2001; Ghenai, 2010).

Promptni NO nastaje brzim reakcijama između azota iz vazduha za sagorevanje sa radikalima ugljovodonika (oslobođenih devolatilizacijom), u zonama fronta plamena i pri uslovima bogate smeše, formirajući prvo međuproizvode kao što su HCN , N i CN , koji dalje oksiduju u NO (Turns, 2006).

Treba naglasiti da kod sagorevanja biomase emisije termičkog i promptnog NO su praktično zanemarljive zbog relativno niske temperature sagorevanja uslovljene niskom temperaturom topljenja pepela (Khan et al., 2009; Leckner et al., 2008; EPA, 1999).

NO iz goriva nastaje oksidacijom azota vezanog u gorivu. Pri sagorevanju biomase, oksidacija azota vezanog u gorivu je dominantan mehanizam formiranja NO. Prema (Vassilev et al., 2010) drvo i drvni ostaci imaju sadržaj azota 0,1-0,7% gorive mase, dok slama i poljoprivredni ostaci imaju sadržaj azota 0,5-1% gorive mase (kod lucerke je on čak 2,8%). Veća emisija NO se očekuje za koncentracije azota vezanog u gorivu iznad 0,6% izraženo na suhu masu goriva (Mladenović et al., 2016b).

NO iz goriva se emituje uglavnom oksidacijom azotnih jedinjenja (NH_3 , HCN i HNCO) oslobođenih u procesu devolatilizacije (66-75%), a manje kroz heterogeno-katalizovanu oksidaciju azota iz koksnog ostatka ($<25\%$) (Obernberger et al., 2006; Zhou et al., 2006). Kod sagorevanja biomase azot se oslobodja sa volatiliba uglavnom kao NH_3 (jer je azot u biomasi zastupljen kroz azotnofunkcionalne-amino grupe), ređe kao HCN koji je najznačajniji prekurzor za formiranje N_2O , što je razlog zanemarljivih emisija N_2O (Leckner et al., 1993; Ahn et al., 2011). Šta više, Hasegawa u svom radu (Hasegawa et al., 2001) iznosi da će stepen konverzije NH_3

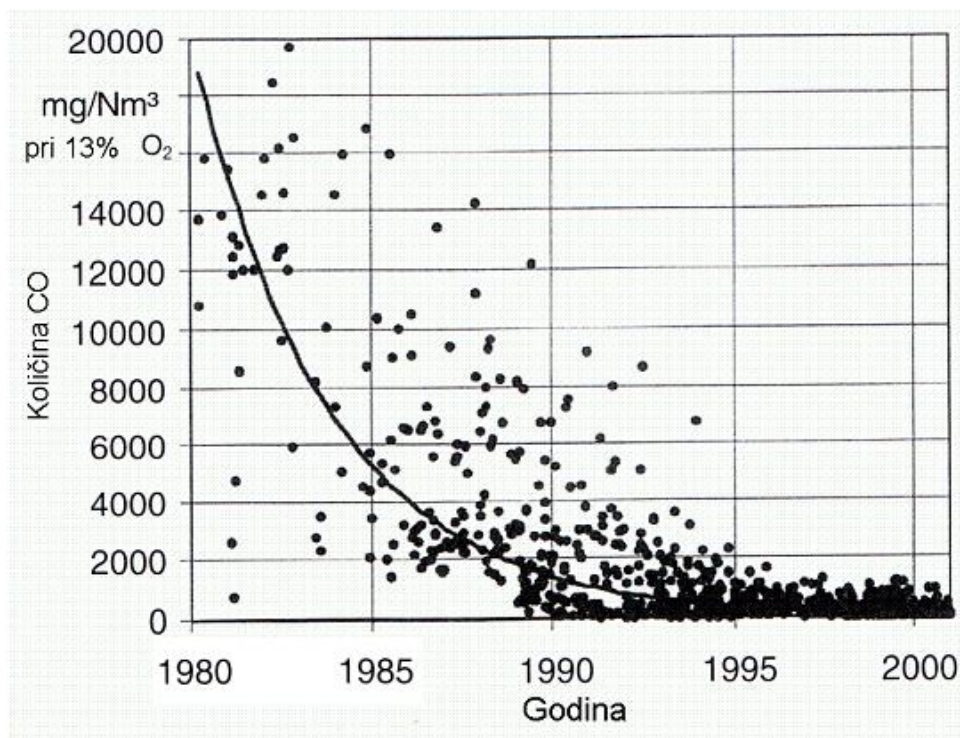
u NO biti veći sa porastom vrednosti odnosa CO/H₂, dok prisustvo male količine CH₄ inhibira dejstvo ovih gasova (CO/H₂) na konverziju NH₃ u NO.

Treba napomenuti još da koksni ostatak i pepeo imaju katalitički efekat na redukciju NO. Koksni ostatak daje katalitičku površinu za redukciju gasne faze NO uz pomoć CO, slično kao i pepeo u prisustvu minerala CaO, MgO i Fe₂O₃. Ovakva veza između NO i CO implicira da je istovremeno smanjenje ovih oksida teško izvodljivo, odnosno da smanjivanje jednog često dovodi do povećanja drugog (Mladenović et al., 2016b; Houshfar et al., 2012).

2.7.5 Emisija ostalih gasova

Osim gore navedenih gasova, u produktima sagorevanja se često mogu naći još i ugljen-monoksid (CO) i nesagoreli ugljovodonici (C_nH_m). Nesagoreli ugljovodonici u produktima sagorevanja oslobođeni su u procesu devolatilizacije goriva, međutim usled nedovoljno dobrog mešanja sa vazduhom za sagorevanje, kao i u slučaju ugljen-monoksida, nije došlo do njihovog potpunog sagorevanja. Kako se sadržaj ugljen-monoksida u produktima sagorevanja lako meri, to se on smatra jednostavnim i pouzdanim indikatorom kvaliteta sagorevanja (Lefebvre et al., 2010; Turns, 2006; Olsson, 2006).

Iz tog razloga, Kaltschmitt u svom radu (Kaltschmitt et al., 2001) daje dijagramski prikaz tehnološkog razvoja uređaja i postrojenja za sagorevanje biomase, izražen kroz izmerene emisije ugljen-monoksida u produktima sagorevanja kotlova na biomasu u Republici Nemačkoj u periodu 1980-2000. godine (Slika 2.6).



Slika 2.6: Emisije ugljen-monoksida u produktima sagorevanja kotlova na biomasu u periodu 1980 - 2000. godina (Kaltschmitt et al., 2001)

Međutim, kada je reč o Republici Srbiji, Igić i Nakomčić-Smaragdakis u radovima (Igić, 2008; Nakomčić-Smaragdakis et al., 2014) se navodi da je kod pojedinačnih ručno loženih kotlovskih postrojenja na biomasu emisija ugljen-monoksida u opsegu 2000 - 3000 mg/Nm³, dok promena od ručnog na automatsko loženje pokazuje jasno poboljšanje kvaliteta sagorevanja, što se odražava na smanjenje emisije ugljen-monoksida.

2.8 Pregled tipova ložišta za sagorevanje biomase

U zavisnosti od brzine primarnog vazduha ložišta za sagorevanje biomase mogu se podeliti na sledeće tehnologije sagorevanja (Van Loo et al., 2002; Nussbaumer T., 2003):

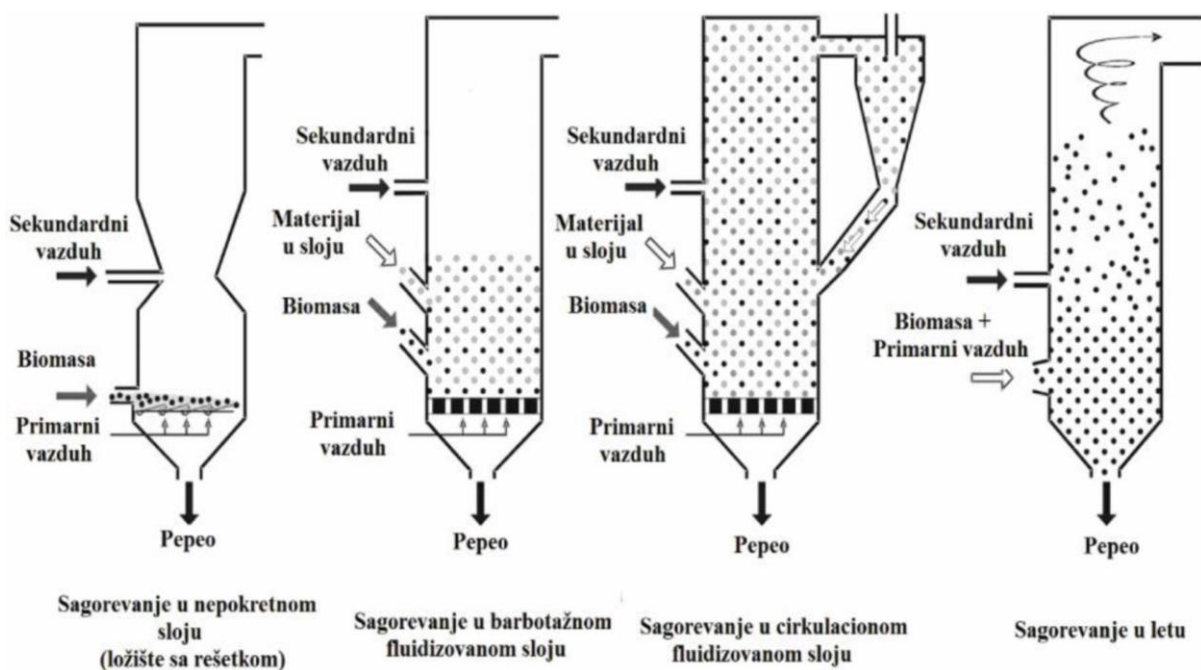
- sagorevanje u nepokretnom sloju,
- sagorevanje u fluidizovanom sloju,
- sagorevanje u letu (slika 2.7).

Sistemi za sagorevanje biomase u nepokretnom sloju podrazumevaju ložišta sa rešetkom i ložišta sa loženjem odozdo. Kod ovih sistema, primarni vazduh se u zonu sagorevanja uvodi kroz sloj, pa se u sloju mogu razlikovati četiri karakteristične zone:

sušenje, devolatilizacija, sagorevanje volatila i sagorevanje koksnog ostatka. Produkti sagorevanja, koji napuštaju sloj, u sebi mogu sadržati značajnu količinu nesagorelih gasova, kao što su ugljen-monoksid i metan (i drugi lakši ugljovodonici), koji dogorevaju u zoni iznad sloja, u koju se dovodi sekundarni vazduh.

U sistemima za sagorevanje u fluidizovanom sloju, biomasa sagoreva u sloju inertnog materijala (najčešće pesak ili hematit). Najznačajnija razlika u odnosu na ložišta sa fiksnim slojem je što ne postoje jasno izdiferencirane, gore pomenute, četiri zone, već se procesi od sušenja do sagorevanja koksnog ostatka odvijaju simultano. U zavisnosti od brzine fluidizacije razlikuju se ložišta sa sagorevanjem u mehurastom i cirkulacionom fluidizovanom sloju.

Sistemi za sagorevanje u letu podrazumevaju ložišta za sagorevanje sitnijih oblika biomase, kao što su: piljevina, ljuska suncokreta, ljuska pirinča i sl. Kod ove vrste ložišta, biomasa se u zonu za sagorevanje uvodi u struji primarnog vazduha, a dogorevanje nesagorelih gasova vrši se dovođenjem sekundarnog vazduha.



Slika 2.7: Sagorevanje u nepokretnom sloju, sagorevanje u mehurastom i cirkulacionom fluidizovanom sloju i sagorevanje u letu (Van Loo et al., 2008)

2.8.1 Ložišta za sagorevanje na rešetki

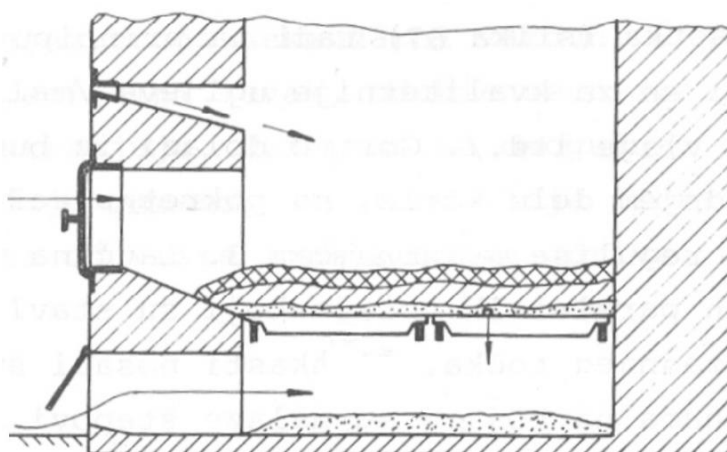
Postoji nekoliko tipova rešetki za sagorevanje biomase: nepokretna rešetka, pokretna rešetka, putujuća rešetka, rotaciona rešetka i vibraciona rešetka. Sve tehnologije sagorevanja na rešetki imaju svoje specifičnosti, tako da se pri izboru

tehnologije mora voditi računa o karakteristikama biomase koja će se sagorevati. Treba napomenuti da sagorevanje na nepokretnoj rešetki se koristi za vrlo male snage ($< 1 \text{ MW}_t$), a na pokretnoj rešetki za srednje snage (do 10 MW_t pa i više).

Sagorevanje na rešetki je prevashodno namenjeno gorivima sa visokim sadržajem vlage i pepela, kao i za širok opseg veličina i oblika čestica (ali bez sitnih frakcija $< 5 \text{ mm}$) goriva. Takođe, na rešetki mogu sagorevati i mešavine goriva (npr. mešavina drvne i poljoprivredne biomase) koje se pri sagorevanju različito ponašaju. Mogućnost dobrog kontrolisanja debljine sloja i osiguravanje ujednačene raspodele goriva po površini rešetke, omogućava pravilnu distribuciju primarnog vazduha po rešetki, u cilju ostvarenja potrebne količine vazduha u zonama sušenja, gasifikacije i sagorevanja. Ovakva kontrola distribucije vazduha omogućava rad postrojenja i na snagama od oko 25% od nominalne. Preciznom regulacijom primarnog vazduha moguće je održavati i blago substehiometrijske uslove u sloju u cilju smanjenja emisije azotnih oksida. Osim toga, regulacijom primarnog vazduha se kontrolise i temperaturu na rešetki i u ložištu kotla, kako bi se smanjila mogućnost sinterovanja pepela.

Nepokretna rešetka

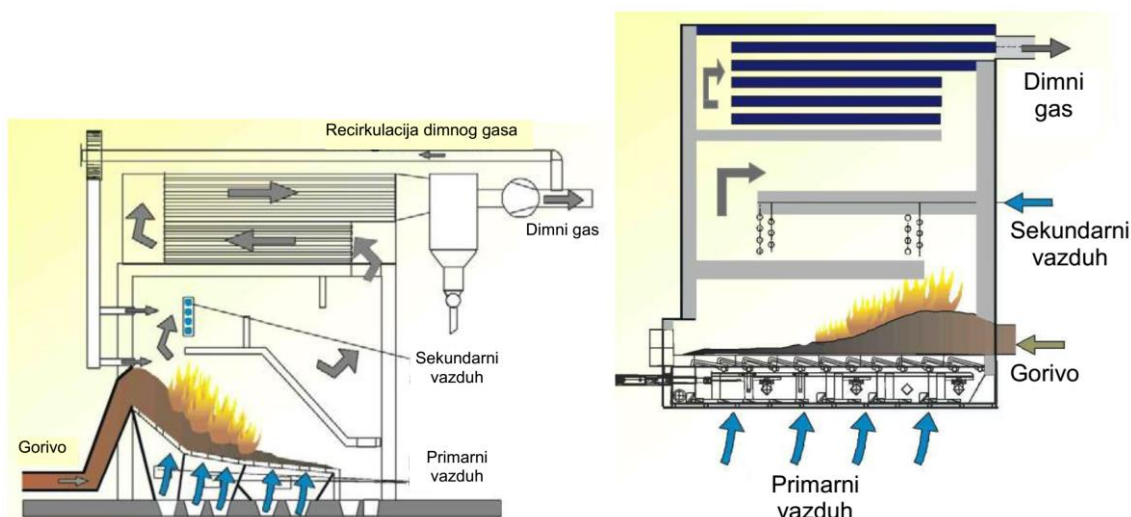
Nepokretna rešetka se uglavnom koristi kod ložišta, odnosno kotlova male snage ($< 1 \text{ MW}_t$). Gorivo se na rešetku dovodi ubacivanjem odnosno pod dejstvom gravitacione sile i njegova raspodela duž rešetke ne može biti precizno regulisana (Slika 2.8). Ovaj tip ložišta je najčeće korišćena tehnologija za sagorevanje poljoprivredne biomase u domaćem agrokompleksu (Đurović, 2008).



Slika 2.8: Nepokretna rešetka (Gulić et al., 1991)

Pokretna rešetka

Pokretna rešetka može biti kosa ili horizontalna, a sastoji se iz naimeničnih redova fiksnih i pokretnih segmenata. Usled horizontalnog kretanja pokretnih segmenata gorivo se kreće po rešetki (Slika 2.9). Ovo ujedno obezbeđuje i mešanje svežeg i delimično sagorelog goriva, čime se površina sloja stalno obnavlja, što omogućava sagorevanje veće količine goriva na rešetki. I kod ovog tipa rešetke primarni vazduh koji se u sloj goriva dovodi kroz rešetku, istovremeno služi i za hlađenje rešetke, mada ima izvedbi i sa vodom hlađenom rešetkom. Regulacija rada ovog tipa rešetke je znatno zahtevnije nego kod putujuće rešetke, što za posledicu može imati povećanu emisiju ugljen-monoksida, ako i pojavu nepotpuno sagorelog koksa u pepelu. Pepeo se kod ovog tipa rešetke takođe odvodi na kraju rešetke (Quaak et al., 1999, Gesell et al., 2007). Kod pokretne horizontalne nema nekontrolisanog kretanja sloja goriva po rešetki, usled sile gravitacije, pa je lakše je ostvariti željenu distribuciju goriva po rešetki, što je bitno sa aspekta stacionarnosti u radu i smanjenja mogućnosti zašljakivanja (Nussbaumer, 2001).

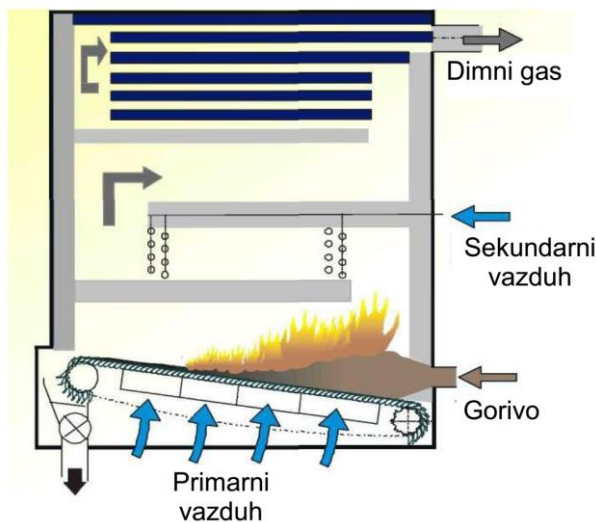


Slika 2.9: Pokretna kosa i horizontalna rešetka (Fletcher, 2012)

Putujuća rešetka

Putujuća rešetka je napravljena od rešetnica (segmenata) koje čine beskrajnu traku, gusenicu, koja se kreće duž ložišta (Slika 2.10). Gorivo se, obično pomoću pužnog dozatora, dovodi na jedan kraj rešetke i transportuje se kontinualno kroz ložište, zajedno sa rešetkom. Pepeo se sa rešetke uklanja na njenom drugom kraju okretanjem segmenata rešetke pod dejstvom sile gravitacije. Primarni vazduh koji se u sloj goriva uvodi kroz rešetku istovremeno služi i za hlađenje rešetke, a podešavanjem brzine kretanja rešetke se osigurava potpuno sagorevanja koksnog

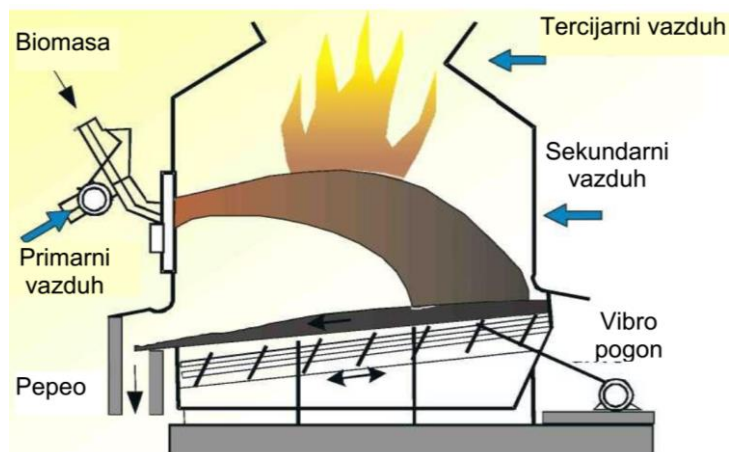
ostatka. Ova ložišta su prevashodno namenjena za sagorevanje drvene sečke i drvnih peleta. Prednosti ovog tipa rešetke su uniformni uslovi sagorevanja duž cele rešetke i niska emisija čestica, a nedostatak je što usled nehomogenosti biomase koja na njoj sagoreva može doći do zona sa različitim uslovima sagorevanja i posledično nestacionarnosti u radu (Dragičević, 2003).



Slika 2.10: Putujuća rešetka (Fletcher, 2012)

Vibraciona rešetka

Vibraciona rešetka sastoji se od dva ili više segmenata postavljena na opruge, tako da se može kretati naizmenično napred-nazad, čime se obezbeđuje transport goriva duž rešetke. Primarni vazduh se dovodi ispod sloja kroz otvore na segmentima rešetke (slika 2.11). Osim za visoke frekvencije vibriranja rešetke, učestala je pojava zašljakivanja, odnosno sinterovanja pepele, usled nabijanja goriva vibriranjem. Nedostaci ove tehnologije su povećana emisija čestica usled intenzivnih vibracija rešetke i povećana emisija ugljen-monoksida usled naglog kretanja goriva niz rešetku (Broek et al., 1995).



Slika 2.11: Vibrirajuća rešetka (Fletcher, 2012)

Rotirajuća konusna rešetka

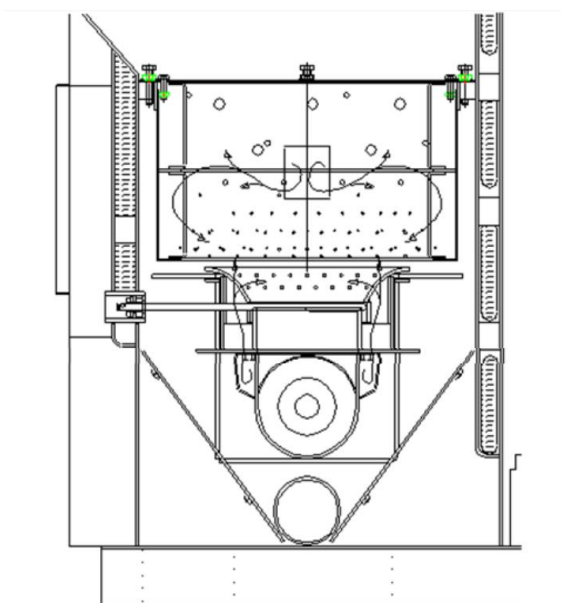
Rotirajuća rešetka ima konusni oblik, a sastoji se od prstenastih segmenata koji međusobno imaju suprotnosmerno obrtanje (Slika 2.12). Biomasa se dovodi na vrh konusa odozdo, a primarni vazduh se uduvava u sloj kroz segmente rešetke, pri čemu se vodi računa da u sloju goriva na rešetki uslovi budu substehiometrijski kako bi se snizila temperatura i izbeglo sinterovanje pepela. Dogorevanje nesagorelih gasova odvija se u sekundarnoj komori za sagorevanje, koja može biti horizontalna, za kotlove do 10 MWt, ili vertikalna, za kotlove do 4 MWt (Erić, 2010). Suprotnosmerno obrtanje segmenata rešetke obezbeđuje dobro mešanje sveže biomase i užarenog koksnog ostatka, što omogućava sagorevanje biomase sa sadržajem vlage i do 65%. Nedostaci ove tehnologije su neophodnost postojanja pomoćnog gorionika za inicijalno paljenje goriva, kao i neophodnost povremenog zaustavljanja sistema radi čišćenja od krupnijih čestica pepela (Van Loo et al., 2002).



Slika 2.12: Rotirajuća rešetka (Fletcher, 2012)

2.8.2 Ložišta sa loženjem odozdo

Gorivo se u komoru za sagorevanje dovodi pužnim transporterom odozdo, kroz dno, dok se primarni vazduh uvodi kroz otvore i proreze na dnu komore, a sekundarni kroz otvore na obimu komore. Ložišta sa loženjem odozdo prevashodno su namenjena sagorevanju biomase granulacije do 50mm (strugotina, pelet, piljevina) i niskim sadržajem pepela. Kod korišćenja biomase sa visokim sadržajem pepela i niskom temperaturom topljenja može doći do začepljenja otvora za dovod primarnog vazduha, usled formiranja sloja rastopljenog pepela na dnu komore. Treba istaći da ovaj tip ložišta predstavlja jednostavnu i jeftinu tehnologiju sagorevanja biomase za snage do 6 MWt (Janić et al., 2012).



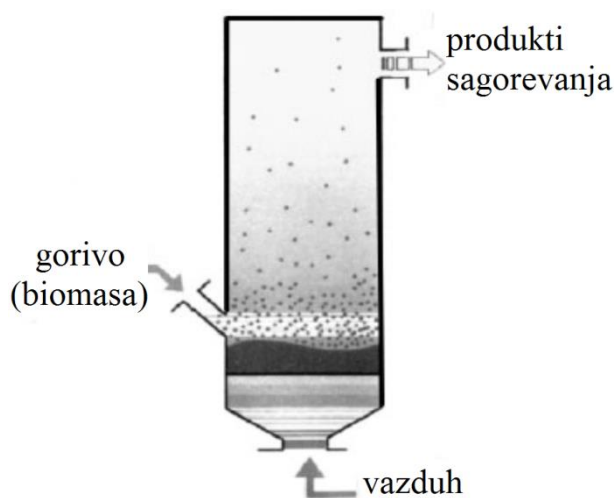
Slika 2.13: Ložišta sa loženjem odozdo (Herz-srb, 2017)

2.8.3 Ložišta sa fluidizovanim slojem

Fluidizovani sloj je stanje u kome čestice čvrstog materijala (mešavina goriva i inertnog materijala) lebde u struji fluida (gasa), a osobine ovakvog sloja su veoma slične osobinama fluida (Oka, 1994). Pri određenoj brzini produvanja sloja čvrstog rastresitog materijala gasom (vazduh je najčešće korišćen gas za fluidizaciju) dolazi do odvajanja čestica jednih od drugih i njihovog lebdenja u struji gasa, čime se ceo sloj, odnosno mešavina čestica i gasa ponaša kao homogen fluid. U zavisnosti od brzine gasa za fluidizaciju, odnosno od brzine produvanja sloja, razlikuju se dva tipa kotlova za sagorevanje u fluidizovanom sloju: kotlovi za sagorevanje u mehurastom fluidizovanom sloju i kotlovi za sagorevanje u cirkulacionom fluidizovanom sloju (Laković et al., 2015).

Mehurasti fluidizovani sloj

Sagorevanje u mehurastom fluidizovanom sloju (MFS) se koristi za kotlove snage veće od 5 MWt, s tim da ova granica nije tehnološke već ekonomske prirode (Koorneef et al., 2007) (Slika 2.14). Najčešće korišćen materijal sa kojim se biomasa meša u sloju je pesak veličine zrna oko 1mm, ali se u slučaju korišćenja biomase sa visokim sadržajem alkalnih jedinjenja koristi drugi materijal za ispuni sloja, jer silicijum iz peska reaguje sa alkalnim elementima stvarajući jedinjenja sa niskom temperaturom topljenja. Primarni vazduh se dovodi preko distribucione rešetke na dnu sloja, a brzine fluidizacije su u opsegu 1 - 2,5 m/s, što je nešto veća brzina od minimalne brzine fluidizacije, dok je temperatura sloja u opsegu 800 - 900 °C. Sekundarni vazduh za sagorevanje se dovodi u zonu iznad sloja, čime se ostvaruje dvostepeno sagorevanje i smanjena emisija oksida azota (Valentim et al., 2006; Leckner, 1998). Prednost tehnologije sagorevanja u MFS se ogleda u mogućnosti korišćenja biomase sa visokim sadržajem vlage i sa širokim opsegom veličina čestica, kao i u mogućnosti mešanja različitih tipova biomase ili mešanja biomase sa drugim čvrstim gorivima, na primer ugljem.

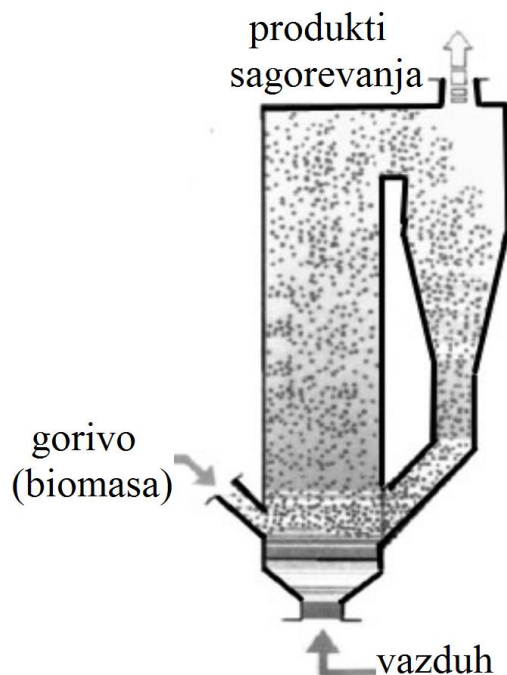


Slika 2.14: Ložište sa mehurastim fluidizovanim slojem (Mladenović, 2013)

Cirkulacioni fluidizovani sloj

Povećanjem brzine fluidizacije do opsega 5 - 10 m/s, sistem mehurastog fluidizovanog sloja prelazi u cirkulacioni fluidizovani sloj (CFS) u kome se celokupna mešavina goriva i inertnog materijala kreće kroz ložište. Smeša čestica inertnog materijala, nesagorelog goriva i pepela odlazi u ciklon gde se čestice inertnog materijala i nesagorelog goriva izdvajaju iz mešavine i ponovo vraćaju u ložište (Slika 2.15). Usled velike turbulentnosti i intenzivnog mešanja po celoj zapremini ložišta, postiže se veća efikasnost sagorevanja i niža emisija štetnih gasova nego

kod MFS. Međutim, mana ove tehnologije su visoki investicioni troškovi, pa su ova ložišta prevashodno namenjena za kotlove snage preko 30 MWt (Erić, 2010), mada ima i izuzetaka kao što je (Thunman et al., 2013). Osim toga, čestice biomase moraju biti veličine do najviše 20 mm. Temperature u ložištu se obično kreću u opsegu 800 - 900 °C, što se ne kontroliše dovodom vazduha, već spoljnim izmenjivačem toplote ili vodogrejnim zidovima ložišta.



Slika 2.15: Ložište sa cirkulacionim fluidizovanim slojem (Mladenović, 2013)

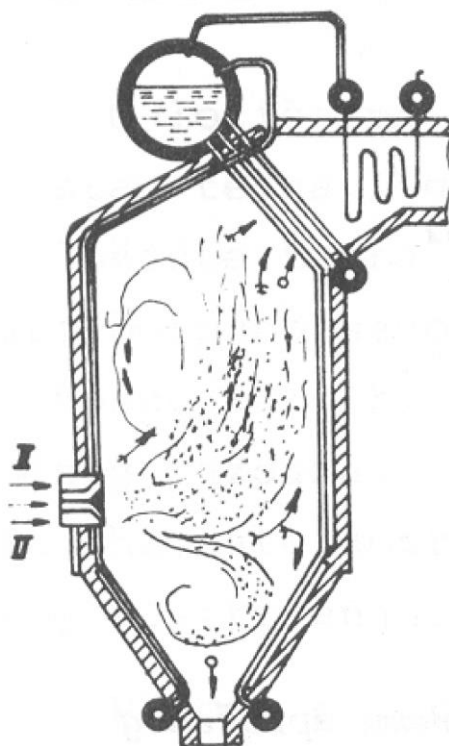
2.8.4 Ložišta za sagorevanje u letu

Tehnologija sagorevanja u letu se koristi za sagorevanje usitnjene biomase, koja se zajedno sa primarnim vazduhom injekciono ubacuje u ložište. Uslov da biomasa bude dovoljno usitnjena i sa ne prevelikim sadržajem vlage, je nužan iz dva razloga: da bi struja gasa mogla sa sobom da nosi čestice biomase i da bi ta čestica tokom svog relativno kratkog boravka u zoni visokih temperatura stigla potpuno da sagori. Granulacija biomase može biti između 10 i 20 mm, a sadržaj vlage do 20% (Nussbaumer et al., 1997). S obzirom da je usitnjavanje biomase na navedenu veličinu skup proces, ova tehnologija se primenjuje samo kod biomase koja izvorno zadovoljava ovaj uslov, kao što je piljevina, ljuska suncokreta, ljuska pirinča i sl. Kako bi se vreme boravka čestica biomase u zoni visokih temperatura produžilo, struja gasova koja ih nosi ima vrtložno kretanje. Tehnologija sagorevanja u letu lako ostvaruje temperature u ložištu od preko 1000 °C, što značajno povećava brzinu i efikasnost sagorevanja, a smanjuje veličinu ložišnog prostora, međutim u slučaju

sagorevanja biomase ove temperature su ograničene na nekih 800 °C, usled relativno niskih temperatura sinterovanja pepela (Li et al., 2015; Ma et al., 2007). Takođe, treba istaći da se u kotlovima sa sagorevanjem u letu startovanje i postizanje radne temperature vrši pomoću gorionika na gasovito ili tečno gorivo, što svakako utiče na cenu opreme i rada kotla. Radi povećanja efikasnosti kotla često se vrši recirkulacija produkata sagorevanja. Postoje dva tipa ložišta za sagorevanje u letu: vrtložno i ciklonsko.

Vrtložno ložište

Sagorevanje u vrtlogu se koristi za sagorevanje piljevine i pogodno je za kotlove relativno male snage, 2 - 8MWt. Regulacija rada ovih kotlova je dobra, a karakteriše ih niska emisija azotnih oksida i prilično visoka emisija čestica (Slika 2.16).

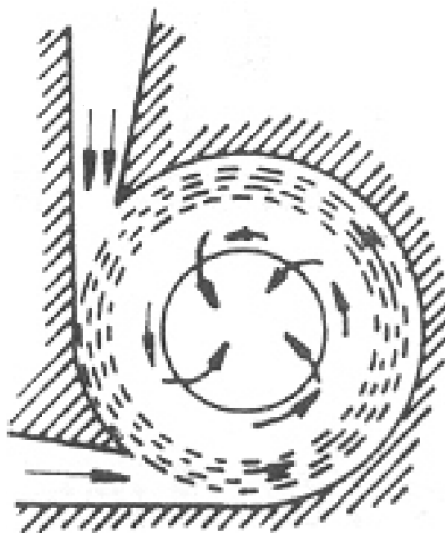


Slika 2.16: Vrtložno sagorevanje (Gulič et al., 1991)

Ciklonsko ložište

Sagorevanje u ciklonu se koristi za sagorevanje najfinijih čestica biomase, poput ljuski suncokreta i pirinča, a ložište se sastoji od dva ciklona. U donji ciklon se sa primarnim vazduhom uduvava sveža biomasa, gde ona delimično sagoreva, a potom zajedno sa nepotpuno sagorelim gasovima odlazi u gornji ciklon u koji se

dovodi sekundarni vazduh, gde se vrši potpuno sagorevanje i prečišćavanje gasova od letećeg pepela (Slika 2.17).



Slika 2.17 Ciklonsko sagorevanje (Gulič et al., 1991)

2.8.5 Retrospektivno poređenje tipova ložišta za sagorevanje biomase

U tabeli 2.10 dat je pregled tipova ložišta u zavisnosti od oblika i veličine čestica biomase koja sagoreva, dok je u tabeli 2.11 data sažeta uporedna analiza prednosti i nedostataka tehnologija za sagorevanje biomase u nepokretnom sloju, fluidizovanom sloju i u letu.

Ukratko se može zaključiti da su ložišta sa rešetkom jednostavnija, jeftinija, pogodnija za manje snage, ali mogu raditi i u relativno velikom opsegu snaga, dok su ložišta sa MFS i CFS i u letu pogodnija za sagorevanje biomase sa većim sadržajem vlage, omogućuju istovremeno sagorevanje mešavine različitih tipova biomase ili biomase i drugih goriva (npr. uglja), imaju veću efikasnost i manju emisiju CO i NO_x.

Tabela 2.10: Pregled tipova ložišta prema obliku i veličini čestica biomase (Erić, 2010)

Oblik	Veličina čestice	Pogodna tehnološka rešenja ložišta
U rastresitom stanju	< 5 mm	Sagorevanje u letu, ciklonska ložišta, MFS, CFS
U rastresitom stanju	< 50 mm	Na rešetki (doziranje odozdo i na), MFS, CFS
U rastresitom stanju	< 100 mm	Na rešetki, MFS
U rastresitom stanju	< 500 mm	Na rešetki, MFS
Usitnjene ili sečene bale	< 50 mm	Sagorevanje u letu, na rešetki, MFS, CFS

Bale	Cele bale	Na rešetki
Peleti	< 30 mm	Na rešetki (doziranje odozdo), MFS, CFS
Briketi	< 120 mm	Na rešetki, MFS

Tabela 2.11: Poređenje prednosti i nedostataka tipova ložišta za sagorevanje biomase (Erić, 2010)

Ložišta sa rešetkom	
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> Niski investicioni i troškovi održavanja za snage do 10 MWt Pogodna za rad u velikom opsegu snaga Mali sadržaj pepela u produktima sagorevanja Malo zaprljanje grejnih površina 	<ul style="list-style-type: none"> Niži stepen efikasnosti usled relativno velikog viška vazduha Mala fleksibilnost u pogledu korišćenja različitih tipova biomase ili mešavina biomase Nehomogeni uslovi sagorevanja po dužini rešetke Nisku emisiju zagađujućih materija je teško postići za mala opterećenja
Ložišta sa loženjem odozdo	
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> Niski investicioni troškovi za postrojenja manje snage Lako i precizno doziranje biomase Niska emisija zagađujućih materija za mala opterećenja 	<ul style="list-style-type: none"> Mala fleksibilnost u pogledu korišćenja biomase različite granulacije Pogodno samo za biomasu sa malim sadržajem pepela i visokom temperaturom sinterovanja pepela
Sagorevanje u mehurastom fluidizovanom sloju	
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> Nema pokretnih delova u ložištu Niski investicioni troškovi za snage do 10 MWt Visok stepen efikasnosti zbog relativno malog viška vazduha Velika fleksibilnost u pogledu korišćenja različitih tipova, granulacije i vlažnosti biomase ili mešavina biomase Niska emisija azotnih oksida 	<ul style="list-style-type: none"> Visoki investicioni i troškovi održavanja Visoki eksploatacioni troškovi usled velike sopstvene potrošnje el. energije Velik sadržaj čestica u produktima sagorevanja Povećana erozija izmenjivačkih površina Povećana osetljivost na zašljakivanje i sinterovanje pepela Gubitak inertnog materijala sa pepelom
Sagorevanje u cirkulacionom fluidizovanom sloju	
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> Nema pokretnih delova u ložištu Velika fleksibilnost u pogledu korišćenja tipova i vlažnosti biomase ili mešavina biomase Dobro sagorevanje usled velike turbulencije u ložištu Visok stepen efikasnosti zbog relativno malog viška vazduha 	<ul style="list-style-type: none"> Visoki investicioni i troškovi održavanja Visoki eksploatacioni troškovi usled velike sopstvene potrošnje el. energije Mala fleksibilnost u pogledu granulacije goriva Velik sadržaj čestica u produktima sagorevanja Povećana erozija izmenjivačkih površina

<ul style="list-style-type: none"> • Niska emisija azotnih oksida 	<ul style="list-style-type: none"> • Povećana osetljivost na zašljakivanje i sinterovanje pepela • Gubitak inertnog materijala sa pepelom
Sagorevanje u letu	
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • Dobra kontrola sagorevanja i regulacije snage • Visok stepen efikasnosti zbog relativno malog viška vazduha • Niska emisija azotnih oksida 	<ul style="list-style-type: none"> • Skupa priprema goriva • Ograničena upotreba biomase i smislu veličine čestica • Visok stepen erozije unutrašnjih površina ložišta • Neophodnost gorionika za start • Velik sadržaj čestica u produktima sagorevanja • Povećana osetljivost na zašljakivanje izmenjivačkih površina

2.9 Pregled literature matematičkog modelovanja i eksperimentalnog istraživanja sagorevanja biomase

U ne tako davnoj prošlosti, dok su mogućnosti računara bile vrlo ograničene, razvoj postrojenja za sagorevanje biomase zasnivao se pretežno na teorijskim analizama i praktičnom iskustvu inženjera, odnosno na podacima dobijenim u radu realnih i eksperimentalnih postrojenja. Međutim, ovakav način razvoja je ograničen primenljivošću dobijenih podataka na drugu vrstu postrojenja u odnosu na ona na kojima su vršena merenja. Osim toga, kontinualna i precizna merenja temperature, protoka i koncentracije gasnih komponenti u ložištu realnih postrojenja su skupa i teško izvodljiva, pa je i generalna ocena performansi realnog postrojenja za različite radne uslove u većini slučajeva usled fizičkih ograničenja bila dugotrajna i teška. Iz tog razloga je mali broj autora, naročito u Srbiji, istraživao sagorevanje biomase u realnim postrojenjima (Babić et al., 1983; Janić, 2000; Mladenović et al., 2009; Erić, 2010; Dedović et al., 2012; Janić et al., 2015).

Sa druge strane, laboratorijska, odnosno eksperimentalna postrojenja, daju podatke koje obezbeđuju korisne informacije o specifičnosti procesa, ali bez mogućnosti računarskih simulacija imaju ograničenost u primenljivosti pri projektovanju realnih postrojenja usled velike fizičke različitosti sa realnim postrojenjima. Dakle, najpouzdaniji rezultati pri definisanju procesa sagorevanja dobijaju se kombinacijom matematičkog modelovanja, odnosno računarskih simulacija i eksperimentalnih merenja, tako što se na osnovu izmerenih veličina

postavljaju ili unapređuju matematički modeli, koji definišu proces sagorevanja, kao i obrnuto, razvojem matematičkih modela unapređuju se eksperimentalna istraživanja.

Werther (Werther et al., 2000) je u svom preglednom radu analizirao mnoga pitanja od značaja za sagorevanje poljoprivredne biomase. Posebnu pažnju je posvetio specifičnostima poljoprivredne biomase kao što su mala nasipna gustina, niska temperatura sinterovanja pepela, veliki sadržaj volatila, sadržaj azota, sumpora i hlora, i u nekim slučajevima veliki sadržaj vlage. Navedena analiza je urađena za četrnaest različitih poljoprivrednih kultura, čiji su setveni ostaci bili u vidu slame (među kojima i pšenična), stabljike ili ljuske. Demirbas je u svojim radovima napravio pregled najvažnijih karakteristika, u smislu sagorevanja, pšenične i pirinčane slame i nekoliko vrsti ljuski i kora koštunjavog voća kao goriva (Demirbas, 2007a) i predložio optimalan izbor postrojenja za njihovo sagorevanje (Demirbas, 2007b). Ates je u radu (Ates, 2011) eksperimentalno istraživao kopirrolizu pšenične slame, ovsene slame i kukuruzovine, dok je Khodaei u svom preglednom radu (Khodaei et al., 2015) osim sumiranja aktuelnih dostignuća u oblasti eksperimentalnog i teorijskog istraživanja sagorevanja slame, kao i drugih tipova biomase, u nepokretnom sloju dao i pregled različitih metodologija koje su korišćene pri matematičkom modelovanju sagorevanja nepokretnom sloju. Osim toga, u radu su posebno obrađene i termofizičke karakteristike slame koje su od značaja pri modelovanju ovog tipa sagorevanja u realnim ložištima.

Kada je reč o sagorevanju biomase u nepokretnom sloju, uticaj različitih svojstava goriva i radnih parametara na paljenje i proces sagorevanja se za neke vrste biomasa mogu pronaći u literaturi, a najznačajniji parametar procesa sagorevanja, brzina primarnog vazduha za sagorevanje, proučavan je od strane više istraživača.

Ronnback (Ronnback et al., 2000) je eksperimentalno istraživao uticaj brzine primarnog vazduha na brzinu kretanja fronta sagorevanja, temperature u sloju i sastav produkata sagorevanja, pri sagorevanju u nepokretnom sloju drvnog peleta i drveta u eksperimentalnom i realnom postrojenju za sagorevanje.

Saastamoinen (Saastamoinen et al., 2000) je takođe eksperimentalno istraživao uticaj brzine primarnog vazduha, vlage, veličine komadića drveta, gustine i vrste drveta na brzinu fronta paljenja u nepokretnom sloju koji se sastoji od drvenih komadića neujednačene veličine.

Thunman u svom radu (Thunman et al., 2001) iznosi da je sagorevanje na rešetci najzastupljeniji način sagorevanja biomase u postrojenjima manjih i srednjih

snaga, te je analizirao sagorevanje šumskih ostataka u kotlu sa pokretnom kosom rešetkom (sa unakrsnim dovođenjem goriva i vazduha za sagorevanje) snage 31MW. Vlažnost šumskih ostataka korišćenih u eksperimentu je bila oko 50%. Kod unakrsnog dovođenja goriva i vazduha, uobičajeno je da sagorevanje počne paljenjem površine sloja, a potom front sagorevanja nastavi da se kreće u smeru od površine sloja ka rešetki. Međutim, Thunman je u svom radu primetio da je kod biomase sa velikom vlažnošću taj smer suprotan od uobičajenog, odnosno da se front sagorevanja kretao u smeru od rešetke ka površini sloja, što je detaljnije opisao i u svojoj doktorskoj disertaciji (Thunman, 2001).

Prvo Horttanainen (Horttanainen et al., 2002), a kasnije i Porteiro (Porteiro et al., 2010a) su u svojim radovima eksperimentalno ispitivali mogućnost povećanja brzine kretanja fronta sagorevanja pri sagorevanju drvene piljevine (od više vrsti drveta) i drvnih peleta u nepokretnom sloju, a u zavisnosti od brzine vazduha za sagorevanje i veličine komadića drveta.

Yang (Yang et al., 2004) je u svom radu eksperimentalno istraživao uticaj promene količine primarnog vazduha, kao glavnog parametra za održavanje stabilnosti procesa sagorevanja i postizanje željene brzine, temperature i sastava produkata sagorevanja, pri sagorevanju drvene biomase u nepokretnom sloju.

Wiinikka (Wiinikka et al., 2005) je istraživao sagorevanje drvnih peleta u nepokretnom sloju, odnosno uticaj količine i distribucije primarnog vazduha kroz sloj na emisiju čestica (praškastih materija). Rezultati su pokazali da način distribucije primarnog vazduha utiče na emisiju i grubih i finih čestica i da se optimizacijom načina dovođenja vazduha može uticati na smanjenje količine čestica još u toku samog procesa sagorevanja.

Ryu (Ryu et al., 2006) je eksperimentalno istraživao sagorevanje tri tipa biomase (dve drvene i energetska trava), različitih gorivih karakteristika, u substehiometrijskim uslovima (uslovi bogate smeše). Rezultati merenja temperature sloja, promene mase sloja i sastava produkata sagorevanja jasno ukazuju na postojanje dve faze u procesu sagorevanja: faza paljenja svežeg goriva i faza sagorevanja preostalog koksa. Za poznate vrednosti koeficijenta viška vazduha, određivanjem brzine fronta sagorevanja, brzine sagorevanja, procenta sagorele mase goriva u fazi paljenja i temperature sloja, analiziran je uticaj gustine sloja, veličine čestica goriva i masenog protoka primarnog vazduha tokom obe faze sagorevanja.

Khor (Khor et al., 2007) je u svom radu prikazao eksperimentalna istraživanja sagorevanja u nepokretnom sloju za tri tipa biomase (slama i dve vrste energetskih trava). Za različite brzine primarnog vazduha i gustine sloja, merio je temperaturu u sloju, promenu mase sloja i sastav produkata sagorevanja, u nameri da odredi brzinu kretanja fronta sagorevanja, brzinu sagorevanja i odnos masa biomase sagorele tokom faze paljenja i faze sagorevanja koksa i nesagorelih ostataka. Pokazao je da se pri malim brzinama primarnog vazduha obe faze (faza paljenja i faza sagorevanja koksa) mogu jasno uočiti, dok je pri velikim brzinama primarnog vazduha vidna samo jedna faza sagorevanja, što se tumači istovremenim sagorevanjem volatila i koksa usled prisutne dovoljne količine vazduha za sagorevanje.

Zhao (Zhao et al., 2008a) je na eksperimentalnom postrojenju za sagorevanje biomase u nepokretnom sloju ispitivao uticaj predzagrevanja primarnog vazduha i vlažnosti goriva na tok sagorevanja. Kao gorivo u eksperimentu koristio je stabljiku kukuruza, iseckanu na komadiće dužine 50 ± 5 mm, vlažnost od 11,5 do čak 42%, dok je protok primarnog vazduha bio konstantan, a njegova temperatura varirana je u opsegu od 20 do 130 °C. Pri tome je merena temperatura sloja, promena mase sloja i koncentracija O_2 , CO, CO_2 i NO u produktima sagorevanja. Zaključeno je da brzina sagorevanja goriva i brzina kretanja fronta sagorevanja rastu sa porastom temperature primarnog vazduha, a opadaju sa porastom vlažnosti goriva. Međutim, primećeno je da sa porastom temperature primarnog vazduha opada temperatura plamena fronta sagorevanja, a varijacije koncentracija O_2 , CO i CO_2 su bile intenzivnije. Kada je reč o vlažnosti goriva zaključeno je da vlažnije gorivo daje manju emisiju azotnih oksida, a suvlje gorivo višu emisiju ugljen monoksida.

Zhao (Zhao et al., 2008b) je na istom postrojenju ispitivao i sagorevanje različitih delova kukuruzne stabljike (puna stabljika, stabljika bez srži, iseckana stabljika bez srži, listovi, metlice) pri ravnotežnoj vlažnosti, a za različite protoke primarnog vazduha bez predzagrevanja. Zaključio je da brzina sagorevanja raste sa porastom protoka primarnog vazduha do određene tačke (tzv. kritične tačke) posle koje počinje da opada usled pothlađenja ložišta. Istovremno, koncentracija NO u produktima sagorevanja opada do dostizanja kritične tačke, gde ima najmanju vrednost, a potom počinje da raste sa porastom protoka primarnog vazduha.

Porteiro je u svom radu (Porteiro et al., 2010b) analizirao uticajne parametre pri suprotnosmernom sagorevanju četiri tipa drvnog peleta u eksperimentalnom postrojenju za sagorevanje biomase u nepokretnom sloju. U funkciji odnosa brzine fronta sagorevanja i primarnog vazduha, ispitivao je uticaj različitih parametara na sagorevanje i zaključio da su najuticajniji sadržaj vlage i veličina čestica goriva.

Takođe, definisao je nov parametar koji je nazvao "stehiometrija koksa" (eng. char stoichiometry) koji mu je služio za ocenjivanje režima sagorevanja. Ovaj parametar predstavlja stehiometrijski odnos vazduha i koksa (uz pretpostavku da je gorivo koks). Dobijeni rezultati pokazuju da se prelazak iz režima, gde brzina sagorevanja zavisi samo od količine dovedenog vazduha, na režim, gde brzina sagorevanja zavisi samo od brzine odvijanja reakcije sagorevanja (što zavisi od prirode reaktanata koji učestvuju u reakciji), dešava upravo za maseni protok primarnog vazduha koji je definisan kao "stehiometrija koksa". Ovo upućuje na to da je prva faza sagorevanja pretežno određena ponašanjem koksa u gorivu. Sa druge strane, parametri kao što su poroznost sloja ili oblik čestice goriva, nisu pokazivali značajniji uticaj pri procesu sagorevanja. Osim toga, Porteiro (Porteiro et al., 2012) je na istom, ali malo modifikovanom, eksperimentalnom postrojenju analizirao i uticaj masenog protoka primarnog vazduha na debljinu fronta sagorevanja drvnog peleta. Utvrdio je da su debljina sloja u kome se dešava proces sušenja i debljina sloja u kome se dešava proces devolatilizacije znatno manji od sloja u kome sagoreva koks. Debljine slojeva sušenja i devolatilizacije su ujednačenih vrednosti bez obzira na protok vazduha, dok debljina sloja sagorevanja koksa značajno varira sa promenom protoka primarnog vazduha, a najmanju vrednost ima pri protoku vazduha koji odgovara vrednosti protoka kada je postignut gore pomenua vrednost "stehiometrija koksa".

Granada (Granada et al., 2012) je, u reaktoru za sagorevanje u nepokretnom sloju, eksperimentalno ispitivao brzinu napredovanja fronta sagorevanja kod osam različitih uzoraka biogoriva (drvnog i agro peleta). Takođe je ovih osam tipova biogoriva podvrgao i termogravimetrijskoj (TG) analizi u cilju ispitivanja njihovog ponašanja tokom devolatilizacije. Pri tome je brzina zagrevanja bila 50 °C/min, jer je to najpribližnija brzina zagrevanja onoj u reaktoru, a i ujedno maksimum korišćene opreme. Zaključio je da biogoriva koja su u TG analizaotoru imala veći prinos volatila i brzinu devolatilizacije, su pri sagorevanju u reaktoru imala veću brzinu napredovanja fronta sagorevanja.

Janić je u svom radu (Janić et al., 2015) eksperimentalno istraživao uticaj količine vazduha za sagorevanje na toplotnu snagu i stepen efikasnosti kotla, pri sagorevanju konvencionalnih sojinih bala slame na nepokretnoj rešetci ručno loženog kotla, deklarisanu toplotne snage 120 kW.

Sakthivadivel je u svom radu (Sakthivadivel et al., 2017) eksperimentalno istraživao sagorevanje u nepokretnom sloju tri tipa biomase sagorevane u mikro-gasifikujućoj peći. U eksperimentu je korišćena ljuska kokosovog oraha, drvo meskite i drvni pelet, a brzina primarnog vazduha je u sva tri slučaja bila 3 m/s. Merene su

temperature u sloju, promena mase i sastav produkata sagorevanja u cilju da se za svako gorivo odredi brzina kretanja fronta sagorevanja, brzina sagorevanja i odnos masa biomase sagorele tokom faze paljenja i tokom faze sagorevanja koksa i nesagorelih ostataka, odnosno da se oceni kvalitet sagorevanja za sve tri vrste biogoriva.

Ispitivanje uticaja različitih radnih parametara na proces sagorevanja na malim eksperimentalnim postrojenjima je brzo, efikasno i relativno jeftino, međutim nedostatak ovako dobijenih rezultata je što je njihova primena ograničena samo na uslove pod kojima su dobijeni.

Sa druge strane, računarske simulacije predstavljaju brz i jeftin način za dobijanje detaljnih informacija o procesu sagorevanja, koje je inače vrlo teško dobiti eksperimentalnim putem u realnim ložištima. Međutim, za razvijanje matematičkih modela koji će u računarskoj simulaciji dati što preciznije informacije, od ključne važnosti je dobro razumevanje različitih mehanizama i subprocesa uključenih u proces sagorevanja. Na taj način se razvoj novih peći i kotlova neće bazirati samo na empirijskim podacima, već će teći simultano sa razvojem matematičkog modela procesa sagorevanja i biće rešenje pretežno zasnovano na rezultatima računarskih simulacija.

Za poznat sastav goriva i poznate parametre sagorevanja, primenom jednačina konzervacije mase i energije, matematičko modelovanje može obezbediti preciznu sliku o temperaturnom gradijentu u sloju, brzini paljenja i sagorevanja sloja, kao i koncentraciji pojedinih gasova u produktima sagorevanja. Osim što u poređenju sa eksperimentalnim istraživanjima računarske simulacije štede vreme, ljudske resurse i novac, jedna od najznačajnijih prednosti matematičkog modelovanja, odnosno računarskih simulacija, je mogućnost nezavisnog variranja pojedinih parametara sagorevanja u cilju pojedinačne procene uticaja koji imaju na proces, bez fizičkih ograničenja. Iz tog razloga matematičko modelovanje postaje prvi izbor pri projektovanju, analizi, testiranju i optimizaciji postrojenja za sagorevanje.

Zbog navedenih prednosti, veći broj istraživača razvijao je različite matematičke modele sagorevanja na rešetci. Prvi matematički model sagorevanja postavio je Bamford (Bamford et al., 1946) još 1946. godine. U cilju poređenja sa eksperimentalnim rezultatima on je ravne drvene ploče sa obe strane izlagao plamenu i istovremeno merio temperaturu u centru ploča, a izmerene vrednosti su predstavljale jedine eksperimentalne podatke kojima je proveravo tačnost modela. Od tog vremena, a naročito sa intenzivnijim razvojem računara, veliki broj istraživača posvetio se matematičkom modelovanju, odnosno razvijanju modela za različite

konstruktivne izvedbe uređaja za sagorevanje. Glavni parametri sagorevanja koji su pri simulacijama varirani su: geometrija i tip ložišta, vrste biomase, veličina delića biomase, gustina sloja, brzina primarnog vazduha i drugi.

Gort (Gort, 1995) je izveo seriju merenja analizirajući uticaj različitih radnih parametara na sagorevanje drvene piljevine u nepokretnom sloju. On je jedan od prvih istraživača koji navodi da sloj biomase može biti delimično pirolizovan, u potpunosti pirolizovan ili sagoreo, u zavisnosti od brzine kretanja fronta sagorevanja, odnosno od brzine prostrujavanja sloja vazduhom. Kasnije, u svom radu Gort (Gort et al., 2001) razvija i teorijski model kretanja fronta sagorevanja kod suprotnosmernog sagorevanja u nepokretnom sloju.

Van der Lans (Van der Lans et al., 2000) je istraživao uticaj brzine i temperature primarnog vazduha pri sagorevanju pšenične slame u pokretnom sloju za unakrsno kretanje sloja i vazduha za sagorevanje. Takođe je razvio dvodimenzijski model za ovaj tip sagorevanja koji je verifikovao eksperimentalnim merenjima. Proširujući ova istraživanja Zhou (Zhou et al., 2005) je razvio jednodimenzijski matematički model sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju i rezultate poredio sa eksperimentalnim merenjima temperature, emisije gasova, brzine fronta paljenja i temperature plamena.

Shin (Shin et al., 2000) je u cilju što boljeg razumevanja insineracije komunalnog otpada, eksperimentalno istraživao i matematički modelovao sagorevanje drvnih komadića u nepokretnom sloju. Utvrdio je da u zavisnosti od količine vazduha koji se dovodi za sagorevanje, postoje tri režima sagorevanja: režim gde brzina sagorevanja zavisi samo od količine dovedenog vazduha, režim gde brzina sagorevanja zavisi samo od brzine odvijanja reakcije sagorevanja (što zavisi od prirode reaktanata koji učestvuju u reakciji) i režim u kome usled prevelike brzine vazduha odnosno konvektivnog hlađenja dolazi do obamiranja i završetka procesa sagorevanja. Shin je u svom radu takođe prikazao jednodimenzioni matematički model kojim je ovo opisao.

Thunman (Thunman et al., 2003) i Bruch (Bruch et al., 2003) su takođe razvijali matematičke modele sagorevanja biomase (drvne sečke) u nepokretnom sloju, koji se može primeniti i pri istosmernom i pri suprotnosmernom sagorevanju, a opisuje u kakvoj su međusobnoj interakciji faze sušenja, devolatilizacije i sagorevanja volatila i koksa.

Yang je u svojim radovima (Yang et al., 2003; Yang et al., 2004) istraživao uticaj brzine primarnog vazduha i vlažnosti goriva na karakteristike sagorevanja u

nepokretnom sloju komunalnog otpada i drvne biomase, kao i uticaj brzine devolatilizacije pri sagorevanju u nepokretnom sloju drvne sečke i komunalnog otpada. Takođe, Yang (Yang et al., 2005) je teorijski i eksperimentalno istraživao uticaj veličine komadića drveta četinaru pri sagorevanju u sloju. U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih merenja mase uzorka, temperature u sloju i sastava gasova iznad sloja, koji su ujedno korišćeni za postavljanje matematičkog modela za simulaciju procesa sagorevanja. Merenjima je utvrđeno da i proces paljenja i sagorevanja u mnogome zavisi od veličine komadića drveta. Osim toga, Yang (Yang et al., 2007) je koristeći komercijalne softvere FLIC i FLUENT simulirao sagorevanje pšenične slame na vibrirajućoj rešetki realnog ložišta, snage 38 MW. Za različite radne uslove kotla, analizirao je vreme sagorevanja, temperaturu u kotlu, sastav produkata sagorevanja.

Kaer (Kaer, 2004) je takođe koristio jedan od komercijalnih CFD (Computational Fluid Dynamics) softvera kojim je simulirao sagorevanje slame u ložištu istovetnim sa realnim na kome su vršena eksperimentalna merenja kako bi se poredila sa rezultatima simulacija. Zaključio je da je loše mešanje u ložištu ključni razlog velike emisije gasova i praškastih materija.

Matematičkim modelovanjem procesa sagorevanja bavio se i Porteiro u svom radu (Porteiro et al., 2006). Model koji je prikazan opisuje faze termičke razgradnje drvnog briketa pri sagorevanju. Model koristi novu diskretizacionu šemu i objedinjeno posmatra subprocesse sagorevanja koji se dešavaju unutar čestice goriva, kao i procese konvekcije i difuzije koji na česticu goriva utiču spolja.

Ryu (Ryu et al., 2007) je istraživao sagorevanje u nepokretnom sloju dve vrste otpada, otpadnog kartona i drvnog otpada, pri različitim brzinama prodivavanja sloja primarnim vazduhom, a eksperimentalni podaci, pre svega brzina paljenja i brzina sagorevanja, korišćeni su za razvijanje matematičkog modela koji predviđa process sagorevanja pri različitim brzinama prostrujavanja sloja primarnim vazduhom.

Yin (Yin et al., 2012) je primenom CFD-a simulirao sagorevanje pšenične slame u realnom kotlu snage 88 MW i pri tome analizirao uticaj promene količine primarnog i sekundarnog vazduha na povećanje energetske efikasnosti kotla i smanjenje emisije zagađujućih materija, dok je Zhaosheng u radu (Zhaosheng et al., 2010) simulirao proces sagorevanja pšenične slame u realnom kotlu za konvencionalne radne uslove i uslove atmosfere obogaćene kiseonikom, a posmatrajući pri tome promenu temperature u ložištu, temperaturski profil same slame u sloju, brzine odvijanja pojedinih faza sagorevanja, kao i brzinu, temperaturu i koncentracije gasova na površini sloja.

Erić (Erić, 2010) je u svom doktoratu razvijao matematički model za sagorevanje balirane sojine slame u potisnom ložištu. Razvijeni model omogućava računarsku simulaciju procesa sagorevanja u cilju analize efekata konstrukcionih i parametarskih izmena na postrojenju sa stanovišta energetske efikasnosti i zaštite životne sredine, a osim toga služi u cilju daljeg razumevanja pojava koje se javljaju pri sagorevanju biomase. Model je verifikovao eksperimentalnim merenjima na kotlu na baliranu sojinu slamu konstruisanog od strane Instituta Vinča za potrebe PKB Beograd. Kod ovog kotla proces je kontinualan i odvija se tako što horizontalno potiskivan balirani ostatak postepeno ulazi u ložište, tako da je zona intenzivnog sagorevanja smeštena praktično na čeonj površini bale, što pruža uslove za veoma efikasno i kontrolisano sagorevanje, što su kroz eksperimentalna merenja potvrdili i u svojim radovima opisali Repić (Repić et al., 2008) i Turanjanin (Turanjanin et al., 2010).

Dedović je u svom radu (Dedović et al., 2012) opisao eksperimentalna istraživanja na realnom postrojenju. U pitanju je ručno loženi toplovodni kotao, deklarisan snage 120kW, sa ravnom nepokretnom rešetkom za sagorevanje konvencionalnih bala slame. U konkretnom eksperimentu ložene su bale pšenične slame, a analiziran je uticaj protoka vazduha (220, 290, 360 and 430 m³/h) i recirkulacije produkata sagorevanja (0, 16,5 i 33%) na termičku snagu i stepen efikasnosti kotla. Uočeno je pravilo da se sa povećanjem protoka vazduha za sagorevanje skraćuje vreme boravka bale u ložištu, a raste termička snaga kotla, bez obzira na stepen recirkulacije produkata sagorevanja. Kada je reč o efikasnosti kotla, rezultati merenja su pokazala da je za tri od četiri režima protoka vazduha, kotao imao najveću efikasnost pri recirkulaciji produkata sagorevanja od 16,5%. Osim toga, eksperimentalni podaci u kombinaciji sa regresionom analizom korišćeni su i za razvoj matematičkog modela koji pravi korelaciju između termičke snage kotla i vremena koje bala pšenične slame provede u ložištu, odnosno brzine sagorevanja bale, kao i korelaciju između stepena efikasnosti kotla i vremena koje bala provede u ložištu.

Miljković je u svojim radovima (Miljković, 2012; Miljković et al., 2013) razvijala dvodimenzijски matematički model za numeričku simulaciju procesa sagorevanja pšenične slame u pokretnom sloju. Razvijeni model omogućava predviđanje prostorne temperaturne slike, brzine pojedinih procesa u sloju i koncentracije pojedinih komponenti produkata sagorevanja, a za različite uslove sagorevanja. Rezultate dobijene simulacijom, zbog sličnosti u sagorevanju, poredila je sa merenjima realizovanim na eksperimentalnom postrojenju za sagorevanje slame u nepokretnom sloju. Osim toga, prema tvrdnjama autora, razvijeni model se uz

minimalne modifikacije može prilagoditi za drugačiju geometriju ložišta, kao i drugu vrstu poroznog biogoriva. Pomenuto postrojenje je opisano u radu (Miljković, 2015).

Ovakav izbor radova nije imao za cilj samo da da pregled dosadašnjih istraživanja procesa sagorevanja, već da izdvoji karakteristične primere različitih aspekata i tendencija pri eksperimentalnom ispitivanju i matematičkom modelovanju postrojenja za sagorevanje biomase.

Ovaj rad se ograničava na istraživanje procesa sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju sa fokusom na procese sušenja, devolatilizacije, sagorevanja volatila i sagorevanja koksa. Razvijeni model daje preciznu sliku o temperaturnom profilu u sloju, brzini sagorevanja, kao i koncentraciji pojedinih gasova u sloju.

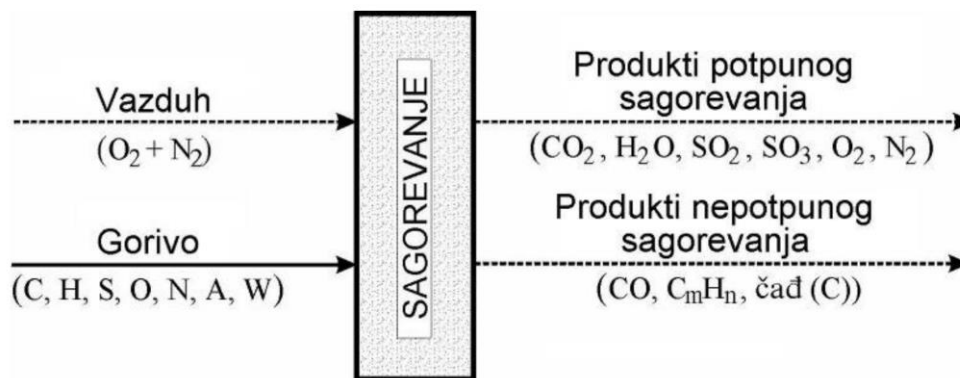
3. MATEMATIČKI MODEL PROCESA SAGOREVANJA PŠENIČNE SLAME U NEPOKRETNOM SLOJU

Kao što je već rečeno, sagorevanje je hemijski proces sjedinjavanja goriva sa kiseonikom uz intenzivno oslobađanje toplote. Ovaj proces može da otpočne samo ako su molekuli goriva u tesnom kontaktu sa molekulima kiseonika i ako je ovoj smeši dovedena energija (energija aktivacije) koja će poslužiti za kidanje atomskih veza (Gulič et al., 1986).

Tokom procesa sagorevanja nastaju produkti sagorevanja - dimni gasovi i pepeo. Sastav produkata sagorevanja može se odrediti hemijskim jednačinama, koje daju samo konačno stanje produkata sagorevanja. Međutim, tokom procesa sagorevanja poljoprivredne biomase odvijaju se veoma složene hemijske reakcije, koje odstupaju od konačnih jednačina sagorevanja. Brzine ovih među-reakcija su različite i zavise od čitavog niza faktora, kao što su: koncentracija sagorive materije u smeši, energija aktivacije, pritisak pri kome teče reakcija, temperatura procesa sagorevanja (Gulič et al., 1991), granulometrijski sastav (Gulič et al., 1980) i dr.

Dobro razumevanje procesa sagorevanja poljoprivredne biomase važno je i sa aspekta određivanja optimalne temperature sagorevanja. Sa jedne strane, visoka temperatura u ložištu kotla dovodi do omekšavanja pepela i značajnog zaprljanja konvektivnih površina ložišta, kao i povećane emisije azotnih oksida, a sa druge strane niska temperatura sagorevanja za posledicu ima povećanu emisiju ugljen-monoksida i značajno smanjenje energetske efikasnosti kotla (Čepić et al., 2016b).

Osim toga, poznavanje zakonitosti sagorevanja, odnosno svih subprocesu koji se odvijaju tokom sagorevanja, neophodno je kako bi se mogla odrediti optimalna količina vazduha za sagorevanje. Ukoliko bi kotao radio sa velikim viškom vazduha, to bi za posledicu imalo gubitke usled pothlađenja ložišta i nepotrebnog zagrevanja vazduha koji ne učestvuje u sagorevanju (Janić, 2000). Sa druge strane, ukoliko bi se u periodu najintenzivnijeg izdvajanja volatila dovela količina vazduha manja od optimalne, došlo bi do nepotpunog sagorevanja volatila, odnosno njihovog napuštanja ložišta u nesagorelom stanju, slika 3.1.



Slika 3.1: Šema potpunog i nepotpunog sagorevanja (Radovanović, 1994)

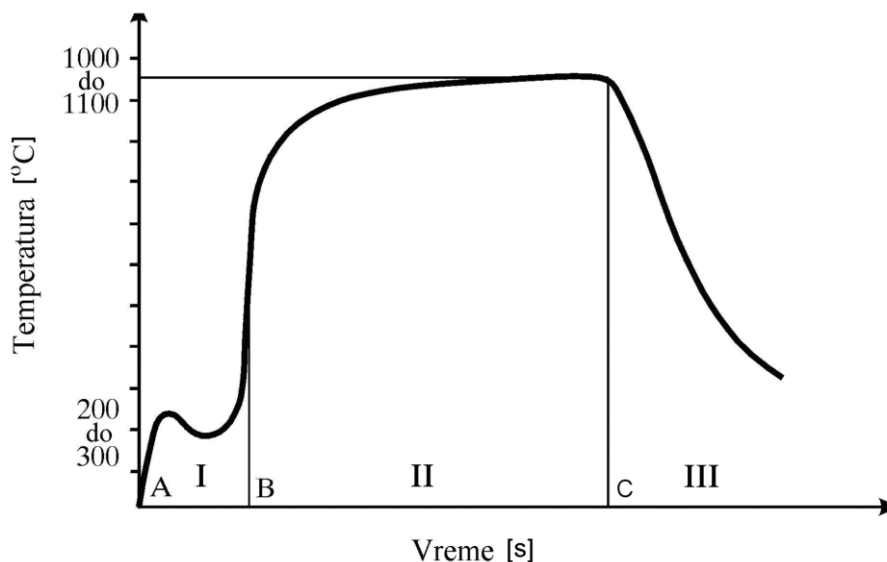
Intenzifikacija procesa sagorevanja, odnosno povećanje ukupne brzine sagorevanja biomase, osim povišenjem temperature, uglavnom se postiže povećanjem brzine difuzije kiseonika i produkata sagorevanja kroz gasni granični sloj (Janić et al., 1998; Janić et al., 2006a). Međutim, povećanje brzine vazduha koji opstrujava čestice biomase, moguć je samo do određene granice, pošto se kako je već navedeno, prekomernim dovodom vazduha hladi zona plamena i usporava sagorevanje (Perunović et al, 1985; Čepić et al., 2016c).

Još jedna bitna karakteristika koja utiče na proces sagorevanja biomase je njena temperatura paljenja. Ona predstavlja početak sagorevanja, a njeno tačno određivanje je veoma složeno, pošto zavisi od niza faktora, kao što su: karakteristike volatila (sastav, koncentracije zapaljivosti, energija aktivacije, ukupni pritisak i dr), reaktivnost, odnos količine gorive materije i kiseonika, specifične površine reakcije, katalitički uticaj pepela, temperatura, vlažnost, pritisak, gustina strukture biomase (teže se pale starija goriva zbog gušće strukture), opšte stanje okoline i drugi (Brkić et al., 2007).

Temperatura samopaljenja je definisana kao temperatura na kojoj dolazi do paljenja volatila izdvojenih iz biomase, bez prisustva otvorenog plamena ili iskre, već samo usled njenog izlaganja povišenim temperaturama. Za razliku od samopaljenja, kod prinudnog paljenja biomase (koje se dešava u eksploataciji, tj. u ložištu) neophodan je izvor toplote čija snaga će zavisiti od sastava zapaljive smeše, temperature okolne sredine, pritiska i drugih parametara koji utiču na proces prenošenja toplote i mase. Za poljoprivrednu biomasu, samim tim i pšeničnu slamu, temperatura samopaljenja se kreće od 220°C, pa naviše (Brkić et al., 2007).

Preveden u svom radu (Preveden, 1980) daje zavisnost temperatura-vreme tokom sagorevanja biomase, slika 3.2. Na slici se mogu uočiti tri karakteristična perioda sagorevanja. Prema Prevedenu, u prvom periodu dolazi do zagrevanja,

sušenja, devolatilizacije i paljenje volatila. Nakon paljenja intezitet sagorevanja se smanjuje, po površini dela biomase na kojoj sagorevaju volatili stvara se sloj koksa, a proces devoaltilizacije se nastavlja. Posle nekog vremena se pod uticajem toplote sagorelih volatila naglo oslobađaju i volatili iz preostale biomase izložene visokoj temperaturi, koji ispunjavaju gasni prostor ložišta i pale. Ovo je ispraćeno turbulentnim sagorevanjem i naglim skokom temperature.



Slika 3.2: Tok krive temperatura-vreme procesa sagorevanja biomase (I-razlaganje, II-sagorevanje, III-obamiranje) (Preveden, 1980)

U drugom periodu biomasa potpuno sagoreva. Tok krive temperatura-vreme u ovom periodu u mnogome će zavisi od oblika ložišta, odnosno od distribucije vazduha u ložištu i od vremena koje će čestica biomase provesti u ložištu (Preveden, 1980).

Treći period karakteriše obamiranje procesa sagorevanja. Vreme trajanja ovog perioda zavisi od potpunosti sagorevanja u prethodnom periodu, odnosno od dužine dogorevanja nepotpuno sagorelih čestica biomase iz prethodnog perioda (Preveden, 1980).

3.1 Matematički opis procesa sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju

Cilj matematičkog modelovanja je da se uz uvođenje odgovarajućih pretpostavki matematički izrazi i opiše proces sagorevanja kao niz prirodnih

fenomena (sušenje, devolatilizacija, sagorevanje) od kojih se sastoji. Ovako dobijen matematički model može se koristiti za određivanje profila različitih veličina koje su relativno teške, a ponekad i nemoguće, za određivanje bilo da je reč eksperimentalnom ili realnom postrojenju.

Za sagorevanje biomase u cilju dobijanja toplotne energije, kao što je već opisano, postoji više tehnologija sagorevanja, pa samim tim i više tipova ložišta. Međutim, za sagorevanje balirane slame, ali i poljoprivredne biomase uopšte, pretežno se koriste kotlovi i ložišta sa ravnom nepokretnom rešetkom (Oka, 1998; Janić et al., 2006b), gde slama sagoreva na rešetci u nepokretnom sloju, a vazduh za sagorevanje se prodivava kroz sloj dovođenjem odozdo kroz rešetku. Tokom tog procesa slama prolazi kroz nekoliko subprocesa: zagrevanje i sušenje, devolatilizacija, sagorevanje volatila i sagorevanje koksa (Puig-Arnavat et al., 2010), kao što je prikazano na slici 3.3.



Slika 3.3: Faze procesa sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju (Čepić et al., 2017a)

Naime, sagorevanje slame u nepokretnom sloju može se smatrati jednodimenzionim, kontinualnim, ustaljenim i površinskim procesom, kod kojeg su granice razmatrane oblasti unapred poznate, međutim, da bi se matematički mogao opisati jedan ovako složen proces neophodno je uvesti i određene pretpostavke (Zhou et al., 2005; Čepić et al., 2016b; Čepić et al., 2017a):

- Sloj se može smatrati uniformnom i poroznom materijom;
- Čvrsta faza (slama) se sastoji iz vlage, volatila, koksa i pepela;
- Gasna faza, koja ispunjava šupljine porozne sredine, je višekomponentna mešavina gasova koji se mogu smatrati idealnim, a njihovo strujanje kroz sloj se takođe smatra idealnim;
- Elementi koji ulaze u sastav slame su C, H, O, dok gasne komponente čine CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄, viši ugljovodonici (C_xH_y), tar (CH_mO_n) i inertni gas N₂;
- Nema pojave fragmentacije, oštećenja ili aglomeracije slame;
- Efekat smanjenja zapremine tokom sušenja, pirolize i sagorevanja je zanemariv (drugim rečima usvojeno je da je porozni materijal izotropan, odnosno da je poroznost konstantna veličina po zapremini sloja);
- Sagorevanje počinje od gornje površine sloja i kreće se vertikalno naniže, sa jednim frontom sagorevanja normalnim na pravac kretanja.

Uzimajući u obzir ove pretpostavke u nastavku rada svaki od gore navedenih subprocesa sagorevanja pšenične slame biće precizno fizički i matematički opisan.

3.1.1 Kinetika sušenja

Proces koji prethodi termičkoj razgradnji biomase je njeno sušenje. Sušenje je praktično čisto fizički proces koji u procesu sagorevanja učestvuje tako što "troši" deo toplote oslobođene sagorevanjem, pa se u periodu sušenja javlja "endotermiski ekstrem". Veliki sadržaj vlage u biomasi će usled velike potrošnje toplote za njeno sušenje dovesti do značajnog smanjenja temperature i brzine sagorevanja, što za posledicu ima nepotpunu razgradnju tara i ugljovodonika oslobođenih u procesu devolatilizacije (McKendry, 2002; Erlich, 2009). Dakle, vlaga u biomasi predstavlja balastnu materiju, a proces sušenja se u potpunosti završava na temperaturi 100-200°C (Kaushal et al., 2010; Puig-Arnavat et al., 2010).

U realnim uslovima odvijanja procesa sušenja, teško je postaviti pouzdanu granicu između pojedinih oblika veza vlage sa skeletom materijala koji se suši. Najznačajniji parametar na osnovu kog se vrši klasifikacija veze, između vlage i čvrstog skeleta, je količina energije koja se utroši za izotermno odstranjivanje vlage iz materijala. Kako je proces odstranjivanja vlage povezan sa kidanjem veza između vlage i skeleta materijala, u zavisnosti od količine energije potrebne za raskidanje tih veza razlikuju se sledeći oblici vezane vlage (Keey, 1972; Bogner et al., 1986; Prvulović, 2004):

- hemijski vezana vlaga;

- fizičko-hemijski vezana vlaga;
- fizičko-mehanički vezana vlaga;

Hemijski vezana vlaga nalazi se u materijalu u obliku kristalohidrata i hidroksilnih jona. Veze ovog tipa su izrazito jake i u toku procesa sušenja ne podležu kidanju.

Fizičko-hemijski vezana vlaga obuhvata osmotski i adsorpciono vezanu vlagu. Osmotski vezana vlaga se unutar materijala transportuje advekcijom, dok kroz polupropusne membrane materijala, tj. ćelijske zidove biomase, prolazi difuzijom. Masa osmotski vezane vlage je znatno veća od adsorpciono vezane vlage. Međutim, transport difuzijom osmotski vezane vlage je ograničen postojanjem slojeva adsorpciono vezane vlage, što joj pruža dopunski otpor pri transportu.

Fizičko-mehanički vezana vlaga obuhvata vlagu kvašenja, kapilarnu vlagu i strukturalnu vlagu. Vlaga kvašenja je površinski upijena vlaga pri neposrednom kontaktu materijala i vode. Kapilarna vlaga se nalazi u mikropilarama poroznog materijala, kao što je biomasa. U zavisnosti od režima sušenja, kapilarna vlaga se transportuje kako u obliku tečnosti (pod dejstvom kapilarnih sila), tako i u obliku pare (usled razlike parcijalnih pritisaka vodene pare u materijalu i okolini). Strukturalna vlaga je vlaga koja je vezana pri formiranju strukture materijala i kao i hemijski vezana vlaga ne uklanja se procesom sušenja.

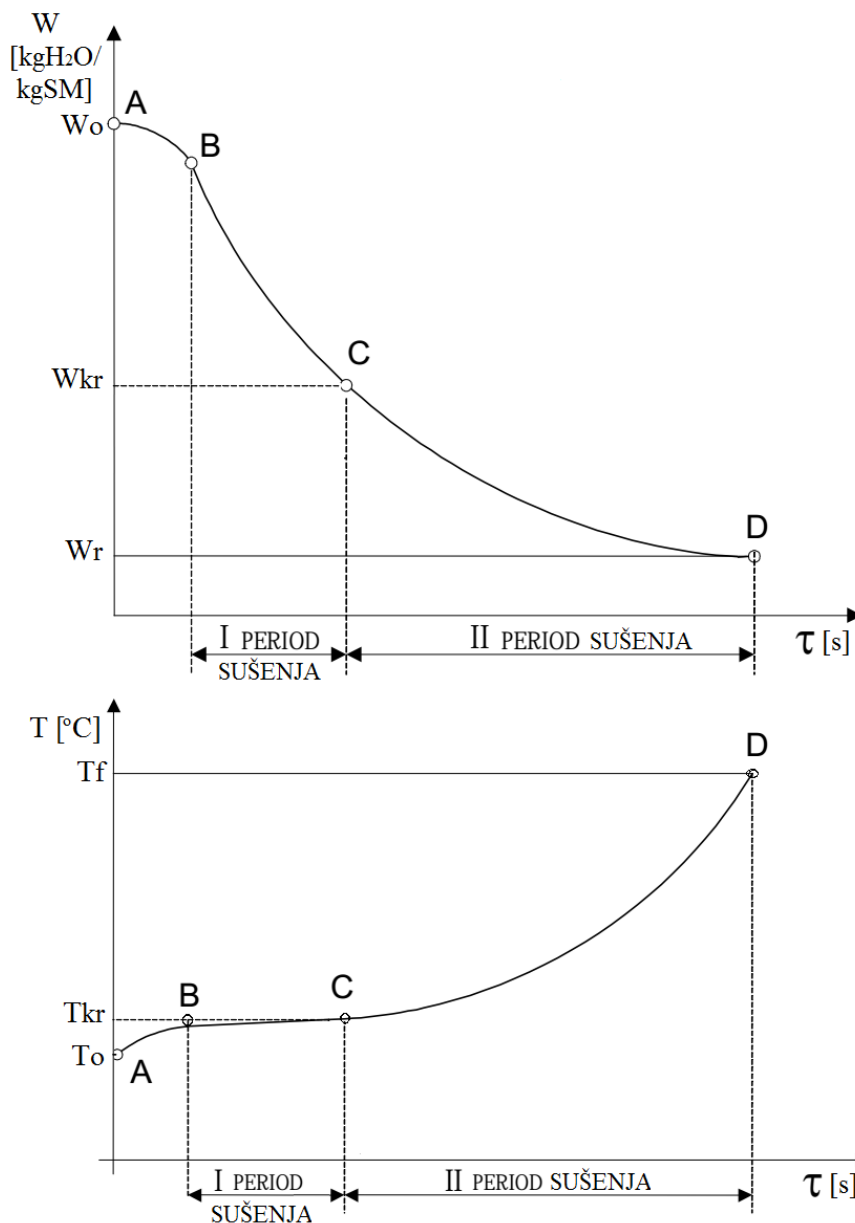
Pri sušenju vlažne biomase najpre se uklanja fizičko-mehanički vezana vlaga (ne računajući strukturalnu vlagu) pa fizičko-hemijski vezana vlaga. Treba napomenuti da, bez obzira na oblik vlage koji se uklanja, sa površine materijala u okolnu sredinu se transportuje isključivo vlaga u gasovitom agregatnom stanju, bilo da se isparavanje dešava na samoj spoljašnjoj površini materijala, bilo da se ono već desilo u unutrašnjosti materijala, pa se u spoljašnju sredinu kroz zidove materijala transportuje u gasovitom stanju (Prvulović, 2004; Miljković, 2012).

Kada se vlažan materijal izloži povišenim temperaturama, najpre dolazi do njegovog zagrevanja, a zatim i do sušenja. Ovaj proces može se podeliti na tri karakteristična perioda:

- period zagrevanja,
- period konstantne brzine sušenja i
- period opadajuće brzine sušenja.

Na slici 3.4 je prikazana kriva sušenja vlažnog materijala. U kratkom vremenskom intervalu, koji odgovara početnom periodu zagrevanja, promena vlažnosti definisana je odsečkom AB na krivi sušenja. Nakon ovog perioda, sadržaj

vlage u materijalu opada gotovo linearno, odnosno brzina sušenja je konstantna, a sušenje se odvija izotermno (odsečak BC na krivi sušenja). Ovaj period se naziva period konstantne brzine sušenja ili prvi period sušenja. U ovom periodu voda isparava sa površine materijala, a otpor difuziji vlage unutar materijala je zanemarljivo mali u odnosu na otpor koji molekuli vode imaju pri odvajanju od površine materijala. Vlažnost materijala koja odgovara završetku periodu konstantne brzine sušenja naziva se kritičnom vlažnošću materijala (w_{kr}). Daljim sušenjem vlažnog materijala, ispod kritične vlažnosti nastupa drugi period sušenja, odnosno period opadajuće brzine sušenja (odsečak CD na krivi sušenja). U periodu opadajuće brzine sušenja voda isparava i sa površine i u unutrašnjosti materijala, a otpor difuziji vlage unutar materijala mnogo je veći od otpora koji molekuli vode imaju pri odvajanju od površine materijala. Dok u ovom periodu brzina sušenja opada, temperatura materijala neprekidno raste (Prvulović, 2004; Keey, 1992; Antonijević et al., 1992; Fatehi et al., 2014).



Slika 3.4: Kriva sušenja vlažnog materijala sa vremenom
(gore - kriva promene vlažnosti, dole - kriva promene temperature)

Na ovaj način može se opisati proces sušenja svih materijala kod kojih je početni sadržaj vlage veći od kritičnog sadržaja vlage (w_{kr}). Kako je kod poljoprivredne biomase uobičajena vlažnost niža od kritične (osim ako nije sveže pokisla), neće postojati period konstantne brzine sušenja. Period konstantne brzine sušenja se javlja samo u slučaju da je sadržaj vlage dovoljno visok da se na površini materijala može održavati sloj slobodne vode, pa će brzina sušenja u tom slučaju zavisiti samo od spoljašnjih uslova. Čim sadržaj vlage u materijalu bude na kritičnoj vrednosti, brzina sušenja će početi da opada i u potpunosti će zavisiti od brzine kojom se vlaga prenosi iz unutrašnjosti ka slobodnoj površini materijala. Ova brzina je određena jačinom kapilarnih sila unutar materijala i veličinom gradijenta

koncentracije vlage, temperature i pritiska (Kosi et al., 1995; Kosi et al., 1996; Miljković, 2012).

Pri sušenju poljoprivredne biomase, pa i pšenične slame, bez obzira na tačan oblik veze vlage sa materijalom i da li je isparavanje ograničeno spoljašnjim uslovima ili veličinom otpora difuziji vlage unutar materijala kao kod (Di blasi, 2000; Van der Lans et al., 2000), prema Zhou (Zhou et al., 2005; Zhou et al., 2006) intezitet isparavanja može se definisati Clausius–Clapeyron izrazom:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = k_d \cdot S \cdot (C_{w,s} - C_{w,f}) \quad (3.1)$$

gde je:

$r_{\text{H}_2\text{O}}$ - brzina isparavanja vlage specificirana po jedinici zapremine [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$],

k_d - koeficijent prenosa mase [m/s],

S - površina čestice slame specificirana po jedinici zapremine [m^2/m^3],

$C_{w,s}$, $C_{w,f}$ - koncentracija vlage na površini materijala i u okolnom gasu, respektivno [kg/m^3].

Površina čestice slame specificirana po njenoj zapremini izračunava se prema izrazu:

$$S = \frac{2\rho_s r_p}{\rho_{\text{slame}} (r_p^2 - r_{p,\text{in}}^2)} \quad (3.2)$$

gde je:

ρ_s - gustina sloja slame [kg/m^3],

ρ_{slame} - gustina zida slame [kg/m^3],

$\rho_{\text{slame}} = 410$ [kg/m^3],

r_p , $r_{p,\text{in}}$ - spoljašnji i unutrašnji prečnik slamčice slame [m], respektivno.

3.1.2 Devolatilizacija slame

Devolatilizacija ili piroliza je proces termičke dekompozicije, odnosno razlaganja biomase pod uticajem toplote, a u odsustvu oksidatora – kiseonika

(Jenkins, 1999; Reed et al., 1999). Kako se ovaj proces dešava u unutrašnjosti čestica biomase, kiseonik prisutan u gasnom ambijentu oko čestica doveo bi do oksidacije samo površine čestica biomase, bez uticaja na njihovu unutrašnjost. Naravno, uz uslov da se zagrevanje dešava brže nego difuzija kiseonika iz ambijenta u unutrašnjost čestica. Proces devolatilizacije se dešava u širokom opsegu temperatura, počinje sa završetkom sušenja, pa sve do nekih 500°C (Di Blasi et al., 1998; Bassilakis et al., 2001; Bridgwater, 2003; Kaushal et al., 2010). Ovako širok temperaturni raspon ukazuje na postojanje lakše i teže isparljivih materija u biomasi.

Devolatilizacija, kao i sušenje, u procesu sagorevanja učestvuje tako što "troši" deo toplote oslobođene sagorevanjem. Osnovni produkt devolatilizacije biomase, pa tako i pšenične slame, su volatili, koji predstavljaju mešavinu gasova (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_xH_y) i tar-a. Tar je kondenzabilna frakcija organskih jedinjenja sadržanih u volatilima nakon devolatilizacije biomase i uglavnom se sastoji od mešavine lakih i teških aromatičnih ugljovodonika (Zhang et al., 2011). Nakon potpune devolatilizacije biomase ostaje samo čvrsti ostatak – koks (Zhou et al., 2005). Koks se sastoji od čistog ugljenika (tzv. C_{fix}) i mineralnih materija, koje će nakon sagorevanja koksa ostati u vidu pepela. Upravo, reaktivnost koksa neće zavisi samo od osobina biomase i uslova odvijanja devolatilizacije (Okumura et al., 2009), nego i od sadržaja mineralnih materija, naročito kalijuma (Jensen et al., 1998; Zolin et al., 2002).

Sa aspekta kinetike sagorevanja biomase svakako najbitniji podatak je maseni odnos volatila i koksnog ostatka. Kako je kod pšenične slame taj odnos 80% volatila spram 20% koksa (Van der Lans et al, 2000; Pešenjanski, 2002), odnosno vrlo velik u korist volatila, za očekivati je da će pri devolatilizaciji (a potom i sagorevanju volatila) doći do burnih termo-fizičkih reakcija u sloju, kao što su mini eksplozije sa urušavanjem sloja.

Proces devolatilizacije pšenične slame može se opisati jednostepenom reakcijom sledećeg oblika (Zhou et al., 2005):

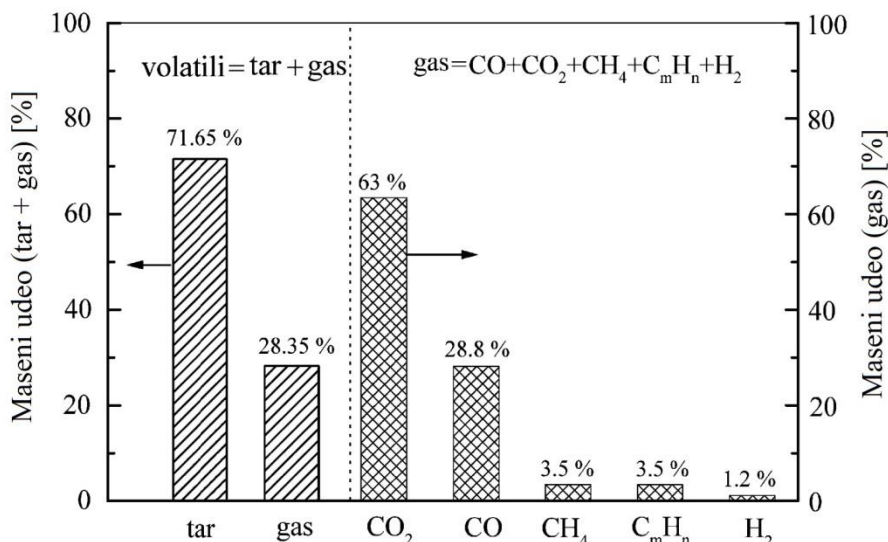
Slama \rightarrow volatili + koks,

Volatili = $\alpha_1 \cdot \text{gas} + \beta_1 \cdot \text{tar}$,

Gas = $\gamma_1 \cdot \text{CO} + \gamma_2 \cdot \text{CO}_2 + \gamma_3 \cdot \text{C}_x\text{H}_y + \gamma_4 \cdot \text{H}_2 + \gamma_5 \cdot \text{CH}_4$

gde su: α_1 , β_1 i γ_i - maseni udeli različitih produkata devolatilizacije [%].

Maseni udeli različitih produkata devolatilizacije slame dati su na slici 3.5 (Zhou et al., 2005).



Slika 3.5: Maseni udeli produkata devolatilizacije slame (na suvoj osnovi) (Zhou et al., 2005)

Brzina devolatilizacije slame definisana je Arrhenius-ovim izrazom za brzinu hemijske reakcije:

$$r_{\text{vol}} = k_{\text{vol}} m_{\text{vol}} \quad (3.3)$$

gde je:

r_{vol} - brzina devolatilizacije slame specificirana po jedinici zapremine [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$],

k_{vol} - konstanta brzine devolatilizacije [s^{-1}], koja se računa po obrascu (Stenseng, 2001):

$$k_{\text{vol}} = 1,56 \cdot 10^{10} \exp\left(\frac{-16600}{T_s}\right) \quad (3.4)$$

m_{vol} - masa volatila preostalih u slami specificirana po jedinici zapremine [kg/m^3],

T_s - Temperatura slame (čvrste faze) [K].

3.1.3 Sagorevanje volatila

Volatili izdvojeni u procesu devolatilizacije pšenične slame gotovo da se mogu posmatrati kao posebno gorivo. Kako se devolatilizacija pšenične slame odvija na temperaturama 250 do 450 °C (Van der Lans et al., 2000; Pešenjanski, 2002), odnosno na temperaturama koje su niže od temperature paljenja praktično svih

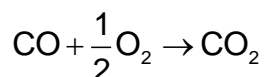
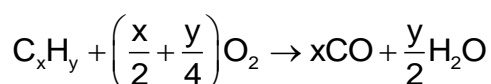
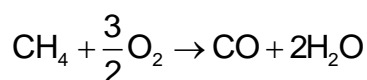
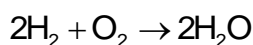
komponentata dobijenih devolatilizacijom, za devolatilizaciju i za zagrevanje izdvojenih volatila do temperature paljenja troši se toplota oslobođena sagorevanjem volatila i koksa. Kada se u ložišnom prostoru dostigne temperatura od oko 500°C (Pešenjanski, 2002) prvo dolazi do paljenja, a potom i sagorevanja, izdvojenih volatila u gasnoj sredini iznad sloja, a zatim i do paljenja i sagorevanja koksa u sloju, slika 3.6. Da bi nakon paljenja izdvojenih volatila došlo do njihovog stabilnog sagorevanja neophodno je ostvariti fluidno polje koje će u fazi paljenja obezbediti dovođenje toplote, a u fazi sagorevanja odvođenje produkata sagorevanja. Naravno, intezitet izdvajanja volatila mora biti ispraćen odgovarajućim dovodom svežeg vazduha, kako bi se moglo ostvariti njihovo sagorevanje. Sagorevanje volatila može se predstaviti kao sagorevanje gasa i tara.



Slika 3.6: Sagorevanje volatila (Drašković et al., 1986)

Sagorevanje gasa

Sagorevanjem gasa, odnosno gasovitih produkata devolatilizacije pšenične slame (H_2 , CH_4 , C_xH_y), dobija se H_2O i CO , a daljom oksidacijom CO nastaje CO_2 . Prema (Zhou et al., 2005; Zhou et al., 2006) ova konverzija može se prikazati sledećim hemijskim reakcijama:



Brzina odvijanja navedenih hemijskih reakcija određena je izrazima 3.5-3.8, respektivno:

$$r_{\text{H}_2} = k_{\text{H}_2} C_{\text{H}_2}^{1,5} C_{\text{O}_2} \quad (3.5)$$

$$r_{\text{CH}_4} = k_{\text{CH}_4} C_{\text{CH}_4}^{0,7} C_{\text{O}_2}^{0,8} \quad (3.6)$$

$$r_{\text{C}_x\text{H}_y} = k_{\text{C}_x\text{H}_y} C_{\text{C}_x\text{H}_y} C_{\text{O}_2} \quad (3.7)$$

$$r_{\text{CO}} = k_{\text{CO}} C_{\text{CO}} C_{\text{O}_2}^{0,5} C_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} \quad (3.8)$$

Dok su konstante brzina date izrazima 3.9-3.12, respektivno:

$$k_{\text{H}_2} = 51,8 \cdot T_f^{1,5} \exp\left(-\frac{3420}{T_f}\right) \quad (3.9)$$

$$k_{\text{CH}_4} = 1,6 \cdot 10^{10} \exp\left(-\frac{24157}{T_f}\right) \quad (3.10)$$

$$k_{\text{C}_x\text{H}_y} = 2,7 \cdot 10^8 \cdot T_f^{0,5} \exp\left(-\frac{20131}{T_f}\right) \quad (3.11)$$

$$k_{\text{CO}} = 3,25 \cdot 10^7 \exp\left(-\frac{15098}{T_f}\right) \quad (3.12)$$

gde je:

r_i - brzina i -te hemijske reakcije [$\text{mol}/\text{m}^3\text{s}$],

k_i - konstanta brzine i -te hemijske reakcije [s^{-1}],

C_i - koncentracije reaktanata i -te hemijske reakcije [mol/m^3],

T_f - temperatura gasa (gasne faze) [K].

Kako u C_xH_y dominira C_2H_6 , u daljem radu će C_xH_y biti zamenjeno sa C_2H_6 .

Sagorevanje tara

Tar je smeša kondenzabilnih ugljovodonika nastalih devolatilizacijom biomase. Količina i sastav tara zavisiće od vrste i fizičkih osobina biomase, kao što su vlaga i veličina delića biomase, kao i od uslova pod kojima se odvija devolatilizacija, pre svega od temperature i brzine zagrevanja. Međutim, prema (Zhou et al., 2005; Zhou et al., 2006) u cilju pojednostavljenja modelovanja sagorevanja tara, tar se može prikazati kao ugljovodonik sa hemijskom formulom $\text{CH}_{1,84}\text{O}_{0,96}$, koji sagoreva prema sledećoj reakciji:



Brzina reakcije sagorevanja tara definisana je izrazom 3.13:

$$r_{\text{tar}} = k_{\text{tar}} C_{\text{CH}_{1,84}\text{O}_{0,96}}^{0,5} C_{\text{O}_2} \quad (3.13)$$

gde je:

r_{tar} - brzina sagorevanja tara [$\text{mol}/\text{m}^3\text{s}$],

k_{tar} - konstanta brzine sagorevanja tara [s^{-1}], koja se računa po obrascu (Bryden et al., 1996):

$$k_{\text{tar}} = 2,9 \cdot 10^5 T_e \exp\left(-\frac{9650}{T_e}\right) \quad (3.14)$$

gde je:

$C_{\text{CH}_{1,84}\text{O}_{0,96}}$ - koncentracija tara u gasu [mol/m^3],

C_{O_2} - koncentracija kiseonika u gasu [mol/m^3],

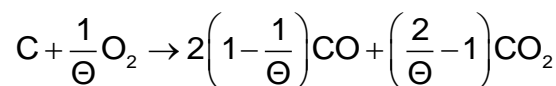
T_e - srednja temperatura [K], gde je: $T_e = \begin{cases} \frac{1}{2}(T_f + T_s), & T_f \leq T_s \\ T_f, & T_f > T_s \end{cases}$

3.1.4 Sagorevanje koksnog ostatka

Kako je već spomenuto, nakon devolatilizacije pšenične slame ostaje samo čvrsti ostatak – koks, koji se sastoji od čistog ugljenika i mineralnih materija, koje će nakon sagorevanja koksa ostati u vidu pepela. Dok se sagorevanje volatila odvija u

celokupnoj zapremini koju zauzimaju reaktanti, sagorevanje koksa je vezano za površinu sloja slame. Ovo implicira da je za sagorevanje koksa potrebno ostvariti stalni dovod vazduha u sloj, odnosno produvavanje sloja, kako bi se omogućila difuzija kiseonika u unutrašnjost čestica slame i istovremeno odvodio ugljen-dioksid u okolni gasni prostor.

Sagorevanjem koksa primarno nastaju CO i CO₂, koji odlaze u gasni prostor iznad sloja gde CO dogoreva u CO₂. Sagorevanje koksa može se prikazati sledećom hemijskom reakcijom:



gde je:

Θ - stehiometrijski odnos pri sagorevanju koksa [-], a izračunava se po obrascu:

$$\Theta = \frac{1 + r_c}{1 + 0,5 \cdot r_c} \quad (3.15)$$

gde je:

r_c - odnos nastalog CO i CO₂ [-], koji se izračunava po obrascu (Pedersen, 2003):

$$r_c = \frac{CO}{CO_2} = 12 \exp\left(-\frac{3300}{T_s}\right) \quad (3.16)$$

Brzina sagorevanja koksa data je izrazom 3.17 (Zhou et al., 2005):

$$r_{koks} = k_{koks} m_{koks} p_{b,O_2} \quad (3.17)$$

gde je:

r_{koks} - brzina sagorevanja koksa [kg/m³s],

m_{koks} - masa preostalog nesagorelog koksa u slami [kg/m³],

p_{b,O_2} - parcijalni pritisak kiseonika u gasu [Pa].

k_{koks} - konstanta brzine sagorevanja koksa [1/s·Pa], koja se računa po izrazu (Zhou et al., 2005):

$$k_{\text{koks}} = \left(\frac{(r_p - r_{p,\text{in}}) \rho_{\text{koks}} R T_s}{\Theta M_{\text{koks}}} \cdot \frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_c} \right)^{-1} \quad (3.18)$$

gde je:

ρ_{koks} - inicijalna gustina koksa u zidu slame [kg/m^3],

$\rho_{\text{koks}} = 57,6$ [kg/m^3],

R - univerzalna gasna konstanta [$\text{J/mol}\cdot\text{K}$],

M_{koks} - molarna masa ugljenika [kg/mol],

k_c - kinetička konstanta sagorevanja [$1/\text{s}\cdot\text{Pa}$], koja se računa po izrazu 3.19 (Zolin et al., 2002):

$$k_c = 8620 \exp\left(-\frac{15900}{T_s}\right) \quad (3.19)$$

3.2 Bilansne jednačine - konzervacija mase i energije

3.2.1 Konzervacija mase za gasnu fazu

Jednačina konzervacije mase za gasnu fazu data je izrazom 3.20:

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon_b)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f v_f)}{\partial x} = r_f \quad (3.20)$$

gde je:

t - vreme [s],

x - vertikalna koordinata, merena od rešetke [m],

ε_b - poroznost sloja [-],

v_f - brzina gasa [m/s],

ρ_f - gustina gasne faze [kg/m^3],

r_f - brzina konverzije čvrste u gasnu fazu usled isparavanja vlage, devolatilizacije slame i sagorevanja koksa, specificirana po jedinici zapremine [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$].

Nakon procesa isparavanja vlage i devolatilizacije, odnosno nakon što sagorivi produkti devolatilizacije dospeju u gasnu fazu, dolazi do homogene hemijske reakcije sagorevanja gasa, tako da gasna faza predstavlja mešavinu vodene pare, produkata devolatilizacije i produkata sagorevanja sagorivih komponenti kako gasne tako i čvrste faze.

Kako je gasna faza višekomponentna, jednačina konzervacije mase može biti napisana za svaku gasnu komponentu pojedinačno, gde je $i = \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2, \text{CH}_4, \text{C}_x\text{H}_y, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2$ i tar:

$$\frac{\partial(\epsilon_b \rho_f Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f v_f Y_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_b D_{a,\text{eff}} \rho_f \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \epsilon_b r_i \quad (3.21)$$

gde je:

Y_i - maseni udeo i -te komponente u gasnoj fazi [-],

r_i - brzina stvaranja i -te komponente usled isparavanja vlage, devolatilizacije slame i sagorevanja volatila i koksa, specificirana po jedinici zapremine [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$].

$D_{a,\text{eff}}$ - koefijent efektivne aksijalne disperzije [m^2/s], i izračunava se prema izrazu (Massman, 1998):

$$D_{a,\text{eff}} = D_i + 0,5 \cdot v_f \cdot d_p \quad (3.22)$$

gde je:

D_i - koeficijent molekularne difuzije i -te komponente [m^2/s],

d_p - spoljašnji prečnik slamčice slame [m],

$$d_p = 2 \cdot r_p = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

$d_{p,\text{in}}$ - unutrašnji prečnik slamčice slame [m],

$$d_{p,\text{in}} = 2 \cdot r_{p,\text{in}} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

3.2.2 Konzervacija mase za čvrstu fazu

Jednačina konzervacije mase za čvrstu fazu data je izrazom 3.23:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = -r_f \quad (3.23)$$

gde je:

ρ_s - gustina sloja slame [kg/m^3].

3.2.3 Konzervacija energije za gasnu fazu

Jednačina konzervacije energije za gasnu fazu data je izrazom 3.24:

$$\frac{\partial(\epsilon_b \rho_f h_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f v_f h_f)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_b k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \alpha S (T_s - T_f) + Q_f - Q_{lf} \quad (3.24)$$

gde je:

h_f - entalpija gasne faze [J/kg], koja se izračunava izrazom 3.25:

$$h_f = \int C_{pf} dT_f \quad (3.25)$$

C_{pf} - specifična toplota gasne faze [J/molK], koja se računa po obrascu (Purnomo et al., 1990):

$$C_{pf} = (0,99 + 1,22 \cdot 10^{-4} T_f - 5,68 \cdot 10^{-3} T_f^{-2}) \cdot 10^3 \quad (3.26)$$

k_f - toplotna provodljivost gasne faze [W/mK], koja se računa po obrascu (Purnomo et al., 1990):

$$k_f = 4,8 \cdot 10^4 T_f^{0,717} \quad (3.27)$$

α - koeficijent prelaza toplote [$\text{W/m}^2\text{K}$],

Q_f - dobitak toplote usled sagorevanja gasne faze [W/m^3],

Q_{lf} - gubitak toplote usled kondukcije kroz zid reaktora [W/m^3] koja se dobija izrazom 3.28:

$$Q_{lf} = \frac{2\pi k \epsilon_b (T_s - T_a)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.28)$$

gde je:

k - koeficijent prolaza toplote [W/m^2K],

$k = 0,18 W/m^2K$,

T_a - temperatura okoline [K],

$T_a = 293 K$,

$r_{2(1)}$ - spoljašnji (unutrašnji) poluprečnik reaktora [m],

$r_2/r_1 = 1,1$.

3.2.4 Konzervacija energije za čvrstu fazu

Jednačina konzervacije energije za čvrstu fazu data je izrazom 3.29:

$$\frac{\partial(\rho_s h_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \alpha S (T_f - T_s) + Q_s - Q_{H_2O} - Q_{ls} \quad (3.29)$$

gde je:

h_s - entalpija čvrste faze (sloja) [J/kg], koja se računa po obrascu 3.30:

$$h_s = \int C_{ps} dT_s \quad (3.30)$$

C_{ps} - specifična toplota čvrste faze [J/molK], koja se računa po obrascu (Pedersen, 1998):

$$C_{ps} = 977,75 \ln(T_s) - 4114,4 \quad (3.31)$$

k_{eff} - Efektivna toplotna provodljivost čvrste faze (sloja) [W/mK],

Q_s - dobitak toplote usled sagorevanja koksa [W/m^3],

Q_{H_2O} - gubitak toplote usled isparavanja vlage [W/m^3],

Q_{ls} - gubitak toplote usled kondukcije kroz zid reaktora [W/m^3], gde je:

$$Q_{ls} = \frac{2\pi k(1-\varepsilon_b)(T_s - T_a)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.32)$$

Efektivna toplotna provodljivost čvrste faze može se dobiti izrazom (Fjellerup et al., 2003):

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{eff},0} + \frac{0,5k_f \text{PrRe}}{\varepsilon_b} \quad (3.33)$$

gde je:

Pr - Prandt-lov broj [-], gde je: $Pr = 0,7$,

Re - Reynolds-ov broj [-], koji se računa po izrazu 3.34:

$$\text{Re} = \frac{\rho_f v_f d_p}{\mu_f} \quad (3.34)$$

gde je

μ_f - dinamička viskoznost [Pa·s], koja se računa po izrazu 3.35:

$$\mu_f = 1,98 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T_f}{300}\right)^{2/3} \quad (3.35)$$

$k_{\text{eff},0}$ - efektivna toplotna provodljivost nepokretne čvrste faze (sloja) [W/mK],

koja se računa po izrazu 3.36:

$$k_{\text{eff},0} = \varepsilon_b (k_f + h_{rv} \Delta l) + \frac{(1-\varepsilon_b) \Delta l}{\frac{1}{\frac{k_f}{l_f} + h_{rs}} + \frac{l_s}{k_s}} \quad (3.36)$$

gde je:

h_{rv} - koeficijent efektivnog prenosa toplote zračenjem šupljina [W/m²K],

$$h_{rv} = 0,1952 \left(1 + \frac{\varepsilon_b(1-\zeta)}{2(1-\varepsilon_b)\zeta}\right)^{-1} \left(\frac{T_s}{100}\right)^n \quad (3.37)$$

h_{rs} - konvektivni koeficijent prenosa toplote zračenjem [W/m²K],

$$h_{rs} = 0,1952 \left(\frac{\zeta}{2-\zeta} \right) \left(\frac{T_s}{100} \right)^n \quad (3.38)$$

Δl - karakteristična razdaljina između dve čestice [m],

$$\Delta l = 0,96795 d_p (1 - \epsilon_b)^{-1/3} \quad (3.39)$$

l_f - ekvivalentna debljina gasne faze (ima isti toplotni otpor kao sloj fluidnog filma) [m],

$$l_f = 0,15912 \Delta l \left(\frac{k_f}{k_{vazd}} \right)^{0,3716} \epsilon_b^{1,7304} \quad (3.40)$$

l_s - ekvivalentna debljina čvrste faze (ima isti toplotni otpor kao sfera prečnika d_p) [m],

$$l_s = \frac{2}{3} d_p \quad (3.41)$$

k_s - toplotna provodljivost čiste čvrste materije (zida slame) [W/mK],

$$k_s = 0,05 \text{ W/mK},$$

gde je:

ζ - emisivnost [-],

$\zeta = 0,9$ (za koks pšenične slame),

k_{vazd} - toplotna provodljivost vazduha [W/mK], koja se računa po obrascu (Flamant eta al., 1993):

$$k_{vazd}(T_f) = 5,66 \cdot 10^{-5} T_f + 1,1 \cdot 10^{-2} \quad (3.42)$$

n - empirijski koeficijent koji zavisi od sabijenosti sloja ($n = 1$ za fluidizovani sloj, $n = 3$ za jako sabijen sloj) [-], koji se računa po izrazu 3.43:

$$n = 1,93 + 0,67 \exp \left(\frac{-(\dot{m}_{vazd} - 0,39)}{0,054} \right) \quad (3.42)$$

gde je:

\dot{m}_{vazd} - maseni protok primarnog vazduha [$\text{kg/m}^2\text{s}$].

Navedenim sistemom jednačina zaokruženo je definisanje matematičke formulacije modela sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju.

3.3 Numerički postupak rešavanja jednačina modela

Postavljen matematički model procesa sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju, podrazumeva, pored fizičko-hemijskog opisa i matematičku formulaciju svih subprocesa pri procesu sagorevanja. Kako se ovako postavljen sistem sastoji od velikog broja međusobno spregnutih parcijalnih diferencijalnih jednačina, nemoguće ga je analitički rešavati, te se isti mora numerički rešavati. Primenom metode konačnih zapremina, kao jedne od najčeće korišćenih inženjerskih metoda pri rešavanju problema prenosa mase i energije (Patankar, 1980), uz poznate početne i granične uslove, dobijaju se podaci o brzini sagorevanja, temperaturskom i koncentracionom polju pojedinih gasova u sloju. Na taj način moguće je analizirati individualne procese sušenja, devolatilizacije (endotermne reakcije pirolize izvornog materijala) i sagorevanja (egzotermne reakcije oksidacije produkata devolatilizacije). Takođe, ovaj postupak podrazumeva homogenizaciju sloja, odnosno preslikavanje makroskopskih osobina materije sloja na izabranu kontrolnu zapreminu. Kontrolna zapremina sa jedne strane mora biti dovoljno mala da bi se određivane veličine mogle smatrati prosečnim za celu kontrolnu zapreminu, a sa druge dovoljno velika da bi se porozna materija mogla smatrati kontinuumom. U cilju brzog dobijanja rešenja, ali i ostvarivanja dovoljne tačnosti, vremenski i prostorni korak iznose 1 s, odnosno 1 mm, respektivno. Takođe, da bi postavljeni matematički model bio jednoznačno određen potrebno je definisati i početne i granične uslove.

3.3.1 Metoda konačnih zapremina

Metoda konačnih zapremina podrazumeva da je proračunski domen (kontrolna zapremina) podeljen na konačan broj subdomena, odnosno ćelija (manje kontrolne zapremine). Jednačine konzervacije važe kako za čitav proračunski domen, tako i za svaku ćeliju pojedinačno. U centru svake ćelije nalazi se čvor (proračunska tačka) za koji se izračunavaju vrednosti varijabli. Da bi se dobilo ovo diskretno rešenje potrebno je diferencijalne jednačine modela, koje se mogu predstaviti opštom jednačinom (3.43), svesti na sistem linearnih algebarskih jednačina.

$$\operatorname{div}(\rho v \phi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\phi} \operatorname{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (3.43)$$

gde je:

ρ - gustina [kg/m^3],

v - vektor brzine [m/s],

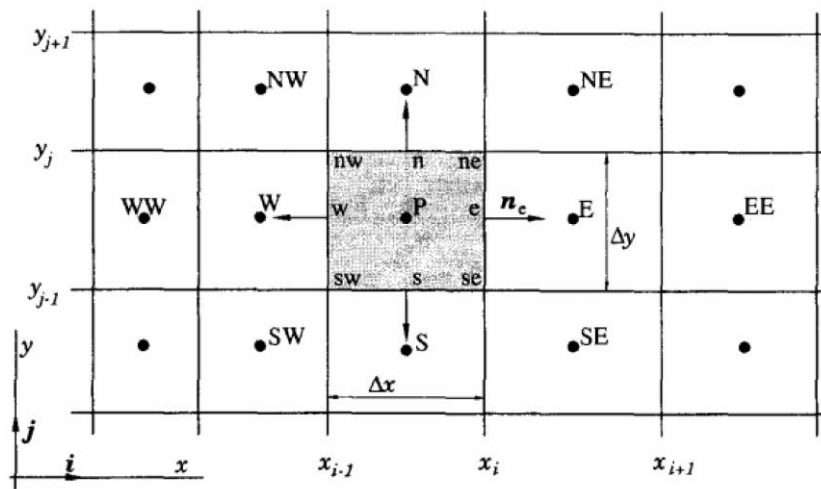
ϕ - varijabla (fizička veličina koja se bilansira),

Γ_ϕ - koeficijent difuzije [m^2/s],

$\text{grad}\phi$ - gradijent varijable,

S_ϕ - izvorni član varijable.

Da bi se dobila algebarska jednačina za pojedinačnu ćeliju, potrebno je izvršiti, kao što je već rečeno, diskretizaciju proračunskog domena. Diskretizacija dvodimenzionog domena u okolini proizvoljne proračunske tačke P prikazana je na slici 3.7. Čvor posmatrane ćelije označen je sa P, a čvorovi susednih ćelija sa N, E, S, W (od engl. North, East, South, West).



Slika 3.7: Primer 2D kontrolne zapremine (Ferziger et al., 2008)

Površina ćelije je ograničena sa četiri stranice označene slovima: n, e, s, w; dok se proračunska tačka P nalazi u centru ćelije. Sada se ukupan protok varijable (konvektivni i difuzioni) kroz granice ćelije može zapisati kao suma protoka kroz sve četiri stranice:

$$\int_A f dA = \sum_k \int_{A_k} f dA \quad (3.44)$$

gde je sa f označen i konvektivni i difuzioni fluks varijable kroz stranice ćelije, oba u smeru normale na stranicu ćelije. Bitno je napomenuti da se ćelije ne smeju preklapati, tj. da svake dve susedne ćelije imaju samo jednu zajedničku stranicu koja ih deli.

Za izračunavanje površinskog integrala iz izraza 3.44 potrebno je poznavati vrednost podintegralne funkcije f za čitavu površinu A . Međutim, ta informacija nam nije poznata jer se izračunavaju samo vrednosti u čvorovima ćelija, te je neophodno da se uvede aproksimacija, koja podrazumeva da se integral aproksimira vrednostima sastavljenim od vrednosti varijabli sa jedne ili više lokacija na stranicama ćelija, a vrednosti na stranicama ćelija se određuju preko vrednosti u susednim čvorovima.

Najjednostavnija aproksimacija je po pravilu srednje tačke, gde se integral aproksimira proizvodom podintegralne funkcije u centru stranice i površine stranice ćelije, prema izrazu 3.45:

$$F_e = \int_{A_e} f dA = \bar{f}_e A_e \approx f_e A_e \quad (3.45)$$

Ovakva aproksimacija je drugog reda tačnosti i zahteva poznavanje vrednosti podintegralne funkcije na lokaciji "e" (e - istočna stranica ćelije). Međutim, kako nije poznata njena vrednost na lokaciji "e", potrebno ju je dobiti interpolacijom. Da bi se pri tome zadržala tačnost drugog reda, vrednost f_e se mora računati metodom koja je takođe najmanje drugog reda tačnosti. U tom smislu može se primeniti pravilo trapeza dato izrazom 3.46:

$$F_e = \int_{A_e} f dA \approx \frac{A_e}{2} (f_{ne} + f_{se}) \quad (3.46)$$

Uz napomenu da je u ovom slučaju potrebno izraziti fluks u uglovima ćelija ("ne" i "se").

Metoda konačnih zapremina je u inženjerskoj praksi verovatno najčešće korišćena numerička metoda, kako zbog svoje najjednostavnosti za razumevanje (jer svi izrazi koje je potrebno aproksimirati imaju fizičko značenje), tako i za programiranje.

3.3.2 Početni uslovi

Kao što je opisano u poglavlju 4.3, proces sagorevanja je iniciran zagrevanjem električnog grejača, postavljenog neposredno iznad sloja. Dakle, na površini sloja temperatura (i gasne i čvrste faze) je setovana na 773 K i traje 2 s, dok je u ostatku sloja temperatura 293 K. Gustina i sastav gasne faze odgovaraju karakteristikama vazduha na standardnim uslovima.

3.3.3 Granični uslovi

Za gasnu fazu sloja:

Brzina i temperatura primarnog vazduha na rešetki (dno sloja) definisani su izabranim režimom rada, dok su na površini sloja gradijenti koncentracije, temperature i brzine gasova jednaki nuli.

Za čvrstu fazu sloja:

Dok je temperatura čvrste faze sloja na rešetki, usled intezivne razmene toplote čvrste i gasne faze, izjednačena sa temperaturom primarnog vazduha, na površini sloja gradijent temperature čvrste faze sloja takođe je jednak nuli.

4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE SAGOREVANJA PŠENIČNE SLAME U NEPOKRETNOM SLOJU

U Srbiji su prisutne sve navedene tehnologije sagorevanja biomase, osim sagorevanja u CFS. Međutim, uglavnom se koriste zastarela tehnološka rešenja, bez automatske regulacije procesa, što ima negativnih implikacija i sa aspekta energetske efikasnosti i sa aspekta emisije zagađujućih materija.

Štednjaci, kotlovi za etažno grejanje i drugi uređaji domaće proizvodnje, koji se koriste u domaćinstvima imaju nažalost niz ozbiljnih nedostataka. To se pre svega odnosi na nizak stepen korisnosti, koji kod štednjaka retko prelazi 50%, a kod kotlova 60%, dok je u razvijenim evropskim zemljama veći od 70%, odnosno 80% (Ilić et al., 2003; Dedović et al., 2012; Janić et al., 2015). Konstruktivna rešenja ovih uređaja i nisu specijalno namenjena za sagorevanje biomase, nego su to rešenja koja proizvođači nude za sva čvrsta goriva, a zapravo su pogodnija za sagorevanje uglja nego biomase. Kako u biomasi ima daleko više volatila nego u uglju, ložišni prostor ovih uređaja je mali i nedovoljan za njihovo sagorevanje, a osim toga, u njemu često nema uopšte ili nema dovoljno šamotnih opeka, koje su takođe neophodne za pravilno dogorevanje volatila. Posledica ovakve konstrukcije su, kao što je već rečeno, mala efikasnost sagorevanja i visoka emisija zagađujućih materija, pre svega ugljen-monoksida i aromatičnih ugljovodonika.

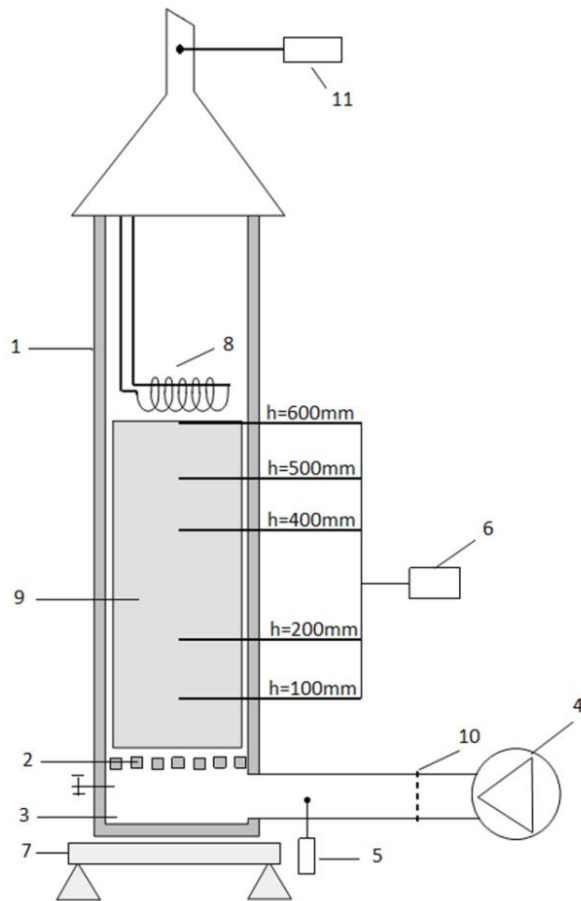
Za optimalnu konstrukciju uređaja za sagorevanje biomase neophodni su detaljni podaci o procesu sagorevanja, kao i uticaj različitih radnih parametara na sam proces sagorevanja. Kako je već spomenuto, u prošlosti se razvoj ovih uređaja zasnivao na iskustvu, na merenjima dobijenim u realnim postrojenjima i na merenjima dobijenim u eksperimentalnim postrojenjima. Međutim, ovakav način razvoja uređaja je bio ograničen primenljivošću dobijenih podataka na drugu vrstu uređaja u odnosu na ona na kojima su vršena merenja, tako da je bilo teško načiniti bitne izmene u konstruktivnim parametrima uređaja.

Osim toga, kod realnih postrojenja su detaljna merenja temperature u sloju, protoka i koncentracije pojedinih gasnih komponenti teško izvodljiva i skupa. Iz tih razloga je praćenje procesa sagorevanja obično ograničeno samo na merenje temperature i sastava produkata sagorevanja. Čak je i generalna ocena performansi postrojenja za sagorevanje pri različitim radnim uslovima zahtevna i dugotrajna. Dok sa druge strane, merenja na laboratorijskim postrojenjima obezbeđuju vrlo korisne podatke o specifičnostima procesa sagorevanja pri različitim radnim uslovima.

4.1 Opis laboratorijskog postrojenja

Laboratorijsko postrojenje prikazano na slici 4.1 je uređaj namenjen za eksperimentalno ispitivanje procesa sagorevanja u nepokretnom sloju različitih vrsta poljoprivredne biomase. Rezultati i zaključci dobijeni ovim ispitivanjima predstavljaju bitan korak za unapređenje i razvoj pri projektovanju novih, kao i rekonstrukciju starih uređaja za sagorevanje. Merenjem promene mase sloja, sastava produkata sagorevanja i temperature sloja tokom procesa sagorevanja, moguće je direktno praćenje različitih procesa u sloju, kao i određivanje brzine sagorevanja pri različitim uslovima sagorevanja (brzina vazduha kojim se sloj produvava, gustina sloja, itd.), a samim tim i određivanje uticaja različitih radnih parametara na proces sagorevanja, što je inače veoma teško izvodljivo u realnom postrojenju.

Laboratorijsko postrojenje opisano u radu (Čepić et al., 2013) sastoji se od vertikalnog cilindričnog reaktora (1), visine 1080 mm, sa unutrašnjim prečnikom od 230 mm. Zid reaktora je od lima prokronskog čelika debljine 2 mm. Kako bi se toplotni gubici po poprečnom preseku sloja sveli na minimum oko reaktora je postavljena kamena vuna debljine 50 mm, fiksirana limenom oplatom. Na dnu reaktora nalazi se čelična rešetka (2) kroz koju se ventilatorom (4) dovodi vazduh potreban za sagorevanje u reaktoru. Regulacija broja obrtaja ventilatora vrši se preko regulacionog transformatora. Za merenje brzine vazduha za sagorevanje korišćena su dva tipa anemometara (5). Za iniciranje procesa sagorevanja korišćen je električni grejač (8) koji se postavlja neposredno iznad sloja. Za merenje temperature u sloju kroz male otvore na reaktoru upušteni su termoparovi povezani sa data loggerom (6) i računarom. Sonda gasnog analizatora (11) kojim je vršeno kontinualno merenje koncentracije produkata sagorevanja postavljena je u dimnjaku postrojenja 2080 mm iznad rešetke. U cilju merenje promene mase tokom sagorevanja celokupna aparatura postavljena je na industrijsku vagu (7).



Slika 4.1: Šematski i fotografski prikaz eksperimentalnog postrojenja

1-reaktor, 2-rešetka, 3-pepeljara, 4-ventilator, 5-anemometar, 6-termoparovi sa data loggerom, 7-vaga, 8-električni grejač, 9-biomasa, 10-laminator, 11-gasni analizator.



Slika 4.2: Merenje gasova na postrojenju

4.2 Opis opreme korišćene u eksperimentu

Specifikacija opreme korišćene u eksperimentu data je u tabeli 4.1.

Tabela 4.1: Specifikacija opreme korišćene u eksperimentu

Data logger (4-kanalni)	
Proizvođač	Testo, Nemačka
Model	177-T4
Mereni parametar	Temperatura (°C/°F)
Senzor	Tip: K, T, J
Opseg merenja (za tip K)	– 200 do +1370°C
Greška merenja (za opseg od 70 - 1000 °C)	±0,5%
Rezolucija merenja	0,1°C

Slika 4.3: Data logger Testo 177-T4



Data logger (3-kanalni)


Proizvođač	Testo, Nemačka
Model	735-2
Mereni parametar	Temperatura (°C/°F)
Senzor	Tip: Pt100, K, T, J, S
Opseg merenja (za tip K)	- 200 do +1370 °C
Greška merenja (za opseg od 70°C pa naviše)	±(0,2°C + 0,3% izmerene vred.)
Rezolucija merenja	0,1°C



Slika 4.4: Data logger Testo 735-2




Termopar (merni vrh)

Proizvođač	Testo, Nemačka
Model	0602 5693
Mereni parametar	Temperatura

Senzor	Tip K (merni vrh)
Opseg merenja	– 200 do +1300 °C
Dimenzije	L=1000mm, fi=3mm
Klasa tačnosti	Klasa 1
Slika 4.5: Termopar Testo 0602 5693	
Anemometar (sa toplom žicom)	
Proizvođač	Testo, Nemačka
Model	425
Mereni parametar 1	Brzina gasa (m/s)
Mereni parametar 2	Temperatura (°C/°F)
Opseg merenja (mereni parametar 1)	0 do +20 m/s
Opseg merenja (mereni parametar 2)	– 20 do +70 °C
Greška merenja (mereni parametar 1)	±0,03 m/s + 5% od izm.vred.
Greška merenja (mereni parametar 2)	±0,5 °C
Rezolucija merenja (mereni parametar 1)	0,01 m/s
Rezolucija merenja (mereni parametar 2)	0,1 °C
Merna sonda	Teleskopska, max 820 x fi7,5 mm

Slika 4.6: Anemometar Testo 425	
Anemometar (lopaticni)	
Proizvođač	Testo, Nemačka
Model	416
Mereni parametar	Brzina gasa (m/s)
Opseg merenja	+0.6 do +40 m/s
Greška merenja	±0.2 m/s +1.5% od izm.vred.
Rezolucija merenja	0,1 m/s
Merna sonda	Teleskopska, max 890 x fi16 mm
Slika 4.7: Anemometar Testo 416	
Gasni analizator	
Proizvođač	Protea Ltd, Velika Britanija
Model	ProtIR 204M
Tehnologija rada	FTIR
Rezolucija	1 cm ⁻¹ (standard)
Spektralni opseg	700 – 5000 cm ⁻¹

Sočivo	ZnSe
Laser	HeNe
Broj gasova koje je moguće detektovati	29
Slika 4.8: Gasni analizator ProtIR 204M	
Električni grejač	
Poizvođač	Elektrorad, Srbija
Tip	Spiralni, ručno pravljen
Snaga	2 kW
Slika 4.9: Električni grejač Elektrorad	
Regulacioni transformator	
Proizvođač	Iskra-Elektronika, Slovenija
Tip	HSN 0200
Primar	220 V / 50 Hz
Sekundar	270 Vmax / 7 Amax

Slika 4.10: Regulatorni transformator Iskra	
Vaga za postrojenje	
Proizvođač	Shollex, Srbija
Model	SHYH
Merni kapacitet	150 kg
Rezolucija merenja	50 g
Dimenzija platforme	600 x 600mm
Slika 4.11: Vaga Shollex SHYH	
Vaga za odmeravanje slame	
Proizvođač	Gorenje
Model	KT05
Merni kapacitet	5 kg
Rezolucija merenja	5 g

Slika 4.12: Vaga Gorenje KT05



4.3 Opis pripreme uzorka i postupka izvođenja eksperimenta

U eksperimentu je korišćena pšenična slama domaće sorte pšenice. Nakon žetve slama je odležala još oko nedelju dana na njivi, po suncu i visokim temperaturama, bez izlaganja kiši ili drugim nepovoljnim klimatskim uticajima, a potom je balirana u formu standardnih bala dimenzije 0.4 x 0.5 x 1 m, prosečne mase 10-12 kg, odnosno gustine 50-60 kg/m³, te nije došlo do mrvljenja ili gnječenja slame. Takođe, i u eksperimentu je slama korišćena bez bilo kakve prethodne pripreme (sečenje ili valjanje). Tehnička i elementarna analiza pšenične slame data je u tabeli 4.2.

Tabela 4.2: Tehnička i elementarna analiza pšenične slame

Vlaga [% _{wt}] 9,3	Volatili [% _{wt}] 71,7	C _{fix} [% _{wt}] 9,8	Pepeo [% _{wt}] 9,2	Hd* (MJ) 16,7
Ugljenik [% _{wt}] 44	Vodonik [% _{wt}] 5,9	Kiseonik [% _{wt}] 40	Azot [% _{wt}] 0,67	Sumpor [% _{wt}] 0,14

* izraženo na suhu osnovu

Reaktor se puni do visine od 600 mm, mereno od rešetke, slamom odvađenom iz bale. Posebna pažnja posvećena je postizanju ujednačene gustine sloja u reaktoru. Za iniciranje procesa sagorevanja korišćen je električni grejač postavljen 5 mm iznad sloja. Kada se slama zapali grejač se isključuje, a uključuje se ventilator i počinje dovod vazduha za sagorevanje, produvanjem sloja kroz rešetku. Sa promenom broja obrtaja ventilatora moguće je postići različite uslove reakcija sagorevanja i/ili pirolize. Eksperimenti su realizovani pri kombinaciji četiri gustine sloja i četiri brzine produvanja sloja (tabela 4.3). Postavljanjem pet termoparova po vertikalnoj osi cilindra, na 100, 200, 400, 500 i 600 mm mereno od rešetke, omogućeno je direktno praćenje promene temperature u sloju, ali i određivanje brzine fronta sagorevanja, odnosno posredno određivanje promene mase uzorka usled kretanja fronta sagorevanja. Takođe, postavljanjem celokupne aparature na

vagu omogućeno je direktno merenje promene mase uzorka tokom vremena, što omogućava i neposredno određivanje brzine sagorevanja.

Tabela 4.3: Režimi eksperimentalnih ispitivanja

Masa slame [kg]	Gustina sloja [kg/m ³]	Protok vazduha		Režim
		[m/s]	[kg/m ² h]	
1	40	0.13	565	PS40/565
		0.26	1112	PS40/1112
		0.30	1306	PS40/1306
		0.43	1853	PS40/1853
1.25	50	0.13	565	PS50/565
		0.26	1112	PS50/1112
		0.30	1306	PS50/1306
		0.43	1853	PS50/1853
1.50	60	0.13	565	PS60/565
		0.26	1112	PS60/1112
		0.30	1306	PS60/1306
		0.43	1853	PS60/1853
1.75	70	0.13	565	PS70/565
		0.26	1112	PS70/1112
		0.30	1306	PS70/1306
		0.43	1853	PS70/1853
Sa merenjem gasova				
1.50	60	0.27	1152	PSG60/1152
		0.31	1332	PSG60/1332
		0.43	1872	PSG60/1872

5. RUZULTATI I DISKUSIJA

Kao što je već navedeno, proces sagorevanja slame može se podeliti u četiri uzastopna (ili delimično preklapajuća) subprocesa: sušenje, devolatilizacija, sagorevanje volatila i sagorevanje koksa. Dakle, kada se površina sloja slame zapali, front sagorevanja počinje da se kreće kroz sloj vertikalno naniže, označavajući time početak faze paljenja svežeg goriva. Toplota koja se oslobađa u frontu sagorevanja prenosi se na svežu slamu, što dovodi do njenog sušenja i devolatilizacije. Međutim, kako front sagorevanja i vazduh za sagorevanje imaju suprotnosmerne tokove, ova toplota se ne prenosi duboko u sloj, već naprotiv tokom cele faze paljenja ostaje u vrlo uskim granicama (Porteiro et al., 2012; Čepić et al., 2017b). Osim toga, kako je heterogena reakcija sagorevanja koksa znatno sporija od homogene reakcije sagorevanja volatila, dovedena količina vazduha za sagorevanje određuje kojim intezitetom će nakon sagorevanja volatila, sagorevati koks koji ostaje nakon prolaska fronta sagorevanja kroz sloj. Iz tog razloga se tokom faze paljenja, zone sušenja, devolatilizacije, sagorevanja volatila i sagorevanja koksa ređaju sukcesivno, gledano od rešetke ka vrhu sloja (Slika 3.3), iako se ovi subprocesi praktično istovremeno odvijaju. Kada front sagorevanja dotakne rešetku za sagorevanje, faza paljenja je završena, i sve do kraja procesa sagorevanja je faza sagorevanja nesagorelog koksa.

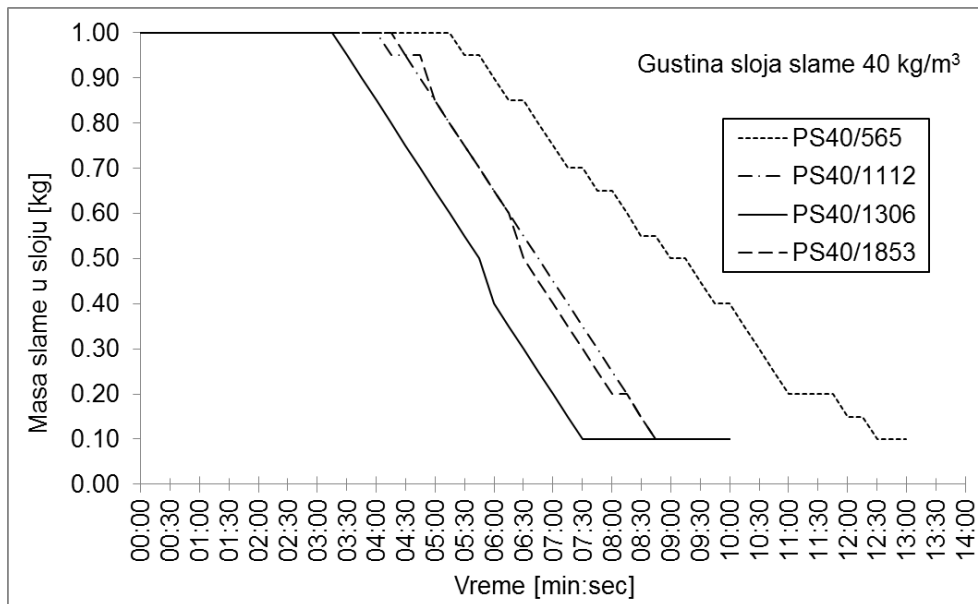
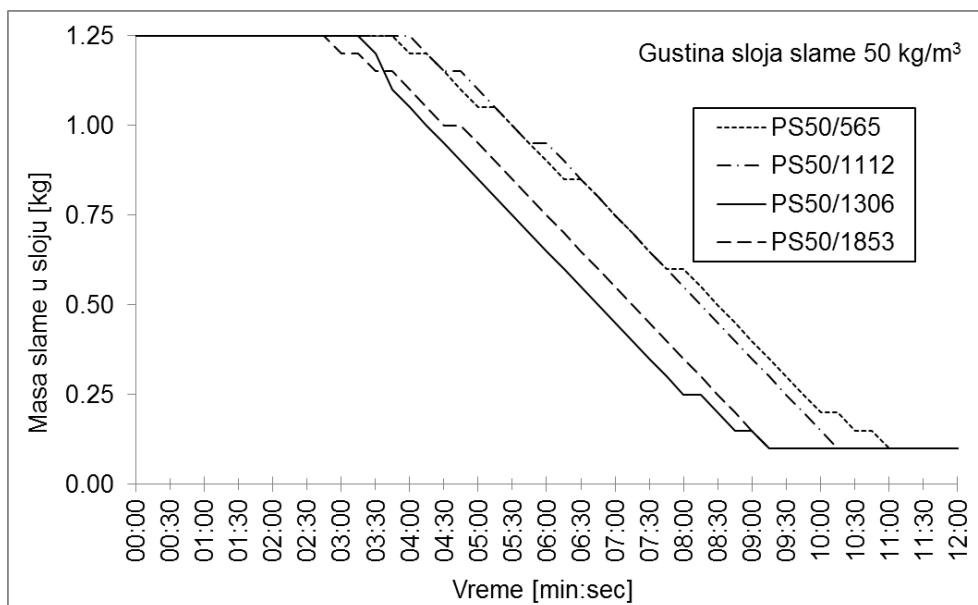
5.1 Brzina sagorevanja

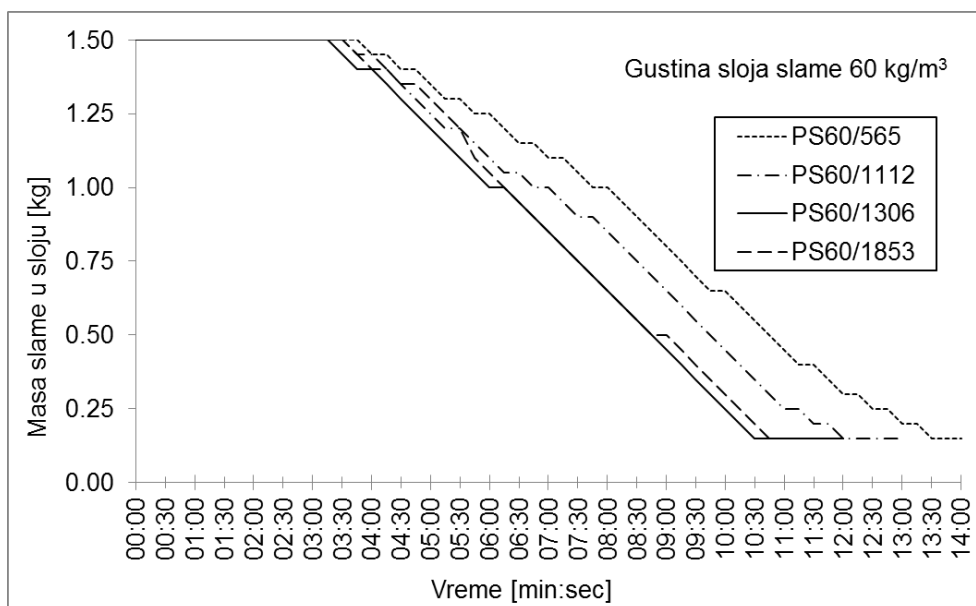
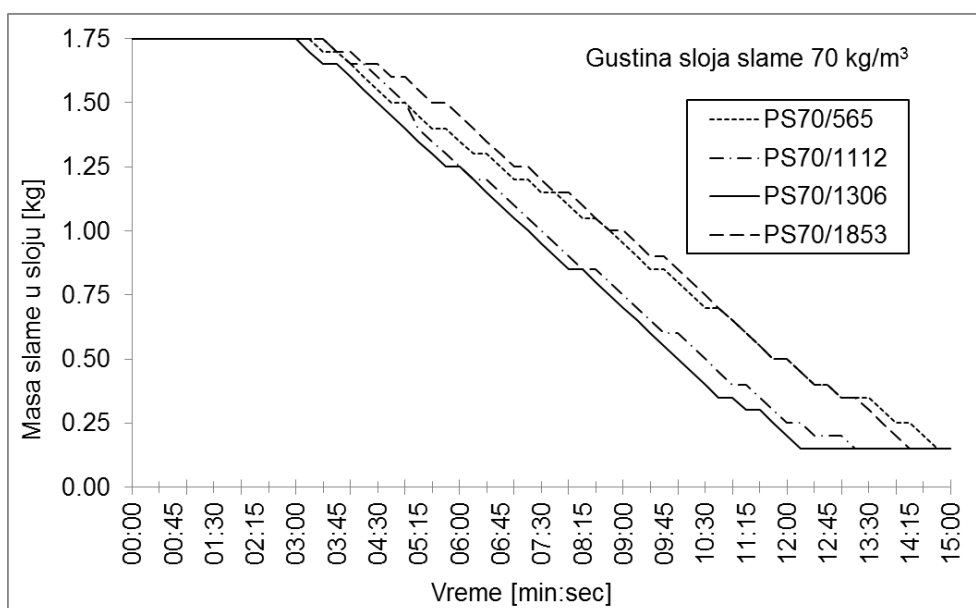
Za kvantitativno izražavanje napredovanja procesa sagorevanja slame u nepokretnom sloju, najčešće se koriste dva parametra: brzina paljenja i brzina sagorevanja. Brzina sagorevanja [$\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$] definisana je kao promena, odnosno smanjenje, mase slame tokom vremena, specificirana po površini poprečnog preseka sloja. Brzina sagorevanja određuje se direktno, in-situ merenjem mase slame na vagi tokom trajanja sagorevanja. Brzina paljenja [$\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$], iako ima istu jedinicu kao i brzina sagorevanja, određuje se na potpuno drugačiji način. Brzina paljenja određuje se indirektno, množenjem brzine fronta sagorevanja sa gustinom sloja. Odavde je jasno da brzina paljenja predstavlja onu masu slame (opet specificiranu po površini poprečnog preseka sloja) kroz koju je front sagorevanja prošao, devolatizovao je i zapalio. Naravno za određivanje, brzine paljenja neophodno je znati brzinu kretanja fronta sagorevanja, koja se određuje kao količnik rastojanja između termoparova i vremena kretanja fronta sagorevanja od termopara

do termopara (Khodaei et al., 2015; Porteiro et al., 2010a; Porteiro et al., 2010b; Khor et al., 2007; Ryu et al., 2007; Ryu et al., 2006; Zhao et al., 2008).

Kako slama pre sagorevanja mora biti devolatizovana, brzina paljenja je uvek veća od brzine sagorevanja. Razlika između ove dve vrednosti predstavlja masu koja je ostala nakon prolaska fronta sagorevanja, a koja je pretežno koks i eventualno nepotpuno devolatizovana slama. Kako će ovaj ostatak, koji ostaje da dogori u fazi sagorevanja koksa, imati malu brzinu sagorevanja poželjno je minimalizovati trajanje faze sagorevanja koksa, odnosno voditi sagorevanje tako da se faze paljenja i sagorevanja koksa odvijaju gotovo simultano. Razlika između brzine paljenja i brzine sagorevanja, postaje sve izraženija sa smanjenjem protoka vazduha, jer se pri nedovoljnoj količini vazduha za potpuno sagorevanje, sva količina dovedenog vazduha prvenstveno troši na sagorevanje volatila te je brzina paljenja značajno viša od brzine sagorevanja, što za posledicu ima neustaljeno sagorevanje i kako je već objašnjeno, veliku količinu koksa koja ostaje da sagori u fazi sagorevanja koksa. Treba naglasiti da je brzina sagorevanja, u odnosu na brzinu paljenja, znatno važniji parametar u ocenjivanju kvaliteta sagorevanja, jer kako je gore objašnjeno, ona je objektivni pokazatelj koja je masa slame sagorela u jedinici vremena. (Khodaei et al., 2015; Khor et al., 2007; Porteiro et al., 2012; Ryu et al., 2006; Zhao et al., 2008).

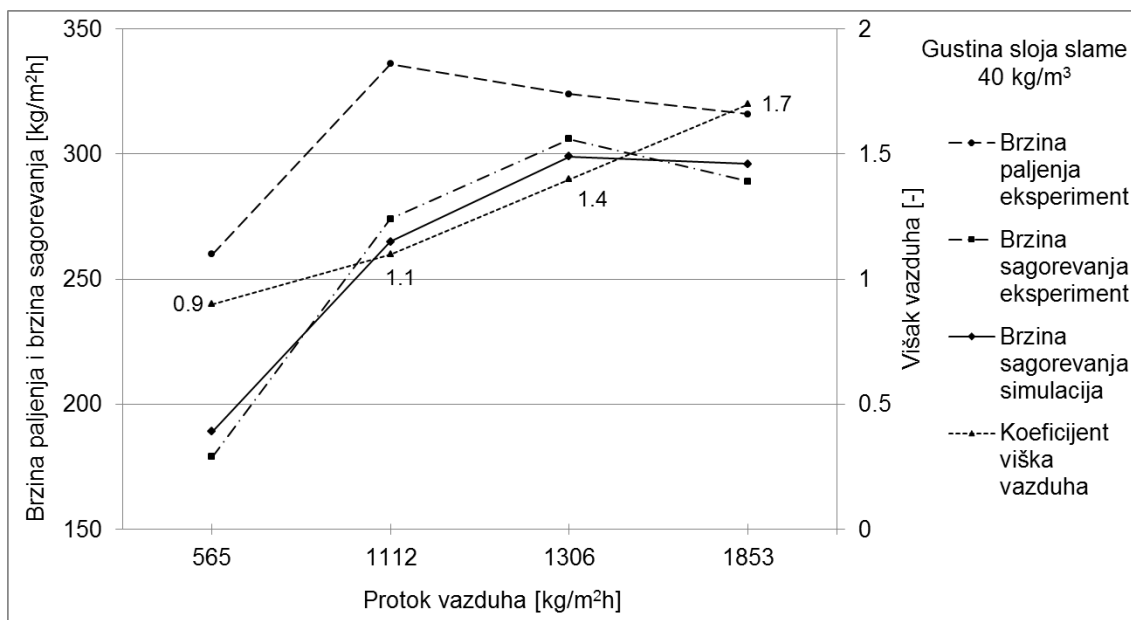
Na slikama 5.1-5.4 prikazana je eksperimentalno dobijena brzina sagorevanja, za četiri gustine sloja i četiri protoka vazduha. Uočljivo je da režimi PS40/1306, PS50/1306, PS60/1306, PS70/1306 (videti tabelu 4.3), imaju tokom faze paljenja u velikoj meri monotonost u opadanju, dok se kod režima PS40/565, PS50/565, PS50/1112, PS60/565, PS70/565 i PS70/1853 (videti tabelu 4.3) javljaju neregularnosti (zastoji) koji su u zavisnosti od režima posledica ili nedostatka vazduha ili prevelike količine vazduha. Gradijent krivih se takođe menja sa promenom količine vazduha za sagorevanje. Naime, raste sa porastom protoka vazduha do kritične vrednosti, kojoj odgovara optimalna količina vazduha (što je oko 1306 kg/m²h), a potom počinje da se smanjuje usled konvektivnih gubitaka sa primarnim vazduhom. Smanjenje gradijenta krive sagorevanja, odnosno usporenje sagorevanja, indikuje kraj faze paljenja, nakon čega je do kraja sagorevanja prisutna samo faza sagorevanja koksa.

Slika 5.1: Brzina sagorevanja pri gustini sloja 40 kg/m³ (exp.)Slika 5.2: Brzina sagorevanja pri gustini sloja 50 kg/m³ (exp.)

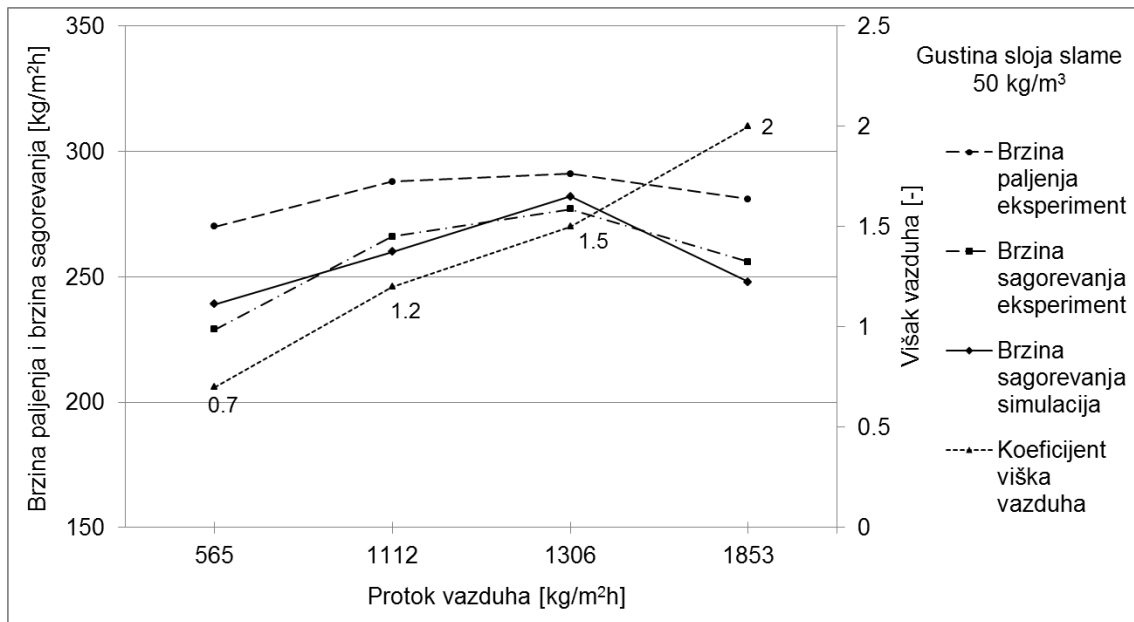
Slika 5.3: Brzina sagorevanja pri gustini sloja 60 kg/m³ (exp.)Slika 5.4: Brzina sagorevanja pri gustini sloja 70 kg/m³ (exp.)

Na slikama 5.5-5.8, kao i u tabeli 5.1, može se videti da za sve gustine sloja režimi sa protokom vazduha 1306 kg/m²h kojima odgovara koeficijent viška vazduha oko 1,4-1,5 i prema eksperimentalnim rezultatima i prema rezultatima simulacije, imaju najveću brzinu sagorevanja. Međutim, sa porastom gustine sloja prisutan je opadajući trend brzine sagorevanja, pa tako za režim PS40/1306 brzina sagorevanja iznosi 306 kg/m²h, dok za režim PS70/1306 samo 250 kg/m²h. Takođe, sa porastom

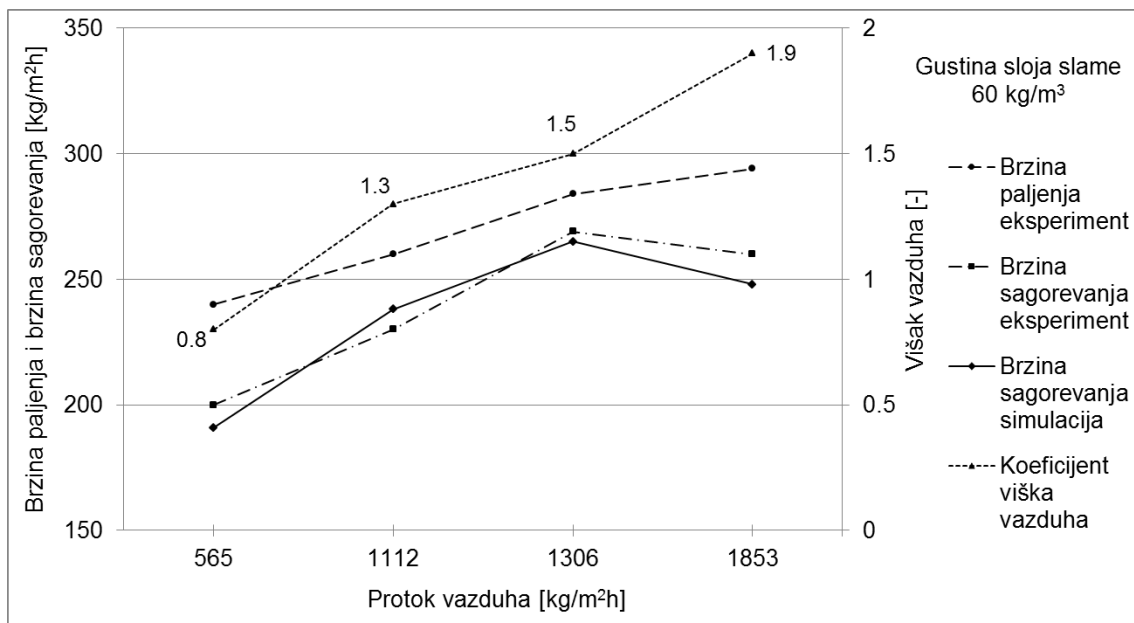
gustine sloja dolazi i do smanjenje brzine kretanja fronta sagorevanja (sa 8,1 m/h u režimu PS40/1306 na 3,8 m/h u režimu PS70/1306), odnosno brzine paljenja (koja je umnožak brzine kretanja fronta i gustine sloja), kao i do smanjenja razlike između brzine paljenja i brzine sagorevanja pri istom protoku vazduha. Ovo se može objasniti na dva načina: pri manjoj gustini veća je poroznost sloja te front sagorevanja brže napreduje kroz veće šupljine, a drugi razlog može biti što je neka od zapaljenih slamčica propala kroz sloj, odnosno kroz šupljine, i izazvala paljenje sveže slame. Kako su front sagorevanja i vazduh za sagorevanje suprotnosmernih tokova, ova mogućnost je verovatnija pri manjim protocima vazduha (režim PS40/565 i PS40/1112) nego pri većim. Osim toga, na ovoj slici se lakše uočava da, nezavisno od gustine sloja, krive paljenja i sagorevanja konvergiraju sa porastom protoka vazduha do navedene vrednosti protoka vazduha (1306 kg/m²h), nakon čega divergiraju. Razlog takvom ponašanju procesa sagorevanja je što pri malom protoku vazduha relativno mali procenat toplote oslobođene sagorevanjem slame se konvektivno prenosi sa primarnim vazduhom, ali je usled male količine vazduha i intezitet sagorevanja mali, dok sa porastom količine vazduha raste i intezitet sagorevanja. Međutim, sa porastom količine vazduha za sagorevanje, usled pojačanog konvektivnog prenosa toplote, raste i količina toplote potrebna za odvijanje procesa devolatilizacije slame, koja se obezbeđuje iz intezivnijeg sagorevanja, samo do navedene granice protoka vazduha, posle koje dolazi do obamiranja procesa sagorevanja usled prevelikih konvektivnih gubitaka.



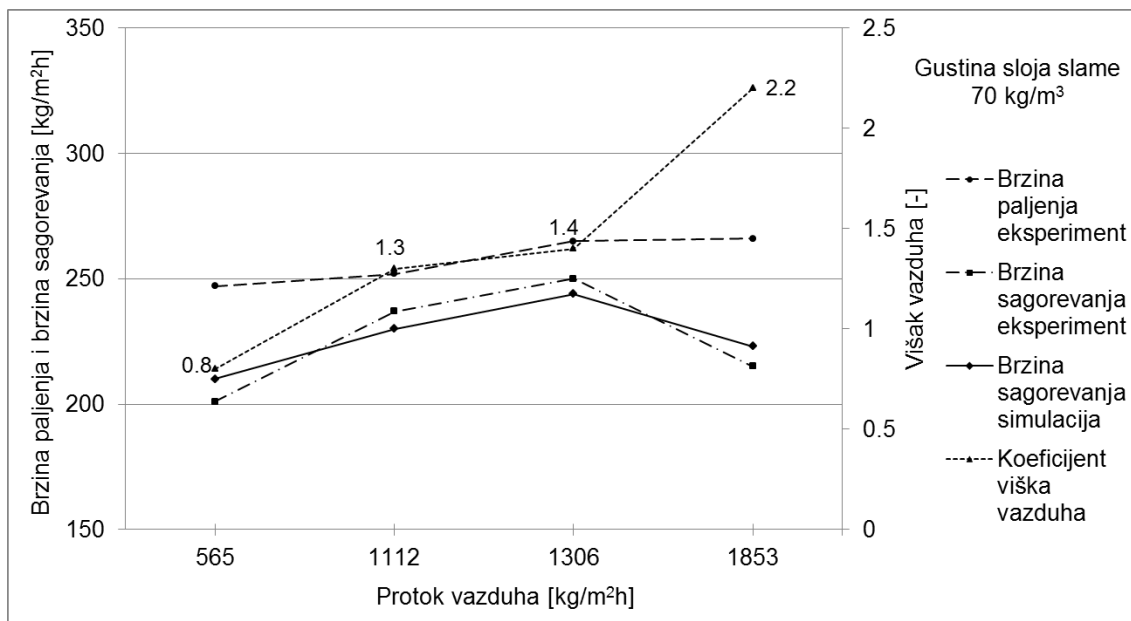
Slika 5.5: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i koeficijenta viška vazduha od protoka vazduha pri gustini sloja 40 kg/m³ (exp. i sim.)



Slika 5.6: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i koeficijenta viška vazduha od protoka vazduha pri gustini sloja 50 kg/m³ (exp. i sim.)



Slika 5.7: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i koeficijenta viška vazduha od protoka vazduha pri gustini sloja 60 kg/m³ (exp. i sim.)



Slika 5.8: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i koeficijenta viška vazduha od protoka vazduha pri gustini sloja 70 kg/m^3 (exp. i sim.)

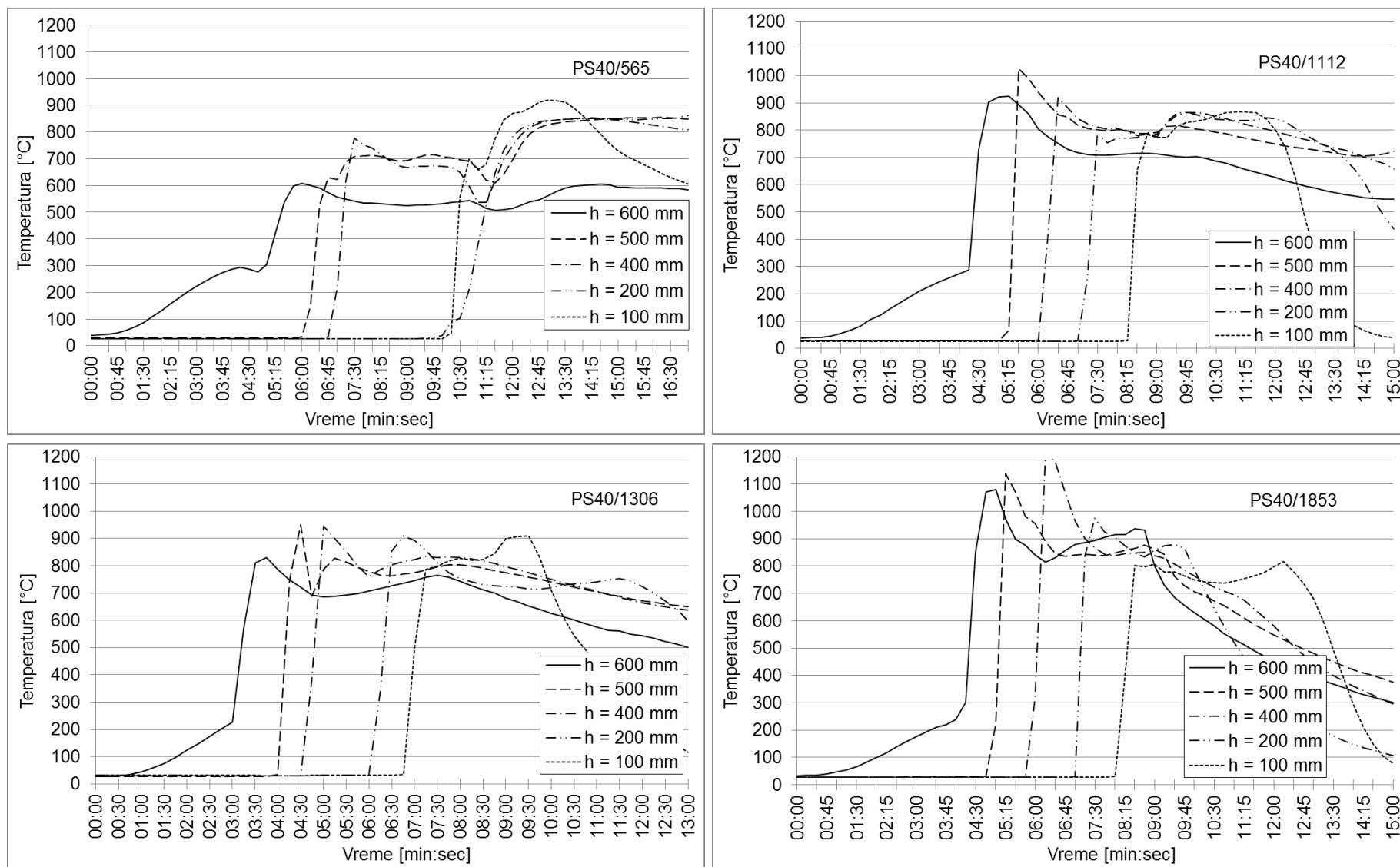
Tabela 5.1: Parametri sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju

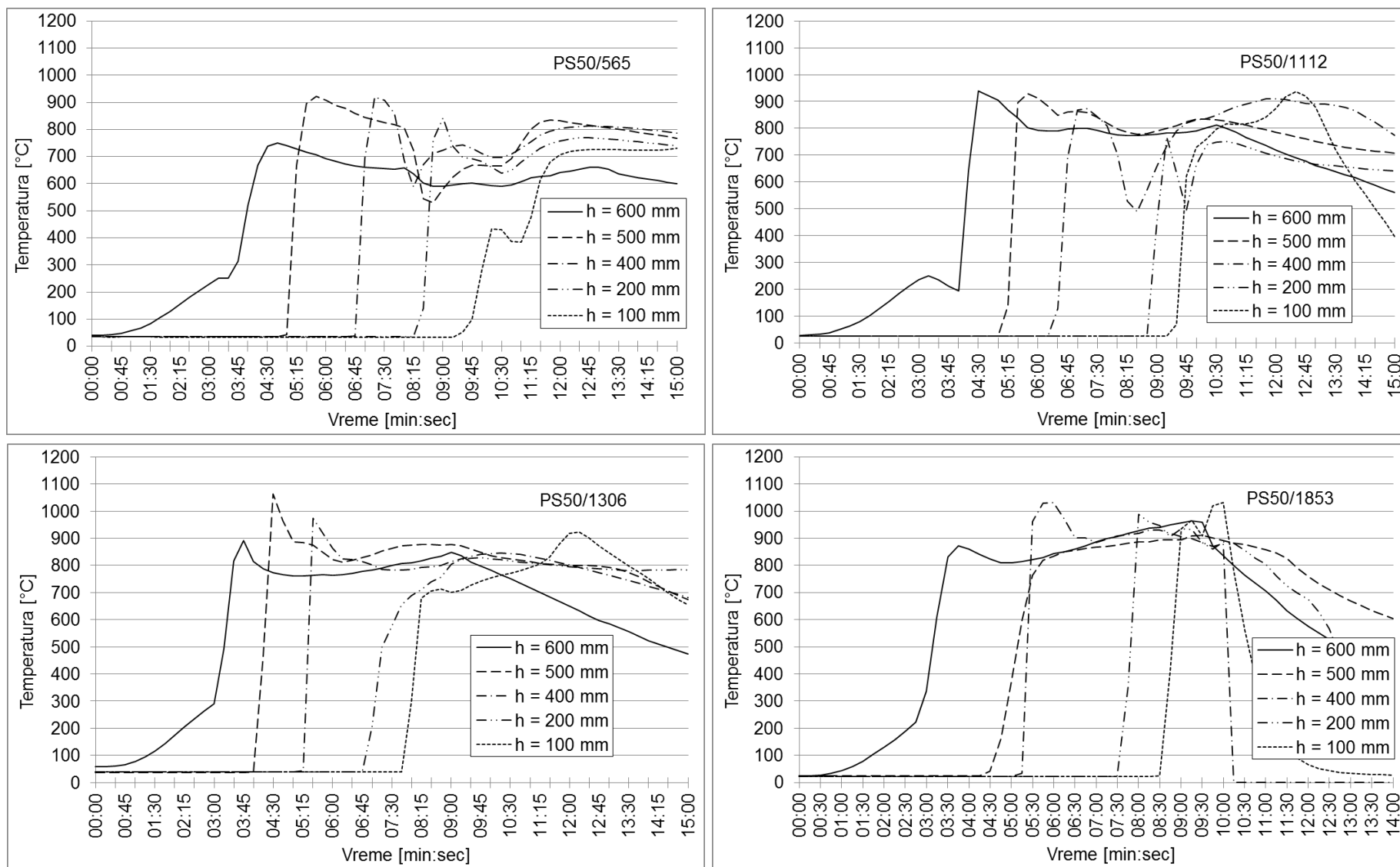
Režim	Gustina sloja [kg/m^3]	Protok vazduha [$\text{kg/m}^2\text{h}$]	Brzina fronta sagorevanja [m/h]	Brzina paljenja (exp.) [$\text{kg/m}^2\text{h}$]	Brzina sagorevanja (exp.) [$\text{kg/m}^2\text{h}$]	Brzina sagorevanja (sim.) [$\text{kg/m}^2\text{h}$]	Višak vazduha [-]
PS40/565	40	565	6,5	260	179	189	0,9
PS40/1112		1112	8,4	336	274	265	1,1
PS40/1306		1306	8,1	324	306	299	1,4
PS40/1853		1853	7,9	316	289	296	1,7
PS50/565	50	565	5,4	270	229	239	0,7
PS50/1112		1112	5,7	288	266	260	1,2
PS50/1306		1306	5,8	291	277	282	1,5
PS50/1853		1853	5,6	281	256	248	2,0
PS60/565	60	565	4,0	240	200	191	0,8
PS60/1112		1112	4,3	260	230	238	1,3
PS60/1306		1306	4,7	284	269	265	1,5
PS60/1853		1853	4,9	294	260	254	1,9
PS70/565	70	565	3,5	247	201	210	0,8
PS70/1112		1112	3,6	252	237	230	1,3
PS70/1306		1306	3,8	265	250	244	1,4
PS70/1853		1853	3,8	266	215	223	2,2

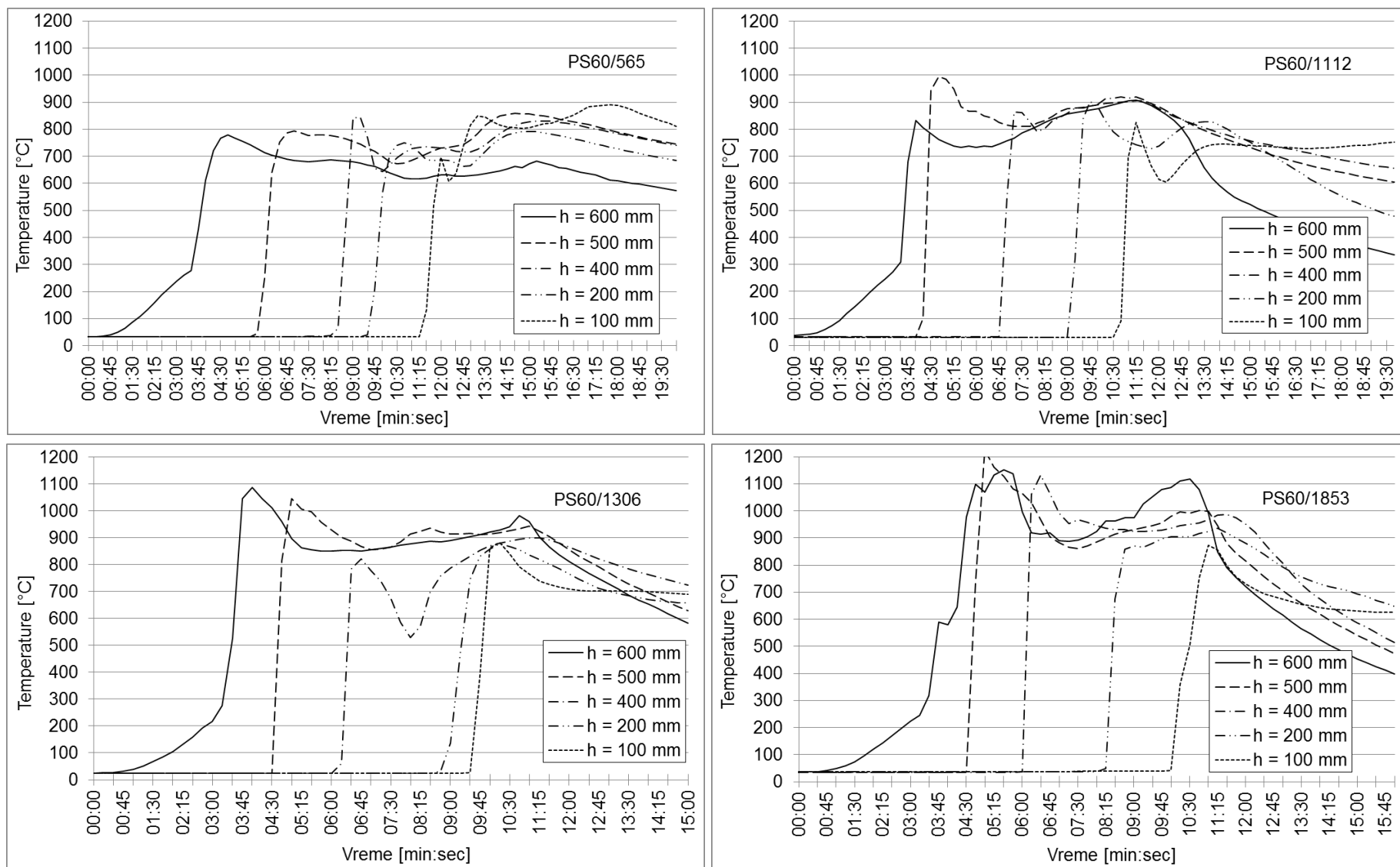
5.2 Temperaturni i koncentracijski profil

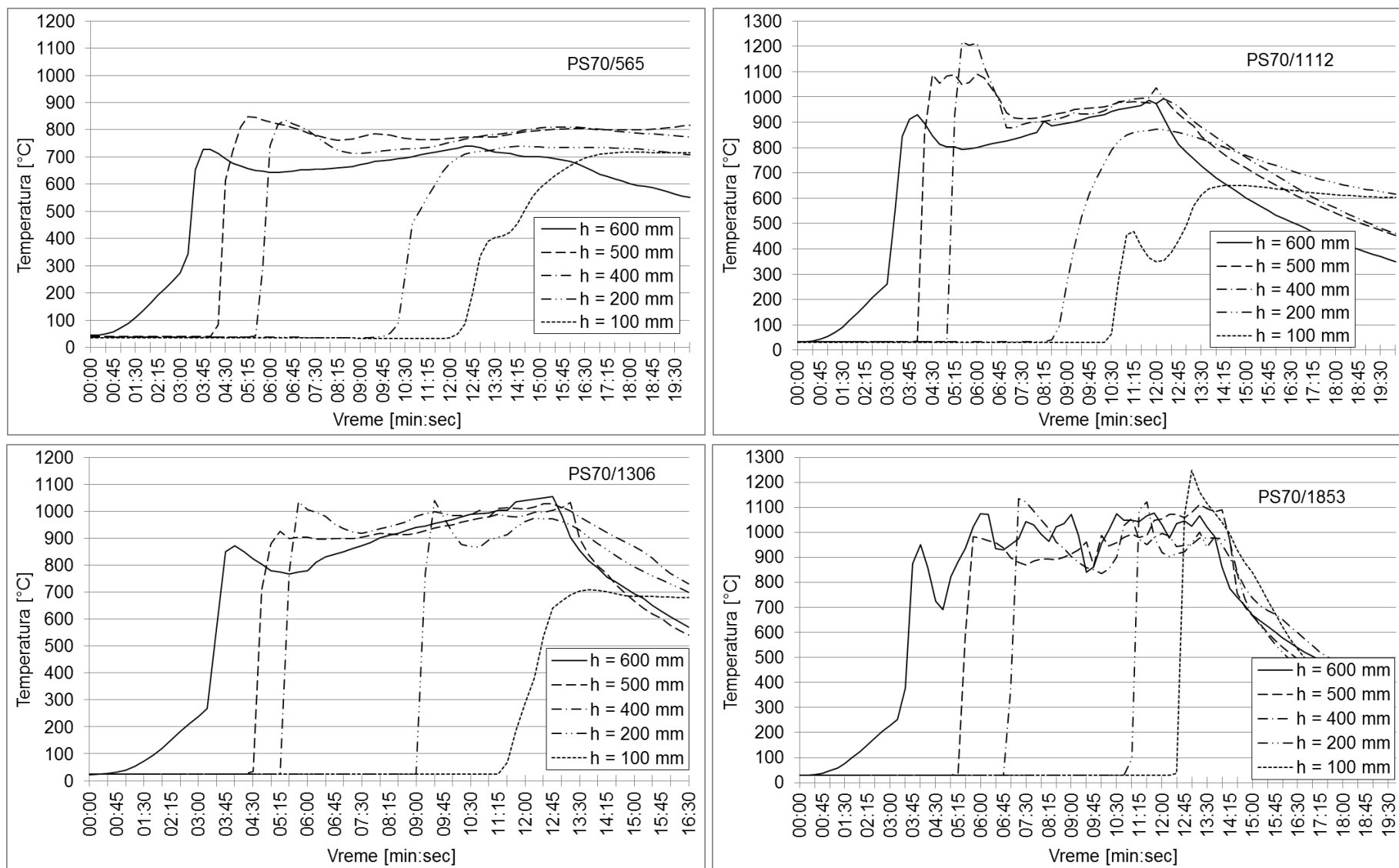
Na slikama 5.9-5.12 dat je eksperimentalno dobijen temperaturni profil u sloju za sve režime sagorevanja. I na temperaturnim profilima se jasno mogu razlikovati dve faze sagorevanja. Tokom faze paljenja, kretanje fronta sagorevanja je praćeno oštrim skokom temperature na termoparu (sa sobne na 800 do 1200 °C sa protokom vazduha od 565 kg/m²h do 1853 kg/m²h, respektivno). Nakon prolaska fronta sagorevanja preko termopara na njemu je primetan značajan pad temperature, ali kako se termopar nalazi nizstrujno od fronta sagorevanja ona i dalje ostaje visoka.

Po završetku faze paljenja, svi termoparovi počinju istovremeno da beleže porast temperature koja dostiže svoj novi pik. Ova pojava jasno indikuje odvijanje faze sagorevanja koksa, koji je kao mešavina čistog ugljenika i mineralnih materija, kalorično gorivo i čijim se sagorevanjem oslobađa velika količina toplote koja se registruje istovremenim skokom temperature na termoparovima. Nagli pad temperature koji se javlja nakon ovog pika označava kraj sagorevanja. Takođe, u fazi intenzivnog sagorevanja koksa, na svim termoparovima, osim na termoparu koji je najbliži rešetci, beleže se vrlo slične vrednosti temperature, odnosno temperaturni pikovi su im gotovo identični. Ovo potvrđuje da se sagorevanje koksa odvija u celoj zapremini reaktora, odnosno da nema sleganja sloja, što je bila jedna od pretpostavki pri modelovanju procesa.

Slika 5.9: Temperaturni profil za gustinu sloja 40 kg/m³ (exp.)

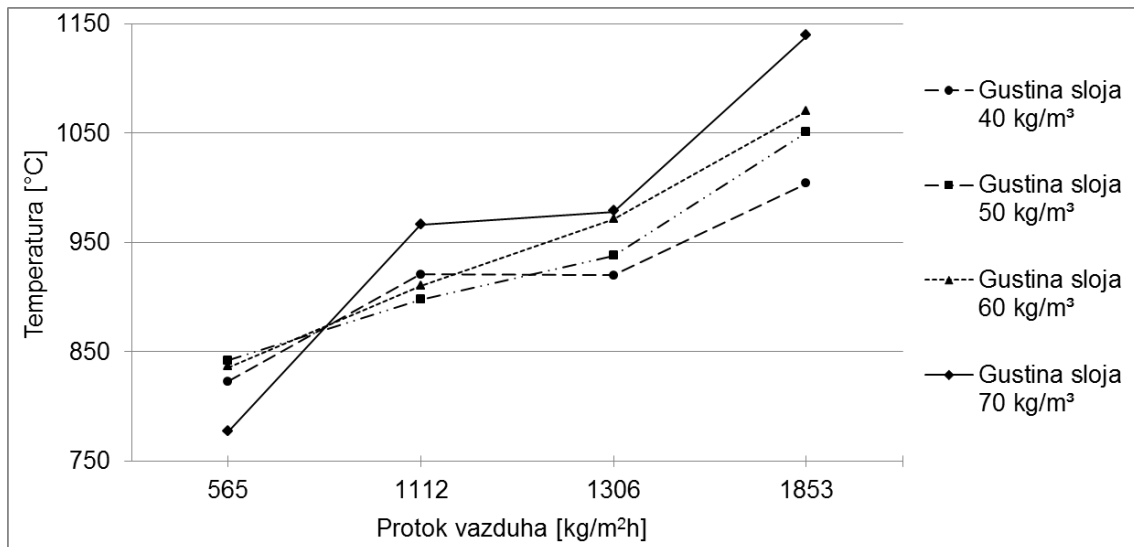
Slika 5.10: Temperaturni profil za gustinu sloja 50 kg/m³ (exp.)

Slika 5.11: Temperaturni profil za gustinu sloja 60 kg/m³ (exp.)

Slika 5.12: Temperaturni profil za gustinu sloja 70 kg/m³ (exp.)

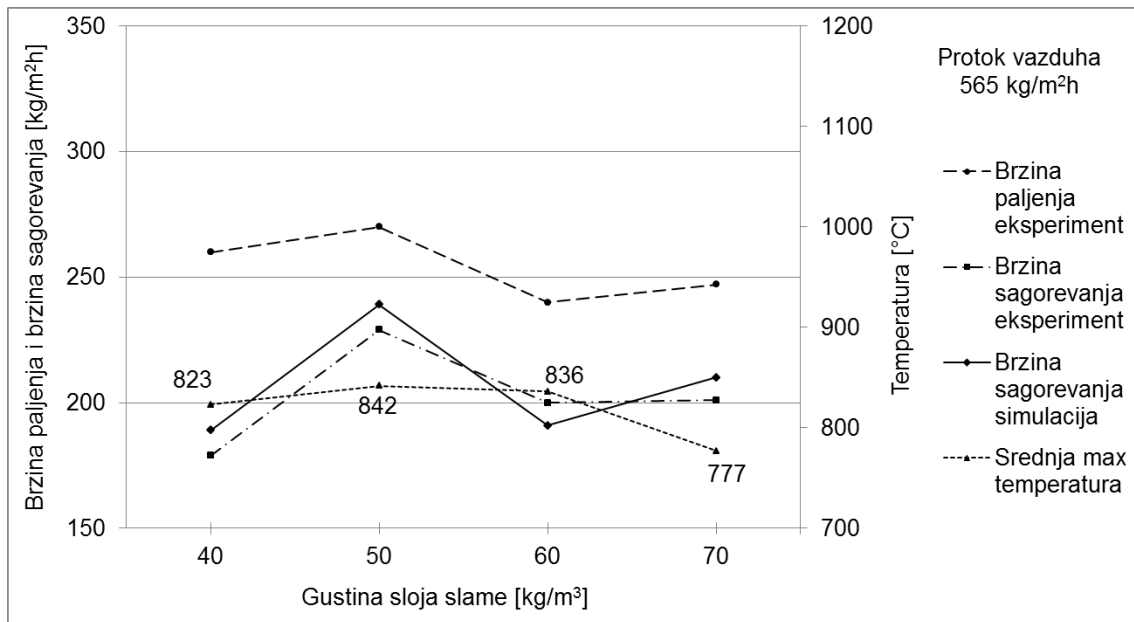
Drugi važan parametar za analizu procesa sagorevanja je temperaturni pik, odnosno srednja maksimalna temperatura koja se postiže tokom sagorevanja. Međutim, treba imati u vidu da manje oscilacije u visini temperaturnog pika u istom režimu sagorevanja mogu poticati i od lokalne neujednačenosti gustine sloja (ne računajući termoparove bliže rešetki gde je jači efekat hlađenja primarnim vazduhom), iako je autor posebno vodio računa da do toga ne dođe. Tako da se prema (Zhou et al., 2005), temperatura fronta sagorevanja može računati kao srednja vrednost vrednosti temperaturnih pikova tj. srednja maksimalna temperatura u nekom režimu.

Na slici 5.13 data je zavisnost srednje maksimalne temperature od protoka vazduha. Iako sa porastom protoka vazduha, nakon prekoračenja kritične vrednosti ($1306 \text{ kg/m}^2\text{h}$), dolazi do smanjenja brzine paljenja i sagorevanja (slike 5.5-5.8), kada je reč o temperaturi to nije slučaj. Naime, sa porastom protoka vazduha, temperatura kontinuirano raste, što može ukazivati na to da se sagorevanje odvijalo u uslovima bogate smeše, odnosno da iako je višak vazduha bio oko 1,4-1,5 (naročito izraženo za režime PS60/1306 i PS70/1306), to nije bilo dovoljno da bi se mogla ostvariti potpuna oksidacija koksa, tara i gasovitih produkata devolatilizacije slame. Povećanjem protoka vazduha (višak vazduha je bio oko 2) ostvareno je i njihovo sagorevanje, a dobijena toplota je očigledno veća od toplotnih gubitaka usled konvekcije sa primarnim vazduhom, te se to manifestuje kao porast temperature. Ova pojava je naročito izražena u režimima sa najvećom gustinom sloja (režimi PS70/...) i u nešto manjoj meri u režimima sa gustinom sloja 60 kg/m^3 (režimi PS60/...), što ukazuje da je zbog male poroznosti sloja ravnomerna distribucija primarnog vazduha kroz sloj nedovoljno efikasna, te za režime sa većom gustinom sloja treba razmotriti mogućnost dovođenja sekundarnog vazduha za sagorevanje. Takođe, treba primetiti da je za najmanji protok vazduha i najveću gustinu sloja (režim PS70/565), srednja maksimalna temperatura niža za oko $60 \text{ }^\circ\text{C}$ u odnosu na vrednosti ostalih režima za isti protok vazduha, što je posledica upravo objašnjenje slabe distribucije vazduha kroz sloj, što dovodi do tinjanja slame bez mogućnosti postizanja ustaljenog procesa sagorevanja.

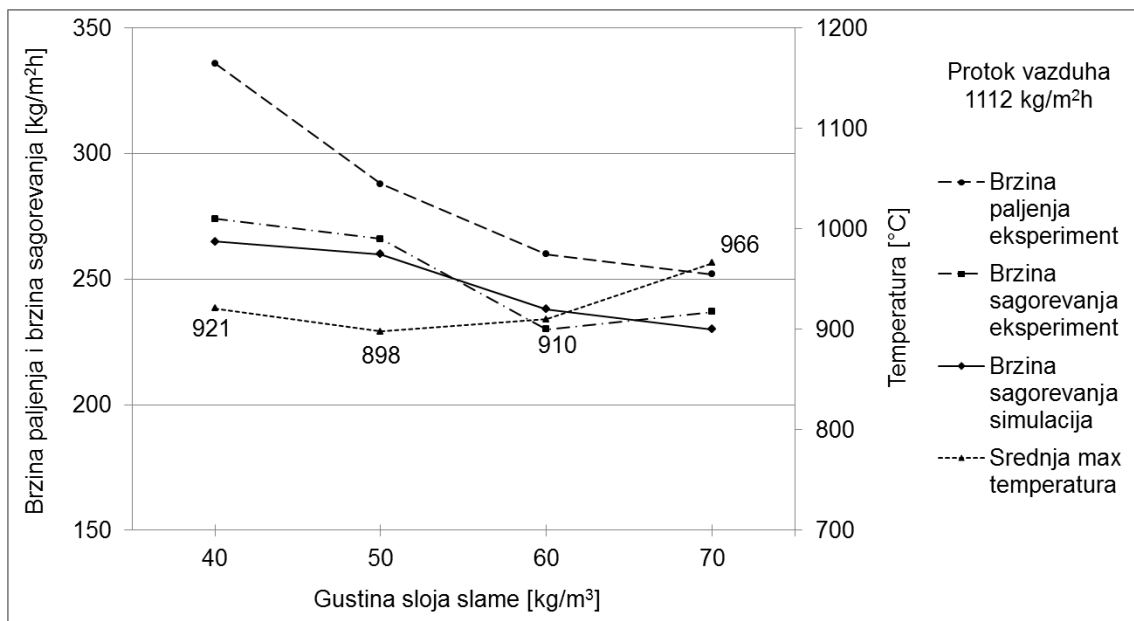


Slika 5.13: Zavisnost srednje maksimalne temperature od protoka vazduha i gustine sloja

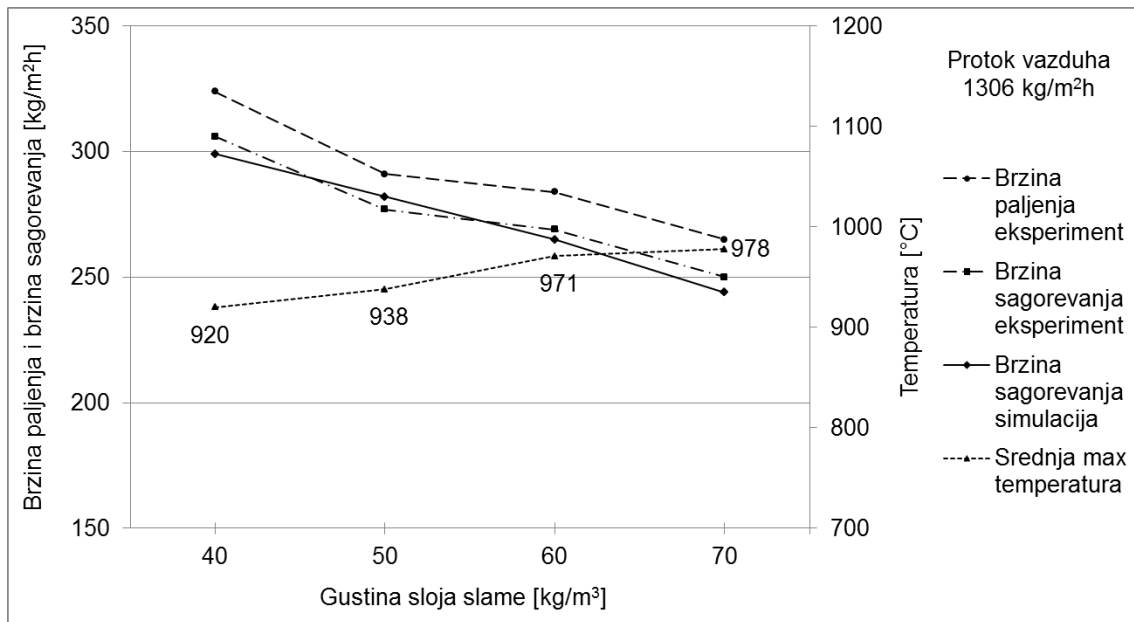
Na slikama 5.14-5.17 data je zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja (\dot{m}) i srednje maksimalne temperature od gustine sloja, pri konstantnom protoku vazduha. Ovde je interesantno uočiti dve stvari: jedna je porast srednje maksimalne temperature i sa porastom protoka vazduha i sa porastom gustine sloja (osim u slučaju PS70/565 što je gore objašnjeno), što je naravno posledica inteziviranja sagorevanja usled veće količine vazduha i veće količine goriva koje je na raspolaganju, a druga je smanjenje razlike između brzine paljenja i brzine sagorevanja do protoka vazduha 1306 kg/m²h, a potom opet povećanje razlike, što je gore već objašnjeno.



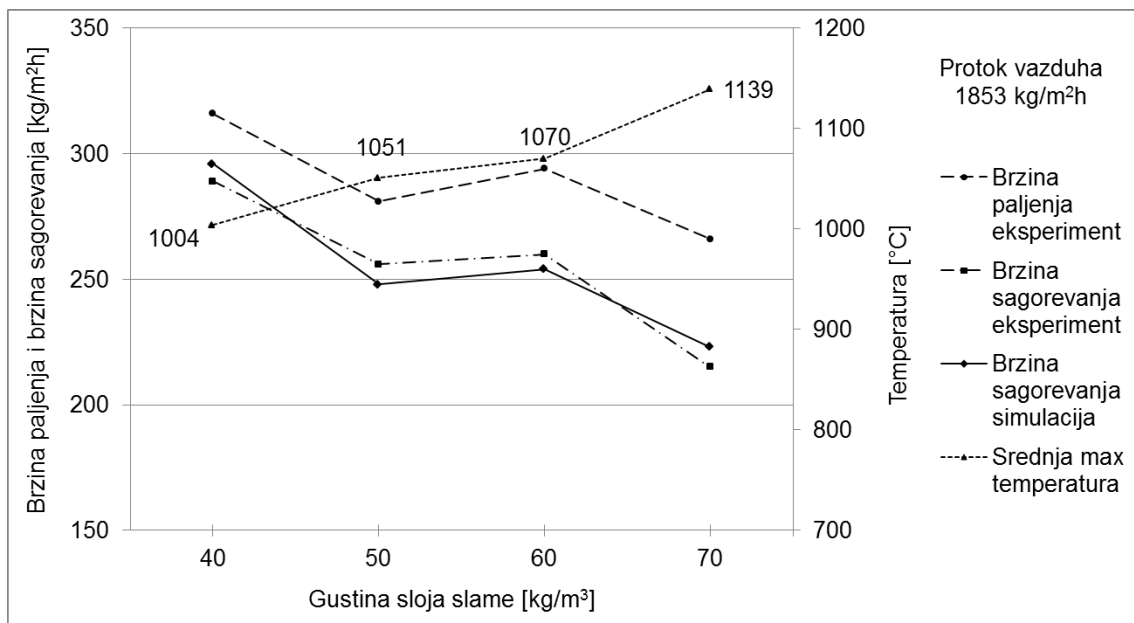
Slika 5.14: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i srednje maksimalne temperature od gustine sloja pri protoku vazduha 565 kg/m²h (exp. i sim.)



Slika 5.15: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i srednje maksimalne temperature od gustine sloja pri protoku vazduha 1112 kg/m²h (exp. i sim.)



Slika 5.16: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i srednje maksimalne temperature od gustine sloja pri protoku vazduha 1306 kg/m²h (exp. i sim.)

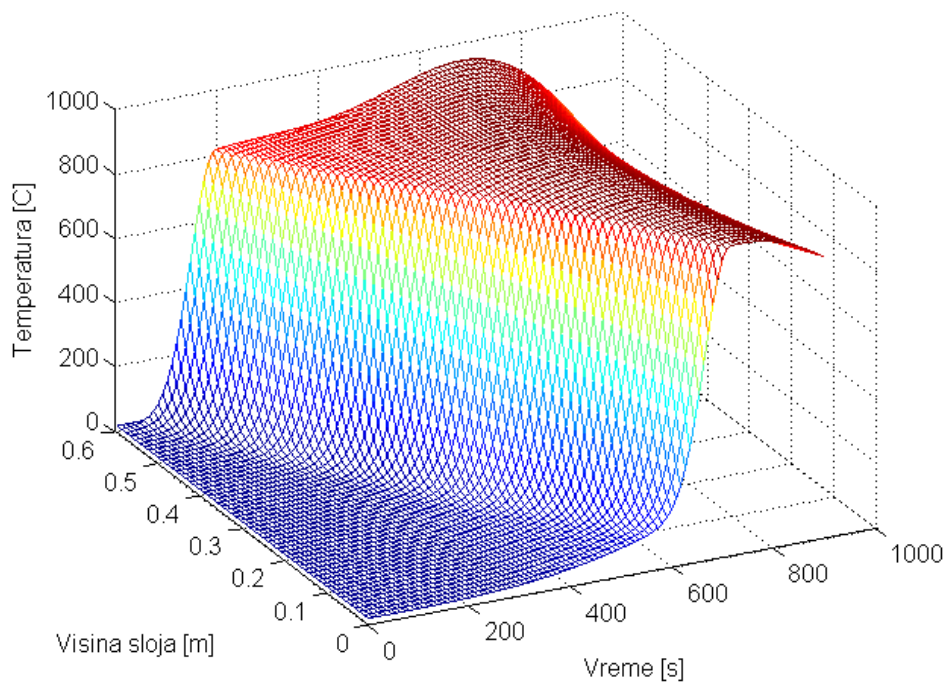
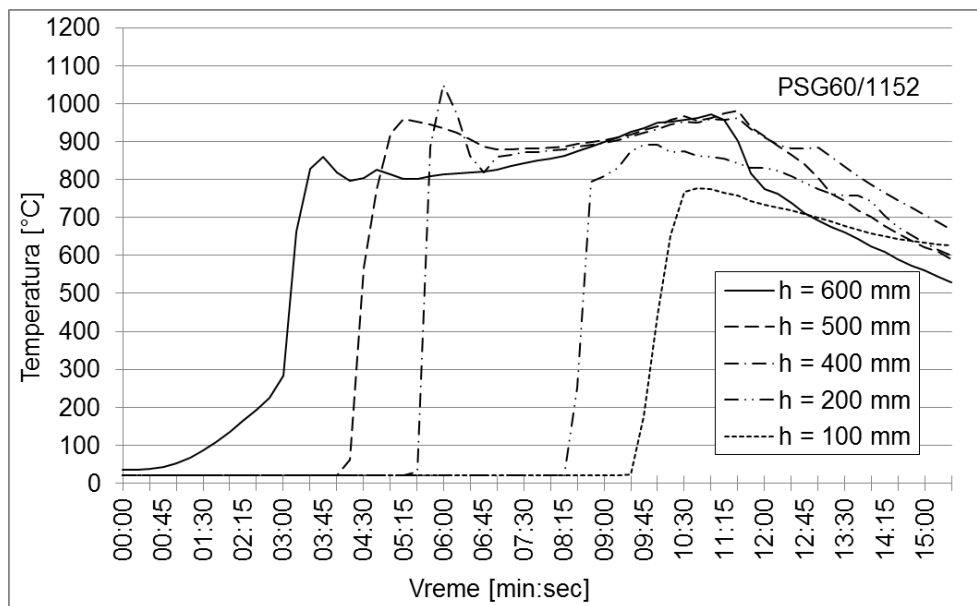


Slika 5.17: Zavisnost brzine paljenja, brzine sagorevanja i srednje maksimalne temperature od gustine sloja pri protoku vazduha 1853 kg/m²h (exp. i sim.)

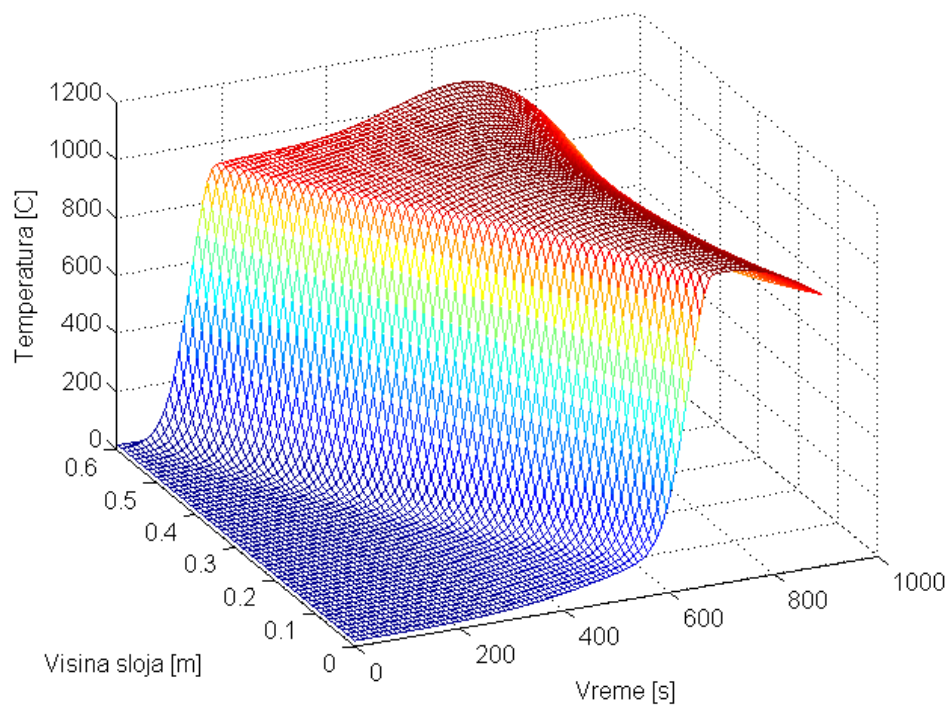
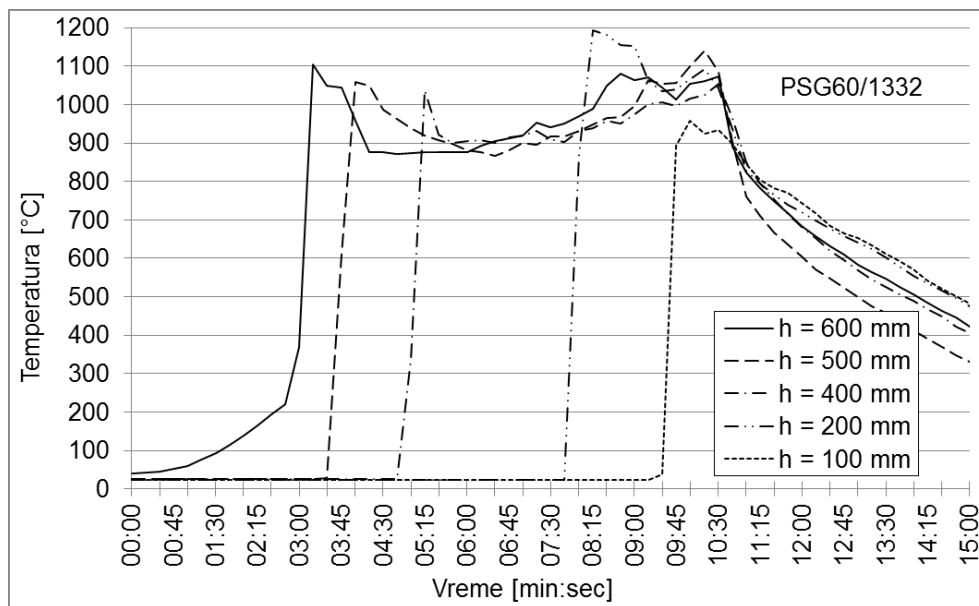
Kako se iz navedenih rezultata može zaključiti da je pri sagorevanju pšenične slame u nepokretnom sloju u cilindricnom reaktoru bez dovođenja sekundarnog vazduha optimalna gustina sloja oko 60 kg/m³, u narednom delu rada biće dat uporedni prikaz eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih simulacijom modela,

za gustinu sloja 60 kg/m^3 i tri protoka vazduha (tabela 4.3). Za ova tri režima je urađeno i merenje sastava produkata sagorevanja, odnosno merenje koncentracije O_2 , CO i CO_2 u dimnjaku postrojenja (1,5 m iznad sloja), čime bi trebalo da se dobije potpunija slika o reakcijama koje su usledile u gasnoj fazi iznad sloja, naravno pod pretpostavkom da nam je poznat sastav gasova u sloju, što bi trebalo da obezbedi matematički model. Treba samo napomenuti da su protoci vazduha izabrani tako da im odgovaraju koeficijenti viška vazduha od oko 1 (režim PSG60/1152), 1,5 (režim PSG60/1332) i 1,9 (režim PSG60/1872).

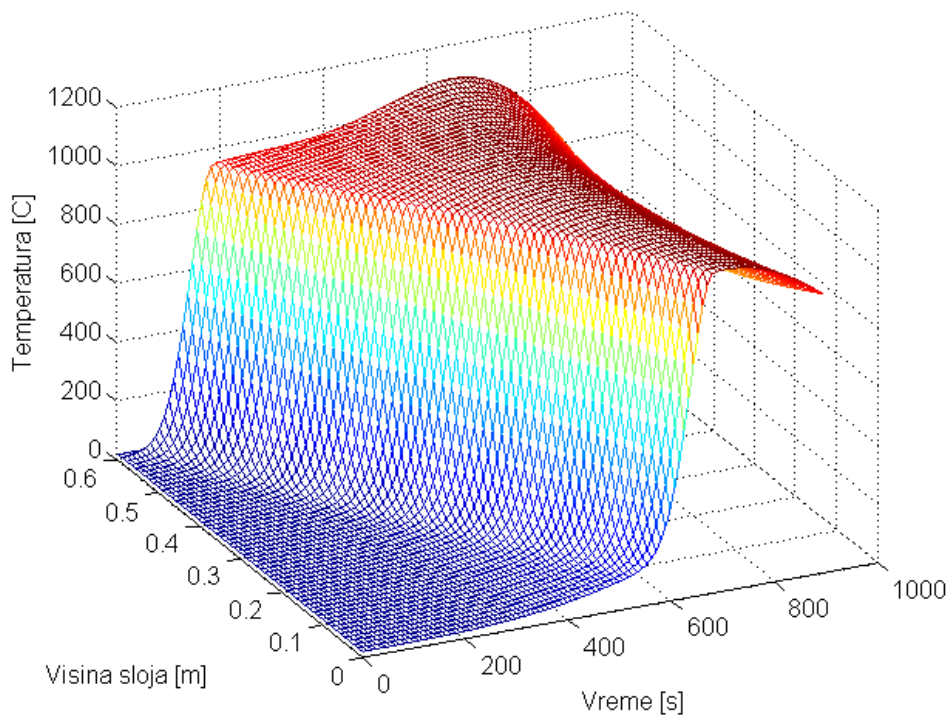
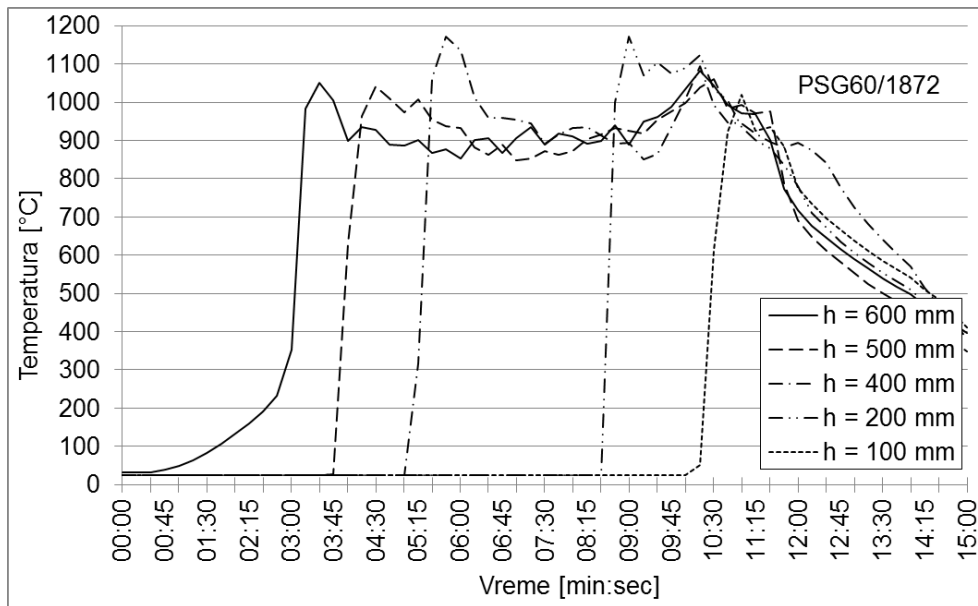
U režimu PSG60/1152 (slika 5.18), usled sagorevanja u uslovima bogate smeše, temperatura se u fazi paljenja kretala nešto preko $800 \text{ }^\circ\text{C}$ na površini sloja sa trendom porasta u smeru ka rešetki, a u fazi sagorevanja koksa oko $950 \text{ }^\circ\text{C}$. Takođe, i na grafiku simulacije temperaturnog profila u sloju se vidi trend rasta temperature u dva pravca, jedan u smeru ka rešetki (sa početnih $800 \text{ }^\circ\text{C}$ pa naviše), a drugi u završnoj fazi sagorevanja usled sagorevanja zaostalog koksa, koji je iznosio nepunih $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Pri većim protocima vazduha, režimi PSG60/1332 i PSG60/1872 (slika 5.19 i 5.20, respektivno), temperatura u fazi paljenja kretala se od $900\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$, a u fazi sagorevanja koksa nešto ispod $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Kao što može videti slične vrednosti su dobijene i rezultatima simulacije za oba režima.



Slika 5.18: Temperaturni profil u sloju (exp. i sim.) za režim PSG60/1152



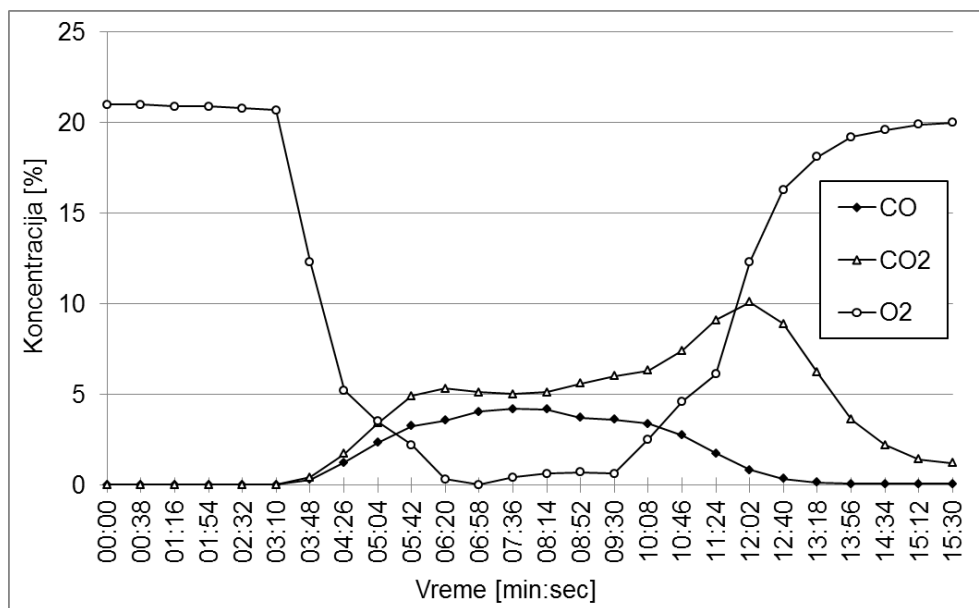
Slika 5.19: Temperaturni profil u sloju (exp. i sim.) za režim PSG60/1332



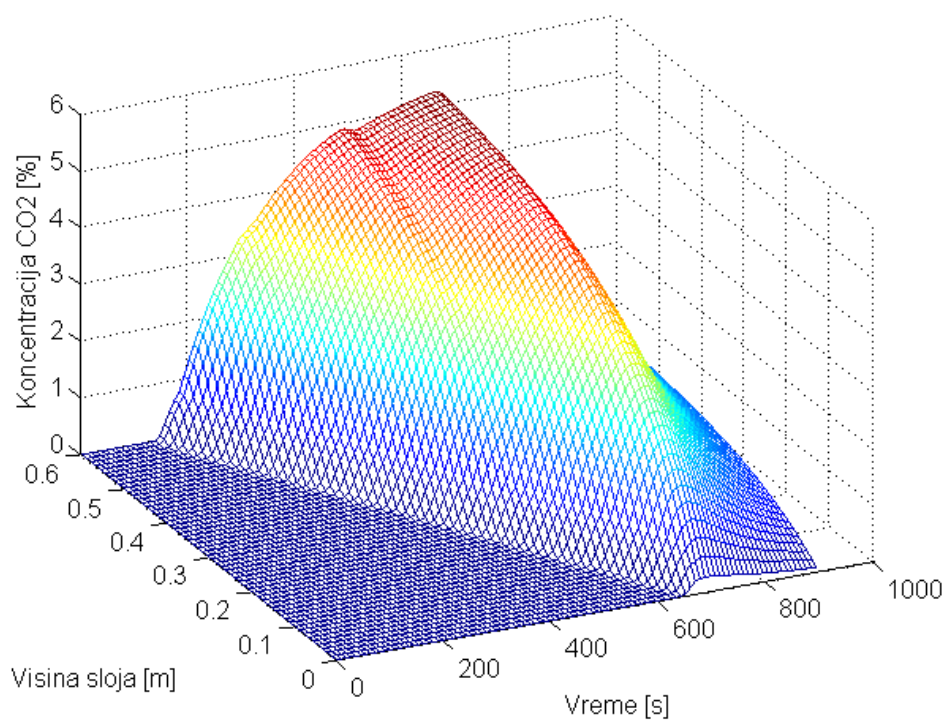
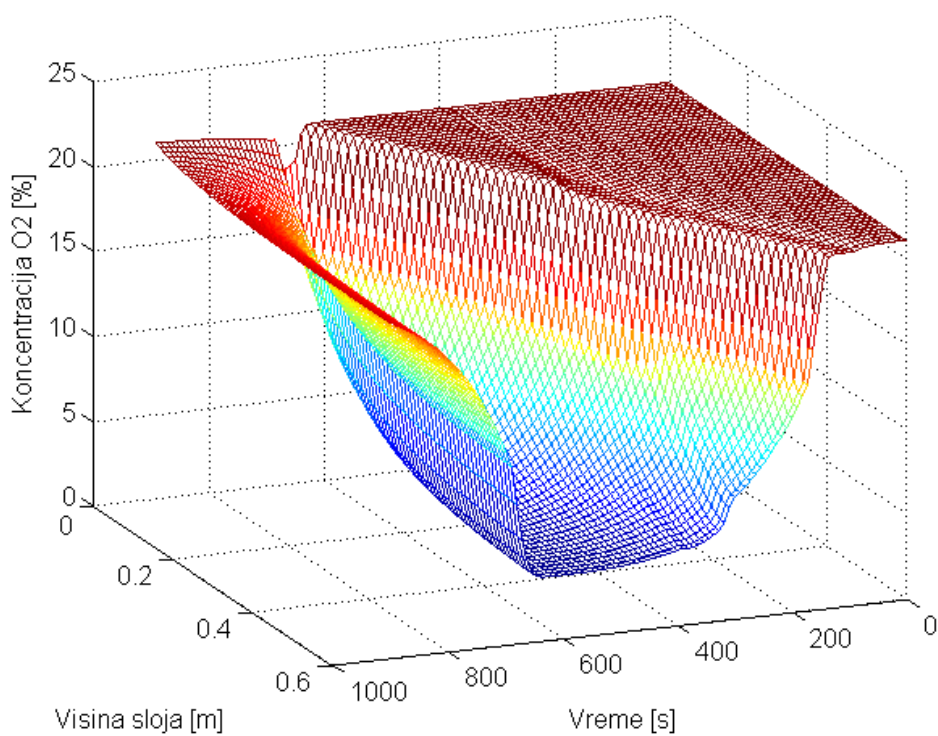
Slika 5.20: Temperaturni profil u sloju (exp. i sim.) za režim PSG60/1872

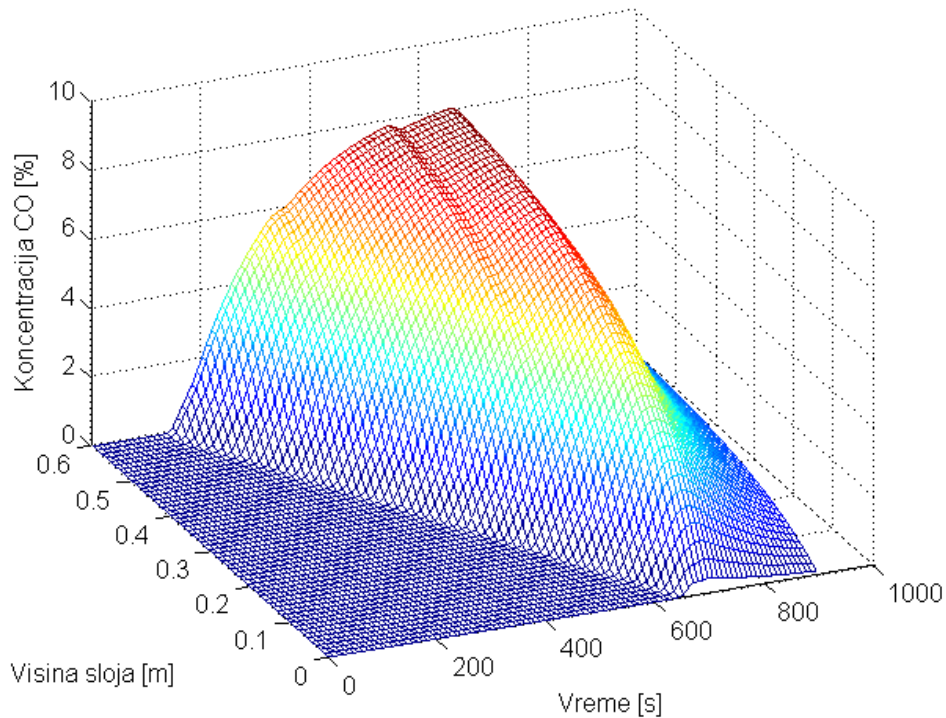
Kada je reč o koncentracionom profilu, u režimu PSG60/1152 (slika 5.21a-d) početak sagorevanja obeležen je naglim padom koncentracije O_2 sa 21 na manje od 1% i istovremenim skokom koncentracije CO i CO_2 sa 0 na 4 i 5%, respektivno. Tokom faze paljenja koncentracija CO_2 se kretala oko 5%, ali je interesantno primetiti porast koncentracije CO_2 u periodu 9:30-12:40 min sagorevanja, što je posledica intenzivnog sagorevanja koksa, kao što je već objašnjeno. Međutim interesantan je i istovremeni rast koncentracije O_2 , što implicira da nije sav O_2

iskrišćen u fazi sagorevanja koksa. Koncentracija CO od 4% tokom faze paljenja posledica je nepotpunog sagorevanja u uslovima bogate smeše. Kako se faza paljenja približavala kraju primetan je linearan pad koncentracije CO sa 4 na ispod 1% i istovremeni rast koncentracije O₂. Dostizanjem koncentracije kiseonika 20% u produktima sagorevanja obeležen je kraj sagorevanja. Kada je reč o koncentracijama dobijenim simulacijom, vidimo da se koncentracija CO₂ na površini sloja kretala do najviše 5%, sa blagim skokom pred kraj sagorevanja, a imajući u vidu da je u dimnjaku postrojenja izmerena koncentracija CO₂ od 5-10%, za očekivati je postojanje u sloju nešto veće koncentracije CO, koji bi svojim dogorevanjem dao ovu vrednost CO₂. Koncentracija CO se na površini sloja kretala do maksimalnih 8 posto, dok je bliže rešetki njegova koncentracija bila niža kao posledica prostrujavanja svežim vazduhom kroz rešetku. Koncentracija kiseonika je posmatrano od rešetke ka površini sloja permanentno opadala, da bi na površini sloja bila oko 4% što je međutim utrošeno u oksidaciji ugljen-monoksida u gasnoj fazi iznad sloja.



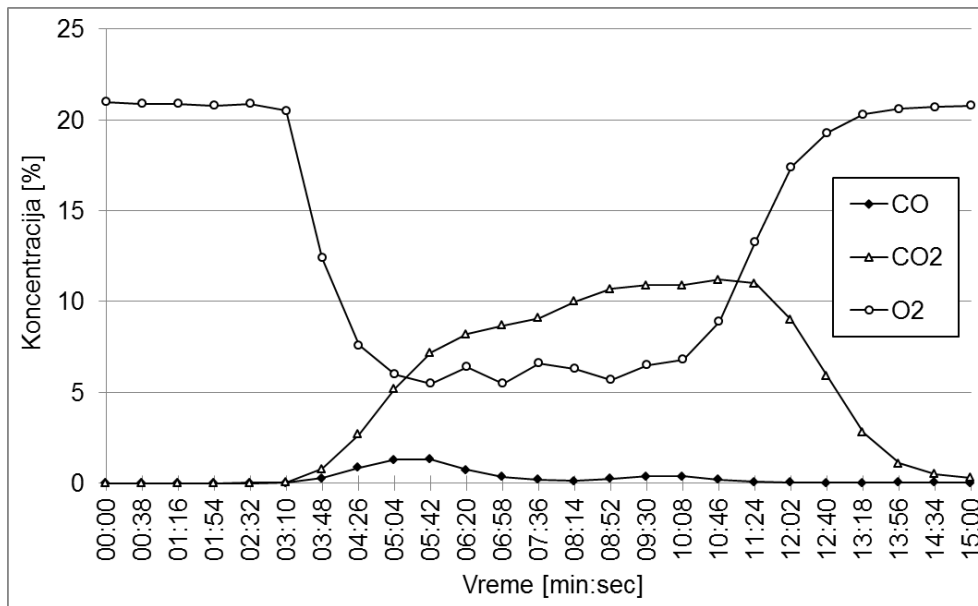
Slika 5.21a: Koncentracije CO₂, O₂ i CO izmerene u dimnjaku postrojenja za režim PSG60/1152

Slika 5.21b: Koncentracija CO₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1152Slika 5.21c: Koncentracija O₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1152

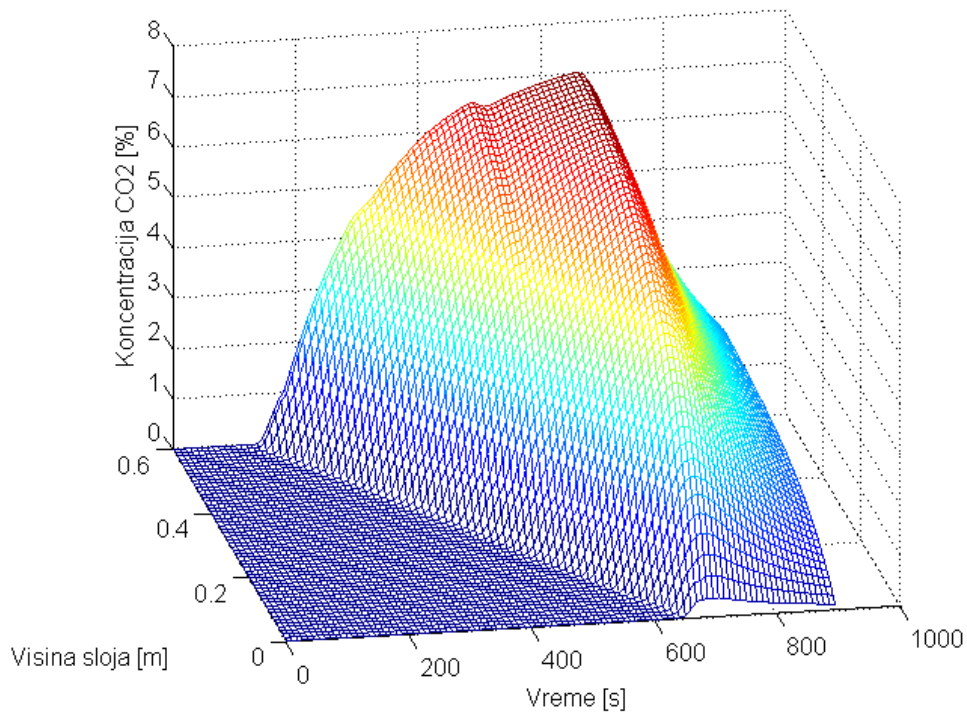


Slika 5.21d: Koncentracija CO u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1152

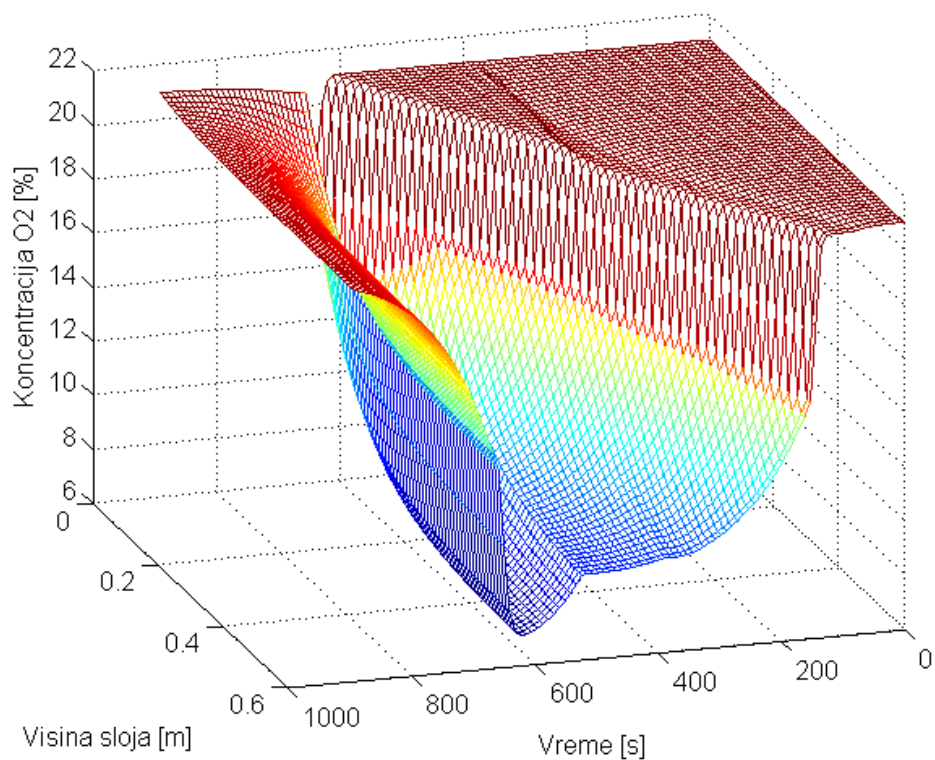
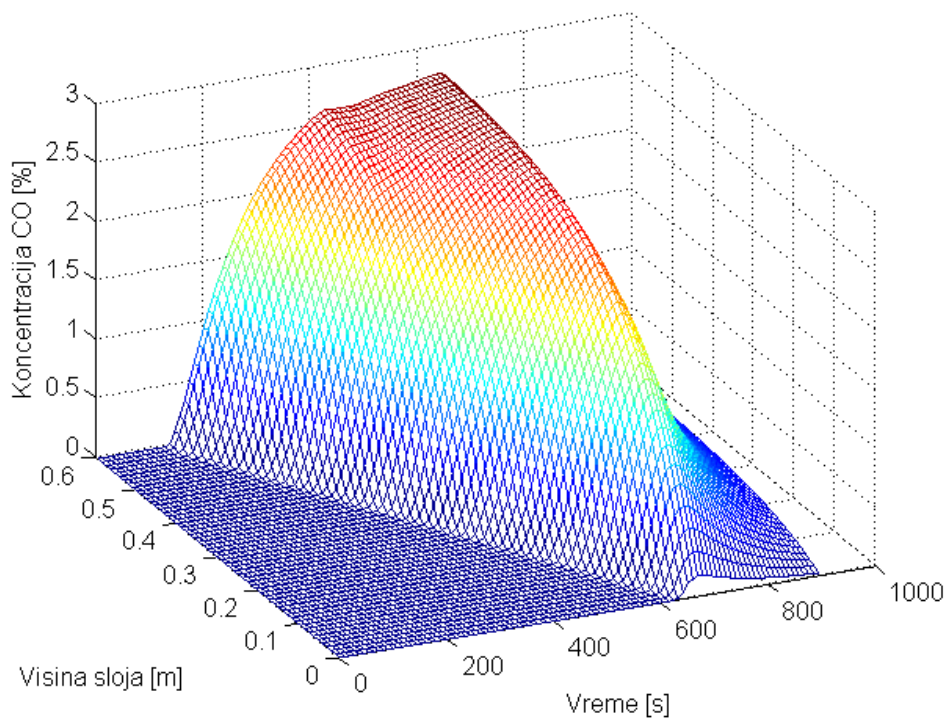
U režimu PSG60/1332 (slika 5.22a-d) koncentracija O_2 u produktima sagorevanja je sa ambijentalne vrednosti brzo pala na oko 6% (označavajući time početak sagorevanja), i manje-više zadržala tu vrednost tokom celog sagorevanja. Koncentracija CO je na početku sagorevanja, do postizanja ustaljenog sagorevanja, imala manji skok (1,3%) koji je brzo pao ispod 0,4%, ali je interesantno da je primetan ponovni blagi rast koncentracije CO, simultano sa rastom koncentracija CO_2 imala oko 9 min od početka sagorevanja, što je naravno posledica početka sagorevanja koksa. Kada je reč o koncentracijama dobijenim simulacijom, vidimo da se koncentracija CO_2 na površini sloja kretala od nekoliko do maksimalnih 7% pred kraj sagorevanja, a imajući u vidu da je u dimnjaku postrojenja izmerena koncentracija CO_2 tokom sagorevanja od 7-11%, za očekivati je postojanje u sloju nekoliko procenata CO, koji bi svojim dogorevanjem dao ovu vrednost CO_2 , pogotovo imajući u vidu da je ugljen monoksida vrlo malo, odnosno da je praktično sav oksidovan u CO_2 . Koncentracija CO se na površini sloja kretala do maksimalnih 2,5-3%, dok je bliže rešetki njegova koncentracija bila niža kao posledica prostrujavanja svežim vazduhom kroz rešetku. Koncentracija kiseonika je posmatrano od rešetke ka površini sloja permanentno opadala, da bi na površini sloja bila oko 9% sa jednim malim padom pred kraj sagorevanja što je verovatno posledica dogorevanja koksa.



Slika 5.22a: Koncentracije CO₂, O₂ i CO izmerene u dimnjaku postrojenja za režim PSG60/1332

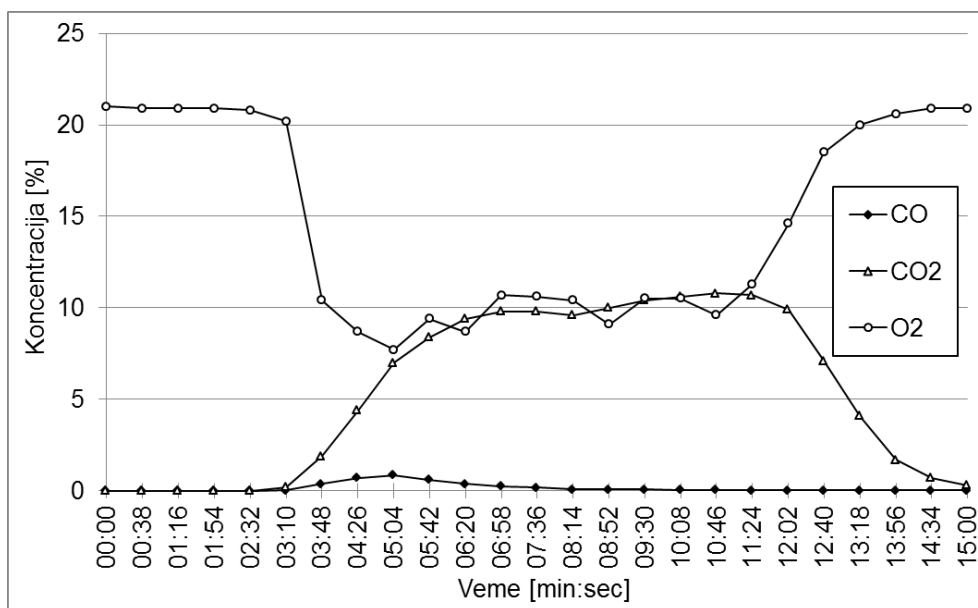


Slika 5.22b: Koncentracija CO₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1332

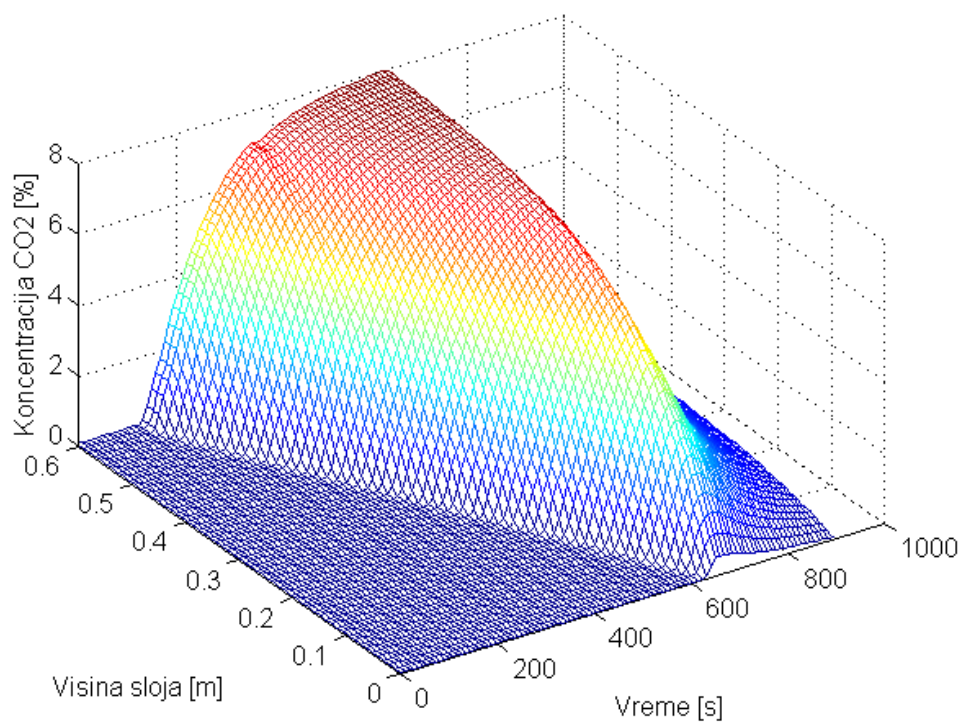
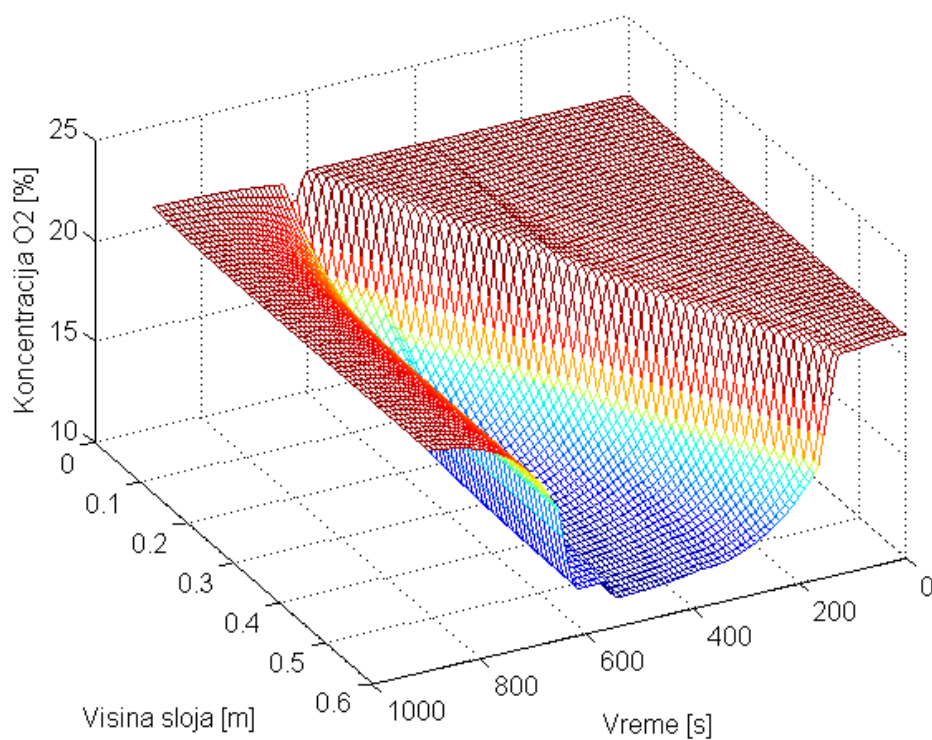
Slika 5.22c: Koncentracija O₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1332

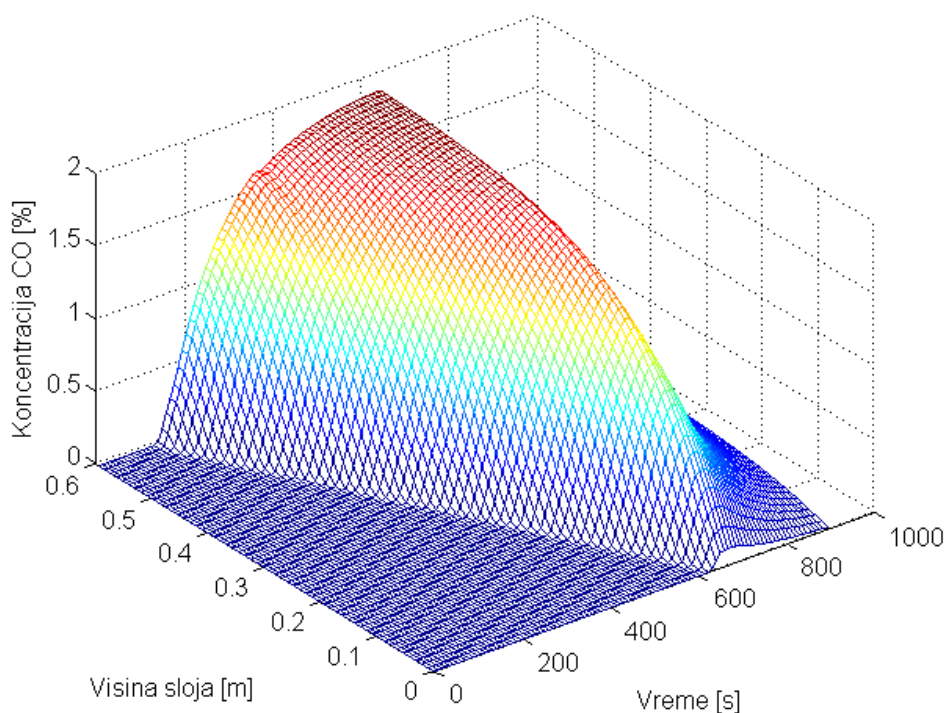
Slika 5.22d: Koncentracija CO u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1332

U režimu PSG60/1872 (slika 5.23a-d) koncentracija O_2 za nekih 40 sekundi pada sa 21 na 10%, označavajući time početak sagorevanja. Istovremeno koncentracija CO pokazuje vrlo blagi trend rasta (ostajući pri tom ispod 1%), ali samo do ustaljenja procesa, dok je do kraja sagorevanja imala vrednost blisku nuli. Međutim, interesantno je primetiti da i pored toga što je koncentracije kiseonika u produktima sagorevanja bila sve vreme oko 10%, postoji blagi rast koncentracije CO_2 pred kraj sagorevanja, što ukazuje na postojanje faze sagorevanja koksa. Ovo je posledica nemogućnosti da se dovedeni kiseonik iskoristi u oksidacionim procesima, što je posledica lošeg mešanja primarnog vazduha sa gorivom. Kada je reč o koncentracijama dobijenim simulacijom, vidimo da se koncentracija CO_2 na površini sloja kretala od 7 do maksimalnih 8%, a imajući u vidu da je u dimnjaku postrojenja izmerena koncentracija CO_2 tokom sagorevanja od 8-10%, odnosno samo pred kraj saorevanja oko 11%, za očekivati je u sloju postojanje male količine ugljen-monoksida (simulacijom dobijeno ispod 2%), koji je u gasnom prostoru iznad sloja oksidovan u ugljen-dioksid zbog, kako je prikazano, koncentracije kiseonika od preko 10%.



Slika 5.23a: Koncentracije CO_2 , O_2 i CO izmerene u dimnjaku postrojenja za režim PSG60/1872

Slika 5.23b: Koncentracija CO₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1872Slika 5.23c: Koncentracija O₂ u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1872



Slika 5.23d: Koncentracija CO u sloju dobijena simulacijom za režim PSG60/1872

Premda su na početku prikazani rezultati upućivali da je optimalan protok vazduha onaj kome odgovara koeficijent viška vazduha od oko 1,5, eksperimentalnim i simulacionim određivanjem koncentracija O_2 , CO i CO_2 , kao i upoređivanjem temperaturnog profila u sloju to je i potvrđeno, čime je praktično postignuta i validacija razvijenog matematičkog modela.

6. ZAKLJUČAK

Usled sve veće potražnje za "čistom" energijom sa jedne strane i intezivnog razvoja čistih energetske tehnologije sa druge, u razvijenim zemljama se intezivno radi na unapređenju postrojenja za sagorevanje poljoprivrednih ostataka, u smislu istovremenog povećanja energetske efikasnosti i smanjenja emisije štetnih gasova. Na ostvarenju ovog cilja rade kako naučno istraživačke organizacije, tako i razvojni timovi proizvođača opreme. U tom smislu matematičko modelovanje procesa sagorevanja, kao efikasan i brz način ispitivanja i nalaženja optimalnih uslova za željeni razvoj procesa, pruža niz prednosti prilikom projektovanja novih ili provere postojećih postrojenja.

Ovaj rad imao je za cilj da poveže teorijska znanja sa eksperimentalnim ispitivanjem sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju, a u cilju formiranja matematičkog modela koji će kroz računarske simulacije omogućiti analizu uticaja varijacije parametara procesa (gustine sloja, količine vazduha za sagorevanje) na proces sagorevanja sa stanovišta postizanja što kvalitetnijeg sagorevanja i smanjenja emisije zagađujućih materija. Osim toga, postavljeni matematički model može da posluži kao inženjerski alat za dalje razumevanje fenomena koji se javljaju pri procesu sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju, kao i projektovanje uređaja za sagorevanje u nepokretnom sloju.

Republika Srbija raspolaže sa oko 3,2 Mten u obnovljivim izvorima energije, gde najveći udeo ima biomasa sa 2,6 Mten, odnosno 1,56 Mten (60%) biomasa poljoprivrednog porekla i 1,04 Mten (40%) šumska biomasa. Treba naglasiti da se u Vojvodini, kao izrazito ravničarskoj i poljoprivrednoj regiji, nalazi skoro dve trećine, odnosno oko 1 Mten, poljoprivredne biomase. Ova energija bila bi dovoljna da se u Vojvodini podmiri gotovo sve potrebe za niskotemperaturnom energijom stacionarnih energetske sistema (grejanje objekata, prerada i sušenje proizvoda i dr.).

Pšenična slama je, posle kukuruza, najzastupljenija ratarska kultura i čini 20% (0,2 Mten) energetske potencijala poljoprivredne biomase na području Vojvodine. Pšenična slama kao gorivo ima svojih specifičnosti u pogledu: hemijskog sastava, temperature sagorevanja, temperature sinterovanja pepela, toplotne moći i emisije zagađujućih materija, ali ono što pšeničnu slamu bitno razlikuje od fosilnih goriva su: manji udeo ugljenika i vodonika, velik udeo kiseonika, mali udeo azota i sumpora, relativno mali udeo pepela i relativno velik udeo vlage. Međutim, jedna od najvažnijih karakteristika pšenične slame kao goriva je njena donja toplotna moć koja se kreće

oko 14MJ po kilogramu radnog goriva, što je u pogledu dobijanja toplotne energije, čini jednakim ili čak boljim, od većine domaćih ugljeva. Takođe, jedan od vrlo značajnih efekata korišćenja biomase, pa i pšenične slame, kao goriva je znatno manje zagađenje životne sredine. Ovo je izraženo kroz nultu emisiju ugljen-dioksida i kroz smanjenu emisiju sumpor-dioksida i praškastih materija u odnosu na emisije pri sagorevanju fosilnih goriva. Kada je reč o izboru tehnologije za sagorevanje pšenične slame, imajući u vidu da je ona u baliranom obliku, jedini (isplativ) izbor njenog sagorevanja bilo bi sagorevanje u nepokretnom sloju, te autor pri modelovanju nije ni razmatrao druge tehnologije sagorevanja.

Kada je reč o ispitivanju uticaja različitih radnih parametara na proces sagorevanja na malim eksperimentalnim postrojenjima ono je brzo, efikasno i relativno jeftino, međutim nedostatak ovako dobijenih rezultata je što je njihova primena ograničena samo na uslove pod kojima su dobijeni. Sa druge strane, matematičko modelovanje i računarske simulacije predstavljaju brz način za dobijanje detaljnih informacija o procesu sagorevanja, koje je inače vrlo teško dobiti eksperimentalnim putem u realnim ložištima. Međutim, za formiranje matematičkih modela koji će u računarskoj simulaciji dati što preciznije informacije, od ključne važnosti je dobro razumevanje različitih mehanizama i subprocesa koji se odvijaju tokom procesa sagorevanja. Na taj način se razvoj novih peći i kotlova neće bazirati samo na empirijskim podacima, već će teći simultano sa razvojem matematičkog modela procesa sagorevanja i biće rešenje pretežno zasnovano na rezultatima računarskih simulacija. Osim što u poređenju sa eksperimentalnim istraživanjima računarske simulacije štede vreme, ljudske i materijalne resurse, jedna od najznačajnijih prednosti matematičkog modelovanja, odnosno računarskih simulacija, je mogućnost nezavisnog variranja pojedinih parametara sagorevanja u cilju pojedinačne procene uticaja koji imaju na proces. Iz tog razloga matematičko modelovanje postaje prvi izbor pri projektovanju, analizi, testiranju i optimizaciji postrojenja za sagorevanje.

Ovaj rad se ograničava na istraživanje procesa sagorevanja poljoprivredne biomase u poroznom sloju sa fokusom na procese sušenja, devolatilizacije, sagorevanja volatila i sagorevanja koksa. Za poznate parametre sagorevanja (gustinu sloja i protok vazduha), formirani model daje sliku o brzini sagorevanja, temperaturnom profilu i koncentraciji pojedinih gasova u sloju, a konkretizovan je za proces sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju.

Sa jedne strane, za potrebe analize i opisivanja pojava koje se u sloju odvijaju pri sagorevanju pšenične slame, a sa druge za potrebe validacije matematičkog modela, realizovana su merenja kombinacijom četiri gustine sloja (40, 50, 60 i 70

kg/m³) i četiri protoka vazduha (565, 1112, 1306 i 1853 kg/m²h). Pored ovih, realizovana su još tri merenja za gustinu sloja 60 kg/m³ i protok vazduha 1152, 1332 i 1872 kg/m²h, pri kojima je vršeno i merenje sastava produkata sagorevanja.

I prema eksperimentalnim i prema rezultatima računarskih simulacija, zaključeno je da je za sve četiri gustine sloja brzina sagorevanja najveća pri protoku vazduha od 1306 kg/m²h, kome odgovara koeficijent viška vazduha oko 1,5. Pri protocima vazduha manjim ili većim od ove vrednosti javljali su se zastoji na dijagramu brzine sagorevanja što je posledica ili nedovoljne količine vazduha da bi devolatilizacija slame, sagorevanje volatila i sagorevanje koksa tekli simultano, ili sa druge strane prevelike količine vazduha što za posledicu ima da su konvektivni gubici veći od toplote oslobođene sagorevanjem volatila, što takođe dovodi do usporavanja sagorevanja.

Ako se posmatra promena brzine sagorevanja sa promenom gustine sloja, primetan je opadajući trend brzine sagorevanja sa povećanjem gustine sloja, pa tako za režime PS40/1306, PS50/1306, PS60/1306, PS70/1306 brzina sagorevanja respektivno iznosi 306, 277, 269 i 250 kg/m²h. Međutim i pored ove činjenice, ne daje se prednost najmanjoj gustini sloja iz više razloga. Kako je slama rastresit materijal i već sama po sebi ima malu nasipnu i energetske gustinu, ekonomski činioci (cena transporta, skladištenja, manipulacije, veličine postrojenja za sagorevanje i dr.) nalažu veću gustinu baliranja. Kako se u Srbiji i dalje pretežno koriste balirke starije generacije, a manipulacija balama se vrši ručno, maksimalna (i ujedno najčešća) gustina koja dozvoljava ovakvu vrstu rada je gustina bale od 60 kg/m³. Osim toga, kako se na slici 5.13 može videti da srednja maksimalna temperatura raste sa porastom gustine što je posebno važno sa aspekta energetske efikasnosti postrojenja za sagorevanje.

Takođe, sa porastom gustine sloja primećeno je smanjenje brzine kretanja fronta sagorevanja (sa 8,1 m/h u režimu PS40/1306 na 3,8 m/h u režimu PS70/1306), kao i do smanjenja razlike između brzine paljenja i brzine sagorevanja za isti protok vazduha. Ovo se može objasniti na dva načina: sa smanjenjem gustine sloja raste njegova poroznost te front sagorevanja može brže da se kreće kroz veće šupljine, a drugi razlog može biti što je neka od zapaljenih slamčica propala kroz šupljine sloja i na taj način ubrzala kretanje fronta. Kako su front sagorevanja i vazduh za sagorevanje suprotnosmernih tokova, druga mogućnost se može ostaviti samo pri manjim protocima vazduha (režim PS40/565 i PS40/1112). Takođe, uočeno je da, nezavisno od gustine sloja, krive paljenja i sagorevanja konvergiraju sa porastom protoka vazduha do 1306 kg/m²h, nakon čega divergiraju. Kako je gore objašnjeno, razlog ovakvom odnosu brzina paljenja i sagorevanja je što su pri malom

protoku vazduha mali i konvektivni gubici, ali je sa druge strane i intezitet sagorevanja slabiji. Međutim, sa porastom količine vazduha za sagorevanje, usled pojačanog konvektivnog prenosa toplote, raste i količina toplote potrebna za odvijanje procesa devolatilizacije slame, koja se obezbeđuje iz intezivnijeg sagorevanja, ali samo do kritične vrednosti protoka ($1306 \text{ kg/m}^2\text{h}$), posle koje dolazi do obamiranja procesa sagorevanja usled prevelikih konvektivnih gubitaka.

Kada je reč o temperaturnom profilu u sloju, on jasno ukazuje na dve faze sagorevanja - faza paljenja i faza sagorevanja koksa. Tokom faze paljenja, kretanje fronta sagorevanja praćeno je oštrim skokom temperatura na termoparovima, koje po prolasku fronta beleže pad, a potom ponovni rast nakon što front sagorevanja dostigne rešetku, čime je praktično otpočela faza sagorevanja koksa. Ponovni pad temperature označava kraj i ove faze, odnosno kraj procesa sagorevanja.

Bitno je primetiti da iako sa porastom protoka vazduha, nakon prekoračenja kritične vrednosti ($1306 \text{ kg/m}^2\text{h}$), dolazi do smanjenja brzine paljenja i sagorevanja, temperatura i dalje raste, što može ukazivati na to da se sagorevanje odvijalo u uslovima bogate smeše, odnosno da iako je višak vazduha bio oko 1,4-1,5, to nije bilo dovoljno da bi se mogla ostvariti potpuna oksidacija gasovitih produkata devolatilizacije, tara i koksa. Povećanjem protoka vazduha (višak vazduha je bio oko 2) ostvareno je i njihovo sagorevanje, a dobijena toplota je očigledno veća od toplotnih gubitaka usled konvekcije, te se to beleži kao porast temperature. Ovo je naročito izraženo u režimima sa najvećom gustinom sloja (režimi PS70/...), što ukazuje da je zbog male poroznosti sloja ravnomerna distribucija primarnog vazduha kroz sloj nedovoljno efikasna, što dovodi do tinjanja slame bez mogućnosti postizanja ustaljenog sagorevanja. U prilog tome ide i činjenica da je za najveću gustinu sloja i najmanji protok vazduha (režim PS70/565), srednja maksimalna temperatura niža za oko $60 \text{ }^\circ\text{C}$ u odnosu na vrednosti ostalih režima pri istom protoku vazduha. Kao rešenje treba razmotriti mogućnost dovođenja sekundarnog vaduha za sagorevanje.

Poređenjem eksperimentalnih i rezultata simulacije temperaturnih profila u sloju vidi se njihovo veliko slaganje. Na grafiku simulacije temperaturnog profila, za režim PSG60/1152, vidi se trend rasta temperature u dva pravca, jedan u smeru ka rešetki (sa početnih $800 \text{ }^\circ\text{C}$ pa naviše), a drugi u završnoj fazi sagorevanja usled sagorevanja zaostalog koksa, koji je iznosio nepunih $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Isti profil je snimljen i eksperimentalno, gde se usled sagorevanja u uslovima bogate smeše, temperatura u fazi paljenja kretala nešto preko $800 \text{ }^\circ\text{C}$ na površini sloja sa trendom porasta u smeru ka rešetki, a u fazi sagorevanja koksa oko $950 \text{ }^\circ\text{C}$. I pri većim protocima vazduha, režimi PSG60/1332 i PSG60/1872, eksperimentalni i simulacioni grafik

profila brzina imaju veliko slaganje, pa je na oba temperatura u fazi paljenja bila oko 900-1000 °C, a u fazi sagorevanja koksa nešto ispod 1100 °C.

Kada je reč o koncentracionim profilima O₂, CO i CO₂, treba imati u vidu da su eksperimentalna merenja vršena u dimnjaku postrojenja, na oko 2 m iznad rešetke, a da matematički model posmatra samo reakcije u sloju (ne i u gasnoj fazi iznad sloja), odnosno da se simulacijom matematičkog modela obezbeđuju koncentracioni profili u sloju. Svejedno, pokazalo se da model može služiti kao dobar alat za nalaženje veze između koncentracija u sloju i koncentracija izlaznih produkata sagorevanja, što je i realizovano za tri režima sa istom gustinom sloja (60 kg/m³) i protocima vazduha kojima odgovaraju koeficijenti viška vazduha oko 1, 1,5 i 1,9. Zaključeno je da model daje rezultate koji su vrlo dobro usaglašeni sa rezultatima eksperimentalnih merenja, pa je i na ovaj način potvrđeno da bi režim sagorevanja sa koeficijentom viška vazduha od 1,5 (režim PSG60/1332) bio najbolji izbor u okolnostima malog ložišnog prostora, bez mogućnosti dovođenja sekundarnog vazduha.

U radu su analizirane mogućnosti sagorevanja pšenične slame u nepokretnom sloju sa aspekta varijacije gustine sloja i protoka primarnog vazduha. Utvrđeno je da na ovaj način (bez dovođenja sekundarnog vazduha) ne može efikasno sagorevati sloj gustine veće od oko 60 kg/m³. Međutim prostora za dalju analizu ima u smeru povećanja gustine sloja (do čak 200 kg/m³) uz proširenje ložišnog prostora i uvođenje sekundarnog vazduha. U tom slučaju bi proces sagorevanja trebalo voditi tako da se na rešetci odvija sagorevanje u substehiometrijskim uslovima (praktično bi se na rešetci odvijala gasifikacija biomase), a u sekundarnoj zoni, zoni oksidacije, bi se uvodio sekundarni vazduh radi potpunog sagorevanja produkata gasifikacije iz primarne zone. Naravno preduslov za potpuno sagorevanje u sekundarnoj zoni nije samo količina vazduha, već kvalitet njegovog mešanje sa gorivim produktima. U tom smislu, i realizovani matematički model bi trebalo nadograditi modelom sagorevanja u prostoru iznad sloja kako bi se modelovanjem mogla dobiti celovita slika procesa sagorevanja.

LITERATURA

- Ahn S.Y., Go S.M., Lee K.Y., Lim T.H., Seo S.I., Choi G.M., Kim D.J., 2011. The characteristics of NO production mechanism on flue gas recirculation in oxy-firing condition. *Applied Thermal Engineering*, 31, pp.1163 - 1171.
- Alimpić M., 1983. Energija iz poljoprivrede. *Savremena poljoprivredna tehnika* 9 (1-2), pp. 1-7.
- Antonijević D., Voronjec D., 1992. Kretanje vlaga unutar materijala tokom procesa sušenja sa konduktivnim dovođenjem toplote. *Procesna tehnika*, 2 – 3, pp. 318-321, Beograd.
- Ates F., 2011. Co-pyrolytic Behaviors of Agricultural Wastes. *Energy Sources - Part A*, 34, pp. 111-121
- Babić M., 1986. Toplovodni kotao BST-400, elaborat. Poljoprivredni fakultet, Novi Sad: 5-9.
- Babić M., 1990. Protokol o ispitivanju kotla UTK-40, proizvođač „Bratstvo“ Subotica, lociranog u Subotici, izveštaj. Poljoprivredni fakultet, Novi Sad: 1-4.
- Babić M., Babić Lj., 1983. Prilog proučavanju diskontinualnih procesa sagorevanja periodičnog karaktera. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 1-2 (9), pp. 35-40.
- Badger P.C., Fransham P., 2006. "Use of mobile fast pyrolysis plants to densify biomass and reduce biomass handling costs - A preliminary assessment. *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 321 - 325.
- Badger P.C., 1999. Solid Fuels. *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, (V), Energy & Biomass Engineering, ASAE, eds. Kitani, O., pp. 248-288.
- Bamford C.H., Crank J., Malan D.H., 1946. The combustion of Wood. Part 1. *Proceedings of the Cambridge, Philosophical Society*.
- Bapat D.W., Kulkarni S.V., Bhandarkar V.P., 1997. Design and operating experience on fluidized bed boiler burning biomass fuels with high alkali ash. Vancouver, New York, NY: ASME.
- Bassilakis R, Carangelo R.M., Wójtowicz M.A., 2001. TG-FTIR analysis of biomass pyrolysis. *Fuel*, 80, pp. 1765-1786.

- Basu P., 2006. Combustion and gasification in fluidized beds. CRC press, Taylor and Francis group, London.
- Basu P., 2013. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Second Edition. Elsevier, USA.
- Bhattacharya S.C., Abdul Salam P., 2002. Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries. Biomass and Bioenergy, 22, pp.305-317.
- Bhattacharya S.C., Salam P.A., Sharma M., 2000. Emissions from biomass energy use in some selected Asian countries. Energy, 25, pp.169-188.
- Bildirici M., Özaksoy F., 2013. The Relationship Between Economic Growth and Biomass Energy Consumption in some European Countries. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 5, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4802944>
- Bildirici M., Özaksoy F., 2016. Woody Biomass Energy Consumption and Economic Growth in Sub-Saharan Africa. Procedia Economics and Finance, 38, pp. 287-293.
- Blasi C.D., 2008. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Progress in Energy and Combustion Science, 34, pp.47-90.
- Bogner M., 2003. Termotehničar. Interklima-grafika, Vrnjačka Banja. Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije, Beograd
- Bogner M., Vasiljević B., 1986. Osnovi teorije i tehnike sušenja. Procesna tehnika, (2 i 3), pp. 69-85.
- Bridgwater A.V., 2003. Renewable fuels and chemical by thermal processing of biomass. Chemical Engineering Journal, 91, pp. 87–102.
- Brkić Lj., Živanović T., 2006. Termički proračun parnih kotlova. Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Brkić M., Janić T., 1998. Mogućnosti korišćenja biomase u poljoprivredi. In Proc. Briketiranje i peletiranje biomase iz poljoprivrede i šumarstva, pp. 5-9.
- Brkić M., Tešić M., Furman T., Martinov M., Janić T., 2007. Potencijali i mogućnosti briketiranja i peletiranja otpadne biomase na teritoriji pokrajine Vojvodine (studija), Poljoprivredni Fakultet, Novi Sad.

- Broek R., Faaij A., Wijk A., 1995. Biomass Combustion Power Generation Technologies, Background report 4.1, Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, The Netherlands.
- Bruch C., Peters B., Nussbaumer T., 2003. Modelling wood combustion under fixed bed conditions. *Fuel*, 82 (6), pp. 729-738.
- Bryden K.M., Ragland K.W., 1996. Numerical Modeling of a Deep, Fixed Bed Combustor. *Energy & Fuels*, 10 (2), pp. 269-275.
- Čepić Z., Miljković B., Nakomčić-Smaragdakis B., Živančev (Šenk) N., Marković D., 2013. Experimental Plant for Testing of Agricultural Biomass Combustion. 16. Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia – SIMTERM, Soko Banja: University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, Society of Thermal Engineers of Serbia, 22-25 Oktobar, pp. 368-371.
- Čepić Z., Nakomčić-Smaragdakis B., Dragutinović N., 2016a. Crop residues as source of energy in Autonomous Province of Vojvodina. ISWA world congress 2016, Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, 19-21 Septembar, pp. 2127-2132.
- Čepić Z., Nakomčić-Smaragdakis B., Dragutinović N., 2016b. Mathematical modeling of straw combustion in a fixed bed. ISWA world congress 2016, Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, 19-21 Septembar, pp. 2133-2138.
- Čepić Z., Nakomčić-Smaragdakis B., Miljković B., Radovanović (Petrović) Lj., Đurić S., 2016c. Combustion Characteristics of Wheat Straw in a Fixed Bed, *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, 38 (7), pp. 1007-1013.
- Čepić Z., Nakomčić-Smaragdakis B., Dragutinović N., 2017a. Description of straw combustion in a fixed bed. The 8th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2017), Novi Sad, Serbia, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, June 8-10, PS-1.17, pp. 1-3.
- Čepić Z., Nakomčić-Smaragdakis B., 2017b. Experimental analysis of the influence of air-flow rate on wheat straw combustion in a fixed bed. *Thermal Science*, 21 (3), pp. 1443-1452.
- De Jong W., Unal O., Andries J., Hein K.R.G., Spliethoff H., 2003. Thermochemical conversion of brown coal and biomass in a pressurised fluidised bed gasifier

- with hot gas filtration using ceramic channel filters: measurements and gasifier modeling. *Applied Energy* 74 (3), pp. 425–437.
- Dedović N., Igić S., Janić T., Matić-Kekić S., Ponjican O., Tomić M., Savin L., 2012. Efficiency of Small Scale Manually Fed Boilers – Mathematical Models. *Energies*, 5, pp. 1470-1489.
- Demirbas A., 2001. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemical. *Energy Conversion and Management*, 42, pp. 1357–1378.
- Demirbas A., 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, pp 219–30.
- Demirbas A., 2007a. Combustion of biomass. *Energy Sources - Part A*, 29, pp. 549-561.
- Demirbas A. 2007b. Combustion systems for biomass fuel. *Energy Sources - Part A*, 29, pp. 303-312.
- Demirbas A., 2005. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, pp. 171-192.
- Demirbas M.F., Balat M., Balat H., 2009. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, 50, pp. 1746-1760.
- Dhillon R.S., von Wuehlisch G., 2013. Mitigation of Global Warming through Renewable Biomass. *Biomass and Bioenergy*, 48, pp. 75-89.
- Di Blasi C., 2000. Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers. *Chemical Engineering Science*, 55 (15), pp. 2931-2944.
- Di Blasi C., Lanzetta M., 1998. Pyrolysis kinetics of wheat and corn straw. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 44, pp. 181-192.
- Dragičević V., 2003. Optimizacija ložišta za izgaranje biomase, doktorska disertacija. Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.
- Dragutinović N., Höfer I., Kaltschmitt M., 2017a. Effect of additives on thermochemical conversion of solid biofuel blends from wheat straw, corn

- stover, and corn cob. Biomass Conversion and Biorefinery, DOI 10.1007/s13399-017-0273-7
- Dragutinović N., Nakomčić-Smaragdakis B., Čepić Z., 2016. Comparison of fuel properties of crop residues and municipal solid waste for energy generation. ISWA world congress 2016, Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, 19-21 Septembar, pp. 1906-1919.
- Dragutinović N., Nakomčić-Smaragdakis B., Čepić Z., 2017b. Comparison of ash melting behavior of crop residues and woody biofuels with recommended measures. The 8th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2017), Novi Sad, Serbia, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, June 8-10, PS-1.16, pp. 1-4.
- Dražković D., Radovanović M., Adžić M., 1986. Sagorevanje. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- Dupont C., Boissonnet G., Seiler J.M., Gauthier P., Schweich D., 2007. Study about the kinetic processes of biomass steam gasification. Fuel, 86(1), pp. 32–40.
- Đorđević B., Valent V., Šerbanović S., 1987. Termodinamika i termotehnika. Građevinska knjiga, Beograd
- Đurić V., Bogner M., 1981. Parni kotlovi – teorijske osnove i proračuni, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- Đurović D., 2008. Prilog razvoju sagorevanja balirane biomase iz poljoprivredne proizvodnje, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- EPA Technical Bulletin, Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled, EPA-456/F-99-006R, November 1999, <http://www.epa.gov/ttn/catc1/dir1/fnoxdoc.pdf>
- Erić A., 2010. Termomehanički procesi pri sagorevanju baliranog sojinog ostatka u potisnom ložištu, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu.
- Erlich C., 2009. Comparative study of residue pellets from cane sugar and palm-oil industries with commercial wood pellets, applied in downdraft gasifier, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, ISBN 978-91-7415-455-9.

- Faaij A.P.C., 2006a. Bio-energy in Europe: changing technology choices. *Energy Policy*, 34, pp. 322-342.
- Faaij A., 2006b. Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, pp. 343-375.
- Fatehi H., Bai X. S., 2014. A Comprehensive Mathematical Model for Biomass Combustion. *Combustion Science and Technology*, 186, pp. 574-593.
- Ferziger J.H., Peric M., 2008. *Numerische Strömungsmechanik*. Springer, Berlin.
- Fjellerup J., Henriksen U., Jensen A.D., Jensen P.A., Glarborg P., 2003. Heat Transfer in a Fixed Bed of Straw Char. *Energy Fuels*, 17 (5), pp. 1251–1258.
- Flamant G., Lu J.D., Variot B., 1993. Towards a generalized model for vertical walls to gas-solid fluidized bed heat transfer. Part 2. Radiative transfer and temperature effects. *Chemical Engineering Science*, 48 (13), pp. 2493-2503.
- Fletcher T. H., 2012. *Handbook of Biomass and Co-Firing*. Brigham Young University, Provo, Utah.
- Gani A., Naruse, I., 2007. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. *Renewable Energy*, 32, pp. 649-661.
- Gao N., Li A., Quan C., Qu Y., Mao L., 2012. Characteristics of hydrogen-rich gas production of biomass gasification with porous ceramic reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, pp. 9610-9618
- Gesell G., Clark M., 2007. Grate and Boiler Technology Assessment for a New WTE Plant in the U.S., 15th North American Waste to Energy Conference, May 21-23, 2007, Miami, Florida USA, NAWTEC15-3203.
- Ghenai C., 2010. Combustion of Syngas Fuel in Gas Turbine Can Combustor. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Giuntoli J., Agostini A., Caserini S., Lugato E., Baxter D., Marelli L., 2016. Climate change impacts of power generation from residual biomass. *Biomass and Bioenergy*, 89, pp. 146-158.
- Gokcol C., Dursun B., Alboyaci B., Sunan E., 2009. Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey. *Energy Policy*, 37, pp. 424-431.

- Göke S., Füre M., Bourque G., Bobusch B., Göckeler K., Krüger O., Schimek S., Terhaar S., Paschereit C.O., 2012. Influence of steam dilution on the combustion of natural gas and hydrogen in premixed and rich-quench-lean combustors. *Fuel Processing Technology*.
- Gort R., Brouwers J.J.H., 2001. Theoretical Analysis of the Propagation of a Reaction Front in a Packed Bed, *Combustion and Flame*, 124 (1–2), pp. 1-13.
- Gort R., 1995. On the Propagation of a Reaction Front in a Packed Bed: Thermal Conversion of Municipal Waste and Biomass, *Doktorska disertacija*, Univerzitet Twente, Twente, Holandija,
- Granada E., Eguia P., Comesan J.A., Patino D., Porteiro J., Saavedra A., 2012. Experimental Analysis of Several Biomass Fuels: The Effect of the Devolatilization Rate on Packed Bed Combustion, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4738593>
- Gulič M., Brkić Lj., Perunović P., 1986. *Parni kotlovi*. Mašinski fakultet, Beograd.
- Gulič M., Brkić Lj., Perunović P., 1991. *Parni kotlovi*. Mašinski fakultet, Beograd.
- Gulič M., Perunović P., Stepanov Lj., Pešenjanski I., Gvozdenac D., Sekulić D., 1980. Istraživanje procesa sagorevanja poljoprivrednih otpadaka u vertikalnom sloju, *Fakultet tehničkih nauka*, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.
- Gvozdenac D., Nakomčić-Smaragdakis B., Gvozdenac-Urošević B., 2010a. *Obnovljivi izvori energije*, FTN izdavaštvo, Novi Sad.
- Gvozdenac D., Petrović J., Brkić M., Marić M., Kljajić M., Gvozdenac Urošević B., Đaković D., 2010b, *Elaborat: Razvoj tržišta biomase u Vojvodini*, *Fakultet tehničkih nauka*, Novi Sad.
- Herz-Srbija, Brošura - Herz Biomasa. Datum pristupa: januar 2017. Brošura dostupna na: http://herzmediaserver.com/data/www/srb/brosure/herz_biomasa.pdf
- Hartmann H., Thuneke K., Holdrich A., Roßmann P., 2003. *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. Gulzow, Nemačka: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
- Hasegawa T., Sato M., Nakata T., 2001. A study of combustion characteristics of gasified coal fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123, p. 22.

- Hassan M., Salam A. & Alam A.M.S., 2009. Identification and characterization of trace metals in black solid materials deposited from biomass burning at the cooking stoves in Bangladesh. *Biomass and Bioenergy*, 33, pp.1376-1380.
- Horttanainen M., Saastamoinen J., Sarkomaa P., 2002. Operational limits of ignition front propagation against air flow in packed beds of different wood fuels. *Energy and Fuels*, 16, pp. 676-686.
- Houshfar E., Løvås T., Skreiberg Ø., 2012. Experimental Investigation on NOx Reduction by Primary Measures in Biomass Combustion: Straw, Peat, Sewage Sludge, Forest Residues and Wood Pellets. *Energies*, 5, pp. 270-290.
- Igić S., Pekez. Z., Brkić. M., Janić T., 2006. Određivanje toplotne moći, sadržaja vlage i pepela pšenične i sojine slame. *Revija agronomska saznanja*, 16 (5), pp. 38-43.
- Ilić M., i ostali. 2003. Energetski potencijal i karakteristike ostataka biomase i tehnologije za njenu pripremu i energetsko iskorišćenje u Srbiji (studija). Studija urađena u okviru projekta NP EE611-113A, Ministarstvo za nauku i tehnološki i razvoj R. Srbije, Beograd.
- International Energy Agency (IEA), 2016. Key world energy statistics, page 24. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf> (7.12.2016.)
- Janić T., Igić S., Dedović N., Pavlović D., Turan J., Sedlar A., 2015. Thermal Power of Small Scale Manually Fed Boiler. *Thermal Science*, 19, pp. 329-340.
- Janić T., Milenković B., Brkić M., Janjatović Z., Pavlović D., Gluvakov Z. 2012. Energetska efikasnost i analiza potencijala biomase (studija). Izvršilac studije Eko-produkt, Novi Sad.
- Janić T., 2000. Kinetika sagorevanja balirane pšenične slame, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- Janić T., Brkić M., Igić S., 2006a. Dobijanje toplotne energije sagorevanjem balirane biomase. *Revija agronomska saznanja*, 16 (3), pp. 45-47.
- Janić T., Brkić M., Igić S., 2006b. Uticaj hemijsko-fizičkih karakteristika balirane biomase na konstrukciju kotlovskih postrojenja. *Revija agronomska saznanja*, 16 (5), pp- 7-10.

- Janić T., Brkić M., Erdeljan Z., 1998. Sagorevanje balirane biomase. PTEP, 2 (3), pp. 117-121.
- Jenkins B.M., Baxter L.L., Miles Jr. T.R., Miles T.R., 1998. Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology, 54, pp. 17-46
- Jenkins B.M., 1999. Pyrolysis Gas. CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Energy & Biomass Engineering, 5, pp. 222-248, ASAE, eds. Kitani, O.
- Jensen A., Dam-Johansen K., Wojtowicz M., Serio M., 1998. Energy Fuels, 12, pp. 929-938.
- Jones J.M., Nawaz M., Darvell L.I., Ross A.B., Pourkashanian M., Williams A., 2006. Towards biomass classification for energy applications. Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, 1, pp. 331-339 eds. Bridgwater A.V, Boocock D.G.B, CPL Press, Thatcham
- Kaer S.K., 2004. Numerical modelling of straw-fired grate boiler. Fuel, 83, pp. 1183-1190
- Kaewluan S., Pipatmanomai, S., 2011. Gasification of high moisture rubber woodchip with rubber waste in a bubbling fluidized bed. Fuel Processing Technology, 92, pp. 671-677.
- Kaliyan N., Morey, R.V., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass and Bioenergy, 33, pp. 337-359.
- Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H., 2016. Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren, 3. aktualisierte Aufl. Springer.
- Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H., 2001. Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer.
- Kanevče G., Dedinec A., Dedinec A., 2016. Optimal Usage of Biomass for Energy Purposes Toward Sustainable Development - A Case of Macedonia, Thermal Science, 20 (1), pp. S77-S91.
- Karaosmanoglu F., Tetik E., Gollu E., 1999. Biofuel production using slow pyrolysis of the straw and stalk of the rapeseed plant. Fuel Processing Technology, 59, pp. 1-12.

- Kaushal P., Abedi J. & Mahinpey N., 2010. A comprehensive mathematical model for biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor. *Fuel*, 89, pp. 3650-3661.
- Kaygusuz K., 2012. Energy for sustainable development: A case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp.1116-1126.
- Keey R.B., 1972. *Drying Principles and Practice*, Pergamon Press, London.
- Keey R.B., 1992. *Drying of loose and particulate materials*. Hemisphere, NY.
- Khan A., De Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H., 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90, pp. 21–50.
- Khodaei H., Al-Abdeli Y.M., Guzzomi F., Yeoh G.H., 2015. An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion. *Energy*, 88, pp. 946-972.
- Khor A., Ryu C., Yang Y.B., Sharif V., Swithenbank J., 2007. Straw combustion in a fixed bed combustor. *Fuel*, 86, pp. 152–160.
- Koornneef J., Junginger M., Faaij A., 2007. Development of fluidized bed combustion - An overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(1), pp. 19-55
- Kosi F., Milenković R., Raičević D., Ercegović Đ., Vukič Đ., Živković M., Radojević R., 1996. Eksperimentalno određivanje parametara sušenja biljnih materijala. *Poljoprivredna tehnika*, 1-2 (95), pp. 1-19, Beograd.
- Kosi F., Raičević D., Ercegović Đ., Vukič Đ., Živković M., Radojević R., Milenković R., 1995. Stanje istraživanja i razvoja tehničko-tehnološki sistema sušenja biljnih materijala. *Poljoprivredna tehnika*, vol 5-6 (95), pp. 13-16, Beograd.
- Kostić Z., Nošpal A., Oka S., 1995. Biomass Combustion in Fluidized Bed. *Termotehnika*, 11 (4), pp. 317-328, Beograd.
- Laković M.S., Jović M.M., i Stojanović B.V., 2015. Kotlovi za sagorevanje goriva u fluidizovanom sloju. *Tehnika*, 70(4), pp. 625-630.
- Larson E., Fiorese G., Liu G., Williams R., Kreutza T., Consonni S., 2010. Co-production of decarbonized syngases and electricity from coal + biomass with

- CO₂ capture and storage: an Illinois case study. *Energy & Environmental Science*, 3, pp. 28-42.
- Leckner B., Karlsson M., 1993. Gaseous emissions from circulating fluidized bed combustion of wood. *Biomass Bioenergy* 4, pp. 379-389.
- Leckner C., Chyang S., Qian F.P., Lin Y.C., Yang S.H., 2008. NO and N₂O emission characteristics from a pilot scale vortexing fluidized bed combustor firing different fuels. *Energy Fuels*, 22, pp. 1004-1011.
- Leckner B., 1998. Fluidized bed combustion: Mixing and pollutant limitation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 24, pp. 31-61
- Lefebvre A.H., Ballal D.R., 2010. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels*. Boca Rotan: Taylor & Francis.
- Li J., Paul C.M., Younger L.P., Watson I., Hossain M., Welch S., 2015. Combustion Modelling of Pulverized Biomass Particles at High Temperatures. *Energy Procedia*, 66, pp. 273-276.
- Li X.T., Gradce J.R.J., Lim C., Watkinson A.P., Chen H.P.R., Kim J., 2004. Biomass gasification in a circulating fluidized bed. *Biomass and Bioenergy*, 26, pp.171-193.
- Lv D., Xu M., Liu X., Zhan Z., Li Z., Yao H., 2010. Effect of cellulose, lignin, alkali and alkaline earth metallic species on biomass pyrolysis and gasification. *Fuel Processing Technology*, 91, pp. 903-909.
- Ma L., Jones J.M., Pourkashanian M., Williams A., 2007. Modelling the combustion of pulverized biomass in an industrial combustion test furnace. *Fuel*, 86 (12–13), pp. 1959-1965.
- Martinov, M., Gemeš R., 1980. Toplotna moć slame žita uzgajanih na području SAP Vojvodine. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 6 (3-4), pp. 95-101.
- Masia A.A.T., Buhre B.J.P., Gupta R.P., Wall T.F., 2007. Characterising ash of biomass and waste. *Fuel Process Technology*, 88, pp. 1071–1081.
- Massman W.J., 1998. A review of the molecular diffusivities of H₂O, CO₂, CH₄, CO, O₃, SO₂, NH₃, N₂O, NO, and NO₂ in air, O₂ and N₂ near STP. *Atmospheric Environment*, 32 (6), pp. 1111-1127.

- McKendry P., 2002a. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83 (1), pp. 55-63.
- McKendry P., 2002b. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83 (1), pp. 47-54.
- Miah M.D., Rashid H.A., Shin M.Y., 2009. Wood fuel use in the traditional cooking stoves in the rural floodplain areas of Bangladesh: A socio-environmental perspective. *Biomass and Bioenergy*, 33, pp.70-78.
- Miles T.R., Miles J.T.R., Baxter L.L., Bryers R.W., Jenkins B.M., Oden L.L. 1995., Alkali deposits found in biomass power plants. A preliminary investigation of their extent and nature. Report of the National Renewable Energy Laboratory (NREL/TZ-2-11226-1; TP-433-8142), Golden, CO, USA.
- Miljković B., 2015. Experimental Facility for Analysis of Biomass Combustion Characteristics. *Thermal Science*, 19 (1), pp. 341-350.
- Miljković B., 2012. Matematički model sagorevanja pšenične slame u pokretnom sloju, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- Miljković B., Pešenjanski I., Vićević M., 2013. Mathematical modelling of straw combustion in a moving bed combustor: A two dimensional approach. *Fuel*, 104, pp. 351-364.
- Mitić D., 1998. Fizičke karakteristike biomasa i biobriketa Srbije (potencijalna ekološka goriva), monografija, JDPTEP, JSDITZ, Novi Sad – Niš, 119.
- Mitić D., Manoilov A., 1997. Interni izveštaj laboratorije za sagorevanje i termotehniku, FZNR Niš (Tehničke analize biomasa Srbije). Izveštaj broj 16./17.3.97
- Mladenović M., 2013. Istraživanje termomehaničkih procesa prilikom razgradnje tečnih goriva velikih gustina u fluidizovanom sloju, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- Mladenović M., Dakić D., Nemoda S., Paprika M., Komatina M., Repić B., Erić A., 2016b. The combustion of biomass – The impact of its types and combustion technologies on the emission of nitrogen oxide. *Hemijska industrija*, 70, pp. 287-298.

- Mladenović M., Paprika M., Marinković A., 2016a. Mere denitrifikacije pri sagorevanju biomase. 29. Međunarodni kongres o procesnoj industriji – PROCESING '16. 2-3. Jun, 2016, Beograd, pp. 173-185.
- Mladenović R., Dakić D., Erić A., Mladenović M., Paprika M., Repić B., 2009. The boiler concept for combustion of large soya straw bales. *Energy*, 34, pp. 715-723.
- Moilanen A., 2006. Thermogravimetric characterisations of biomass and waste for gasification processes. VTT Technical Research Centre of Finland. Publications No 607, pp. 103
- Mousques P., Dirion J.L., Grouset D., 2001. Modeling of solid particles pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 58, pp. 733–745.
- Nakomcic-Smaragdakis B., Cepic Z., Dragutinovic N., 2016. Analysis of solid biomass energy potential in Autonomous Province of Vojvodina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, pp. 186-191.
- Nakomčić-Smaragdakis B., Čepić Z., Dragutinović N., 2014. Proces sagorevanja pšenične slame i njegov uticaj na zagađenje vazduha. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 40 (1), pp. 55-62.
- Nakomčić-Smaragdakis B., Čepić Z., Dragutinović N., 2015. Energetski potencijal i značaj korišćenja poljoprivredne biomase u AP Vojvodini. 9. International Scientific Conference "Metrology and Quality in Production Engineering and Environmental Protection" - ETIKUM, Novi Sad, Srbija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 19-20 Jun, pp. 85-88.
- Nikolić S., Miletić M., 1985. Efikasnost sagorevanja goriva u funkciji gorionika, Beograd: Naučna knjiga.
- Ninić N., Oka S., Nikolić S., Nikolić M., Mičić J., 1994. Energetski potencijal biljnih ostataka u Srbiji, Monografija, Jugoslovensko društvo termičara, Beograd.
- Nussbaumer T., 2001. Energie. In *Energie aus Biomasse*, eds. Kaltschmitt M, Haltmann H, 288-389. Springer, Berlin.
- Nussbaumer T., 2003. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy & Fuels*, 17, pp. 1510-1521

- Nussbaumer T., Hustad J.E., 1997. Overview of Biomass Combustion, Chapter Developments in Thermochemical Biomass Conversion, pp. 1229-1243, Springer.
- Nutalapati D., Gupta R., Moghtaderi B., Wall T.F., 2007. Assessing slagging and fouling during biomass combustion: A thermodynamic approach allowing for alkali/ash reactions. *Fuel Processing Technology*, 88, pp.1044–1052.
- Obernberger I., Brunner T., Bärnthaler G., 2006. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy* 30, pp. 973–982.
- Oka S., 1992. Korišćenje otpadne čvrste biomase u energetske svrhe. In Proc. Sagorevanje biomase u energetske svrhe, 7-19. Beograd.
- Oka S., 1998. Korišćenje otpadne čvrste biomase u energetske svrhe. *Energetika, ekonomije, ekologija*, 3(2), pp. 61-66
- Oka S., 1994. Sagorevanje u fluidizovanom sloju, Procesi i primena, Jugoslovensko društvo termičara, Beograd.
- Okumura Y., Hanaoka T., Sakanishi K., 2009. Effect of pyrolysis conditions on gasification reactivity of woody biomass-derived char. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, pp. 2013 - 2020.
- Olsson M., 2006. Wheat Straw and Peat for Fuel Pellets-Organic Compounds from Combustion. *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 555-564.
- Overend R.P., 1996. Thermochemistry: The key to minerals separation from biomass for fuel use in high performance systems. In Proc. VTT Symposium 164, Power production from biomass with special emphasis on gasification and pyrolysis R&DD, Technical Research centre of Finland, Espo, pp. 345-351.
- Panwar N.L., Kothari P., Tyagi V.V., 2012. Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 16, pp.1801-1816.
- Patankar S.V., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere, New York, USA.
- Pedersen K., 2003. The product ratio of CO/CO₂ in the oxidation of biomass char, Master Thesis, Department of Chemical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark.

- Pedersen L.T., 1998. Straw combustion on the grate, Master Thesis, Department of Chemical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark.
- Pereira E.G., da Silva J.N., de Oliveira J.L., Machado, C.S., 2012. Sustainable energy: A review of gasification technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 4753-4762.
- Perunović P., Pešenjanski I., Timotić U., 1985. Istraživanje procesa sagorevanja poljoprivrednih otpadaka u vertikalnom sloju – II faza, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- Pešenjanski I., 2000. Kinetika sagorevanja pšenične slame, Magistarska teza, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- Pešenjanski I. 2002. Parametri kinetike reakcije pšenične slame pri niskotemperaturskom sagorevanju, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu.
- Pešenjanski I., Perunović P., Bajić V., Cvetičanin M., Marković T., 1995. Ložište za sagorevanje baliranih poljoprivrednih otpadaka. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 5(3), pp. 41-43.
- Pongpiachan S., Tipmanee D., Khumsup C., Kittikoon I., Hirunyatrakul P., 2015. Assessing risks to adults and preschool children posed by PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) during a biomass burning episode in Northern Thailand. *Science of The Total Environment*, 508, pp. 435-444.
- Porteiro J., Patino D., Miguez J., Granada E., Moran J., Collazo J., 2012. Study of the reaction front thickness in a counter-current fixed-bed combustor of a pelletised biomass. *Combustion and Flame*, 159, pp. 1296-1302.
- Porteiro J., Míguez J.L., Granada E., Moran J.C., 2006. Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle. *Fuel Processing Technology*, 87, pp. 169-175.
- Porteiro J., Patino D., Moran J., Granada E., 2010b. Study of a Fixed-Bed Biomass Combustor: Influential Parameters on Ignition Front Propagation Using Parametric Analysis. *Energy Fuels*, 24 (7), pp. 3890-3897.
- Porteiro J., Patino D., Collazo J., Granada E., Moran J., Miguez J.L., 2010a. Experimental Analysis of the Ignition Front Propagation of Several Biomass Fuels in a Fixed-Bed Combustor. *Fuel*, 89 (1), pp. 26-35.

- Powlson D., 2006. Cereals straw for bioenergy: Environmental and agronomic constraints. In Proc. Expert Consultation: Cereals Straw Resources for Bioenergy in the European Union / Pamplona, pp. 45-59.
- Preveden Z., 1980. Alternativno gorivo i poljoprivredni otpaci. In Proc. Jugoslovenski simpozijum o aktuelnim problemima mehanizacije poljoprivrede, Jugoslovensko društvo poljoprivredne tehnike, Šibenik, pp. 579-591.
- Prins M.J., 2005. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, Doktorska disertacija, Technische Univesiteit Eindhoven, Nederland.
- Prvulović S., 2004. Modelovanje mehanizma prenosa toplote pri konvektivnom sušenju i utvrđivanje numeričkih pokazatelja, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu.
- Puig-Arnavat M., Bruno J.C., Coronas A., 2010. Review and analysis of biomass gasification models. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, pp. 2841-2851.
- Purnomo D.J.A., Ragland K.W., 1991. Pressurized downdraft combustion of woodchips. Symposium (International) on Combustion, 23 (1), pp. 1025-1032.
- Quaak P., Knoef H., Stassen H., 1999. Energy from Biomass, A Review of Combustion and Gasification Technologies. The World Bank, Washington D.C., U.S.A.
- Quaschnig V., 2013. Erneuerbare Energien und Klimaschutz – Techniken und Planung, Ökonomie und Ökologie, Energiewende. Hanser – Berlin.
- Radmanesh R., Chaouki J., Guy, C., 2006. Biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor: experiments and modeling. AIChE Journal, 52, pp. 4258-4272.
- Radovanović M., 1994. Goriva. Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- Reed M.C., Wright L.L., Overend R.P., Wiles C., 1999. Biomass Energy. Goswami, D.Y. Energy Resources – Mechanical Engineering Handbook, Ed. Frank Keith, Boca Raton: CRC Press LLC, pp. 7.24-7.33.
- Repić B., Dakić D., Paprika M., Mladenović M., Erić A., 2008. Soya Straw Bales Combustion in High-Efficient Boiler. Thermal Science, 12 (4), pp. 51-60.

- Richards G. A., McMillian M.M., Gemmen R.S. Rogers W.A., Cully S.R., 2001. Issues for low-emission, fuel-flexible power systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27, pp. 141-169.
- Richards G.A., Casleton K.H., Weiland N.T., 2010. Chapter 7 Syngas Utilization. In T. Lieuwen, V. Yang & R. Yetter, eds. *Synthesis gas combustion: Fundamentals and applications*. Boca Raton: CRC Press, pp.193 - 222.
- Richards T. L., Brownell D., Ruamsook K., Liu J., Thomchick E., 2012. Chapter 7 Biomass Harvest and Logistics. In C. Kole, C.P.J. Joshi & D.R. Shonnard, eds. *Handbook of Bioenergy Crop Plants*. Boca Raton, FL, USA: Chemical & Biological Sciences, pp. 119.
- Risnes H., Fjellerup J., Henriksen U., Moilanen A., Norby P., Papadakis K., 2003. Calcium addition in straw gasification. *Fuel*, 82, pp. 641–651.
- Ronnback M., Axell M., Gustavsson L., 2000. Combustion processes in a biomass fuel bed – experimental results. *Progress in thermochemical conversion*, Tyrol, Austria, pp. 17-22.
- Rosentrater K.A., Todey D., Persyin R., 2009. Quantifying Total and Sustainable Agricultural Biomass Resources in South Dakota – A Preliminary Assessment. *Agricultural Engineering International*, 11, pp. 1-14.
- Ryu C., Phan A.N., Yang Y.B., Sharifi V., Swithenbank J., 2007. Ignition and burning rates of segregated waste combustion in packed beds. *Waste Management*, 27, pp. 802-810.
- Ryu C., Yang Y.B., Khor A., Yates N., Sharifi V., Swithenbank J., 2006. Effect of fuel properties on biomass combustion: part I experiments – fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel*, 85, pp. 1039–1046.
- Radovanović M., Venderbosch R.H., van Swaij W.P.M., 1997. Biomasa kao gorivo, stanje razvoja i perspektive. *Termotehnika*, 2-3, pp. 225-288.
- Saastamoinen J.J., Taipale R., Horttanainen M., Sarkomaa P., 2000. Propagation of the ignition front in beds of wood particles. *Combustion and Flame*, 123, pp. 214-226.
- Sakthivadivel D., Iniyar S., 2017. Combustion characteristics of biomass fuels in a fixed bed micro-gasifier cook stove. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31, pp. 995-1002.

- Sarigiannis D., Karakitsios S., Kermenidou M., Nikolaki S., Zikopoulos D., Semelidis S., Papagiannakis A., Tzimou R., 2014. Total exposure to airborne particulate matter in cities: The effect of biomass combustion. *Science of The Total Environment*, 493, pp. 795-805.
- Sarigiannis D., Karakitsios S., Zikopoulos D., Nikolaki S., Kermenidou M., 2015. Lung cancer risk from PAHs emitted from biomass combustion. *Environmental Research*, 137, pp. 147-156.
- Shen G., Wei S., Zhang Y., Wang B., Wang R., Shen H., Li W., Huang Y., Chen Y., Chen H., Tao S., 2013. Emission and size distribution of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from residential wood combustion in rural China. *Biomass and Bioenergy*, 55, pp. 141-147.
- Shin D., Choi S., 2000. The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed. *Combust Flame*, 121, pp. 167-180.
- Sippula O., Lind T., Jokiniemi J., 2008. Effects of chlorine and sulphur on particle formation in wood combustion performed in a laboratory scale reactor. *Fuel*, 87, pp. 2425-2436.
- Statistics I., 2012. ISBN 978-92-64-17388-0 Renewables information. Paris, France.
- Statistički godišnjak Republike Srbije 2010-2016, Republički zavod za statistiku, <http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/Public/PageView.aspx?pKey=82>, 13.08.2017.
- Stenseng M., 2001. Pyrolysis and combustion of biomass, PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, Technical University of Denmark.
- Šefčić Đ., 1990. Istraživanje kriterijuma za ocenjivanje efektivnosti postupka valorizacije slame, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.
- Tešić M., 1981. Istraživanje potencijala, svojstava, situacije i mogućnosti korišćenja nuzproizvoda poljoprivrede kao izvora energije. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- Theis M., Skrifvars B.J., Hupa M., Tran H., 2006a. Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: Deposition rates. *Fuel*, 85, pp. 1125–1130.

- Theis M., Skrifvars B.J., Zevenhoven M., Hupa M., Tran H., 2006b. Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 2: Deposit chemistry. *Fuel*, 85, pp. 1992–2001
- Thunman H., Lind F., Breitholtz C., Berguerand N., Seemann M., 2013. Using an oxygen-carrier as bed material for combustion of biomass in a 12-MWth circulating fluidized-bed boiler. *Fuel*, 113, pp. 300-309.
- Thunman H. 2001. Principles and models of solid fuel combustion, PhD Thesis, Department of Energy Conversion, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- Thunman H., Leckner B., 2001. Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels. *Fuel*, 80, pp. 473-481.
- Thunman H., Leckner B., 2003. Co-Current and Counter-Current Fixed Bed Combustion of Biofuel – A Comparison, *Fuel*, 82, pp. 275-283.
- Thy P., Jenkins B.M., Grundvig S., Shiraki R., Leshner C.E., 2006. High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes. *Fuel*, 85, pp. 783–795.
- Thy P., Leshner C.E., Jenkins B.M., 2000. Experimental determination of hightemperature elemental losses from biomass slag. *Fuel*, 79, pp. 693–700.
- Thy P., Jenkins B.M., Grundvig S., Shiraki R., Leshner C.E., 2006. High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes. *Fuel*, 85, pp. 783-795.
- Thy P., Jenkins B.M., Williams R.B., Leshner C.E., 2004. Slag formation and potassium volatilization from rice straw blended wood fuel. *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry*, 49, pp. 89-92.
- Turanjanin V., Đurović D., Dakić D., Erić A., Repić B., 2010. Development of the Boiler for Combustion of Agricultural Biomass by Products. *Thermal Science*, 14, pp. 707-714.
- Turns S.R., 2006. *An introduction to combustion: concepts and applications*. McGraw-Hill.
- Urošević D., Gvozdenac-Urošević B., 2012. Comprehensive Analysis of a Straw-Fired Power Plant in Vojvodina. *Thermal Science*, 16 (1), pp. 97-106.

- Vaezi M., Passandideh-Fard M., Moghiman M., Charmchi, M., 2012. On a methodology for selecting biomass materials for gasification purposes. *Fuel Processing Technology*, 98, pp. 74–81.
- Valentim B., de Sousa M.J.L., Abelha P., Boavida D., Gulyurtlu I., 2006. Combustion studies in a fluidised bed—The link between temperature, NO_x and N₂O formation, char morphology and coal type. *International Journal of Coal Geology*, 67(3), pp. 191-201.
- Van der Lans R.P., Pedersen L.T., Jensen A., Glarborg P., Dam-Johansen K., 2000. Modelling and experiments of straw combustion in a grate furnace. *Biomass and Bioenergy*, 19 (3), pp. 199-208.
- Van Loo S., Koppejan J., 2008. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, London.
- Van Loo S., Koppejan J., *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*, Twente University Press, Enschede, 2002.
- Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G., Morgan T.J., 2012. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, 94, pp. 1–33.
- Vassilev S.V., Baxter D., Vassileva C.G., 2013. An overview of the behaviour of biomass during combustion: part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter. *Fuel*, 112, pp. 391–449.
- Vassilev S.V., Baxter D., Vassileva C.G., 2014. An overview of the behavior of biomass during combustion: part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. *Fuel* 117, pp. 152–183
- Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G., 2010. An overview of chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, pp. 913-933.
- Viglasky J., 1999. Slama kao potencijalni izvor energije. *Nacionalno društvo za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi - PTEP*, 3, (3-4), pp. 86-90.
- Wang L., Skreiberg O., Becidan M., 2014 Investigation of additives for preventing ash fouling and sintering during barley straw combustion. *Applied Thermal Engineering*, 70, pp.1262–1269

- Wei X., Schnell U., Hein K., 2005. Behaviour of gaseous chlorine and alkali metals during biomass thermal utilisation. *Fuel*, 84, pp. 841-848.
- Werther J., Saenger M., Hartge E.U., Ogada T., Siagi Z., 2000, Combustion of Agricultural Residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26, pp. 1-27.
- Whitty K.J., Zhang H.R., Eddings E.G., 2010. Pollutant Formation and Control. In T.C. Lieuwen, V. Yang & R. Yetter, eds. *Synthesis Gas Combustion: Fundamentals and Applications*. Boca Rotan: CRC Press Taylor & Francis Group. pp.169 - 188.
- Wiinikka H., Gebart R., 2005. The Influence of Air Distribution Rate on Particle Emissions in Fixed Bed Combustion of Biomass. *Combustion Science and Technology*, 177 (9), pp. 1747-1766.
- Xie H., Yu Q., Duan W., Wang K., Li X., Shi X., 2013. Pyrolysis characteristics and kinetics of lignin derived from three agricultural wastes. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5, pp. 063119-10.
- Yang Y.B., Newman R., Sharifi V., Swithenbank J., Ariss J., 2007. Mathematical modelling of straw combustion in a 38 MWe power plant furnace and effect of operating conditions. *Fuel*, 86, pp. 129–142.
- Yang Y.B., Ryu C., Khor A., Sharifi V., Swithenbank J., 2005. Fuel size effect on pinewood combustion in a packed bed. *Fuel*, 84, pp. 2026-2038.
- Yang Y.B., Sharifi V., Swithenbank J., 2004. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds. *Fuel*, 83, pp. 1553-1562.
- Yang Y.B., Yamauchi H., Nasserzadeh V., Swithenbank J., 2003. Effects of fuel devolatilisation on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed. *Science direct*, 82, pp. 2205-2221.
- Yin C., Rosendahl L., Clausen S., Hvid SL., 2012. Characterizing and modeling of an 88 MW grate-fired boiler burning wheat straw: experience and lessons. *Energy*, 4, pp. 473-482.
- Zakon o energetici Republike Srbije („Službeni glasnik RS”, broj 57/2011, 80/2011 - ispravka, 93/2012 i 124/2012).

- Zhang R.Z., Liu C.Y., Yin R.H., Duan J., Luo Y.H., 2011. Experimental and kinetic study of the NO-reduction by tar formed from biomass gasification, using benzene as a tar model component. *Fuel processing technology*, 92, pp.132-138.
- Zhao W., Li Z., Wang D., Zhu Q., Sun R., Meng B., Zhao G., 2008b. Combustion characteristics of different parts of corn straw and NO formation in a fixed bed. *Bioresource Technology*, 99, pp. 2956-2963.
- Zhao W., Li Z., Zhao G., Zhang F., Zhu Q., 2008a. Effect of air preheating and fuel moisture on combustion characteristics of corn straw in a fixed bed. *Energy Conversion and Management*, 49, pp. 3560-3565.
- Zhaosheng Y., Xiaoqian M., Yanfen L., 2010. Mathematical modelling of combustion in a gratefired boiler burning straw and effect of operating conditions under air- and oxygenenriched atmospheres. *Renewable Energy*, 35, pp. 895-903.
- Zhou H., Jensen A.D., Glarborg P., Jensen P.A., Kavaliauskas A., 2005. Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. *Fuel*, 84, pp. 389-403.
- Zhou H., Jensen A.D., Glarborg P., Kavaliauskas A., 2006. Formation and reduction of nitric oxide in fixed-bed combustion of straw. *Fuel* 85, pp. 705–716.
- Zolin A., Jensen A.D., Jensen P.A., Dam-Johansen K., 2002. Experimental study of char thermal deactivation, *Fuel*, vol 81, pp. 1065-1075
- Zosima A., Tzimou-Tsitouridou R., Nikolaki S, Zikopoulos D., Ochsenkühn-Petropoulou M., 2016. PM10 emissions and PAHs: The importance of biomass type and combustion conditions. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 51, pp. 341-347.
- Zwietering Th.N., 1959. The degree of mixing in continuous flow systems. *Chemical Engineering Science*, Vol 11, Issue 1, pp. 1-15.
- Živković M., 2013. *Ekologija sagorevanja*, skripta, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- Živković M., Radojević R., Radivojević D., Dražić D., 2008. Postupci pripreme ostataka rezidbe iz višegodišnjih zasada. *Poljoprivredna tehnika*, 4, pp. 1-8.

PRILOZI**Prilog 1: Matlab kod - sagorevanje pšenične slame u nepokretnom sloju**

```
% Model Sagorevanja Psenicne Slame U Nepokretnom Sloju (SPSUNS)
% Autor: Zoran Cepic
% Ulazni parametri:
% roslame    % gustina slame u sloju [kg/m^3]
% protok     % Protok vazduha na ulazu [kg/(m^2*h)]
function Matlab_kod_SPSUNS(roslame,protok)
wfin=protok/3600;
Hcil = 1.080;    % visina cilindricnog reaktora
hcil = 0.600;    % visina punjenja reaktora
rcil = 0.115;    % poluprecnik cilindricnog reaktora
rp = 0.002;     % poluprecnik slamcice
dp = 0.004;     % precnik slamcice
rpin = 0.00185; % untrasnji poluprecnik slamcice
roslamcice = 410.; % gustina zida slamcice
epsb = 1-roslame/roslamcice; % poroznost sloja
emis = 0.60;    % emisivnost

R = 8.314;      % Univerzalna gasna konstanta
Pr = 0.7;      % Prandtl-ov broj
Sch = 0.7;     % Schmidt-ov broj
sig = 5.67e-8; % Stefan-Bolcman-ova konstanta
Ro2 = 260;
Mtar = 0.0292;
Mc = 0.012;
Mh2o = 0.018;
Mco = 0.028;
Mco2 = 0.044;
Mch4 = 0.016;
Mh2 = 0.002;
```

```
Mcxhy = 0.030;
Mo2 = 0.032;
Mn2 = 0.028;
Mchar = 0.012;

% Difuzioni koeficijenti za pojedine gasove
Do2=0.1820e-4;
Dco=0.1807e-4;
Dco2=0.1381e-4;
Dh2o=0.2178e-4;
Dh2= 0.7453e-4;
Dch4=0.1952e-4;
Dcxhy=0.1952e-4;
Dtar=0.1952e-4;
Dn2=0.1788e-4;

Htar=16.689e6;
Hh2=12.77e6;
Hch4=39.858e6;
Hcxhy=70.422e6;
Hco=12.644e6;
Hchar=35.468e6;
Hh2o=2.258e6;
n=1;
brElem = n*100;
brInter = n*100;
Dx = Hcil/brElem;
vrSim = 900;      % Vreme simulacije
Dt = vrSim/brInter;
maxIter= 5;      % Maksimalni broj iteracija do konvergencije
tk5 = 0.54*brElem;  % Merno mesto na 600mm od resetke
tk4 = 0.45*brElem;  % Merno mesto na 500mm od resetke
tk3 = 0.27*brElem;  % Merno mesto na 300mm od resetke
```

```

tk2 = 0.18*brElem;    % Merno mesto na 200mm od resetke
tk1 = 0.09*brElem;    % Merno mesto na 100mm od resetke
V = rcil*rcil*pi*Dx;
S = 2*roslame*rp/(roslamcice*(rp^2-rpin^2));

Ts = 293*ones(brElem,brInter);    % Temperatura cvrste faze
Tf = 293*ones(brElem,brInter);
Te = 293*ones(brElem,brInter);
mvol = 0.717*roslame*V*ones(brElem,brInter);    % Masa volatila
mH2O = 0.093*roslame*V*ones(brElem,brInter);
mchar = 0.098*roslame*V*ones(brElem,brInter);
kvol = zeros(brElem,brInter);
rvol = zeros(brElem,brInter);
rH2O = zeros(brElem,brInter);
rchar = zeros(brElem,brInter);
ro2 = zeros(brElem,brInter);
rtar = zeros(brElem,brInter);
rf = zeros(brElem,brInter);
Csh2o = zeros(brElem,1);
Cfh2o = zeros(brElem,1);
kc = zeros(brElem,brInter);
kd = zeros(brElem,brInter);
kd1 = zeros(brElem,brInter);
kdH2O = zeros(brElem,brInter);
hs = zeros(brElem,brInter);
ko = zeros(brElem,brInter);
ko1 = zeros(brElem,brInter);
kh2 = zeros(brElem,1);
mvolold = 0.717*roslame*V*ones(brElem,1);
mH2Oold = 0.093*roslame*V*ones(brElem,1);
mcharold = 0.098*roslame*V*ones(brElem,1);
p = 101325*ones(brElem,brInter);    % Atmosferski pritisak
po2 = 0.20685*p; % Parcijalni pritisak kiseonika

```

```

mash = 4.65*V;

ROs = roslame*ones(brElem,brInter);
msukupno = zeros(brInter);
ROash = 0.093*roslame*ones(brElem,brInter);
ROf = 1.293*ones(brElem,brInter);    % Gustina vazduha 1.293 kg/m3
ROco = zeros(brElem,1);
ROco2 = zeros(brElem,1);
ROh2 = 1e-5*ones(brElem,1);
ROo2 = 0.2708*ones(brElem,brInter);
ROch4 = 1e-5*ones(brElem,1);
ROcxhy = 1e-5*ones(brElem,1);
ROsh2o = 4.6*ones(brElem,1);
ROfh2o = 0*ones(brElem,1);
ROtar = 1e-5*ones(brElem,brInter);
ROn2 = 1.0096*ones(brElem,1);
vf = wfin/1.293*ones(brElem,brInter);

for i = 1:brElem    % Pocetni uslovi
    Tf(i,1) = Ts(i,1);
    if i*Dx > hcil
        Ts(i,1) = 293;
    end
    Tf(i,1) = Ts(i,1);
    kvol(i) = 1.56e10*exp(-16600/Ts(i,1));
    rvol(i,1) = 0;
    kc(i,1) = 8619*exp(-15908./Ts(i,1));
    kd(i,1) = (2.53e-7*Ts(i,1).^0.75)/(rp*1.01e5);
    Csh2o(i) = ROsh2o(i)/Mh2o;
    Cfh2o(i) = ROfh2o(i)/Mh2o;
    rH2O(i,1) = 0;
    if i*Dx > hcil
        ROs(i,:)=0;
    end
end

```

```

    ROash(i,:)=0;
    mvol(i,:)=0;
    mH2O(i,:)=0;
    mchar(i,:)=0;
end
msukupno(1) = msukupno(1) + ROs(i,1)*V;
end
Tfold = Tf(i,1);
cpf = zeros(brElem,brInter);
Cpf = zeros(brElem,brInter);    % cpf srednje
cpf(:,1) = 990 + 0.122*Tf(:,1) - 5.68e6*Tf(:,1).^(-2);
vi = 1.98e-5*(Tf(:,1)/300).^(2/3);
Re = ROf(:,1).*vf(:,1)*2*rp./vi;
D = 0.207e-4*(Ts(:,1)/300).^(1.75);
J= (0.765./Re.^0.82 + 0.365./Re.^0.386)/epsb;
kd1(:,1) = (D.*ROf(:,1)./vi).^(2/3).*(vf(:,1)).*J;

Theta = (1 + 12*exp(-3300./Ts(:,1)))/(1 + 6*exp(-3300./Ts(:,1)));
ko(:,1) = 1./...
    ((rp-rpin)*mchar(:,1)*R.*Ts(:,1)./(Theta.*Mchar.*kd1(:,1)*V)+...
    1./kc(:,1));
ko1(:,1) = 1./...
    (R*Ts(:,1)./(Theta.*Mchar.*kd1(:,1)*S)+...
    1./kc(:,1));

% Inicijalizacija
Yo2svi = 0.20946*ones(brElem,brElem);
Yo2old = 0.20946*ones(brElem,1);
Ycosvi = 1e-5*ones(brElem,brElem);
Ycoold = 1e-5*ones(brElem,1);
Yco2svi = 34.999e-5*ones(brElem,brElem);
Yco2old = 34.999e-5*ones(brElem,1);
Yh2svi = 0.000055*ones(brElem,brElem);

```

```

Yh2old = 0.000055*ones(brElem,1);
Ych4svi = 17.45e-5*ones(brElem,brElem);
Ych4old = 17.45e-5*ones(brElem,1);
Ycxhysvi = zeros(brElem,brElem);
Ycxhyold = zeros(brElem,1);
Yh2osvi = zeros(brElem,brElem);
Yh2oold = zeros(brElem,1);
Ytarsvi = zeros(brElem,brElem);
Ytarold = zeros(brElem,1);
alfa = zeros(brElem,brInter); % Koef. prenosa toplote cvrsta f. - gasna f.
Qr = zeros(brElem,brInter); % Toplota zracenjem
Qt = zeros(brElem,brInter); % Toplota sagorevanjem tara
Qg = zeros(brElem,brInter); % Toplota sagorevanjem gasa
Qcr = zeros(brElem,brInter); % Toplota isparavanja

% Vremenska petlja %
vremenskapetlja = waitbar(0,'Molim sacekajte...');
for it=2:brInter

% Intenzitet devolatilizacije
kvol = 1.56e10*exp(-16600./Ts(:,it-1));
rvol(:,it) = kvol.*mvolold;
rvol(:,it) = min(rvol(:,it),1.5);
mvol(:,it) = mvolold - rvol(:,it)*V*Dt;

rc = 12*exp(-3300./Ts(:,it-1));
Theta = (1+1./rc)./(0.5+1./rc);
kc(:,it) = 8619*exp(-15908./Ts(:,it-1));

D = 0.207e-4*(Ts(:,it-1)/300).^(1.75);
J= (0.765./Re.^0.82 + 0.365./Re.^0.386)/epsb;
kd1(:,it) = (D.*ROf(:,it-1)./vi).^(2/3).*(vf(:,it-1)).*J;
kd(:,it) = (2.53e-7*Ts(:,it-1).^0.75)/(rp*1.01e5);

```



```

ko(:,it) = 1./...
    ((rp-rpin)*mchar(:,it)*R.*Ts(:,it-1)./(Theta.*Mchar.*kd1(:,it)*V)+...
    1./kc(:,it));
ko1(:,it) = 20./...
    ( mchar(:,it)*R.*Ts(:,it-1)./(Theta.*Mchar.*kd1(:,it)*S*V) + 1./kc(:,it) );
rchar(:,it) = ko1(:,it).*mchar(:,it-1).*po2(:,it);
rchar(:,it) = min(rchar(:,it),0.9);
mchar(:,it) = mcharold - rchar(:,it)*V*Dt;

const = 1e-4*(10 + wfin)*vrSim/n;
for i = 1:brElem % preko CDF funkcije
    z = 75 - i/n - const*it;
    zrem = 80 - const*it;
    A = 150 + 0.06*(i/n)^2*(2 + wfin);
    if z < 0
        Ts(i,it) = 293 + (700 + 300*wfin)*exp(z^2/(-4000)) + ...
            A*exp(zrem^2/(-1000));
    else
        Ts(i,it) = 293 + (700 + 300*wfin)*exp(z^2/(-50)) + ...
            A*exp(zrem^2/(-1000));
    end
    if i*Dx > hcil
        Ts(i,it) = 293;
    end
end

ro2(:,it) = ( 1.9 - wfin )*Mo2*rchar(:,it)./(Theta*Mc);
rco2 = ( 0.01 + 3.4*wfin )*(rchar(:,it)+ro2(:,it))./(1+rc);

Cco = ROco/Mco; % Koncentracije
Co2 = ROo2(:,it)/Mo2;
Ch2 = ROh2/Mh2;
Cch4 = ROch4/Mch4;

```

```

Ccxhy = ROcxhy/Mcxhy;
Csh2o = mH2O(:,it-1)/(Mh2o*V);
Cfh2o = (ROfh2o)/Mh2o;
Ctar = ROTar(:,it)/Mtar;

vi = 1.98e-5*(Tf(:,it-1)/300).^2/3;
Re = ROf(:,it).*vf(:,it)*dp./vi;
    Sh = 2 + 1.1*Sch^(1/3)*Re.^0.6;
    Nu = 2 + 1.1*Pr^(1/3)*Re.^0.6;
Dg = 1.5e-5*(Ts(:,it-1)+273.15)/298).^1.5*epsb;
hs(:,it) = Dg.*Sh/dp;
h1s = Dg.*Nu/dp;
Qcr(:,it) = S*(h1s.*(Tf(:,it-1)-Ts(:,it-1)) + ...
    emis*sig*(293^4-Ts(:,it-1).^4));
for i = 1:brElem
    if Ts(i,it)<100
        rH2O(i,it) = S*hs(i,it)*(Csh2o-Cfh2o);
    else
        rH2O(i,it) = Qcr(i,it)/Hh2o;
    end
end
rco = rco2.*Theta;
rco = max(0, rco*(0.8 - 1.2*wfin));
rh2 = 51.8*Tf(:,it-1).^3/2.*exp(-342000./Tf(:,it-1))...
    .*(Ch2.^1.5).*Co2;
kch4 = 1.6e6*exp(-24157./Tf(:,it-1));
rch4 = kch4.*(Cch4.^0.7).*Co2.^0.8;
kcxhy = 2.7e8*(Tf(:,it-1).^0.5).*exp(-201310./Tf(:,it-1));
rcxhy=kcxhy.*Ccxhy.*Co2;
mH2O(:,it) = mH2Oold + rH2O(:,it)*V*Dt;
rtar(:,it) = 2.9e0*Ts(:,it-1).*exp(-9650./Ts(:,it-1))...
    .*(Ctar.^0.5).*Co2;

```

```

for i = 1:brElem
    if mvol(i,it)<0 || i*Dx>hcil
        mvol(i,it) = 0;
    end
    if mchar(i,it)<0 || i*Dx>hcil
        mchar(i,it) = 0;
    end
    if mH2O(i,it)<0 || i*Dx>hcil
        mH2O(i,it) = 0;
        rH2O(i,it) = 0;
    end
end
rf(:,it) = -rH2O(:,it) + rvol(:,it) + rchar(:,it);
mvolold = mvol(:,it);
mcharold = mchar(:,it);
mH2Oold = mH2O(:,it);
ROs(:,it) = (mH2O(:,it) + mvol(:,it) + mchar(:,it))/V + ROash(:,it);
for i = 1:brElem
    msukupno(it) = msukupno(it) + ROs(i,it)*V;
end
% jednacina stanja idealnog gasa i jednacina za maseni fluks
RM = R*( 0.78084/Mn2 + Yo2old/Mo2 + Yco2old/Mco2 + Ycoold/Mco + ...
    Yh2old/Mh2 + Ych4old/Mch4 + Ycxhyold/Mcxhy + Yh2oold/Mh2o);
ROf(:,it) = p(:,it)./(RM.*Ts(:,it-1));
for i = 2:brElem
    vf(i,it) = vf(i-1,it) + rf(i,it)*V/(ROf(i,it)*S*epsb*Dx);
end
%-----
% Jednacine kontinuiteta za pojedinačne gasove
%-----
% maseni udeo za O2
rC = rf(:,it);
Sc = -epsb*ro2(:,it);

```

```

Sp = zeros(brElem,1);
YA = 0.21;
Do2eff = Do2*ones(brElem,1) + rp*vf(:,it);
a = epsb*ROf(:,it).*(Do2eff) / Dx;
aPO = epsb*ROf(:,it-1)*Dx/Dt;
Yo2old = resiPDE(ROf(:,it),vf(:,it),Yo2old,YA,...
a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC);
for i = 1:brElem
    if Yo2old(i) < 0
        Yo2old(i) = 0;
    end
end
Yo2svi(:,it)=Yo2old;

% maseni udeo za CO
rC = rf(:,it);
Sc = epsb*rco;
Sp = zeros(brElem,1);
YA = 1e-5;
Dcoeff = Dco*ones(brElem,1) + rp*vf(:,it);
a = epsb*ROf(:,it).*(Dcoeff) / Dx;
aPO = epsb*ROf(:,it-1)*Dx/Dt;
Ycoold = resiPDE(ROf(:,it),vf(:,it),Ycoold,YA,...
a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC);
Ycosvi(:,it)=Ycoold;

% maseni udeo za CO2 0.034999%
rC = rf(:,it);
Sc = epsb*rco2;
Sp = zeros(brElem,1);
YA = 34.999e-5;
Dco2eff = Dco2*ones(brElem,1) + rp*vf(:,it);
a = epsb*ROf(:,it).*(Dco2eff) / Dx;

```

```

aPO = epsb*ROf(:,it-1)*Dx/Dt;
Yco2old = resiPDE(ROf(:,it),vf(:,it),Yco2old,YA,...
a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC);
Yco2svi(:,it)=Yco2old;

% maseni udeo za H2
rC = rf(:,it);
Sc = epsb*rh2;
Sp = zeros(brElem,1);
YA = 0.000055;
Dh2eff = Dh2*ones(brElem,1) + rp*vf(:,it);
a = epsb*ROf(:,it).*(Dh2eff) / Dx;
aPO = epsb*ROf(:,it-1)*Dx/Dt;
Yh2old = resiPDE(ROf(:,it),vf(:,it),Yh2old,YA,...
a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC);
Yh2svi(:,it)=Yh2old;

% maseni udeo za CH4
rC = rf(:,it);
Sc = epsb*rch4;
Sp = zeros(brElem,1);
YA = 17.45e-5;
Dch4eff = Dch4*ones(brElem,1) + rp*vf(:,it);
a = epsb*ROf(:,it).*(Dch4eff) / Dx;
aPO = epsb*ROf(:,it-1)*Dx/Dt;
Ych4old = resiPDE(ROf(:,it),vf(:,it),Ych4old,YA,...
a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC);
Ych4svi(:,it)=Ych4old;

% maseni udeo za CxHy - etan i ostali visi ugljovodonici
rC = rf(:,it);
Sc = epsb*rcxhy;
Sp = zeros(brElem,1);

```

```

YA=1e-5;
Dcxhyeff = Dcxhy*ones(brElem,1) + rp*vf(:,it);
a = epsb*ROf(:,it).*(Dcxhyeff) / Dx;
aPO = epsb*ROf(:,it-1)*Dx/Dt;
Ycxhyold = resiPDE(ROf(:,it),vf(:,it),Ycxhyold,YA,...
a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC);
Ycxhysvi(:,it)=Ycxhyold;

% maseni udeo za H2O
rC = rf(:,it);
Sc = epsb*S*hs(:,it).*Csh2o*1e-5;
Sp = epsb*S*hs(:,it).*ROf(:,it);
YA = 0.0;
Dh2oeff = Dh2o*ones(brElem,1) + rp*vf(:,it);
a = epsb*ROf(:,it).*(Dh2oeff) / Dx;
aPO = epsb*ROf(:,it-1)*Dx/Dt;
Yh2oold = resiPDE(ROf(:,it),vf(:,it),Yh2oold,YA,...
a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC);
Yh2osvi(:,it)=Yh2oold;

% maseni udeo za tar
rC = rf(:,it);
Sc = epsb*rtar(:,it);
Sp = zeros(brElem,1);
YA=1e-5;
Dtareff = Dtar*ones(brElem,1) + rp*vf(:,it);
a = epsb*ROf(:,it).*(Dtareff) / Dx;
aPO = epsb*ROf(:,it-1)*Dx/Dt;
Ytarold = resiPDE(ROf(:,it),vf(:,it),Ytarold,YA,...
a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC);
Ytarsvi(:,it)=Ytarold;

ROo2(:,it) = Yo2svi(:,it).*ROf(:,it);

```

```

ROco = Ycosvi(:,it).*ROf(:,it);
ROh2 = Yh2svi(:,it).*ROf(:,it);
ROch4 = Ych4svi(:,it).*ROf(:,it);
ROcxhy = Ycxhysvi(:,it).*ROf(:,it);
ROfh2o = Yh2osvi(:,it).*ROf(:,it);
po2(:,it) = Ro2*ROo2(:,it).*Tf(:,it);
ROtar(:,it) = Ytarsvi(:,it).*ROf(:,it);

```

%-----

% Jednacine održanja energije gasne faze

%-----

% Termicka provodnost

```
kf = 4.8e-4.*Tf(:,it-1).^0.717;
```

% Dinamicka viskoznost

```
vi = 1.98e-5*(Tf(:,it-1)/300).^(2/3);
```

```
Re = ROf(:,it).*vf(:,it)*2*rp./vi; % Reynolds-ov broj
```

```
Nu = 0.41*Re.^0.6.*Pr^0.33;
```

```
alfa(:,it) = Nu.*kf./(2*rp); % Koeficijent prenosa toplote cvsta-gasna faza
```

```
alfa(:,it) = min(alfa(:,it),30);
```

```
Qr(:,it) = alfa(:,it)*S.*(Ts(:,it)); % Toplota zracenjem
```

```
Qr(:,it) = min(Qr(:,it),3e7);
```

```
Qt(:,it) = Mtar*rtar(:,it)*Htar; % Toplota sagorevanjem tara
```

% Toplota sagorevanjem gasa

```
Qg(:,it) = Mh2*rh2*Hh2 + ...
```

```
Mco*rco*Hco + ...
```

```
Mch4*rch4*Hch4 + Mcxhy*rcxhy*Hcxhy;
```

```
cpf(:,it) = 990 + 0.122*Tf(:,it-1) - 5.68e6*Tf(:,it-1).^(-2);
```

```
Cpf(:,it) = (990*(Tf(:,it-1)-293) + 0.061*(Tf(:,it-1).^2-293^2) + ...
```

```
5.68e6*(Tf(:,it-1).^(-1) - 293^(-1) ) )./(Tf(:,it-1)-293);
```

```
rC = rf(:,it);
```

```
Sc = Qr(:,it) + Qt(:,it) + Qg(:,it);
```

```
Sp = alfa(:,it)*S;
```

```

TfA = 293;

Keffo = epsb*kf;
Keff = Keffo + 0.5*kf.*Re*Pr/epsb;
a = Keff / (Dx);
aPO = epsb*ROf(:,it-1).*cpf(:,it)*Dx/Dt;
Tfold = resiPDE( ROf(:,it).*cpf(:,it), vf(:,it), Tfold, TfA, ...
    a, aPO, brElem, Dx, Sc, Sp, rC);
Tfold = min(Tfold,2000);
Tf(:,it) = Tfold;

for i = 1:brElem
    if Tf(i,it) > Ts(i,it)
        Te(i,it) = Tf(i,it);
    else
        Te(i,it) = (Tf(i,it) + Ts(i,it))/2;
    end
end
end
waitbar(it/brInter);
end
close(vremenskapetlja);
% Kraj vremenske petlje %

xosa = 0:n*Dx:Hcil-Dx;
t = 0:n*Dt:vrSim-Dt;
lighting phong;
set(gcf,'Renderer','zbuffer');

figure
plot(t,msukupno(1:n:brInter));
xlabel('Vreme [sec]','fontsize',12)
ylabel('Masa slame [kg]','fontsize',12)

```



```
figure
mesh(t,xosa,Ts(1:n:brElem,1:n:brInter)-273);
xlabel('Vreme [s]','fontsize',12);
ylabel('Visina sloja [m]','fontsize',12);
zlabel('Temperatura [C]','fontsize',12);
set(gca,'fontsize',12);
```

```
figure
mesh(t,xosa,Yo2svi(1:n:brElem,1:n:brInter).*100);
xlabel('Vreme [s]','fontsize',12);
ylabel('Visina sloja [m]','fontsize',12);
zlabel('Koncentracija O2 [%]','fontsize',12);
set(gca,'fontsize',12);
```

```
figure
mesh(t,xosa,Ycosvi(1:n:brElem,1:n:brInter).*100);
xlabel('Vreme [s]','fontsize',12);
ylabel('Visina sloja [m]','fontsize',12);
zlabel('Koncentracija CO [%]','fontsize',12);
set(gca,'fontsize',12);
```

```
figure
mesh(t,xosa,Yco2svi(1:n:brElem,1:n:brInter).*100);
xlabel('Vreme [s]','fontsize',12);
ylabel('Visina sloja [m]','fontsize',12);
zlabel('Koncentracija CO2 [%]','fontsize',12);
set(gca,'fontsize',12);
```

Published with MATLAB® R2013a

Prilog 2: Matlab kod - rešavanje PDE

```

% Resava transportnu parcijalnu diferencijalnu jednacinu
% u zadatom vremenskom trenutku uz vazenje
% jednacine kontinuiteta (napomena: rC > 0)
function Yk = resiPDE(ROf,vf,Yold,YA,a,aPO,brElem,Dx,Sc,Sp,rC)
A=zeros(brElem,brElem);
B = Sc*Dx + aPO.*Yold;

A(1,1) = a(2) + ROf(1)*vf(1) + 2*a(1) + aPO(1) + (Sp(1) + rC(1))*Dx;
A(1,2) = -a(2);
B(1) = B(1) + (ROf(1)*vf(1) + 2*a(1))*YA;

for i=2:brElem-1
    A(i,i-1) = -ROf(i-1).*vf(i-1) - a(i-1);
    A(i,i) = a(i+1) + ROf(i-1).*vf(i-1) + a(i-1) + ...
        aPO(i) + (Sp(i) + rC(i))*Dx;
    A(i,i+1) = -a(i+1);
end

A(brElem,brElem-1) = - ROf(brElem-1).*vf(brElem-1) - a(brElem-1);
A(brElem,brElem) = ROf(brElem-1).*vf(brElem-1) + a(brElem-1) + ...
    aPO(brElem) + (Sp(brElem) + rC(brElem))*Dx;

Yk = A\B; % Resavanje sistema jednacina

end
% Kraj funkcije resiPDE

```

Published with MATLAB® R2013a

Biografija autora sa bibliografijom

Zoran Čepić je rođen 13.01.1983. godine u Zrenjaninu, gde je završio Zrenjaninsku gimnaziju. U Novom Sadu, na Fakultetu tehničkih nauka, upisuje školske 2002/03. godine Mašinstvo, smer Energetika i procesna tehnika. Studije je završio u predviđenom roku, 2008. godine, kao redovan student sa prosečnom ocenom 9,47 i ocenom diplomskog-master rada 10. Zvanje koje je stekao je Diplomirani inženjer mašinstva - master. Školske 2008/09. godine upisuje se na doktorske studije, takođe na Fakultetu tehničkih nauka, studijski program Inženjerstvo zaštite životne sredine. Od meseca aprila 2009. godine postaje stipendista Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, a od oktobra 2012. godine zapošljava se na katedri za Inženjerstvo zaštite životne sredine Fakulteta tehničkih nauka kao saradnik u nastavi, a januara 2013. godine biva biran u zvanje asistenta. Angažovan je na izvođenju auditornih i računarskih vežbi na osnovnim akademskim, master akademskim i tempus studijama, na predmetima Alternativna energetika, Modelovanje i simulacija u inženjerstvu zaštite životne sredine, Modelovanje i simulacija energetske sistema, Termoprocesna postrojenja sa energetske, ekonomskog i ekološkog aspekta i Tehnologija obnovljivih izvora energije kod prof. dr Branke Nakomčić-Smaragdakis, i na predmetima Rasprostiranje poremećaja i Projektovanje sistema zaštite kod prof. dr Slavka Đurića. U toku doktorskih studija uspešno polaže osam ispita sa prosečnom ocenom 10. U svom naučnom radu autor je ili koautor na 8 SCI radova (3 M21a, 2 M22 i 3 M23) i većem broju radova u domaćim časopisima, međunarodnim i nacionalnim konferencijama. Takođe je bio učesnik na dva Republička i jednom bilateralnom projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kao i učesnik na dva međunarodna projekta. Imao je nekoliko kraćih studijskih boravaka u Bugarskoj, Makedoniji i Mađarskoj i aktivan je član naučne sekcije Zaštitijade. Govori, čita i piše engleski jezik.

Bibliografija

Nakomčić-Smaragdakis B., Dvornić T., **Čepić Z.**, Đurić S.: Geothermal energy potentials in the province of Vojvodina from the aspect of the direct energy utilization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, Vol. 16, No 8, pp. 5696-5706, **M21a**

Nakomčić-Smaragdakis B., **Čepić Z.**, Dragutinović N.: Analysis of solid biomass energy potential in Autonomous Province of Vojvodina, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, Vol. 57, pp. 186-191, **M21a**

Nakomčić-Smaragdakis B., Dvornić T., **Čepić Z.**, Dragutinović N.: Analysis and possible geothermal energy utilization in a municipality of Panonian basin of Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 59, pp. 940-951, **M21a**

Nakomčić-Smaragdakis B., Čepić Z., Čepić M., Dvornić T.: Data analysis of the flue gas emissions in the thermal-power plant firing fuel oil and natural gas, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, Vol. 11, No 2, pp. 269-280, **M22**

Šljivac D., Nakomčić-Smaragdakis B., Vukobratović M., Topić D., **Čepić Z.**: Cost-benefit comparison of on-grid photovoltaic systems in Pannonian parts of Croatia and Serbia, *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 2014, Vol. 21, No 5, pp. 1149-1158, **M22**

Čepić Z., Nakomčić-Smaragdakis B.: Experimental analysis of the influence of air flow rate on wheat straw combustion in a fixed bed, *Thermal Science*, 2017, Vol. 21, No. 3, pp. 1443-1452, **M23**

Čepić Z., Nakomčić-Smaragdakis B., Miljković B., Radovanović (Petrović) Lj., Đurić S.: Combustion Characteristics of Wheat Straw in a Fixed Bed, *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, 2016, Vol. 38, No 7, pp. 1007-1013, **M23**

Nakomčić-Smaragdakis B., **Čepić Z.**, Živančev (Šenk) N., Dorić J., Radovanović (Petrović) Lj.: Use of scrap tires in cement production and their impact on nitrogen and sulfur oxides emissions, *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, 2016, Vol. 38, No 4, pp. 485-493, **M23**