Biblid: 0350-2953 (2018) 44(1): 11-20
UDK: 621.1; 62-97

Originalni naučni rad
Original scientific paper

ANALIZA UTICAJA KARAKTERISTIKA GORIVA I TEMPERATURSKIH USLOVA NA EMISIJU ŠTETNIH PRODUKATA SAGOREVANJA BIOMASE

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FUEL CHARACTERISTICS AND TEMPERATURE CONDITIONS ON THE EMISSION OF HARMFUL PRODUCTS OF BIOMASS COMBUSTION

Repić Branislav¹, Erić Aleksandar¹, Nemoda Stevan¹, Dakić Dragoljub²

¹Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča"

Laboratorija za termotehniku i energetiku, 11351 Beograd, Mike Petrovića Alasa 12-14

²Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta,

11000 Beograd, Kraljice Marije 16

e-mail: brepic@vinca.rs

SAŽETAK

Sagorevanje biomase praćeno je emisijom zagađujućih materija, NO, NO₂, CO, CO₂ i u manjoj meri SO i SO₂ jedinjenja. U cilju pronalaženja odgovarajućeg načina za organizovanje procesa sagorevanja, neophodno je analizirati uticaj temperature na emisiju zagađujućih produkata sagorevanja. Takva analiza se može izvršiti izračunavanjem hemijsko termodinamičkog ravnotežnog sastava sistema, što daje ravnotežni sastav dimnih gasova u odnosu na temperaturu sagorevanja. Termodinamičko izračunavanje hemijske ravnoteže omogućava smanjenje eksperimentalnih ispitivanja na bazi procene verovatnoće odvijanja određenih reakcija. U radu su prikazani rezultati primene razvijenog modela za izračunavanje hemijsko termodinamičke ravnoteže sistema koji se sastoji od jedinjenja i elemenata sadržanih u gorivu i vazduhu za sagorevanje. Rezultati su dobijeni za temperaturski interval od 800-1700 K, pritisku 1 bar, višku vazduha $\alpha = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ i 3.0 , sadržaj vlage $W = 10, 20, 30, 40$ i 50% , i za nekoliko različitih vrsta biomase. Za praktičnu primenu rezultata proračuna u radu su dati rezultati merenja temperaturskih uslova u ložištima kotlova od 1,5 MW i 75 kW gde se sagoreva balirana biomasa.

Cljučne reči: Biomasa, sagorevanje, modeliranje, emisija.

1. UVOD

Zaštita atmosferskog vazduha od zagađenja svih vrsta je jedan od veoma aktuelnih problema savremenog sveta. Sagorevanje različitih goriva (čvrstih, tečnih, gasovitih, biomase i dr.), praćeno je emisijom velikog broja polutanata. U najznačajnije polutante svakako spadaju azotni oksidi (NO_x). Azotni oksidi nastali pri sagorevanju potiču iz prisustva azota u gorivu i vazduhu za sagorevanje. Shodno tome rezultatna emisija NO_x

oksida može se klasifikovati kao (Repić, 1992): termička emisija koja uglavnom čini 10-30% ukupne emisije NOx i NOx emisija iz goriva (70-90% ukupne emisije).

Smanjenje sadržaja azotnih oksida u dimnim gasovima moguće je ostvariti na dva načina: prečišćavanjem dimnih gasova i vođenjem procesa sagorevanja. Drugi način smanjenja NOx emisije je češće u upotrebi. Radi pronalaženja najpogodnijeg načina vođenja procesa sagorevanja neophodno je poznavati uticaj temperature na formiranje NOx oksida. Ovo se, pored ostalog, može ostvariti i proračunom hemijsko termodinamičke ravnoteže sistema koja daje ravnotežni sastav produkata sagorevanja u zavisnosti od temperature sagorevanja na osnovu čega je moguće analizirati uticaj temperature na formiranje NOx oksida, kao i drugih štetnih produkata sagorevanja. Proračun hemijsko termodinamičke ravnoteže sistema ujedno omogućava da se suzi oblast eksperimentalnih istraživanja i oceni verovatnoća odvijanja pojedinih reakcija.

Biomasa je jedan od najznačajnijih obnovljivih izvora energije, kako u svetu (De Wit and Faaij, 2010), tako i kod nas (Dakić i dr. 2012, Janić i dr. 2008). Prema najnovijim podacima (Repić i dr. 2018) Srbija raspolaže sa oko 5,6 Mtoe obnovljivih izvora energije, dok je biomasa zastupljena sa oko 3,4 Mtoe. 60% od toga su ostaci iz poljoprivredne proizvodnje, a 40% čini drvena biomasa. Trenutno se samo mali deo otpadne biomase koristi u proizvodnji energije uglavnom za grejanje. Očekuje se, u skoroj budućnosti, značajno povećanje korišćenja biomase u energetske svrhe. Imajući to u vidu neophodno je blagovremeno osvetliti i uticaj sagorevanja biomase po okolinu.

2. MATERIJAL I METOD

Skup jednačina koje se koriste za modeliranje hemijsko termodinamičke ravnoteže sistema može se formulisati korišćenjem dva osnovna pristupa. Prvi pristup se zasniva na prvom varijacionom principu hemijske termodinamike, koji se sastoji u tome, da pri ravnotežnim koncentracijama sastojaka sistema, termodinamički potencijali dobijaju ekstremne vrednosti. Drugi pristup se zasniva na zakonu dejstva masa (metod konstanti ravnoteže). Oba pristupa su ekvivalentna zato što se konstante ravnoteže hemijskih reakcija određuju (pri konstantnom totalnom pritisku) iz slobodnih entalpija (tzv. Gibsove slobodne energije) reaktanata i produkata sagorevanja (White et al. 1958).

Prvi korak pri modeliranju je odluka o broju gasovitih i kondenzovanih (čvrstih i tečnih) hemijskih supstanci koje će se razmatrati. Ako je taj broj **m**, broj kondenzovanih supstanci **f**, a broj atomskih vrsta **q**, tada je **m-q** jednačina zakona dejstva mase koje određuju ravnotežni sastav sistema. Drugim rečima, u sistemu je **m-q** ravnotežnih konstanti koje su nezavisne. Ravnotežne konstante se obično specificiraju za reakcije dekompozicije na sastavne atome, tako da su sve jednačine dobijene na taj način nezavisne i računaju se kao:

$$K_j = \prod_{i=1}^q p_i^{a_{ij}} / p_j \quad (j=1, 2, 3, \dots, m-q)$$

(1)

gde su p_i parcijalni pritisci atomskih vrsta, p_j parcijalni pritisci molekulskih vrsta, a_{ij} su steheometrijski koeficijenti u reakcijama dekompozicije, K_j konstante reakcija (konstante dejstva mase) dekompozicije na atome.

U slučaju kondenzovanih supstanci koje ne formiraju čvrste rastvore, primena zakona dejstva masa, (zato što je parcijalni pritisak zasićenja iznad kondenzovane faze konstantan pri konstantnoj temperaturi), daje još f jednačina u obliku:

$$K_k^o = p_k \quad (k=1, 2, \dots, f) \quad (2)$$

gde k može da označava bilo atomsku bilo molekularnu hemijsku vrstu.

Za idealnu gasnu smešu u sistem jednačina termodinamičke ravnoteže uključuje se i Daltonov zakon:

$$\sum_{i=1}^m p_i = p \quad (3)$$

Da bi se sistem jednačina zatvorio, uvodi se još $q-1$ jednačina bilansa mase:

$$\frac{\sum_{i=1}^m a_{gi} \cdot p_i + \sum_{k=1}^f a_{gk} \cdot p \cdot v_k}{\sum_{i=1}^m a_{di} \cdot p_i + \sum_{k=1}^f a_{dk} \cdot p \cdot v_k} = \frac{G}{D} \quad (4)$$

gde su a_{gi} i a_{gk} broj atoma vrste g u gasnoj komponenti i , odnosno kondenzovanoj fazi k ; a_{di} i a_{dk} je broj atoma vrste d u gasnoj komponenti i , odnosno kondenzovanoj fazi k ; v_k je odnos broja molova supstance k u kondenzovanoj fazi prema ukupnom broju molova u gasnoj fazi; a sa G i D je označen ukupan broj atoma vrste g odnosno d , u sistemu. Jednačina bilansa mase (4) odražava činjenicu da jedan mol svake supstance, bilo u gasnoj ili kondenzovanoj fazi, sadrži Avogadrov broj molekula (odnosno atoma).

Sistem jednačina (1) do (4) ima samo jedno realno pozitivno rešenje za specificirani set parametara (Zeldovich, 1938). To je nelinearni sistem algebarskih jednačina koji se obično rešava iterativno, polazeći od izabranog seta početnih vrednosti za glavne sastojke, ili korišćenjem Sajdel-ovog, Newton-Raphson-ovog ili nekog drugog metoda.

U radu se razmatra samo gasovita faza. U slučajevima u kojima se uzimaju u obzir i kondenzovane faze, u sistem jednačina hemijsko termodinamičke ravnoteže uključuju se još i konstante napona para iznad kondenzovanih faza date hemijske vrste pri razmatranoj temperaturi, i jednačine bilansa onih atoma u sistemu koji se javljaju u kondenzovanoj fazi.

Za rešavanje problema korišćen je metod direktnih iteracija (Kostić et al. 1994). Na početku rešavanja, specificiran je set početnih vrednosti parcijalnih pritisaka samo za glavne sastojke. Rešavanje je početo od najniže temperature (800 K) pri kojoj se nekoliko supstanci nalaze u kondenzovanoj fazi i njihovi parcijalni pritisci na toj temperaturi su jednaki njihovim pritiscima zasićenja. Koeficijenti polinoma kojima je opisana zavisnost Gibbs-ove slobodne energije od temperature i promene entalpije pri hemijskim reakcijama, koji su korišćeni za proračun konstanti ravnoteže, uzeti su iz reference (Glushko, 1981).

2.1. Procedura proračuna

Na osnovu prikazanih jednačina napravljen je odgovarajući računski program. On je korišćen za proračun sastava produkata sagorevanja ili produkata gasifikacije u stanju hemijsko termodinamičke ravnoteže i za određivanje termodinamičkih veličina stanja komponenata i produkata sagorevanja: H_2 , S_2 , O_2 , N_2 , SO , SO_2 , SO_3 , NO , NO_2 , N_2O , H_2O , CO , CO_2 , OH , CH_4 , C_2H_2 , H_2S . Termodinamičke veličine stanja su: Gibsova funkcija komponenata; entropija, entalpija i specifična toplota komponenata; molarna masa, gasna konstanta, gustina, entalpija, entropija i Gibsova funkcija produkata; specifična toplota nereagujuće smeše.

Ulazni podaci za proračun su:

- molske i atomske mase sledećih komponenata: MN_2 , MO_2 , MCO_2 , AA_r , M_{vaz} , AC , AH , AN , AO , AS , MH_2O (izražene u kg/mol). Ove veličine određene su iz (Glushko, 1981).

- podaci za gorivo (elementarna analiza goriva C, H, N, O, S, koja se odnosi na masu goriva bez vlage i pepela), oksidans (potrebna količina vazduha za sagorevanje 1 kg goriva - y (kg vazd./kg gor.) i vodena para (kao odnos količine vlage po kilogramu goriva, z (kgH₂O/kg gor.)). Ovi podaci uzeti su iz (Repić i dr. 2008, Mladenović i dr. 2009).

- podaci za toplotu formiranja i molarne mase komponenata. Toplota formiranja je eksperimentalno određena, dok su molarne mase komponenata uzete iz (Kozic i dr. 1986).

- podaci za izračunavanje konstanti ravnoteže. Ovi podaci odnose se na koeficijente polinoma koji predstavljaju temperaturnu zavisnost modifikovane Gibsove funkcije, i promenu entalpije za hemijske reakcije dekompozicije na sastavne atome. Koeficijenti polinoma uzeti su iz (Glushko, 1981).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Proračun je urađen za više različitih vrsta biomasa čije su elementarne i tehničke analize date u Tabeli 1. Vrednost promenljive y (kg vazduha/kg goriva) i z (kgH₂O/kg goriva) pri koeficijentu viška vazduha $\alpha = 1$ (stehiometrijska količina vazduha) date su u Tabeli 2. Koeficijent viška vazduha je izračunat u odnosu na stehiometrijski potrebnu količinu vazduha za sagorevanje ugljenika, sagorljivog sumpora i vodonika u CO_2 , SO_2 i H_2O respektivno. Za sve analizirane biomase vrednosti za y su preračunate na sadržaj vlage u gorivu od 10% kako bi se rezultati proračuna mogli bolje upoređivati međusobno. Za analizu su izabrane biomase kojima Srbija najviše raspolaže i to: sojina i pšenična slama, kukuruzovina, oklasak kukuruza i drvna biomasa.

Tab. 1. Tehnička i elementarna analiza različitih goriva

Tab 1. The ultimate and proximate compositions for different fuels

N°	Gorivo Fuel	Vlaga Moisture	Pepeo Ash	C	H	N	O	S
-	-	Dostavno/As fire	Bez vlage i pepela/Moisture ash free					
		%	%	%	%	%	%	%
1	Sojina slama Soya straw	15.00	4.71	50.00	6.28	0.54	43.08	0.11
2	Pšenična slama Wheat straw	8.50	6.00	43.58	7.31	0.66	48.36	0.09
3	Kukuruzovina Maize straw	20.00	2.08	44.62	6.31	0.71	48.24	0.11
4	Oklasak kukur. Corncob	27.80	2.55	46.49	5.95	0.74	46.80	0.02
5	Drvo Wood	20.00	1.50	50.06	5.98	0.51	43.45	0.00
6	Ugalj Kolubara Coal Kolubara	9.99	27.04	63.73	6.19	1.25	27.05	1.78
7	Ugalj Soko Coal Soko	1.93	26.53	67.42	5.79	1.97	23.45	1.37
8	Ugalj Ibar Coal Ibar	0.22	53.67	76.71	5.79	2.69	2.84	11.97
9	Lako lož ulje Light oil	0.05	0.02	86.09	13.35	0.49	0.055	0.015
10	Mazut Heavy oil	2.20	0.30	86.25	10.34	0.31	0.100	3.000

Tab. 2. Ulazni podaci za proračun

Tab. 2. The input data for calculations

N°	Gorivo/Fuel	y	z	α
-	-	kg. vazduha/kg. goriva kg. air/kg. fuel	kg. vlage/kg. goriva kg. water/kg. fuel	-
1	Sojina slama Soya straw	6.0450	0.1176280	1.0
2	Pšenična slama Wheat straw	5.4313	0.1180777	1.0
3	Kukuruzovina Maize straw	5.2163	0.1140770	1.0
4	Oklasak kukuruza Corncob	5.3637	0.1140890	1.0
5	Drvo Wood	5.9305	0.1132400	1.0
6	Ugalj Kolubara Coal Kolubara	8.3568	0.1586500	1.0
7	Ugalj Soko Coal Soko	8.7819	0.0269800	1.0
8	Ugalj Ibar Coal Ibar	11.1960	0.0047700	1.0
9	Lako lož ulje Light oil	14.4640	0.0005000	1.0
10	Mazut Heavy oil	13.5800	0.0310200	1.0

Rezultati proračuna hemijsko termodinamičke ravnoteže za sisteme biomase N°1-5 (Tabela 1) prikazani su na Sl. 1. Analizirani su gasoviti sastojci produkata sagorevanja NOx i SOx jer od štetnih zagađujućih materija njihova prisutnost je od najvećeg značaja.

Na Sl. 1 prikazani su rezultati izračunavanja parcijalnog pritiska NO za sisteme N°1-5 i $\alpha = 2.50$. Veći α odabran je iz razloga što kotlovi na biomasu uglavnom rade u takvim režimima. Iz prikazanog dijagrama očigledno je da je NO emisija veoma osetljiva na temperaturu sagorevanja biomase i da se povećava sa porastom iste. Rezultati proračuna pokazali su da se proračunske vrednosti za NO, za sve tipove biomase, kreću u relativno malom opsegu. Na Sl. 1 su označene granice emisije NOx prema domaćim propisima [12] za ložišta koja sagorevaju biomasu. Linija GVE (granična vrednost emisije) označava maksimalnu dozvoljenu vrednost parcijalnog pritiska NOx za kotlove koji koriste biomasu (nova srednja postrojenja <10 MWt, 243,5 ppm, što odgovara 500 mg/Nm³, tj. parcijalni pritisak od $2.435 \cdot 10^{-4}$ bara). Iz dijagrama je očigledno da emisija NOx na 1290 K premašuje vrednosti dozvoljene emisije NOx za ove kotlove na biomasu.

Na Sl. 1 prikazani su i rezultati izračunavanja parcijalnog pritiska SO₂ za sisteme N°1-5 i $\alpha = 2.50$. Iz dobijenih rezultata jasno je da na emisiju SO₂ ne može značajno uticati varijacija temperature u ložištu kotla jer je ona praktično konstantna iznad 1100 K i uglavnom zavisi od sadržaja sagorljivog sumpora u gorivu. Izračunate vrednosti za SO₂ značajno variraju za različite vrste biomase i veoma se razlikuju. Linija GVE označava vrednost parcijalnog pritiska SO₂ koji odgovara odabranoj vrednosti emisije SO₂ od 200 mg/Nm³ (prema domaćim propisima [12] za nova velika postrojenja na biomasu >50 MWt, vezano za parcijalni pritisak od $0.007 \cdot 10^{-3}$ bara). Očigledno je da su vrednosti emisije SO₂ na granici i ispod granice dozvoljenih vrednosti.

Radi poređenja sa biomasom na Sl. 2 prikazani su rezultati izračunavanja parcijalnog pritiska NO i SO₂ za sisteme N°6-10 (ugljevi Kolubara, Soko i Ibar, mazut i lako lož ulje, Tabela 1) i $\alpha = 1.25$. Iz dijagrama se može videti da emisija NOx na 1350 K premašuje vrednosti dozvoljene emisije za kotlove na ugalj. Linija GVE označava vrednost parcijalnog pritiska NO od $2.19 \cdot 10^{-4}$ bar koji odgovara vrednosti emisije NO od 450 mg/Nm³. Emisija SO₂ značajno je viša kada se radi o sagorevanju ugljeva i mazuta i iznad je zakonski dozvoljenih vrednosti [12]. Linija GVE označava vrednost parcijalnog pritiska SO₂ od $2.275 \cdot 10^{-4}$ bar što odgovara odabranoj vrednosti emisije SO₂ od 650 mg/Nm³.

Sl. 1. Parcijalni pritisak NO i SO₂ za sisteme N°1-5 (Tabela 1) i $\alpha = 2.50$

Fig. 1. Partial pressure of NO and SO₂ for systems N°1-5 (Table 1) and $\alpha = 2.50$

Na Sl. 3 i 4 predstavljeni su rezultati proračuna termodinamičke ravnoteže za parcijalne pritiske NO_2 , N_2O , SO i SO_3 za sisteme N°1-5 i za višak vazduha $\alpha = 2.50$. Iz prikazanih dijagrama evidentno je da NO_x i SO_x emisija ne prevazilazi dozvoljene vrednosti emisije za kotlove koji sagorevaju biomasu.

Sl. 2. Parcijalni pritisak NO i SO_2 za sisteme N°6-10 (Tabela 1) i $\alpha = 1.25$

Fig. 2. Partial pressure of NO and SO_2 for systems N°6-10 (Table 1) and $\alpha = 1.25$

Sl. 3. Parcijalni pritisak NO_2 i N_2O za sisteme N°1-5 (Tabela 1) i $\alpha = 2.50$

Fig. 3. Partial pressure of NO_2 and N_2O for systems N°1-5 (Table 1) and $\alpha = 2.50$

Sl. 4. Parcijalni pritisak SO i SO_3 za sisteme N°1-5 (Tabela 1) i $\alpha = 2.50$

Fig. 4. Partial pressure of SO and SO_3 for systems N°1-5 (Table 1) and $\alpha = 2.50$

Na Sl. 5 prikazani su rezultati proračuna parcijalnog pritiska NO za sisteme N°1-5 za različite vrednosti viška vazduha i temperaturu sagorevanja od 1075 K i 1175 K. Rezultati proračuna pokazuju promenu NO u vrlo uskom opsegu za različite vrste biomase. Za ove dve temperature emisija NO je ispod zakonski dozvoljenih vrednosti emisije [12].

Sl. 5. Parcijalni pritisak NO za sisteme N°1-5 i temperaturu 1075K i 1175K

Fig. 5. Partial pressure of NO for systems N°1-5 at temperature 1075 K and 1175K

Na NO_x i SO_x emisiju značajan uticaj ima višak vazduha u ložištu kotla. Analiza ovog uticaja sprovedena je za sojinu slamu (sistem N°1). Rezultati proračuna parcijalnog pritiska NO za različite viškove vazduha $\alpha = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ i 3.0 prikazani su na Sl. 6. Rezultati proračuna pokazuju da je uticaj viška vazduha evidentan i vrlo izražen, naročito pri višim temperaturama, tako da pri temperaturama iznad 1300 K emisija NO prevazilazi zakonski dozvoljene vrednosti GVE, osim za stehiometrijsko sagorevanje tj. kada je $\alpha = 1.0$.

Analiza uticaja sadržaja vlage u gorivu na emisiju produkata sagorevanja prikazana je na Sl. 6. Proračun je urađen za sojinu slamu (sistem N°1) i sadržaj vlage u gorivu $W = 10, 20, 30, 40$ i 50% . Rezultati proračuna pokazuju da je uticaj vlage minimalan i da se manifestuje tek na temperaturama iznad 1300 K, za sve vrednosti sadržaja vlage u gorivu.

Sl. 6. Parcijalni pritisak NO za sistem N°1, višak vazduha 1.0 do 3.0 i sadržaj vlage u gorivu 10 do 50%

Fig. 6. Partial pressure of NO for system N°1, excess air 1.00 to 3.00 and moisture content in fuel 10% to 50%

U cilju konkretne primene dobijenih rezultata proračuna navodimo temperature gasa izmerene u ložištu kotla toplotne snage 70 kW. U kotlu su sagorevane male bale agro biomase težine 10-12 kg po principu cigaretnog sagorevanja (Repić i dr. 2012). Merenjima je dobijeno da su temperature u ložištu reda 950°C, u zoni dogorevanja 800°C, a na izlazu iz kotla 220°C. Rezultati merenja temperatura gasova na kotlu toplotne snage 1,5 MW na kojem se sagorevaju velike bale poljoprivredne biomase težine 200-250 kg takođe po principu cigaretnog sagorevanja pokazuju sledeće (Repić i dr. 2008, Mladenović i dr. 2009): temperature gasa za jedan radni režim u ložištu kotla su oko 900°C, u zoni dogorevanja su nešto niže oko 860°C, a na izlazu iz kotla oko 200°C.

Kao što se iz izloženog može zaključiti temperature gasova u ložištima kotlova koji sagorevaju biomasu su niže nego kod kotlova koji sagorevaju razna fosilna goriva (ugalj, nafta, gas). To je uslovljeno visokim viškom vazduha sa kojim kotlovi na biomasu rade kako bi se ta temperatura održala na nižem nivou i kako bi se izbegao eventualni problem sa niskom temperaturom topljenja pepela biomase.

4. ZAKLJUČAK

Rezultati proračuna dobijeni korišćenjem razvijenog matematičkog modela hemijsko termodinamičke ravnoteže sistema koji se sastoji iz goriva i vazduha za sagorevanje pokazuju uticaj sastava goriva, viška vazduha i sadržaja vlage u gorivu na formiranje različitih produkata emisije SO, SO₂, SO₃, NO, NO₂, N₂O, H₂O, CO i dr.

Rezultati dobijeni za više različitih vrsta biomase i za različite temperature sagorevanja koriste se kao termodinamički indikator koji može poslužiti u cilju planiranja i redukcije nekih emisija štetnih produkata sagorevanja biomase odgovarajućim vođenjem procesa sagorevanja u ložištu. Na taj način mogu se izbeći temperaturske zone u ložištu kotla pri kojima emisija prevazilazi dozvoljene vrednosti. To se može postići adekvatnom organizacijom procesa sagorevanja ili sagorevanjem sa nižim viškom vazduha, a u nekim slučajevima koristeći metod tzv. podstehiometrijskog sagorevanja.

5. LITERATURA

- [1] Dakić D, Paprika M, Repić B, Erić A, Đurović D. (2012). Isplativost korišćenja poljoprivrednih ostataka radi zadovoljenja energetske potrebe. *Savremena poljoprivredna tehnika* 38(2): 87-96.
- [2] De Wit M, Faaij A. (2010). European Biomass Resource Potential and Costs. *Biomass and Bioenergy* 34(2): 188-202.
- [3] Glushko V.P., Gurvich L.V. (1981). *Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv*, Nauka, Moscow.
- [4] Janić T, Brkić M, Igić S, Dedović N. (2008). Termoenergetski sistemi sa biomasom kao gorivom. *Savremena poljoprivredna tehnika* 34(3-4): 212-219.
- [5] Kostić Z, Repić B, Dakić D, Jovanović Lj. (1994). Influence of furnace combustion conditions on NO_x emission from lignite flames. *Journal of Hazardous Materials* 37(1): 225-232.
- [6] Kozic Dj, Vasiljevic B, Bekavac V. (1986). *Handbook for Thermodynamic*, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade.
- [7] 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(5): 715-723.
- [8] Repić B. (1992). Uticaj konstruktivnih i radnih karakteristika gorionika na paljenje i sagorevanje ugljenog praha. Ph.D. diss, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [9] Repić B, Dakić D, Paprika M, Mladenović R, Erić A. (2008). Soya straw bales combustion in high efficient boiler. *Thermal Science* 12(4): 51-60.

- [10] Repić B, Dakić D, Erić A, Đurović D, Marinković A, Stojanović A. (2012). Istraživanje sagorevanja poljoprivredne biomase na industrijskom vodogrejnem kotlu. Termotekhnika 38(1): 25-34.
- [11] Repić B, Erić A, Nemoda S, Dakić D. (2018). Technical and economic consideration of the construction of CHP plant using agricultural or forest biomass. In Proc: Int. Conf. „Energy and Ecology Industry EEI2018“, 130-137. Belgrade, 10-13 October.
- [12] Uredba o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduh iz postrojenja za sagorevanje. (2016). Službeni glasnik Republike Srbije br.6., Beograd.
- [13] White W.B, Johnson S.M, Dantzig G.B. (1958). Chemical Equilibrium in Complex Mixtures. Journal of Chemical Physics 28(5): 751-756.
- [14] Zeldovich Ya.B. (1938). Dokazatelstvo yedinственosti resheniya uravnenii deistviuyushchikh mass. Zhurnal fizicheskoi khimii 2(5): 685.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FUEL CHARACTERISTICS AND TEMPERATURE CONDITIONS ON THE EMISSION OF HARMFUL PRODUCTS OF BIOMASS COMBUSTION

Branislav Repić, Aleksandar Erić, Stevan Nemoda, Dragoljub Dakić

SUMMARY

Biomass combustion is followed by emission of many pollutants, i.e. NO, NO₂, CO, CO₂ and in small amount SO and SO₂ compounds. In order to find a suitable method for organizing the combustion process, it is necessary to analyze the influence of temperature on combustion pollutant products emission. Such an analysis is being performed by computation of the chemical thermodynamic equilibrium composition of the system, which yields the equilibrium composition of flue gases with respect to the combustion temperature. The thermodynamic computations of the chemical equilibrium enable reducing the range experimental investigations and estimating the probability of particular reactions. In the paper presented are the results of an application of the developed model on computation of chemical thermodynamic equilibrium of a system formed by compounds and elements contained in fuel and combusted air. The results are obtained at temperatures from 800-1700 K, pressure 1 bar, excess air $\alpha = 1.0, 1.50, 2.0, 2.5$ and 3.0 , moisture content $W = 10, 20, 30, 40$ and 50% , and for several different types of biomass. For practical application of computation results in the paper presented are the results of measurements of the local furnace temperature conditions at 1.5 MW and 75 kW boilers burning biomass.

Keywords: Biomass, combustion, modelling, emission.

Napomena: Rad je realizovan u okviru projekata Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije „Razvoj i unapređenje tehnologija za energetske efikasno korišćenje više formi poljoprivredne i šumske biomase na ekološki prihvatljiv način, uz mogućnost kogeneracije“ (III42011) i „Unapređenje industrijskog postrojenja sa fluidizovanim slojem u okviru razvoja tehnologije za energetske efikasno i ekološki opravdano sagorevanje različitih otpadnih materija u fluidizovanom ložištu“ (TR33042).

Primljeno: 10. 02. 2018. god.

Prihvaćeno: 18. 02. 2018. god.