Biblid: 0350-2953 (2016) 42(4): 187-196
UDK: 662.7; 66.04

Originalni naučni rad
Original scientific paper

OPTIMIZACIJA LOŽIŠTA ZA SAGOREVANJE POLJOPRIVREDNE BIOMASE U CILJU POVEĆANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI I SMANJENJA ZAGAĐENJA ŽIVOTNE SREDINE

OPTIMIZATION OF FURNACE FOR AGRICULTURAL BIOMASS COMBUSTION IN ORDER TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY AND REDUCING ENVIRONMENTAL POLLUTION

**Dejan Đurović¹, Dragoljub Dakić², Branislav Repić¹, Goran Živković¹, Milica
Mladenović¹**

¹ Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Laboratorija za termotehniku i energetiku, 11351 Beograd, Mihaila Petrovića Alasa 12-14

² Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta,
11000 Beograd, Kraljice Marije 16

E-mail: dejan2004@vinca.rs

SAŽETAK

Poljoprivredna biomasa koja, između ostalog, uključuje i sojinu slamu, ima veliki energetski potencijal u našoj zemlji, a istovremeno veoma mali procenat se do sada koristi u energetske svrhe. Imajući u vidu intenzivnije fluktuacije na tržištu fosilnih goriva, kao i obaveze koje je naša zemlja preduzela prema Energetskoj zajednici, postoji značajna potreba za upotrebu obnovljivih izvora energije, prvenstveno poljoprivredne biomase kao obnovljivog izvora sa najvećim potencijalom u Republici Srbiji. Postoji nekoliko načina korišćenja biomase u energetske svrhe, kao što je sagorevanje na rešetci, sagorevanja u letu, sagorevanja u fluidizovanom sloju, ali kao veoma pogodan način za sagorevanje balirane biomase, u ovom radu će biti prikazano ložište sa cigaretnim sagorevanjem. Cilj ovog rada predstavlja analiza procesa dogorevanja gasova u ložištu za sagorevanje poljoprivredne biomase, kao i razvoj CFD matematičkog modela koji treba da posluži za optimizaciju ložišta za sagorevanje biomase, sa osvrtom na analizu CO sadržaja u produktu sagorevanja.

Cljučne reči: Biomasa, sagorevanje, CFD, optimizacija ložišta.

1. UVOD

U institutu Vinča, Laboratoriji za termotehniku i energetiku (LTE) duži niz godina se radi na razvoju sistema za korišćenje otpadne poljoprivredne biomase kao goriva (Dakić i dr., 2012). Osnovna polazišta saradnika LTE u razvoju korišćenja otpadne poljoprivredne biomase zasnovana su na željama: da se iskoriste potencijali otpadne poljoprivredne biomase, da se ne remeti bilans u proizvodnji hrane i da tehnologija bude dostupna kako korisnicima tako i proizvođačima te opreme u Srbiji. Karakteristike

sagorevanja poljoprivredne biomase se u mnogome razlikuju od karakteristika šumske biomase (Đurović i dr., 2011, Janić i dr., 2010). Zbog toga se pri razvoju sistema za primenu poljoprivredne biomase o tome mora voditi računa. Puštanjem u rad i iskustvom u osmogodišnjoj eksploataciji prvog kotla, nazivne snage 1,5 MW, na tu vrstu biomase, konstruisanom po patentnom rešenju, saradnici LTE su dokazali da vladaju razvijenom tehnologijom. Predloženi postupak izabran je kao optimalna tehnologija sagorevanja balirane poljoprivredne biomase sa stanovišta energetske efikasnosti sa jedne strane, jer je potrebno najmanje energije za pripremu biomase (baliranje), a primenjena tehnološka rešenja su veoma jednostavna, kao i zadovoljenje ekoloških aspekata, sa druge strane.

2. MATERIJAL I METOD RADA

Šema kotla prikazana je na Slici 1. Kao gorivo kotao koristi bale sojine slame, dimenzija 0,7x1,2x2,0 m. Baliran sojin ostatak (1) se pomoću klipnog dodavača (3) kroz vodom hlađeni uvodnik (2) uvodi u ložište (12). Klipni dodavač je pogonjen pomoću odgovarajućeg hidrauličnog sistema (5). Primarni vazduh za sagorevanje se obezbeđuje pomoću ventilatora primarnog vazduha (4) i on se deli na dva dela. Jedan deo primarnog vazduha se uvodi neposredno ispod i iznad bale, a drugi deo kroz spremište pepela (7). Pomoću dela primarnog vazduha koji se uvodi kroz pepeo vrši se fluidizacija i dogorevanje nesagorele biomase, u sloju sopstvenog pepela, koja propadne kroz vodom hlađenu rešetku (11). Pepeo se pomoću pužnog izvlačka (6) izvlači iz sistema čime se održava željena visina fluidizovanog sloja. Sekundarni vazduh se u proces sagorevanja uvodi kroz vodom hlađeni uvodnik sekundarnog vazduha (8), neposredno u zonu sagorevanja koksnog ostatka. Ovaj uvodnik ima mogućnost translatornog i delimično rotacionog kretanja. Pomoću translatornog kretanja uvodnika sekundarnog vazduha vrši se regulisanje snage ložišta (omogućavanjem da manja ili veća količine biomase učestvuje u procesu sagorevanja), a rotacionim kretanjem skidanje pepela i delimično sagorele biomase sa vrha bale. Sekundarni vazduh se obezbeđuje pomoću ventilatora sekundarnog vazduha (9), a translatorno i rotaciono kretanje uvodnika pomoću prenosnog mehanizma (10). Dimni gasovi nastali u primarnoj komori sagorevanja nakon skretanja ulaze u sekundarnu i tercijarnu komoru u kojima se vrši dogorevanje gasne faze, nakon čega preko plameno-dimne cevi (13) ulaze u prvu i drugu promaju razmenjivača toplote (14) i (15). Na izlasku iz razmenjivača toplote, ohlađeni dimni gasovi najpre ulaze u ciklonski prečištač (16), a nakon toga u dimnjak (17).

Sl. 1. Šema industrijsko demonstracionog postrojenja za sagorevanje balirane sojine slame u PKB korporaciji Beograd

Fig. 1. Scheme of industrial demonstration plant for combustion of baled soybean straw in PKB Corporation Belgrade

Primena ove tehnologije omogućava primenu nus-proizvoda iz poljoprivredne proizvodnje, što povećava prihode iz poljoprivredne proizvodnje, a u isto vreme održava balans proizvodnje hrane i smanjenja zagađenja. Ova tehnologija se takođe može koristiti za sagorevanje energetski useva, što predstavlja veliki značaj za Srbiju.

Opisano postrojenje je izrađeno i pušteno u rad 2007. godine i od tada uspešno radi. Međutim, radi sagledavanja eventualnih nedostataka i poboljšanja rada, a pri tome se prevashodno misli na sistem ložišta u kome se odvija proces sagorevanja, neophodno je vršiti dalja eksperimentalna istraživanja na postrojenju. Pored eksperimentalnih istraživanja jako je korisno razviti verodostojnu numeričku simulaciju rada postrojenja pomoću koje bi se što bolje razumeo novi i nedovoljno istraženi način sagorevanja biomase i kako bi se sagledali eventualni propusti u njegovoj izradi, kao i mogućnosti poboljšanja rada sa aspekta energetske efikasnosti i ekologije.

Primena kompleksne numeričke simulacije je od izuzetnog značaja ne samo zbog omogućavanja sveobuhvatnije i detaljnije analize predložene tehnologije, već i radi lakšeg utvrđivanja efekata mogućih konstrukcionih i parametarskih izmena na postrojenju, da bi na taj način bilo ostvareno što bolje sagorevanje kako sa stanovišta energetske efikasnosti, tako i sa aspekta ekologije. Numerički model treba da predstavlja koristan alat za potrebe prognoza efikasnosti rada sa drugim vrstama balirane biomase i mogućim konstrukcionim izmenama na predloženoj instalaciji. Za prikazivanje rezultata proračuna korišćen je komercijalni kod FLUENT.

Da bi se na što jednostavniji način opisao jedan složen proces, kakav je proces dogorevanja gasova u realnom ložištu, potrebno je uvesti neke pretpostavke. Usvojeno je da je sistem dvodimenzijski i stacionaran, dok je pretpostavka sastava gasova u glavnoj zoni sagorevanja zasnovana na rezultatima ranijih istraživanja (Đurović i dr., 2012, Repić i dr., 2013): CH_4 , CO_2 , CO , O_2 , H_2O , inertni gas N_2 , kao i čvrste čestice ugljenika (C).

Sagorevanje gasovitih komponenti se može opisati sledećim hemijskim reakcijama:

U ovom delu će biti definisane neophodne transportne jednačine kojima bi trebalo da budu opisana tri osnovna polja – brzina, koncentracija i temperatura.

Jednačina kontinuiteta se može napisati kao:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w_i) = 0 \quad (1)$$

Zatim je potrebno definisati momentnu jednačinu za turbulentno strujanje u fluidnoj sredini kao i pripadajuće jednačine za kinetičku energiju turbulencije i disipaciju kinetičke energije u eliptičkom obliku. Ove jednačine su definisane na osnovu modeliranja *Reynolds*-ovih turbulentnih napona preko k - ε modela, koji je u praksi najrasprostranjeniji i pokazuje zadovoljavajuće slaganje sa eksperimentalnim rezultatima.

Momentna jednačina ima sledeći oblik:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f w_i w_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j}$$

(2)

gde je $\mu_{eff} = \mu_k + \mu_t$ efektivna viskoznost, koja je jednaka zbiru molekularne i turbulentne viskoznosti.

Izrazi za kinetičku energiju turbulencije i disipaciju kinetičke energije za dati stacionarni slučaj bez svojih lokalnih članova izgledaju:

$$\frac{\partial(\rho_f w_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_{eff} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial w_j}{\partial x_i} + \rho_f \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_f w_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1,\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_{eff} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial w_j}{\partial x_i} + \rho_f C_{2,\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

Konstante koje se javljaju u prethodnim jednačinama date su u Tabeli 1.

Tab. 1. Konstante k - ε modela

Tab. 1. Constants of k - ε model

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1,\varepsilon}$	$C_{2,\varepsilon}$
0,09	1,0	1,3	1,44	1,92

Jednačina održanja energije se može prikazati u sledećem obliku:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(w_i \rho c_p T_f) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda_f}{c_p} \frac{\partial (c_p T_f)}{\partial x_i} \right) + \sum R_k H_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\sum \rho \left(D_{m,k} + \frac{\mu_{eff}}{\rho \sigma_{mt}} \right) (c_{p,k} T) \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right] \quad (5)$$

gde je c_p specifični toplotni kapacitet.

Definisanje polja koncentracija se vrši preko jednačine održanja hemijskih komponenata:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w_i Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \left(D_{m,k} + \frac{\mu_{eff}}{\rho \sigma_t} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right] + R_k \quad (6)$$

gde je R_k maseni izvor/ponor hemijske vrste k , a Y_k maseni udeo hemijske vrste k .

Za homogene reakcije u upotrebi je često modifikovani *Arrhenius*-ov izraz za brzinu stvaranja komponente k , koji uzima u obzir temperaturnu zavisnost (Yin et al., 2008), u sledećem obliku:

$$R_k = M_k \sum_{i=1}^m (\nu_{pit} - \nu_{rik}) A_i T^{\alpha_i} \exp \left(- \frac{E_i}{R_g T} \right) \prod_{j=1}^{n_r} \left(\frac{\rho_j}{M_j} \right)^{\nu_{rj}} \quad (7)$$

Brzina reakcije hemijske vrste i usled reakcije r je ona koja ima manju vrednost izračunatu na osnovu sledeća dva izraza:

$$R_{i,r} = \nu_{i,r}' M_{w,i} A \rho \frac{E}{k} \min \left(\frac{Y_R}{\nu_{R,r}' M_{w,R}} \right) \quad (8)$$

$$R_{i,r} = \nu_{i,r}' M_{w,i} A B \rho \frac{E}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j \nu_{j,r}'' M_{w,j}} \quad (9)$$

Geometrija i mreže modela su prikazane na Sl. 2.

Sl. 2. Mreža modela (a-postojeće ložište, b-modifikovano ložište)

Fig. 2. Model mesh (a-existing furnace, b-modified furnace)

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Sprovedena analiza odnosi se na smanjenje dubine ložišta sa 1,5 m na 0,7 m uz zadržavanje ostalih dimenzija ložišta istim (visina 3 m a širina 1,2 m). Širina ložišta mora da ostane ista jer na tu dimenziju utiče dimenzija bale koja se sagoreva, a obzirom da se analiza pravi za istu vrstu goriva (sojina slama) i istih dimenzija bala, nema smisla menjati širinu ložišta. Sa druge strane, visina ložišta je zadržana na postojećem nivou, jer je ideja da se smanjenjem dubine ložišnog prostora za dogorevanje gasova ostavi dovoljno dugačak put gasovima da bi oni proveli dovoljno vremena na visokoj temperaturi, i potpuno dogoreli. Takođe, da bi se gasovi što bolje mešali i kako bi im se produžila putanja strujanja predviđene se tri pregrade unutar ložišta, za razliku od postojećeg ložišta

gde se nalaze samo dve. Kao ulazne veličine u model korišćene su vrednosti određene eksperimentalno, a prikazane su u Tabeli 2.

Tab. 2. Prikaz ulaznih i izlaznih veličina modela

Tab. 2. Parameters at the inlet and outlet of the proposed furnace

	Ulaz/Inlet	Izlaz/Outlet
Temperatura/Temperature, K	1125	1142
Sadržaj/Content CO, ppm	394	23
Sadržaj/Content O ₂ , %	7,88	7,67
Sadržaj/Content CO ₂ , %	12,42	12,71

Na Slikama 3-5 su prikazani profili temperatura, brzina, i koncentracija CO. Rezultati prikazani u Tab. 2, kao i na Sl. 3–5 govore u prilog činjenici da se i smanjenjem dubine ložišta mogu očekivati zadovoljavajući rezultati. Može se videti da je koncentracija CO niža u odnosu na rezultate na postojećem ložištu, a razlog leži u činjenici da je sužavanjem ložišta znatno povećana brzina strujanja pa je samim tim povećan i stepen turbulencije, što sve zajedno dovodi do boljeg mešanja gorivih gasova i oksidatora (kiseonika) i do potpunijeg sagorevanja.

Sl. 3. Profil temperatura – postojeće ložište (levo) i modifikovano (desno)

Fig. 3. Temperature profile – existing furnace (left) and modified furnace (right)

Sl. 4. Polje brzina – postojeće ložište (levo) i modifikovano (desno)

Fig. 4. Velocity profile – existing furnace (left) and modified furnace (right) **Sl. 5.** Profil koncentracije CO – postojeće ložište (levo) i modifikovano (desno)**Fig. 5.** CO concentration profile – existing furnace (left) and modified furnace (right)

Sa druge strane, da bi se izbegao suviše brz prolazak struje gasova kroz ložište predviđene su tri pregrade u ložišnom prostoru koje dodatno prelamaju struju gasova, vrtlože je, i na taj način produžavaju vreme boravka gasova u ložištu.

Na kraju, da bi se neko postrojenje moglo oceniti da li zadovoljava ekološke norme potrebno je uporediti izlazne vrednosti emisije gasova zagađivača svedeno na referentnu vrednost kiseonika. Za ložišta na drvo, drvni briket i otpatke poljoprivrednih kultura sadržaj kiseonika u jedinici zapremine otpadnog gasa je 11% v/v. Kada se izvorni rezultati emisije štetnih materija (CO) preračunaju za sadržaj O_2 od 11% v/v dobijaju se emisije CO (mg/m^3) koje reprezentuju pojedine vrste ložišta (Uredba, Sl.glasnik, 2010). U Tabeli 3 su upoređene dobijene vrednosti emisije CO, svedene na 11% O_2 , sa dozvoljenim graničnim vrednostima emisije (GVE).

Tab. 3. Poređenje emisije CO pri različitim varijantama ložišta sa GVE**Tab. 3.** Comparison of CO emission due to different furnace geometry with ELV

	Postojeće ložište Existing furnace	Modifikovano ložište Modified furnace
Emisija CO na 11% O_2 Emission of CO on 11% O_2 , mg/m^3	61	22
Granična vrednost emisije CO Emission limited values, mg/m^3	250	250

5. ZAKLJUČAK

Izgrađeni kotao u Korporaciji PKB služi za grejanje plastenika u kojima se uzgaja povrće. Radom kotla se svakodnevno uštedi od 1000 – 3000 €, u zavisnosti od vremenskih prilika. Izgradnjom još ovakvih kotlova u budućnosti bi se propagirala domaća tehnologija bazirana na sopstvenom razvoju, omogućilo bi se iskorišćenje sekundarnih sirovina iz poljoprivredne proizvodnje, bez remećenja bilansa u proizvodnji

hrane. Takođe, stvorile bi se mogućnost uzgoja energetskih biljaka (razne trske, konoplje, brzorastuće trave, itd.) na utrinama i zapuštenom zemljištu.

Sprovedena analiza pokazuje očigledno poboljšanje predloženog ložišta za sagorevanje biomase u odnosu na postojeće. Oformljeni numerički alat, uz manje izmene ili dopune, moći će da se primeni u okviru istraživačkih i inženjerskih analiza i na mnogim drugim instalacijama sličnog tipa. Sužavanje samog ložišta, podrazumeva manje troškove investicionih ulaganja, ali u isto vreme postignuti su bolji rezultati procesa dogorevanja dimnih gasova nego na postojećem ložištu. Sprovedeno istraživanje je pokazalo da ostvareni nivo emisije CO (22 mg/m^3) je znatno niži od regulatornog GVE (250 mg/m^3), definisanim domaćim zakonodavstvom. Na ovaj način energetska efikasnost kotla je poboljšana i svi kriterijumi zaštite životne sredine zadovoljeni. Takođe je pokazano kako se primenom matematičkog modeliranja mogu izbeći skupi i dugotrajni eksperimenti, što je veoma važno u savremenoj inženjerskoj praksi.

6. LITERATURA

- [1] Dakić D, Paprika M, Repić B, Erić A, Đurović D. (2012). Isplativost korišćenja poljoprivrednih ostataka radi zadovoljenja energetskih potreba. *Savremena poljoprivredna tehnika* 38(2): 87-96.
- [2] Đurović D. (2011). Dogorevanje gasova u adijabatskom ložištu za sagorevanje poljoprivredne biomase. Doktorski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [3] Janić T, Brkić M, Igić S, Dedović N. (2010). Biomasa – energetski resurs za budućnost. *Savremena poljoprivredna tehnika* 36(2): 167-177.
- [4] Đurović D, Nemoda S, Dakić D, Adžić M, Repić B. (2012). Furnace for biomass combustion – Comparison of model with experimental data. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55(15-16): 4312-4317.
- [5] Repić B, Dakić D, Eric A, Djurovic D, Marinkovic A, Nemoda S. (2013). Investigation of the cigar burner combustion system for baled biomass. *Biomass and Bioenergy* 58(11): 10-19.
- [6] Yin C, Rosendahl L, Kær S.K, Clausen S, Hvid S.L, Hille T. (2008). Mathematical modeling and experimental study of biomass combustion in a thermal 108 MW grate-fired boiler. *Energy&Fuels* 22: 1380–1390.
- [7] Uredba o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduh. (2010). Službeni glasnik Republike Srbije br.71/2010.

OPTIMIZATION OF FURNACE FOR AGRICULTURAL BIOMASS COMBUSTION IN ORDER TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY AND REDUCING ENVIRONMENTAL POLLUTION

**Dejan Đurović¹, Dragoljub Dakić², Branislav Repić¹,
Goran Živković¹, Milica Mladenović¹**

¹ University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences "Vinca", Laboratory for thermotechnic and energy, 11351 Beograd, Mihaila Petrovića Alasa 12-14, Serbia

² University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering Innovation Centre, 11000 Belgrade, Kraljice Marije 16, Serbia

E-mail: dejan2004@vinca.rs

SUMMARY

Agricultural biomass in which, among others, is include soybean straw, as well as agricultural by product, has great energy potential in our country, and at the same time very small percentage is up to now used for energy purposes. Bearing in mind more intense fluctuations in the market of fossil fuels, as well as obligations that our country has taken in relation to the Energy community, there is a necessity for use renewable energy sources, primarily agricultural biomass as a renewable source with the greatest potential. There are a number of ways of using biomass for energy purposes, such as burning on the grate, dust combustion, fluidized bed combustion, but as appropriate way for baled biomass combustion, has been selected the "cigar burner". The aim of this paper is to analyze processes of gas combustion in the furnace in which agricultural biomass is burning, and also the development of CFD mathematical model which should describe the reliability of the processes that occurs in the part above the zone of bale combustion, with attention on the analysis of CO content in the combustion products.

Keywords: Biomass, combustion, CFD, furnace optimization.

Napomena: Rad je realizovan u okviru projekta 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“, Ev. broj projekta III42011.

Primljeno: 17. 02. 2016. god.

Prihvaćeno: 08. 03. 2016. god.