

Bibliid: 0350-2953 (2010)36, 1: 21-31
UDK: 662.767.2:631.572

Originalni naučni rad
Original scientific paper

**TOPLOTNA SNAGA KOTLA ZA SAGOREVANJE BIOMASE
I PRIKAZ MATEMATIČKIH MODELA
THERMAL POWER OF BIOMASS BOILER
AND REVIEW OF MATHEMATICAL MODELS**

Nebojša Dedović¹, Saša Igić², Todor Janić¹

¹Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 8.

²Grad Novi Sad

E-mail: dedovicn@uns.ac.rs

SAŽETAK

U radu su prikazani rezultati ispitivanja toplovodnog kotla za sagorevanje balirane biomase, lociranom na poljoprivrednom kombinatu "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radna jedinica Kuzmin. Kao biomasa koristile su se bale pšenične i sojine slame. Deklarisana snaga kotla je 120 kW. Obezbeđeno je kontinuirano praćenje uticaja količine vazduha, koji se dovodi u ložište kotlovske postrojenja, na sagorevanje bale. Ispitivana je zavisnost toplotne snage kotla i promene mase od vremena sagorevanja bale. Posmatran je uticaj pet režima rada kotla (pri protoku vazduha: 150, 220, 290, 360 i 430 m³/h) i dva tipa recirkulacije dimnih gasova u ložište kotla (bez recirkulacije i klizna recirkulacija) na sam proces sagorevanja. Cilj ovog istraživanja jeste definisanje korelacionih jednačina koje će predstavljati matematički model zavisnosti toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale, kao i da se ispita uticaj recirkulacije produkata sagorevanja na toplotnu snagu kotla. Matematički modeli dobijeni su primenom nelinearne regresione analize. Toplotna snaga kotla povećavala se sa povećanjem protoka vazduha kroz ložište kotla. Sagorevanje bala bilo je sporije pri kliznoj recirkulaciji, nego kada nema recirkulacije. Primena klizne recirkulacije je imala bolje efekte pri sagorevanju bala pšenične slame.

Ključne reči: pšenična slama, sojina slama, toplotna snaga kotla, kotao, sagorevanje, klizni režim, matematički modeli

1. UVOD

U Srbiji je sve veća potreba za korišćenjem obnovljivih izvora energije (u koje svrstavamo biomasu, biogas, energiju vetra, energiju Sunca, hidroenergiju i geotermalnu energiju), jer cena fosilnih goriva raste bar istim tempom kojim se rezerve ovih goriva smanjuju. U današnje vreme energetske potrebe se najvećim delom podmiruju iz konvencionalnih izvora energije u koje mogu da se svrstaju fosilna goriva (nafta, gas, uglj) i električna energija. Pošto sva relevantna istraživanja u svetu ističu da su fosilna goriva na izmaku, to će za krajnju posledicu imati energetska krizu globalnih razmera (Janić et al, 1998, Wayne i Turner, 1997). Veoma je važno uskladiti i korišćenje obnovljivih izvora energije u našoj zemlji sa smernicama Evropske unije, radi smanjenja zagađenja životne sredine i stvaranja efekta staklene bašte. Za sveobuhvatno sagledavanje tehnookonomskih odrednica korišćenja pšenične i sojine slame, kao i za izbor i projektovanje najpogodnijih

tehnologija, aparata i postrojenja, neophodno je raspolagati podacima o termofizičkim i hemijskim karakteristikama ovih goriva, relevantnim za konkretne uslove eksploatacije (Pešenjanski, 2000). Brojna istraživanja (Alimpić, 1983, Šefčić, 1991, Brkić i Janić, 1998, Janić et al, 2008, Janić et al, 2009) ukazuju na to da se, bez značajnijih posledica u pogledu narušavanja strukture zemljišta, oko jedna četvrtina proizvedene biomase može da koristi u energetske svrhe. To znači da se u Srbiji svake godine za produkciju toplotne energije raspolaze sa oko 3,1 miliona tona biomase, od čega bi mogla da se dobije energija ekvivalentna 1×10^6 t lož ulja i time zadovoljila potreba velikog dela energije, koja se troši u oblastima poljoprivredne proizvodnje (Ostojić et al, 2003, Oka i Jovanović, 1997).

2. MATERIJAL I METOD

U radu je opisano kotlovsko postrojenje za sagorevanje bala sojine i pšenične slame, locirano na poljoprivrednom kombinatu "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radna jedinica Kuzmin. Osnovu postrojenja čini toplovodni kotao proizvođača "Eko produkt" iz Novog Sada, deklarisanе snage 120 kW. Loženje kotla je ručno. Posmatrano kotlovsko postrojenje služi za zagrevanje poslovne zgrade poljoprivrednog kombinata "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radne jedinice Kuzmin. Grejna tela su člankasti liveni aluminijumski radijatori. Kotlovsko postrojenje sastoji se od nekoliko zasebnih, ali nerazdvojnih funkcionalnih celina, koje u sebi sadrže neophodnu mernu i regulacionu opremu. Funkcionalne celine od kojih se sastoji ispitivano postrojenje su: dovod, merenje i regulisanje količine svežeg vazduha koji se dovodi u ložište kotlovskog postrojenja, sagorevanje biogoriva i odvođenje proizvedene količine toplote, odvođenje produkata sagorevanja i merno-regulaciona oprema. Za materijal u ovom radu odabrane su prizmatične bale pšenične i sojine slame, koje su prikupljene neposredno posle žetve na zemljištu poljoprivrednog kombinata "Mitrosrem", radne jedinice Kuzmin. Slama je balirana presom za baliranje, dok je skladištenje balirane slame obavljeno u kamare u okviru ekonomskih dvorišta navedene radne jedinice. U laboratorijskim uslovima određena je srednja vrednost donje toplotne moći pšenične slame u vrednosti od 13,479 MJ/kg, pri sadržaju vlage od 8,2%. Donja toplotna moć pšenične slame svedena na suhu masu iznosila je 14,901 MJ/kg. U laboratorijskim uslovima određena je i srednja vrednost količine pepela pšenične slame od 6,52%. Takođe, određena je i srednja vrednost donje toplotne moći sojine slame u vrednosti od 14,029 MJ/kg, pri sadržaju vlage od 9,5%. Donja toplotna moć sojine slame svedena na suhu masu iznosila je 15,757 MJ/kg. U laboratorijskim uslovima određena je i srednja vrednost količine pepela sojine slame od 4,1% (Igić et al, 2006). Obavljen je izbor bala ujednačenih dimenzija i masa. Nakon njihovog odabira obavljeno je i njihovo skladištenje u prostorijama radne jedinice Kuzmin. Odabrano je ukupno 350 bala pšenične i sojine slame. Bale su bile smeštene u skladišnoj prostoriji, koja se nalazi u sastavu kotlarnice, tako da nisu bile izložene daljim klimatskim uticajima, što im je očuvalo kvalitet i sprečilo veće narušavanje njihovog sastava, izgleda i sabijenosti. Poprečni presek bala bio je u proseku 0,35 m x 0,5 m, dok je dužina bala iznosila oko 0,75 m. Sabijenost bala pšenične i sojine slame bila je ujednačena.

Posmatran je uticaj pet režima rada kotla (150, 220, 290, 360 i 430 m³/h) i dva tipa recirkulacije dimnih gasova u ložište kotla (bez recirkulacije i klizna recirkulacija) na sam proces sagorevanja. Klizna recirkulacija odvijala se na sledeći način. Bale su sagorevane na

početku ciklusa, bez recirkulacije dimnih gasova. Pomoću lambda sonde praćen je koeficijent viška vazduha. Kada je pokazivanje lambda sonde bilo „0“ uključivano je 16,5% recirkulacije. Proces sagorevanja je zatim praćen pomoću analizatora dimnih gasova. Kada je nivo koeficijenta viška vazduha dolazio do nivoa od 3,5, uključivano je 33% recirkulacije. Proces sagorevanja je dalje praćen na taj način što je kraj procesa sagorevanja bio pri koeficijentu viška vazduha od 7 (Igić, 2008).

Neposredni cilj ovog istraživanja jeste definisanje korelacionih jednačina koje će predstavljati matematički model zavisnosti toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale, kao i da se ispita uticaj recirkulacije produkata sagorevanja na toplotnu snagu kotla. Metode merenja su u skladu sa standardom JUS M.E2.203 i DIN 4702 kod definisanja toplotne snage kotla. Toplotna snaga kotla određena je direktnom metodom (Brkić i Živanović, 2006), to jest, merenjem zapreminskog protoka vode i merenjem temperature vode na ulazu i izlazu iz kotla. Detaljan pregled merenja (oznake merenja, dimenzije bala, nazivi instrumenata, opseg merenja) dat je u radu Dedović et al (2008b).

Mnoga istraživanja u vezi sa sagorevanjem bala slame uključuju i formiranje matematičkih modela. Trodimenzionalni matematički model sagorevanja bala slame koji se koristi radi optimalizacije procesa sagorevanja slame dat je u radu Zhaosheng et al (2009). Ispitivana je maksimalna temperatura i koncentracija kiseonika u ložištu kotla, kao i emisija CO. Pokazano je da dati model može pouzdano da se koristi pri detaljnoj analizi sagorevanja slame u kotlovima. U radu Zhou et al (2005) dat je jednodimenzionalni heterogeni matematički model, koji optimalizuje sagorevanje slame. Model daje detaljne informacije o strukturi plamena koji je potreban da bi se zapalila bala slame u ložištu kotla. Zatim, pri sagorevanju bala slame oslobađaju se produkti sagorevanja i njihov sastav ispitivan je u radu Bubenheim et al (1997). Posebna pažnja usmerena je na sadržaj ugljenika u CO i CO₂ i smanjenju otrovnih materija u produktima sagorevanja. U radu Jones et al (2000) upoređeno je korišćenje pšenične slame i uglja (bitumen), kao goriva. Istaknuto je da se slama brzo zapalila, otpuštala volatile i da je sagorevala brže od uglja. Važan segment rada kotla je i stepen korisnog dejstva (Pešenjanski i Stepanov, 2005), koji se kod ručno loženih kotlovskih postrojenja kreće od 70 do 80%, a kod kotlova na pelete je oko 87% (Hertmann et al, 2003, Hellwig, 1985). Stepenn korisnog dejstva manjih kotlovskih postrojenja po pravilu je manji za oko 3% od stepena korisnog dejstva većih kotlovskih postrojenja. U ovom radu istraživanja su bazirana na promeni mase i toplotne snage kotla, dok se analiza produkata sagorevanja i energetske efikasnosti kotla ostavljaju za naredni rad.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Rezultati

Istraživanja su obavljena tokom marta i aprila meseca 2006. godine. Merene veličine su automatski beležene u kontroleru svakih 5 sekundi, tako da je obezbeđeno kontinuirano praćenje procesa sagorevanja. U svakom režimu obavljeno je po tri merenja. U radu su prikazani matematički modeli dobijeni pomoću srednjih vrednosti izmerenih parametara sagorevanja (toplotna snaga kotla i promena mase bale) pri svakom režimu rada pri

recirkulaciji 0% (tabela 1, prva kolona u režimu) i kliznoj recirkulaciji (tabela 1, druga kolona u režimu).

Uslovi sagorevanja bala slame su u velikoj meri spicifični. Sojina slama u sebi sadrži određeni procenat ulja što dovodi do toga da je potrebna veća energija aktivacije procesa sagorevanja-posebno kod potpale bala. Iz tog razloga, dok veći deo mase sojine bale ne bude zahvaćen plamenom, tj. ne bude u reakciji, intenzitet sagorevanja se smanjuje, odnosno oslobađa se manja količina toplotne energije. Prelaskom kritične količine dobijene energije, veći procenat mase bale slame ulazi u reakciju i dobija se veća količina energije, što dovodi do još burnije reakcije i naglog povećanja brzine sagorevanja. Proces se ubrzava sve dok ima dovoljno mase koja će sagorevati. Sama struktura i fizički izgled balirane stabljike, mahuna i lista soje, omogućava dovoljnu poroznost za prolaz vazduha, tako da se sagorevanje ubrzano odvija i u unutrašnjosti bale. Proces sagorevanja se ravnomerno ubrzava sve dok se udeo isparljivih gorivnih materija-volatila, ne smanji. Zatim se toplota proizvodi sagorevanjem fiksnog ugljenika (kojeg ima relativno malo), što se u ložištu manifestuje naglim smanjenjem u predatoj toplotnoj energiji. Navedeno može da se vidi na prikazanim krivama na slici 4, gde se uočava da, nakon ubacivanja bale sojine slame u ložište, produkovana snaga naglo opada, da bi se nakon oko 100 sekundi, bala „razgorela“ i tada počinje naglo produkovanje toplote.

Tab. 1. Merene vrednosti pri sagorevanju bala slame (W=pšenična slama, S=sojina slama)
Tab. 1. Measured values of combustion process (W=wheat straw, S=soybean straw)

Režim rada kotla Boiler operating regime	F u c e l	150 m ³ /h		220 m ³ /h		290 m ³ /h		360 m ³ /h		430 m ³ /h	
Ukupno vreme sagorev. bale [s] Total bale combustion time[s]	W	1175	1585	1055	1120	947	965	650	805	587	600
	S	1258	723	713	504	670	502	453	483	400	447
Toplotna snaga kotla [kW] Boiler thermal power [kW]	W	64,16	39,54	63,47	57,87	71,75	60,83	88,21	76,63	90,90	97,32
	S	75,66	80,42	92,24	103,8	113,1	98,83	96,63	104,1	112,9	113,1
Maksimalna toplot. snaga kotla [kW] Maximum boiler thermal power[kW]	W	83,90	72,00	85,18	83,88	94,07	82,86	119,9	109,1	130,9	134,6
	S	94,05	102,2	110,5	121,1	125,4	122,8	116,6	134,1	141,6	129,3

3.2. Diskusija

Iz tabele 1 se vidi da se vreme sagorevanja bala pšenične i sojine slame smanjuje kako se povećava protok vazduha kroz ložište kotla i to za oba tipa recirkulacije produkata sagorevanja. Treba uočiti da je vreme sagorevanja bala sojine slame uvek manje od vremena sagorevanja bala pšenične slame, osim u režimu 150 m³/h i to kada nema recirkulacije produkata sagorevanja. Pri sagorevanju bala pšenične slame, pri kliznoj recirkulaciji, vreme sagorevanja bala je veće nego kada nema recirkulacije, dok je pri

sagorevanju bala sojine slame prethodna konstatacija tačna za režime 360 i 430 m³/h. Toplotna snaga kotla povećavala se sa povećanjem protoka vazduha kroz ložište kotla i primetno je da se veća toplotna snaga kotla dobija ako se kao gorivo koriste bale sojine slame. Pri kliznoj recirkulaciji, ako se kao gorivo koriste bale sojine slame, dobija se veća toplotna snaga kotla, nego kada nema recirkulacije produkata sagorevanja (osim u režimu 290 m³/h), a obrnuto je u slučaju kada se kao gorivo koriste bale pšenične slame (osim u režimu 430 m³/h). Nominalna snaga kotla (120 kW) dostignuta je u režimima 360 i 430 m³/h kada nema recirkulacije i kada se kao gorivo koriste bale pšenične slame, odnosno u režimu 430 m³/h, pri kliznoj recirkulaciji. Ako se kao gorivo koriste bale sojine slame, onda se samo u režimima 150 i 220 m³/h ne dostiže nominalna snaga kotla i to kada nema recirkulacije.

Koristeći metod višestruke nelinearne regresije i metod najmanjih kvadrata za određivanje regresionih koeficijenata (Strasser, 1985, Bates i Watts, 1988) dolazi se do modela zavisnosti toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale za različite režime rada ako nema recirkulacije. Step en determinisanosti zavisne promenljive iskazan koeficijentom determinacije R^2 odabranih nezavisnih promenljivih i on opisuje prilagodjenost krive izmerenim podacima (Surla, 1992, Pantelić, 1984). Na slikama 1 i 2 predstavljena je zavisnost toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale na osnovu matematičkog modela (1) i to pri sagorevanju pšenične i sojine slame, redom. Dobijeni model predstavlja poboljšanje modela predstavljnog u radu Dedović et al (2008a):

$$P(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}) = b1 + b2 \cdot \dot{v} \cdot \text{Exp} \left(- \left(b3 \cdot \frac{(\tau - b4)}{\tau_{kr}} \right)^2 \right) + b5 \cdot \dot{v} \cdot \text{Sin} \left(b6 \cdot \frac{(\tau - b7)}{\tau_{kr}} \right) \quad (1)$$

gd e su: b1, b2, ..., b7 regresioni koeficijeti dati u tabelama 2 i 3, τ - vreme sagorevanja bale, P - toplotna snaga kotla, \dot{v} - protok vazduha, τ_{kr} - ukupno vreme sagorevanja bale.

Tab. 2. Ocene parametara modela (1), bez recirkulacije, pšenična slama, $R^2=90,40\%$

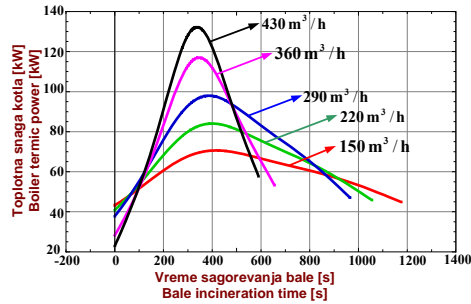
Tab. 2. Estimation of math. model parameters (1), no recirculation, wheat straw, $R^2=90.40\%$

	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
Ocena parametara Parameter estimation	44,75	0,339	-2,307	264,84	0,127	3,718	411,03

Tab. 3. Ocene parametara modela (1), bez recirkulacije, sojina slama, $R^2=93,58\%$

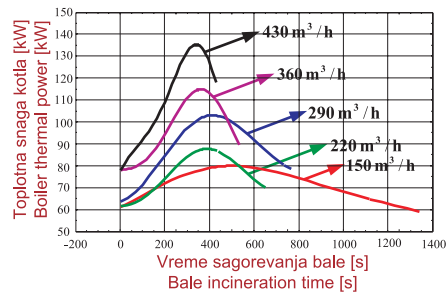
Tab. 3. Parameter estimation of math. model (1), no recirculation, soya straw, $R^2=93.58\%$

	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
Ocena parametara Parameter estimation	44,33	0,088	4,2476	330,8	0,118	3,329	77,749



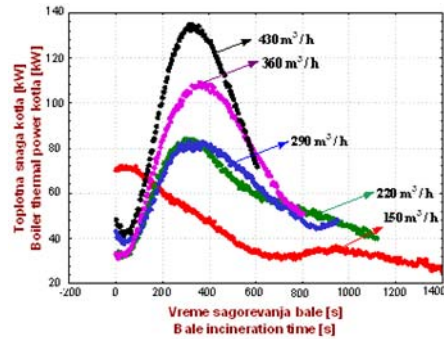
Sl. 1. Zavisnost toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale, bez recirkulacije, pšenična slama

Fig. 1. Correlation between boiler thermal power and bale incineration time, no recirculation, wheat straw



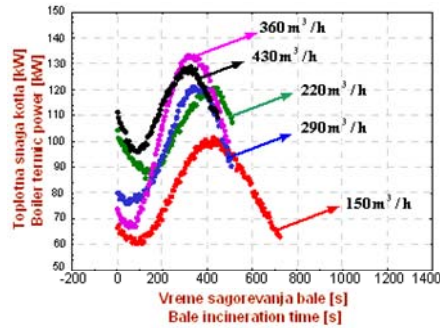
Sl. 2. Zavisnost toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale, bez recirkulacije, sojina slama

Fig. 2. Correlation between boiler thermal power and bale incineration time, no recirculation, soya straw



Sl. 3. Zavisnost toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale (eksperimentalni podaci), klizna recirkulacija, pšenič. slama

Fig. 3. Correlation between boiler thermal power and bale incineration time, variable recirculation, wheat straw (experim. data)



Sl. 4. Zavisnost toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale (eksperimentalni podaci), klizna recirkulacija, sojina slama

Fig. 4. Correlation between boiler thermal power and bale incineration time, variable recirculation, soybean straw (experimen. data)

Promena mase bale dobijena je tako što se usvojilo da procentualna promena mase bude jednaka procentualnoj promeni količine ugljen-dioksida, pri sagorevanju bala slame (slike 5 i 7). Formule date u (2) predstavljaju jednačine promene mase ako se kao gorivo koriste bale pšenične slame i to za svaki režim rada kotla. Sa τ je obeleženo vreme sagoravanja bale, sa m_0 početna masa bale i sa Δm promena mase bale u vremenu.

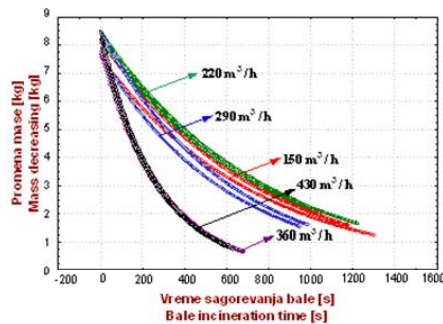
$$\begin{aligned}
 \Delta m(\tau, 150, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00138 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 220, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00132 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 290, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00153 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 360, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00365 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 430, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00378 \cdot \tau)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Formule date u (3) predstavljaju promenu mase bale sojine slame u zavisnosti od vremena.

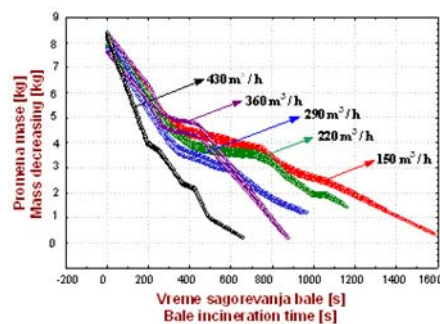
$$\begin{aligned}
 \Delta m(\tau, 150, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,0009 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 220, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,002209 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 290, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00280 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 360, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00319 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 430, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00385 \cdot \tau)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Na osnovu (2) i slike 5 zaključuje se da je najbrža promena mase bale pšenične slame u režimima 360 i 430 m³/h i to kada nema recirkulacije. Poredeći slike 5 i 6, uočava se da je pri kliznoj recirkulaciji promena mase bale sporija, nego kada nema recirkulacije. Treba zapaziti i to da se pri kliznoj recirkulaciji, kada se prvi put vrate dimni gasovi u ložište kotla (16,5%), dostiže maksimalna toplotna snaga kotla i najsporija promena mase bale. Slično, na osnovu (3) i slike 7 važi da je promena mase bale sojine slame brža sa povećanjem protoka svežeg vazduha kroz ložište kotla (u slučaju kada nema recirkulacije). U slučaju klizne recirkulacije, bale sojine slame sagorevale su brže od bala pšenične slame.

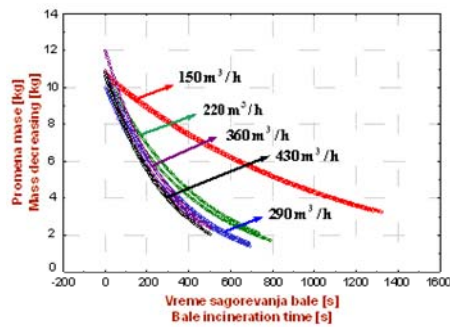
Podaci dobijeni na slikama 3-8 obrađeni su u programskom paketu Statistica 8.0, dok su grafici predstavljeni na slikama 1 i 2 obrađeni u programskom paketu Mathematica 5 (Wolfram, 1991, Krejić i Herceg, 1994).



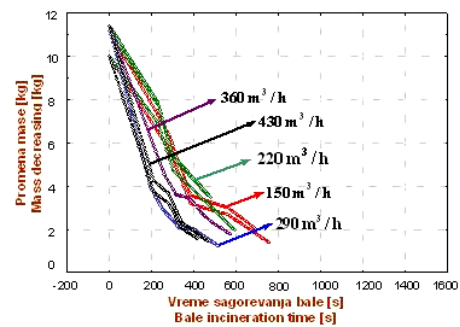
Sl. 5. Promena mase bale u zavisnosti od vremena sagorevanja bale (eksperimentalni podaci), bez recirkulacije, pšenična slama
Fig. 5. Bale mass variation depending on combustion time (experimental data), no recirculation, wheat straw



Sl. 6. Promena mase bale u zavisnosti od vremena sagorevanja bale (eksperimentalni podaci), klizna recirkulacija, pšenič. slama
Fig. 6. Bale mass variation depending on combustion time (experimental data), variable recirculation, wheat straw



Sl. 7. Promena mase bale u zavisnosti od vremena sagorevanja bale (eksperimentalni podaci), bez recirkulacije, sojina slama
Fig. 7. Bale mass variation depending on combustion time (experimental data), no recirculation, soybean straw



Sl. 8. Promena mase bale u zavisnosti od vremena sagorevanja bale (eksperimentalni podaci), klizna recirkulacija, sojina slama
Fig. 8. Bale mass variation depending on combustion time (experimental data), Variable recirculation, soybean straw

4. ZAKLJUČAK

Toplotna snaga kotla povećavala se sa povećanjem protoka vazduha kroz ložište kotla i primetno je da se veća toplotna snaga kotla dobija ako se kao gorivo koriste bale sojine slame. Sagorevanje bala bilo je sporije pri kliznoj recirkulaciji, nego kada nema recirkulacije. Primena klizne recirkulacije je imala bolje efekte pri sagorevanju bala pšenične, nego pri sagorevanju bala sojine slame. Prikazani matematički modeli mogu da se smatraju verodostojnim za dato postrojenje i uslove pod kojima su sprovedeni eksperimenti. Primena matematičkih modela u praksi može biti višestruka. Osim pružanja osnovnih informacija u svrhu povećanja toplotne snage i energetske efikasnosti kotlovskeg postrojenja, ovi matematički modeli mogu da se primene pri projektovanju novih postrojenja, kao i kod rekonstrukcije i automatizacije postojećeg postrojenja. Radi potpunijih informacija o sagorevanju bala pšenične i sojine slame, potrebno je uporediti podatke iz ovog rada sa podacima dobijenim u slučaju sagorevanja sojine slame (Dedović et al, 2009).

5. LITERATURA

- [1] Alimpić M. (1983). Energija iz poljoprivrede. *Savremena poljoprivredna tehnika* 9(1-2): 1-7.
- [2] Bates D. M, Watts D. G. (1988). *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*. New York: Wiley.
- [3] Brkić Lj, Živanović T. (2006). *Termički proračun parnih kotlova*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.
- [4] Brkić M, Janić T. (1998). Mogućnosti korišćenja biomase u poljoprivredi. In Proc: Briketiranje i peletiranje biomase iz poljoprivrede i šumarstva, 5-9. Sombor, 12-15 maja.
- [5] Bubenheim D.L, Patterson M, Wignarajah K, Flynn M. (1997). Incineration of biomass and utilization of product gas as a CO₂ source for crop production in closed systems: Gas quality and phytotoxicity. *Advanced in Space Research* 20(10): 1799-2054.

- [6] Dedović N, Igić S, Janić T. (2008a). Modelovanje energetskog bilansa poljoprivredne proizvodnje na poljoprivrednom kombinatu PD «Mitrosrem». *Revija agronomska saznanja* 13(5): 10-14.
- [7] Dedović N, Igić S, Janić T. (2008b). Uticaj recirkulacije vazduha na energetsku efikasnost kotla za sagorevanje balirane biomase 120 kW i prikaz matematičkih modela. *Savremena poljoprivredna tehnika* 34(3-4): 220-226.
- [8] Dedović N, Igić S, Janić T. (2009). Energetska efikasnost kotla za sagorevanje biomase pri recirkulaciji produkata sagorevanja i prikaz matematičkih modela. *Savremena poljoprivredna tehnika* 35(1-2): 42-51.
- [9] Hellwig M. (1985). Basic of the combustion of wood and straw. In Proc: 3rd E. C. Conference on Biomass "Energy from Biomass", 793-798. Venice, Italy, 25-29 March.
- [10] Hertmann H, Thuncke K, Holdrich A, Robmann P. (2003). *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. Gulzow, Nemačka: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- [11] Igić S. (2008). Uticaj vrste i stanja balirane slame te količine i sastava ulaznog vazduha na efikasnost kotlovskeg postrojenja, Ph.D. rad, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [12] Igić S, Pekez Z, Brkić M, Janić T. (2006). Određivanje toplotne moći, sadržaja vlage i pepela pšenične i sojine slame. *Revija agronomska saznanja* 15(5): 38-43.
- [13] Janić T, Brkić M, Erdeljan Z. (1998). Sagorevanje balirane biomase. *Procesna tehnika i energetika u poljoprivredi* 2(3): 117-121.
- [14] Janić T, Brkić M, Igić S, Dedović N. (2008). Termoenergetski sistemi sa biomasom kao gorivom. *Savremena poljoprivredna tehnika* 34(3-4): 212-219.
- [15] Janić T, Brkić M, Igić S, Dedović N. (2009). Gazdovanje energijom u poljoprivrednim preduzećima i gazdinstvima. *Savremena poljoprivredna tehnika* 35(1-2): 127-133.
- [16] Jones J.M, Pourkashanian M, Williams A, Hainsworth D. (2000). A comprehensive biomass combustion model. *Renewable Energy* 19(1-2): 229-344.
- [17] Krejić Nataša, Herceg Đ. (1994). *Matematika i Mathematica*. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet.
- [18] Oka S, Jovanović Lj. (1997). Biomasa u energetici. In: *Biomasa – obnovljivi izvor energije*. ed. Monografija, 9-18. Beograd: Jugosl. društvo termičara – Institut za nuklearne nauke "Vinča".
- [19] Ostojić M, Simin R, Igić S. (2003). Upotreba biomase za proizvodnju toplotne energije na farmi. *Procesna tehnika i energetika u poljoprivredi* 7(5): 121-123.
- [20] Pantelić I. (1984). *Primena statističkih metoda u istraživanjima i procesima proizvodnje*. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.
- [21] Pešenjanski I. (2000). Kinetika sagorevanja pšenične slame. MSc rad, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [22] Pešenjanski I, Stepanov B. (2005). Rezultati ispitivanja kotla za sagorevanje biomase 250 kW i predlog tehničko-organizacionih mera za povećanje energetske efikasnosti postojećih kotlovskeg postrojenja. *Savremena poljoprivredna tehnika* 31(4): 197-203.
- [23] Strasser H. (1985). *Mathematical Theory of Statistics*, Berlin, New York, De Gruyter.
- [24] Surla Katarina. (1992). *Numeričke i statističke metode u obradi eksperimentalnih podataka* 3. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet.
- [25] Šefčić Đ. (1991). Istraživanje kriterijuma za ocenjivanje efektivnosti postupka valorizacije slame. Ph.D. rad, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [26] Wayne C, Turner J. (1997). *Energy management handbook*, The Fairmont Press, 3rd edition: 87.
- [27] Wolfram S. (1991). *Mathematica A System for Doing Mathematics by Computer*. Second Edition: Illinois, USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Wolfram Research.

- [28] Zhaosheng Y, Xiaoqian M, Yanfen L. (2009). Mathematical modeling of combustion in a grate-fired boiler burning straw and effect of operating conditions under air- and oxygen-enriched atmospheres, *Renewable Energy*, article in press.
- [29] Zhou H, Jensen A.D, Glarborg P, Jensen P.A, Kavaliauskas A. (2005). Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. *Fuel* 84(4): 389-403.

THERMAL POWER OF BIOMASS BOILER AND REVIEW OF MATHEMATICAL MODELS

Nebojša Dedović, Saša Igić, Todor Janić

SUMMARY

The paper reviews test results for a biomass-fired hot water boiler, located at “Mitrosrem” agricultural company from Sremska Mitrovica, work unit Kuzmin. Nominal boiler power is 120 KW. The impact of the quantity of inlet air (150, 220, 290, 360 and 430 m³/h) fed to the boiler firebox was continuously monitored. Correlation between boiler thermal power and bale incineration time, as well as the mass decrease during bale combustion were examined, resulting in presented corresponding mathematical models. Two types of recirculation (no recirculation and variable recirculation) have been chosen. In the case of combustion with no recirculation, average boiler thermal power rate ranges between 63.47 to 90.90 kW for wheat straw (between 75.66 to 113.12 kW for soybean straw). In the case of variable recirculation, average boiler thermal power rate ranges between 39.54 to 97.32 kW for wheat straw (between 80.42 to 113.08 kW for soybean straw). Maximum boiler thermal power is 130.94 kW (in the case of no recirculation), and 134.63 kW (in the case of variable recirculation) for wheat straw. Maximum boiler thermal power is 141.56 kW (in the case of no recirculation), and 134.05 kW (in the case of variable recirculation) for soybean straw. Increase of air throughput in the firebox increases the thermal capacity of the boiler, while the bale combustion time is reduced. Total combustion time ranges between 587 to 1,175 s (600 to 1,585 s, with variable recirculation of combustion products) for wheat straw. Total combustion time ranges between 400 to 1,258 s (447 to 723 s, with variable recirculation of combustion products) for soybean straw. Boiler thermal power is greater if soybean straw bales are used as a fuel. Bale combustion time is prolonged when using variable recirculation as compared to no recirculation. Application of variable recirculation is more suitable when soybean straw is used as a fuel.

Key words: soybean straw, emission, mathematical models, boiler, combustion, recirculation

Napomena: Rad je proistekao iz rezultata rada na projektu energetske efikasnosti NP EE br. 273021 “Unapređenje materijalno-energetskog bilansa i razvoj preduslova za primenu ekološki korektnih energetske sistema zasnovanih na sopstvenim energetske resursima (biomasi) u PK “Mitrosrem” u Sremskoj Mitrovici”, jul 2006., koje je finansiralo Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije.

Primljeno: 21. 12. 2009.

Prihvaćeno: 11. 01. 2010.