

**KOEFICIJENT VIŠKA VAZDUHA PRI ŠAGOREVANJU BALA SLAME I
PRIKAZ MATEMATIČKIH MODELA**

**EXCESS AIR RATE DURING THE STRAW BALE COMBUSTION AND
REVIEW OF MATHEMATICAL MODELS**

Nebojša Dedović¹, Saša Igić², Snežana Matić-Kekić¹, Todor Janić

¹Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 8, ²Grad Novi Sad

E-mail: dedovicn@gmail.com

SAŽETAK

U radu su prikazani rezultati ispitivanja toplovodnog kotla za sagorevanje balirane biomase, lociranom na poljoprivrednom kombinatu "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radna jedinica Kuzmin. Deklarisana snaga kotla je 120 kW. Kao biomasa koristile su se bale pšenične i sojine slame. Obezbeđeno je kontinuirano praćenje uticaja količine vazduha, koji se dovodi u ložište kotlovskeg postrojenja, na sagorevanje bale. Ispitivana je promena toplotne snage i energetske efikasnosti kotla u vremenu, kao i promena mase bale, pri sagorevanju. Posmatran je uticaj pet režima rada kotla (pri protoku vazduha kroz ložište kotla od 150, 220, 290, 360 i 430 m³/h). Cilj istraživanja bio je definisanje jednačina koje će predstavljati matematički model zavisnosti toplotne snage kotla, energetske efikasnosti kotla i promene mase od vremena sagorevanja bale. Matematički modeli, za sve ispitivane veličine, dobijeni su primenom nelinearne regresione analize. Toplotna snaga kotla povećavala se pri povećanju protoka vazduha kroz ložište kotla, dok se vreme sagorevanja bala smanjivalo. Date su vrednosti koeficijenata viška vazduha pri maksimalnoj toplotnoj snazi i maksimalnoj energetske efikasnosti kotla.

Ključne reči: slama, toplotna snaga kotla, energetska efikasnost kotla, koeficijent viška vazduha, matematički modeli

1. UVOD

U Srbiji raste potreba za korišćenjem obnovljivih izvora energije (u koje ubrajamo biomasu, biogas, energiju vetra, energiju Sunca, hidroenergiju i geotermalnu energiju). Razlog za to je cena fosilnih goriva koja raste bar istim tempom kojim se rezerve navedenih goriva smanjuju. Danas se energetske potrebe, osim raritetnih naznaka (Matić-Kekić, 2006, Matić-Kekić, 2008, Babić et al, 2005), podmiruju iz konvencionalnih izvora energije u koje mogu da se svrstaju fosilna goriva (nafta, gas, ugalj) i električna energija. Sva relevantna istraživanja u svetu ističu da su fosilna goriva na izmaku i iz toga sledi da će se desiti energetska kriza globalnih razmera (Janić et al, 1998, Wayne i Turner, 1997). Takođe, važno je uskladiti i korišćenje obnovljivih izvora energije u našoj zemlji sa smernicama Evropske unije, i to sve u svrhu smanjenja zagađenja životne sredine i stvaranja efekta

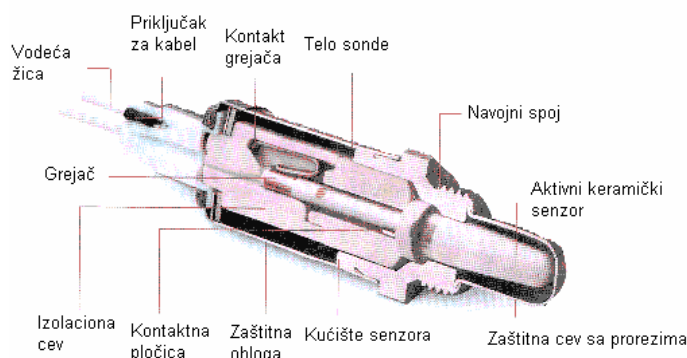
staklene bašte. Za sveobuhvatno sagledavanje tehnoeкономskih odrednica korišćenja pšenične i sojine slame, kao i za izbor i projektovanje najpogodnijih tehnologija, aparata i postrojenja, neophodno je raspolagati podacima o termofizičkim i hemijskim karakteristikama ovih goriva, relevantnim za konkretne uslove eksploatacije (Pešenjanski, 2000). Veliki broj istraživanja (Alimpić, 1983, Šefčić, 1991, Brkić i Janić, 1998, Janić et al, 2008, Janić et al, 2009) ukazuju na to da, bez značajnijih posledica u pogledu narušavanja strukture zemljišta, oko jedna četvrtina proizvedene biomase može da se koristi u energetske svrhe. To bi značilo da se u Srbiji svake godine za produkciju toplotne energije raspolaže sa oko 3,1 miliona tona biomase, od čega bi mogla da se dobije energija ekvivalentna 1×10^6 t lož-ulja i time bi se zadovoljila potreba velikog dela energije, koja se troši u oblastima poljoprivredne proizvodnje (Ostojić et al, 2003, Oka i Jovanović, 1997). Za sagorevanje pšenične slame i biogoriva uopšte, uglavnom se koriste kotlovi i ložišta sa ravnim nepokretnom rešetkom (Oka, 1998, Pešenjanski i Stepanov, 2005). Stepenn korisnog dejstva kod ručno loženih kotlovskih postrojenja kreće se 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.

Najpouzdaniji rezultati pri definisanju procesa sagorevanja dobijaju se eksperimentalnim putem, tako što se na osnovu izmerenih veličina postavljaju matematički modeli (Jones et al, 2000), koji definišu proces sagorevanja. Toplotna snaga kotla koji je posmatran u radu, određena je direktnom metodom (Brkić i Živanović, 2006), to jest, merenjem zapreminskog protoka vode i temperature vode na ulazu i izlazu iz kotla. Energetska efikasnost kotla određena je odnosom između dobijene i uložene toplotne snage kotla. Sa druge strane, o važnosti poznavanja procesa sagorevanja govori i činjenica da je količina dovedenog vazduha u ložište kotla, tokom sagorevanja, znatno drugačija od potrebne. Ukoliko postrojenje radi sa velikim koeficijentom viška vazduha, to za posledicu ima gubitke usled povećanja entalpije vazduha, koji neiskorišćen izlazi kroz gasni trakt (Janić, 2000). Zato će u ovom radu biti ispitano ponašanje koeficijenta viška vazduha tokom procesa sagorevanja bala slame. Ali, pre toga, potrebno je navesti kolika je toplotna snaga, energetska efikasnost i kakva je promena mase tokom sagorevanja da bi se imala kompletnija slika samog procesa sagorevanja. Detaljan pregled merenja (oznake merenja, dimenzije bala, nazivi instrumenata, opseg merenja) dat je u radu Dedović et al (2008).

2. MATERIJAL I METOD

U ovom radu opisano je kotlovsko postrojenje za sagorevanje bala pšenične i sojine slame, locirano na poljoprivrednom kombinatu "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radna jedinica Kuzmin. Osnovu postrojenja čini toplovodni kotao proizvođača "Eko produkt" u Novom Sadu. Toplovodni kotao je deklarisan 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 radiatori. Kotlovsko postrojenje sastoji se od nekoliko zasebnih, ali nerazdvojenih 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.

Kontrola koeficijenta viška vazduha obavljala se lambda sondom. U istraživanju su korišćene univerzalna lambda sonda tipa LS 01 proizvođača “Bosch” i univerzalna lambda sonda sa grejačem tipa LS 07, takođe proizvođača “Bosch” (slika 1). Lambda sonda (senzor kiseonika) je hemijski generator. Ona stalno pravi poređenje između količine kiseonika u dimnim gasovima u dimnjači i okolnog vazduha. Ako ovo poređenje pokaže prisustvo male količine kiseonika proizvodi se napon. Izlazni signal iz ove sonde je naponski signal u opsegu 0-1,1 V. Ukoliko je količina kiseonika u dimnim gasovima koji prolaze kroz dimnjaču mala, napon na izlazu iz lambda sonde je veći od 0,45 volti. Ukoliko je količina kiseonika veća, napon na izlazu iz lambda sonde je niži od 0,45 volti. Radna temperatura lambda sonde je iznad 350⁰C. U eksperimentu je prvo korišćena samo lambda sonda, bez grejača tipa LS 01 proizvođača “Bosch”, koja je imala samo jedan izvod. Pošto je temperatura dimnih gasova u dimnjači često bila ispod radne temperature sonde (350⁰C), pokazivanje lambda sonde nije bilo dovoljno pouzdano. Zato je u eksperimentu korišćena i lambda sonda sa grejačem tipa LS 07, proizvođača “Bosch”. Ona na izlazu ima 4 izvoda od toga dva za povezivanje grejača i dva za generisanje naponskog signala. Grejač je obezbeđivao da sonda radi na radnoj temperaturi od 350⁰C i pri temperaturi dimnih gasova nižoj od ove vrednosti. Naponski signal koji se generiše u lambda sondi uvodi se u ekspanzioni modul tipa IO-AI4-AO2.



Sl. 1. Univerzalna lambda sonda sa grejačem “Bosch” tip LS 07
 Fig. 1. Universal lambda probe with heater “Bosch” type LS 07

Za materijal u radu odabrane su prizmatične bale pšenične i sojine slame koje su prikupljene na zemljištu poljoprivrednog kombinata “Mitrosrem”, radne jedinice Kuzmin. Prikupljanje bala slame obavljeno je neposredno posle žetve. Slama je balirana presom za baliranje, dok je skladištenje balirane slame obavljeno u kamare u okviru ekonomskih dvorišta navedene radne jedinice. 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 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 slame bio je u proseku 0,35 m x 0,5 m, dok je dužina bala iznosila oko 0,75 m. Sabijenost bala slame bila je ujednačena, dok je masa jedne bale iznosila oko 8,5

kg. U radu su prikazani različiti režimi rada kotla (varirana je količina vazduha koji je dovođen u kotao). Posmatran je uticaj pet režima rada kotla (150, 220, 290, 360 i 430 m³/h) na sam proces sagorevanja jer količina vazduha koja se dovodi u ložište kotla u procesu sagorevanja utiče na efikasnost rada kotlovskih postrojenja, koja kao gorivo koriste biomasu. Neposredni cilj ovog istraživanja jeste definisanje korelacionih jednačina koje će predstavljati matematički model zavisnosti toplotne snage i energetske efikasnosti kotla od vremena sagorevanja bale, kao i da se prikažu promena mase u vremenu i vrednosti koeficijenta viška vazduha tokom sagorevanja bala. Metode merenja su u skladu sa standardom JUS M.E2.203 i DIN 4702 kod definisanja toplotne snage kotla.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

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 eksperiment je ponovljen tri puta. U radu su prikazani matematički modeli dobijeni pomoću srednjih vrednosti izmerenih parametara sagorevanja (toplotna snaga i energetska efikasnost kotla), pri svakom režimu (tabela 1).

Tab. 1. Merene vrednosti pri sagorevanju bale pšenične (W) i sojine (S) slame

Tab. 1. Wheat (W) and straw (S) bale combustion process results

Režim rada kotla Boiler operating regime		\dot{v} , m ³ /h				
		150	220	290	360	430
Ukupno vreme sagorevanja bale Total bale incineration time, s	τ_{kr} W	1175	1055	947	650	587
	S	900	713	670	453	400
Toplotna snaga kotla Boiler thermal power, kW	P W	64,16	63,47	71,75	88,21	90,90
	S	75,66	92,24	113,12	96,63	112,94
Energetska efikasnost kotla Boiler energy efficiency rate, %	η W	62,98	57,94	60,00	39,45	36,57
	S	71,97	40,33	41,91	27,17	27,66

Toplotna snaga kotla pri sagorevanju bala pšenične i sojine slame

Na osnovu eksperimentalnih podataka datih u doktorskoj tezi Igić (2008), testiran je sledeći matematički model (Dedović et al, 2008, Dedović et al, 2009). Korišćenjem nelinearne regresione analize (Bates i Watts, 1988, Strasser, 1985)

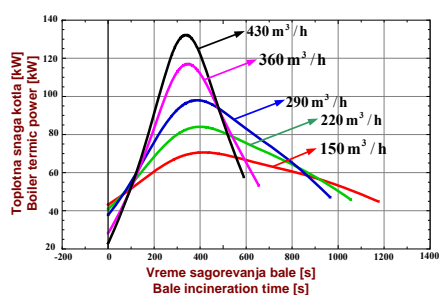
$$P(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}) = b_1 + b_2 \cdot \dot{v} \cdot \text{Exp} \left(- \left(b_3 \cdot \frac{(\tau - b_4)}{\tau_{kr}} \right)^2 \right) + b_5 \cdot \dot{v} \cdot \text{Sin} \left(b_6 \cdot \frac{(\tau - b_7)}{\tau_{kr}} \right), \quad (1)$$

ocenjeni su (tabela 2) regresioni parametri b_1, b_2, \dots, b_7 iz modela (1), gde je τ - vreme sagorevanja bale, P - toplotna snaga kotla, \dot{v} - protok vazduha, τ_{kr} - ukupno vreme sagorevanja bale. Na osnovu tabele 1 (koristeći podatke o ukupnom vremenu sagorevanja bale τ_{kr} i o protoku vazduha \dot{v}) i tabele 2 (koristeći ocene parametara za obe vrste bale), grafici funkcija predstavljenih modelom (1) dati su na slikama 2 i 3 i to za bale pšenične i sojine slame, redom. Grafici su obrađeni u paketu Mathematica (Wolfram, 1991).

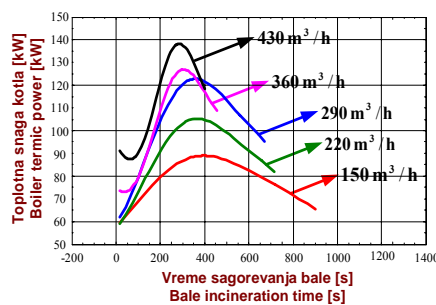
Tab. 2. Ocene parametara modela (1)

Tab. 2. Parameter estimation of mathematical model (1)

Regresioni koeficijenti Regression coefficients	Bale pšenične slame Wheat straw bale, R2=90.40%	Bale sojine slame Soya straw bale, R2=93.58%
b1	44,328	44,751
b2	0,0876	0,339
b3	4,2476	-2,307
b4	330,85	264,841
b5	0,1176	0,127
b6	3,3293	3,718
b7	77,749	411,031



Sl. 2. Zavisnost toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale, pšenična slama
Fig. 2. Correlation between boiler thermal power and bale incineration time, wheat straw



Sl. 3. Zavisnost toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale, sojina slama
Fig. 3. Correlation between boiler thermal power and bale incineration time, soya straw

Zaključujemo da porastom količine protoka vazduha kroz ložište kotla smanjuje se vreme sagorevanja bale i povećava toplotna snaga kotla. Takođe, može se primetiti da su bale pšenične slame duže gorele u odnosu na bale sojine slame, kao i da je sa balama sojine slame postignuta veća toplotna snaga kotla. Pošto je jedan od ciljeva rada da se odredi vrednost koeficijenta viška vazduha pri maksimalnoj snazi, potrebno je utvrditi u kojem vremenu τ se dostiže maksimum funkcija prikazanih na slikama 2 i 3. U tu svrhu mora se naći prvi izvod po vremenu τ funkcije date u (1). Pošto je

$$P_{\tau}'(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}) = \frac{\dot{v}}{\tau_{kr}^2} \cdot \left(2 \cdot b_2 \cdot b_3^2 (b_4 - \tau) \text{Exp} \left(-\frac{b_3^2 (\tau - b_4)^2}{\tau_{kr}^2} \right) + b_5 \cdot b_6 \cdot \tau_{kr} \cdot \text{Sin} \left(\frac{b_6 (\tau - b_7)}{\tau_{kr}} \right) \right), \quad (2)$$

numeričkim rešavanjem jednačine $P_{\tau}'(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}) = 0$ po τ , dobija se za koje je vreme τ dostignut maksimum toplotne snage, za svaki režim rada kotla, ako su se kao gorivo

koristile bale pšenične, odnosno, sojine slame (tabela 4). U tabeli 4 dati su i podaci o energetskej efikasnosti pri maksimalnoj toplotnoj snazi kotla.

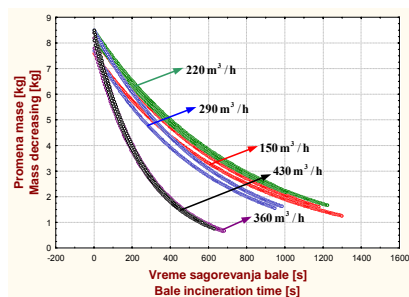
Energetska efikasnost kotla pri sagorevanju bala pšenične i sojine slame
Stepen energetske efikasnosti kotla dobija se pomoću formule

$$\eta(\tau) = \frac{P \cdot c_p \cdot (t_{iv} - t_{iv})}{(m_0 - m(\tau)) \cdot h_d}, \quad (3)$$

gde je $\eta(\tau)$ - stepen korisnosti kotla u vremenu τ , m_0 - početna masa bale, $m(\tau)$ - masa bale u vremenu τ , h_d - toplotna moć goriva, c_p - specifična toplota, a t_{iv} i t_{iv} - temperature vode pre i nakon zagrevanja, redom (Igić, 2008). Problem je izračunati masu bale u određenom vremenu, ali, pod pretpostavkom da je procentualno smanjenje mase bale jednako procentualnom smanjenju CO_2 u produktima sagorevanja, može se rešiti postavljeni problem. Navedena pretpostavka proistekla je iz očekivane eksponencijalne zavisnosti mase bale od vremenu sagorevanja, koja je uočena na eksperimentalnim krivama promene CO_2 u funkciji od vremena. Vrednosti za CO_2 u vremenu τ očitavane su sa mernih uređaja (Igić, 2008). Takođe, očekivanu eksponencijalnu zavisnost promene mase u jedinici vremena potvrđuju i navodi Janića (2000). Zbog toga, prvo se mora odrediti kako se menja masa bale tokom njenog sagorevanja. Dakle, da bi se moglo pristupiti izračunavanju stepena energetske efikasnosti kotlovskog postrojenja, koji je računat prema obrascu (3), gde su u odnos stavljeni raspoloživa toplotna snaga kotlovskog postrojenja i uložena toplotna snaga u datom vremenu, morao se naći način određivanja kinetike sagorevanja balirane slame, tj. gubitka mase bale u vremenu prilikom njenog sagorevanja. Pošto se taj podatak nije mogao izmeriti u realnom kotlovskom postrojenju na kojem su rađeni eksperimenti, gubitak mase bale tokom vremena računat je na osnovu promene procentualnog zapreminskog udela ugljen-dioksida u produktima sagorevanja (za detaljno objašnjenje videti disertaciju Igić (2008)). Matematički modeli, na osnovu kojeg su formirani dijagrami na slikama 4 i 5, prikazani su formulama (4) za bale pšenične i (5) za bale sojine slame. Na navedenim slikama može se uočiti da je brzina smanjenja mase sagorevanih bala u direktnoj vezi sa zapreminskim protokom vazduha za sagorevanje, tj. povećanjem količine vazduha za sagorevanje, smanjenje mase bale je intenzivnije.

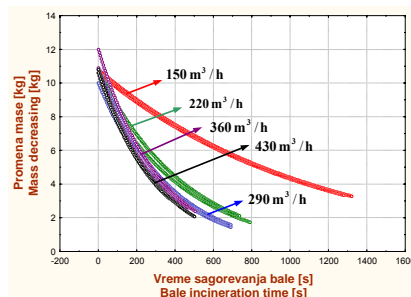
$$\begin{aligned} \Delta m(\tau, 150, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00138 \cdot \tau) \\ \Delta m(\tau, 220, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00132 \cdot \tau) \\ \Delta m(\tau, 290, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00153 \cdot \tau) \\ \Delta m(\tau, 360, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00365 \cdot \tau) \\ \Delta m(\tau, 430, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00378 \cdot \tau) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta m(\tau, 150, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,0009 \cdot \tau) \\ \Delta m(\tau, 220, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,002209 \cdot \tau) \\ \Delta m(\tau, 290, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00280 \cdot \tau) \\ \Delta m(\tau, 360, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00319 \cdot \tau) \\ \Delta m(\tau, 430, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00385 \cdot \tau) \end{aligned} \quad (5)$$



Sl. 4. Promena mase bale pšenične slame u zavisnosti od vremena sagorevanja

Fig. 4. Mass decrease during combustion, wheat straw



Sl. 5. Promena mase bale sojine slame u zavisnosti od vremena sagorevanja

Fig. 5. Mass decrease during combustion, soya straw

Sada, na osnovu eksperimentalnih podataka o energetskej efikasnosti kotla datih u disertaciji Igić (2008), testiran je sledeći matematički model, ako su za gorivo korišćene bale pšenične slame:

$$\eta(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}, \Delta m) = \frac{b8 \cdot \tau \cdot \left(b9 + 0.0876 \cdot \dot{v} \cdot \text{Exp} \left(- \left(4.2476 \cdot \frac{(\tau - 330.85)}{\tau_{kr}} \right)^2 \right) + 0.1176 \cdot \dot{v} \cdot \text{Sin} \left(3.3293 \cdot \frac{(\tau - 77.749)}{\tau_{kr}} \right) \right)}{\Delta m(\tau, \dot{v}, m_0)}. \quad (6)$$

Promena mase u imeniocu formule (6) računa se korišćenjem (4). U slučaju kada su sagorevane bale sojine slame, energetska efikasnost kotla modeluje se kao što sledi:

$$\eta(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}, \Delta m) = \frac{b8 \cdot \tau \cdot \left(b9 + 0.3392 \cdot \dot{v} \cdot \text{Exp} \left(- \left(2.3071 \cdot \frac{(\tau - 264.877)}{\tau_{kr}} \right)^2 \right) + 0.1272 \cdot \dot{v} \cdot \text{Sin} \left(3.7168 \cdot \frac{(\tau - 411.12)}{\tau_{kr}} \right) \right)}{\Delta m(\tau, \dot{v}, m_0)}. \quad (7)$$

Sada se promena mase u imeniocu formule (7) računa korišćenjem (5). U formulama (6) i (7), τ – predstavlja vreme sagoravanja bale, \dot{v} - protok vazduha, τ_{kr} - ukupno vreme sagorevanja bale, m_0 - masa bale, Δm – promena mase bale u vremenu. Ocene regresionih parametara $b8$ i $b9$ date su u tabeli 3.

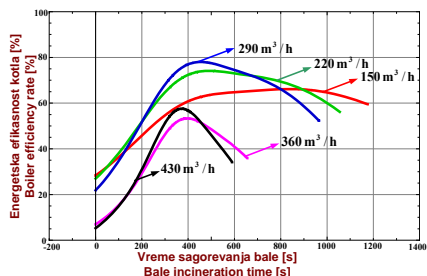
Tab. 3. Ocene parametara modela (6) i (7)

Tab. 3. Parameter estimation of mathematical models (6) and (7)

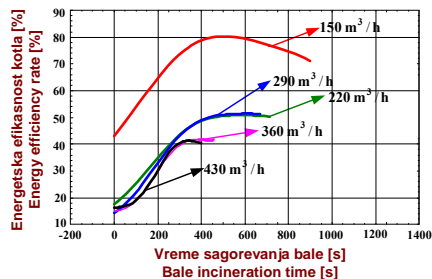
Red. koefic., Red. coef.	Bale pšen. slame, model (6) Wheat straw bale, model (6), R2=89.84%	Bale sojine slame, model (7) Soya straw bale, model (7), R2=98.46%
b1	0,00649	0,00713
b2	12,76336	45,33445

Matematički modeli (6) i (7) predstavljeni su na slikama 6 i 7. Uočljivo je da je veća energetska efikasnost kotla ako se kao gorivo koriste bale pšenične slame. Povećanjem

protoka vazduha (sa 150 na 290 m³/h), povećavala se i energetska efikasnost kotla u slučaju sagorevanja bala pšenične slame. Kada su sagorevane bale sojine slame, povećanjem protoka vazduha, došlo je do opadanja energetske efikasnosti kotla.



Sl. 6. Zavisnost energetske efikasnosti kotla od vremena sagorevanja bale pšenične slame
Fig. 6. Correlation between boiler energy effc. rate and wheat straw bale incineration time



Sl. 7. Zavisnost energetske efikasnosti kotla od vremena sagorevanja bale sojine slame
Fig. 7. Correlation between boiler energy effc. rate and soya straw bale incineration time

Tab. 4. Maksimalna toplotna snaga i energetska efikasnost kotla, W=pšenica, S=soja
Tab. 4. Maximal thermal power and boiler energy efficiency rate, W=wheat, S=soya

Režim rada kotla Boiler operating regime	\dot{v} , m ³ /h						
		150	220	290	360	430	
Vreme dostizanja maksimalne toplotne snage i energetske efikasnost kotla	W	τ [s]	416	400	388	346	338
		Pmax [kW]	70,62	84,05	97,97	116,96	132,19
		η [%]	57,39	72,36	76,37	51,44	56,09
Time of reaching the maximal thetmal power and boiler energy effciency rate,	S	τ [s]	397	366	358	305	286
		Pmax [kW]	89,01	105,33	122,79	127,01	138,25
		η [%]	78,66	47,35	47,06	39,94	39,75

Sada je potrebno utvrditi u kojem vremenu τ se dostiže maksimum funkcija prikazanih na slikama 6 i 7. U tu svrhu mora se naći prvi izvod po vremenu τ funkcija datih u (6) i (7). Rešavanjem jednačine $\eta'_{\tau}(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}, \Delta m) = 0$ po τ za oba tipa slame, dobija se za koje je vreme τ dostignut maksimum energetske efikasnosti, za svaki režim rada kotla (tabela 5). U tabeli 5, takođe su dati i podaci o toplotnoj snazi, pri maksimalnoj energetskej efikasnosti.

Tab. 5. Maksimalna energetska efikasnost i toplotna snaga kotla, W=pšenica, S=soja,
 Tab. 5. Maximal boiler energy efficiency rate and thermal power, W=wheat, S=soya

Režim rada kotla Boiler operating regime		\dot{v} , m ³ /h					
		150	220	290	360	430	
Vreme dostizanja maksimalne energetske efikasnosti i toplotna snaga kotla	W	τ [s]	840	490	454	396	372
		η_{\max} [%]	66,14	74,10	77,99	53,30	57,53
		P [kW]	59,32	81,59	95,63	112,56	128,84
Time of reaching the maximal boiler energy efficiency rate and thermal power	S	τ [s]	503	585	612	383	339
		η_{\max} [%]	80,28	50,78	51,37	41,67	41,29
		P [kW]	86,89	92,39	101,39	119,67	132,21

Koeficijent viška vazduha

Koeficijent viška vazduha λ očitava se sa mernog uređaja. Takođe, vrednost koeficijenta viška vazduha izračunava se po formuli (8) (Bogner, 1992), kao i iz korisničkog uputstva analizatora dimnih gasova TESTO 350 M/XL, TESTO 454.

$$\lambda = \frac{20,94}{20,94 - O_2}, \quad (8)$$

gde je O_2 procentualni udeo kiseonika u produktima sagorevanja. Vrednosti koeficijenta viška vazduha očitavane su periodično (Igić, 2008). Na osnovu izmerenih veličina dobijena je kriva koja definiše zavisnost koeficijenta viška vazduha u funkciji od vremena. Dobijena funkcionalna zavisnost je oblika:

$$\lambda(\tau) = b_1 \cdot \text{Exp}(b_2 \cdot \tau), \quad (9)$$

gde su b_1 i b_2 koeficijenti koji se ocenjuju regresionom analizom (tabele 6 i 7).

Tab. 6. Ocene regresionih parametara modela (9), pri sagorevanju bala pšenične slame

Tab. 6. Regression parameters estimat. during the wheat straw bale combustion, model (9)

Režim rada kotla Boiler operating regime		150 m ³ /h	220 m ³ /h	290 m ³ /h	360 m ³ /h	430 m ³ /h
Regresioni parametri Regression parameters	b1	0,921292	1,637330	1,194850	0,668294	1,362902
	b2	0,001753	0,001081	0,001936	0,004329	0,003743
Koeficijent determinacije Coefficient of determination	R2[%]	85,03	89,11	86,70	88,88	76,01

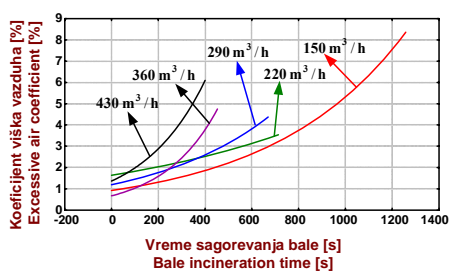
Na slikama 8 i 9, predstavljene su funkcije dobijene pomoću modela (9) i ocena regresionih parametara iz tabela 7 i 8 i to u slučaju kada su za sagorevanje korišćene bale pšenične, odnosno sojine slame, redom. Sa slike 8 uočava se da pri sagorevanju bala pšenične slame, koeficijent viška vazduha se nalazio u intervalu od oko 0,4 do 8,5.

Tab. 7. Ocene regresionih parametara modela (9), pri sagorevanju bala sojine slame

Tab. 7. Regression parameters estimation during the soya straw bale combustion, model (9)

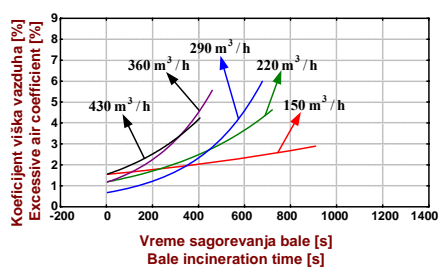
Režim rada kotla Boiler operating regime		150 m ³ /h	220 m ³ /h	290 m ³ /h	360 m ³ /h	430 m ³ /h
Regresioni parametri Regression parameters	b1	1,492098	1,112260	0,568632	1,098155	1,501304
	b2	0,000748	0,002042	0,003570	0,003656	0,002658
Koeficijent determinacije Coefficient of determination	R2[%]	85,03	89,11	86,70	88,88	76,01

Najsporiji rast je bio pri režimu rada kotla 150 m³/h, a najbrži pri režimu 430 m³/h. U režimima 220, 290 i 360 m³/h, koeficijent viška vazduha nije prešao vrednost 5. Pri sagorevanju bala sojine slame (slika 9), koeficijent viška vazduha kretao se od 0,4 do 6,3. Najbrži rast je ovaj put u režimu 360 m³/h. Konačno, u tabeli 8, date su vrednosti koeficijenta viška vazduha pri maksimalnoj toplotnoj snazi i pri maksimalnoj energetskej efikasnosti kotla. Zaključuje se da se koeficijent viška vazduha kretao u povoljnim granicama pri sagorevanju bala slame.



Sl. 8. Zavisnost koeficijenta viška vazduha od vremena sagorevanja bale pšenične slame

Fig. 8. Correlation between excess air coefficient and wheat straw bale incineration time



Sl. 9. Zavisnost koeficijenta viška vazduha od vremena sagorevanja bale sojine slame

Fig. 9. Correlation between excess air coefficient and soya straw bale incineration time

Tab. 8. Vrednosti koeficijenta viška vazduha pri maksimalnoj toplotnoj snazi kotla i pri maksimalnoj energetskejskoj efikasnosti

Tab. 8. Excess air coefficients values at maximal boiler thermal power and maximal energy efficiency rate

Režim rada kotla Boiler operating regime		150 m ³ /h	220 m ³ /h	290 m ³ /h	360 m ³ /h	430 m ³ /h
Vrednosti za λ pri maksimalnoj toplotnoj snazi kotla, W=pšenica, S=soja Values for λ at maximal boiler thermal power, W=wheat, S=soya	W	1,910	2,523	2,532	2,989	4,830
	S	2,008	2,348	2,041	3,349	3,211
Vrednosti za λ pri maksimalnoj energ. efikas. kotla, W=pšenica, S=soja Values for λ at maximal boiler energy effic. rate, W=wheat, S=soya	W	4,017	2,781	2,878	3,711	5,485
	S	2,174	3,673	5,055	4,454	3,697

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize rezultata ispitivanja kotla, pri sagorevanju bala pšenične i sojine slame, zaključak je da porastom protoka vazduha kroz ložište kotla raste snaga kotla i skraćuje se vreme sagorevanja bala slame. Pri sagorevanju bala pšenične slame, porastom protoka vazduha raste i stepen energetske efikasnosti kotla, ali samo kod prva tri protoka vazduha (150, 220 i 290 m³/h), dok kod četvrtog i petog (360 i 430 m³/h) efikasnost je manja nego u prethodnim protocima vazduha. Pri sagorevanju bala sojine slame, energetska efikasnost kotla se smanjivala kako se povećavao protok svežeg vazduha kroz ložište kotla. Najveće energetske efikasnosti dobijene u režimu 290 m³/h kod sagorevanja bala pšenične slame, dok u slučaju sagorevanja bala sojine slame, režim 150 m³/h dao je najveću energetske efikasnost kotla. Kod svih režima sagorevanja bala pšenične i sojine slame, opadanje mase bale obavlja se u zavisnosti od veličine protoka vazduha kroz ložište kotla: manji protok vazduha sporije opadanje mase i obrnuto, veći protok vazduha brže opadanje mase bale. Povećanjem protoka fluida, koeficijent viška vazduha raste. Vrednosti koeficijenta viška vazduha iznose od 0,4 do 8,4 (kod sagorevanja bala pšenične slame), odnosno od 0,4 do 6,3 (kod sagorevanja bala sojine slame) u toku celokupnog procesa sagorevanja.

LITERATURA

- [1] Alimpić M. (1983). Energija iz poljoprivrede. Savremena poljoprivredna tehnika 9(1-2): 1-7.
- [2] Babić M, Babić Ljiljana, Matić-Kekić Snežana, Pavkov I, Karadžić B. (2005). Održivi energetskejski model proizvodnje sušenog voća kombinovanom tehnologijom. Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi- PTEP 9: 109-118.
- [3] Bates D.M, Watts D.G. (1988). Nonlinear Regression Analysis and Its Applicat. New York: Wiley.
- [4] Brkić Ljiljana, Živanović T. (2006). Termički proračun parnih kotlova. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.

- [5] Brkić M, Janić T. (1998). Mogućnosti korišćenja biomase u poljoprivredi. In Proc. Briketiranje i peletiranje biomase iz poljopriv. i šumarstva, 5-9. Sombor, 12-15 maja.
- [6] Bogner M. (1992). Termotehničar 1. Beograd: poslovna politika.
- [7] Dedović N, Igić S, Janić T. (2008). Uticaj recirkulacije vazduha na energetske 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. of the 3rd E.C. Conf. 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] Janić T. (2000). Kinetika sagorevanja balirane pšenične slame. Ph.D. dis., Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [13] Janić T, Brkić M, Erdeljan Z. (1998). Sagorevanje balirane biomase. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku 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 poljopriv. 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] Matić-Kekić Snežana. (2006). Optimalan ugao solarnog kolektora u odnosu na vertikalu. *Letopis naučnih radova Poljoprivrednog fakulteta* 30(1): 161-168.
- [18] Matić-Kekić Snežana. (2008). Određivanje zapremine krošnji piramidalnog, kupa-stog, elipsoidnog i sfernog oblika u prirodi, *Letopis radova Polj. fakulteta* 32: 17-34.
- [19] Oka S. (1998). Korišćenje otpadne čvrste biomase u energetske svrhe. *Energetika, ekonomije, ekologija* 3(2): 61-66.
- [20] 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".

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. Wheat and soya straw bales were used as fuel. The impact of the quantity of inlet air (150, 220, 290, 360 and 430 m³/h) fed to the boiler firebox was continuously monitored. We examined correlation between boiler thermal power, energy efficiency rate and bale incineration time, as well as the mass decrease during the bale incineration and we proposed the corresponding mathematical models. In the case of no combustion products recirculation, average boiler thermal power rate ranges from 63.47 to

90.90 kW for wheat straw (from 75.66 to 113.12 kW for soya straw). Maximum boiler thermal power is 130.94 kW for wheat straw (141.56 kW for soya straw). The increase of air throughput in the firebox, increases the thermal capacity of the boiler, while the bale incineration time is reduced. Total incineration time ranges between 587 and 1,175 for wheat straw (from 400 to 900 s for soya straw). The boiler thermal power is greater if one uses soya straw bales as a fuel. The excess air rate values are given for maximum boiler thermal power and maximum boiler energy efficiency rate. Excess air rate values are between 0.4 and 8.4 (for wheat straw bale combustion), and from 0.4 to 6.3 (for soya straw bale combustion).

Key words: straw, boiler thermal power, boiler efficiency rate, excess air rate, mathematical models

Primljeno: 24.9.2010.

Prihvaćeno: 6.10.2010.