

**ODREĐIVANJE MATEMATIČKIH MODELA PRI RECIRKULACIJI
PRODUKATA SAGOREVANJA BALA PŠENIČNE SLAME
DEFINING MATHEMATICAL MODELS
OF BIOMASS COMBUSTION PRODUCTS RECIRCULATION**

Nebojša Dedović¹, Snežana Matić-Kekić¹, Todor Janić¹, Saša Igić²

¹ Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 8

² Grad Novi Sad

E-mail: dedovicn@polj.uns.ac.rs

SAŽETAK

U ovom radu dati su 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 slame. Obezbeđeno je kontinuirano praćenje uticaja količine vazduha, koji se dovodi u ložište kotlovske postrojenja, na karakteristike sagorevanja bala. Ispitivano je kako se menjaju termička snaga i stepen iskorišćenja kotla tokom sagorevanja bala. Takođe je praćena i promena mase bale pri sagorevanju i to kada nema recirkulacije produkata sagorevanja u ložište kotla i kada je 16,5 % vazduha koji se nalazi u ložištu kotla već zagrejani vazduh nastao od produkata sagorevanja. 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 promene toplotne snage kotla, stepena iskorišćenja kotla i promene mase u toku sagorevanja bala. Matematički modeli za sve ispitivane veličine, dobijeni su primenom nelinearne regresione analize. Termička snaga kotla povećavala se pri povećanju protoka vazduha kroz ložište kotla, dok se vreme kada je bala sasvim izgorela, smanjivalo. Izračunate su vrednosti koeficijenta viška vazduha pri maksimalnoj termičkoj snazi i maksimalnom stepenu iskorišćenja kotla. Predstavljena je i promena koeficijenta viška vazduha u toku sagorevanja bale i to u slučaju kada nema recirkulacije produkata sagorevanja i kada je recirkulacija 16,5 %. Vreme sagorevanja bala (vreme kada je bala potpuno sagorela) bilo je veće kada se koristi recirkulacija produkata sagorevanja u ložište kotla od 16,5 %.

Ključne reči: bale pšenične slame, termička snaga kotla, stepen iskorišćenja kotla, koeficijent viška vazduha, recirkulacija, matematički modeli

1. UVOD

Kako cena fosilnih goriva raste bar istim tempom kojim se rezerve navedenih goriva smanjuju, time raste i potreba za korišćenjem obnovljivih izvora energije (u koje ubrajamo biomasu, biogas, energiju vetra, energiju Sunca, hidroenergiju i geotermalnu energiju). 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, uglj) i električna energija. Relevantna istraživanja u svetu ističu da su fosilna goriva na izmaku, pa se može zaključiti da će se desiti energetska kriza globalnih razmera (Janić et al, 1998, Wayne i Turner, 1997). U svrhu smanjenja zagađenja životne sredine i stvaranja efekta staklene bašte, važno je uskladiti korišćenje obnovljivih izvora energije u našoj zemlji sa smernicama Evropske unije. Za sveobuhvatno sagledavanje tehnoeonomskih odrednica korišćenja 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). Bez značajnijih posledica u pogledu narušavanja strukture zemljišta, oko jedna četvrtina proizvedene biomase može da se koristi u energetske svrhe (Šefčić, 1991, Brkić i Janić, 1998, Janić et al, 2008, Janić et al, 2009). To bi značilo 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 bi se zadovoljila potreba velikog dela energije, koja se troši u oblastima poljoprivredne proizvodnje (Ostojić et al, 2003). Za sagorevanje pšenične slame i biogoriva uopšte, uglavnom se koriste kotlovi i ložišta sa ravnom nepokretnom rešetkom (Oka, 1998, Pešenjanski i Stepanov, 2005). Stepenn iskorišćenja 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 iskorišćenja manjih kotlovskih postrojenja po pravilu je manji za oko 3 % od stepena iskorišćenja većih kotlovskih postrojenja.

Pri definisanju procesa sagorevanja, najpouzdaniji rezultati dobijaju se eksperimentalnim putem, tako što se na osnovu izmerenih veličina postavljaju matematički modeli (Jones et al, 2000). Termička snaga kotla koji je posmatran u radu, određena je direktnom metodom (Brkić i Živanović, 2006), odnosno merenjem zapreminskog protoka vode i temperature vode na ulazu i izlazu iz kotla. Stepenn iskorišćenja kotla određen je odnosom između dobijene i uložene toplotne snage kotla. Sa druge strane, količina dovedenog vazduha u ložište kotla, tokom sagorevanja, je 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. Pored toga, može se postaviti i pitanje da li je bolje da se u kotao ubacuje samo svež vazduh ili da izvestan procenat vazduha ipak bude zagrejan, što se može postići tako što se produkti sagorevanja vraćaju nazad u ložište kotla.

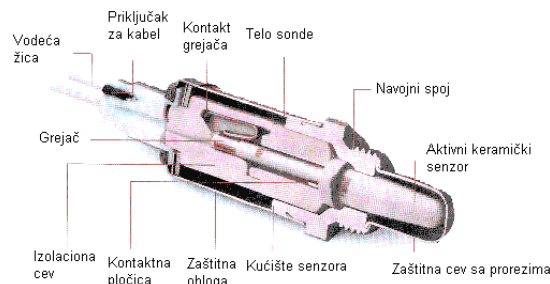
Ali, pre toga, potrebno je navesti kolika je termička snaga, stepenn iskorišćenja kotla i kakva je promena mase tokom sagorevanja da bi se imala kompletnija slika samog procesa sagorevanja. Detaljan pregled merenja (oznake merenja, dimenzije bala, nazivi instrumenata, opseg merenja) dat je u radu Dedović et al (2008).

Cilj istraživanja je da se formiraju matematički modeli promene toplotne snage kotla, stepena iskorišćenja kotla i promene mase tokom sagorevanja bala. Matematički modeli za sve ispitivane veličine, dobijeni su primenom nelinearne regresione analize.

2. MATERIJAL I METOD

Opisano kotlovsko postrojenje za sagorevanje bala pšenične slame, locirano je na poljoprivrednom kombinatu "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radna jedinica Kuzmin. 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 radiator. 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.

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 kontinuirano 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 350 °C. 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 (350 °C), 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 350 °C 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 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 dovoden 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 stepen iskorišćenja kotlovskih postrojenja, koja kao gorivo koriste biomasu. Takođe je posmatrano kako na proces sagorevanja utiče recirkulacija produkata sagorevanja od 16,5 %. Preciznije, sastav vazduha koji se dovodi u kotao je: 100 % svež vazduh (bez recirkulacije) ili 83,5 % svež vazduh i 16,5 % zagrejani vazduh od produkata sagorevanja (16,5 % recirkulacija). Metode merenja su u skladu sa standardom SRPS EN 303-5:2007 i DIN 4702 kod definisanja toplotne snage kotla.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Istraživanja su obavljena tokom marta i aprila meseca 2006. godine. Merene veličine su automatski beležene u kontroleru svakih 5 sekundi, pa je time obezbeđeno kontinuirano praćenje procesa sagorevanja. U svakom režimu eksperiment je ponovljen tri puta. Prikazani matematički modeli dobijeni su pomoću srednjih vrednosti izmerenih parametara sagorevanja (termička snaga i stepen iskorišćenja kotla), pri svakom režimu rada kotla (tabela 1).

Tab. 1. Merene vrednost pri sagorevanju bale slame

Tab. 1. Straw bale combustion process results

| Režim rada kotla-Boiler operating regime | | Recirc. | \dot{V} , m ³ /h | | | | |
|--|-------------|---------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 150 | 220 | 290 | 360 | 430 |
| Prosečno vreme sagorevanja bale-Total bale combustion time (s) | τ_{kr} | 0 % | 1175 | 1055 | 947 | 650 | 587 |
| | | 16,5 % | 1485 | 1427 | 1312 | 772 | 698 |
| Prosečna termička snaga kotla-Average boiler thermal power (s) | P | 0 % | 64,16 | 63,47 | 71,75 | 88,21 | 90,90 |
| | | 16,5 % | 43,00 | 57,86 | 57,88 | 81,44 | 88,12 |
| Prosečni stepen iskorišćenja kotla-Average boiler energy effic. Rate (%) | η | 0 % | 62,98 | 57,94 | 60,00 | 39,45 | 36,57 |
| | | 16,5 % | 57,29 | 66,08 | 52,83 | 45,50 | 40,60 |

Termička snaga kotla pri sagorevanju bala slame

Na osnovu eksperimentalnih podataka datih u doktorskoj tezi Igić (2008), testiran je sledeći matematički model (Dedović et al, 2008, Dedović et al, 2009, Dedović et al, 2010). Korišćenjem nelinearne regresione analize (Bates i Watts, 1988, Strasser, 1985)

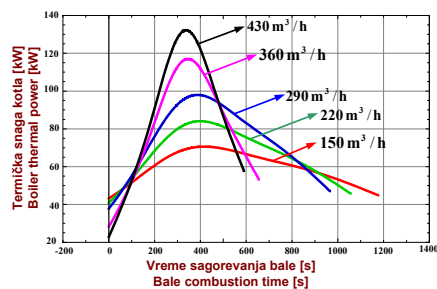
$$P(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}) = b1 + b2 \cdot \dot{v} \cdot \text{Exp} \left(- \left(b3 \cdot \frac{(\tau - b4)}{\tau_{kr}} \right)^2 \right) + b5 \cdot \dot{v} \cdot \text{Sin} \left(b6 \cdot \frac{(\tau - b7)}{\tau_{kr}} \right), \quad (1)$$

ocenjeni su (tabela 2) regresioni parametri b1,b2,...,b7 iz modela (1), gde je τ - vreme sagorevanja bala, P - termička snaga kotla, \dot{v} - protok vazduha, τ_{kr} - vreme kada je bala sagorela. Na osnovu tabele 1 (koristeći podatke o τ_{kr} i \dot{v}) i tabele 2 (koristeći ocene parametara za obe vrste recirkulacije), grafici funkcija predstavljenih modelom (1) dati su na slikama 2 i 3 i to pri recirkulaciji produkata sagorevanja od 0 % i 16,5 %, redom. Grafici su obrađeni u paketu Mathematica (Wolfram, 1991), koji je uspešno korišten i u radovima (Dedović et al, 2003, Matić-Kekić i Mudrinski, 2004. i 2009, Matić-Kekić et al, 2007. i 2008, Babić et al, 2011).

Tab. 2. Ocene parametara modela (1)

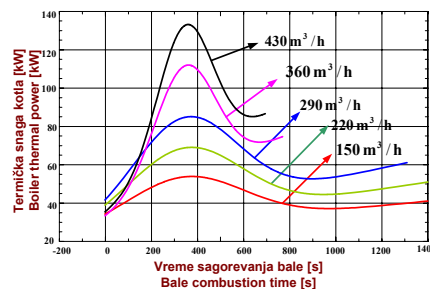
Tab. 2. Parameter estimation of mathematical model (1)

| Regresioni koeficijenti Regression coefficients | Bez recirkulacije, $R^2=90,40\%$ No recirculation, $R^2=90.40\%$ | Recirkulacija 16,5 %, $R^2=82,08\%$ Recirculation 16.5 %, $R^2=82.08\%$ |
|--|---|--|
| b1 | 44,328 | 21,251 |
| b2 | 0,0876 | 0,1710 |
| b3 | 4,2476 | 4,1110 |
| b4 | 330,85 | 345,89 |
| b5 | 0,1176 | 3,0910 |
| b6 | 3,3293 | 0,0390 |
| b7 | 77,749 | -165,18 |



Sl. 2. Promena toplotne snage kotla tokom sagorevanja bala pšenične slame, bez recirkulacije

Fig. 2. Correlation between boiler thermal power and wheat straw bale combustion time, no recirc.



Sl. 3. Promena toplotne snage kotla tokom sagorevanja bala pšenične slame, recirkul. 16,5 %

Fig. 3. Correlation between boiler thermal power and wheat straw bale inciner. time, recir. 16.5 %

Možemo zaključiti da se sa porastom količine protoka vazduha kroz ložište kotla smanjuje vreme sagorevanja bala i povećava termička snaga kotla. Takođe, primećujemo da se u svakom režimu rada kotla povećalo vreme kada je bala potpuno sagorela ako se

koristila recirkulacija produkata sagorevanja u ložište kotla 16,5 % (slika 3). Maksimalna termička snaga kotla je veća kad nema recirkulacije, osim u režimu 430 m³/h. 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 maksimumi funkcija prikazanih na slikama 2 i 3. U tu svrhu mora se naći prvi izvod po vremenu τ funkcije date u (1). Pošto je

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

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 i to bez recirkulacije i kada je recirkulacija produkata sagorevanja 16,5 % (tabela 4). U tabeli 4 dati su i podaci o stepenu iskorišćenja kotla pri maksimalnoj termičkoj snazi kotla.

Stepen iskorišćenja kotla tokom sagorevanja bala slame

Stepen iskorišćenja kotla dobija se pomoću formule

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

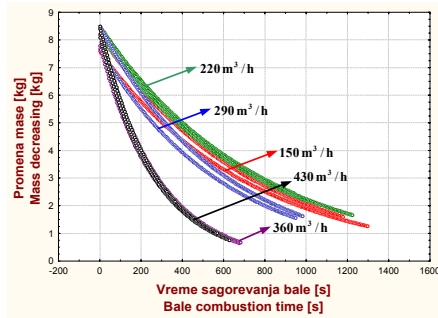
gde je $\eta(\tau)$ - stepen iskorišćenja kotla u vremenu τ , m_0 - početna masa bale, $m(\tau)$ - masa bale u vremenu τ , h_d - donja toplotna moć goriva, c_p - specifična toplota vode, a t_{uv} i t_{iv} - temperature vode pre i nakon zagrevanja, redom (Igić, 2008). Problem je izračunati masu bale u određenom vremenu. Pod pretpostavkom da je procentualno smanjenje mase bale jednako procentualnom smanjenju CO₂ u produktima sagorevanja, može se rešiti postavljeni problem. Navedena pretpostavka proistekla je iz eksponencijalne zavisnosti mase bale od vremena sagorevanja, koja je uočena na eksperimentalnim krivama promene CO₂ u funkciji od vremena. Vrednosti za CO₂ u vremenu τ očitavane su sa mernih uređaja (Igić, 2008). Očekivanu eksponencijalnu zavisnost promene mase u jedinici vremena potvrđuju i navodi Janića (2000).

Prvo se mora odrediti kako se menja masa bale tokom njenog sagorevanja. Dakle, da bi se moglo pristupiti izračunavanju stepena iskorišćenja kotlovskeg postrojenja, koji je računat prema obrascu (3), gde su u odnos stavljeni raspoloživa termička snaga kotlovskeg postrojenja i uložena termička 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 kotlovskeg 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 detaljnije objašnjenje videti disertaciju Igić (2008)). Matematički modeli dati u (4) daju podatak kolika je masa bale sagorela u vremenu τ . Na slikama 4 i 5, prikazana je promena mase bale (gubitak mase bale tokom sagorevanja) ako nema recirkulacije i (5) ako je recirkulacija 16,5 %.

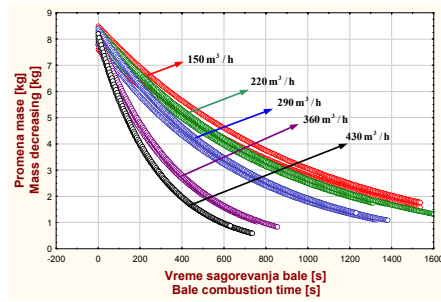
Na navedenim slikama može se uočiti da je brzina smanjenja mase sagorevanih bala pšenične slame u direktnoj proporciji sa zapreminskim protokom vazduha za sagorevanje, tj. povećanjem količine vazduha za sagorevanje, smanjenje mase bale je intenzivnije.

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

$$\begin{aligned}
 \Delta m(\tau, 150, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00102 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 220, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00117 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 290, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00147 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 360, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00267 \cdot \tau) \\
 \Delta m(\tau, 430, m_0) &= m_0 - m_0 \text{Exp}(-0,00354 \cdot \tau)
 \end{aligned} \tag{5}$$



Sl. 4. Promena mase bale pšenične slame tokom sagorevanja bala, bez recirkulacije
Fig. 4. Mass decreasing during combustion, no recirculation



Sl. 5. Promena mase bale pšenične slame tokom sagorevanja bala, recirkulacija 16,5 %
Fig. 5. Mass decreasing during combustion, recirculation 16.5 %

Na osnovu eksperimentalnih podataka o stepenu iskorišćenja kotla datih u disertaciji Igić (2008), testiran je matematički model u slučaju kada nema recirkulacije produkata sagorevanja:

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

Sagorela masa bale u imeniocu formule (6) računa se korišćenjem (4). U slučaju kada recirkulacija produkata sagorevanja iznosi 16,5 %, stepen iskorišćenja kotla modeluje se kao što sledi:

$$\eta(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}, \Delta m) = \frac{b8 \cdot \tau \cdot \left(b9 + 0.171 \cdot \dot{v} \cdot \text{Exp} \left(- \left(4.111 \cdot \frac{(\tau - 345.898)}{\tau_{kr}} \right)^2 \right) + 3.091 \cdot \dot{v} \cdot \text{Sin} \left(0.039 \cdot \frac{(\tau + 165.180)}{\tau_{kr}} \right) \right)}{\Delta m(\tau, \dot{v}, m_0)} \quad (7)$$

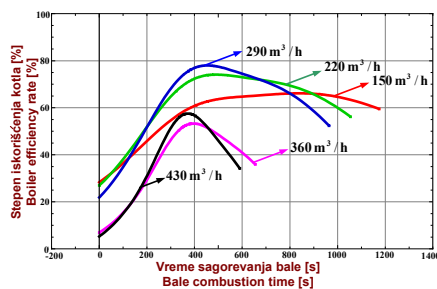
Sada se promena mase u imeniocu formule (7) računa korišćenjem (5). U formulama (6) i (7), τ – predstavlja vreme sagoravanja bale, \dot{v} – protok vazduha, τ_{kr} – vreme kada je bale potpuno sagorela, m_0 – masa bale, Δm – sagorela mase bale u vremenu. Ocene regresionih parametara b8 i b9 date su u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

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

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

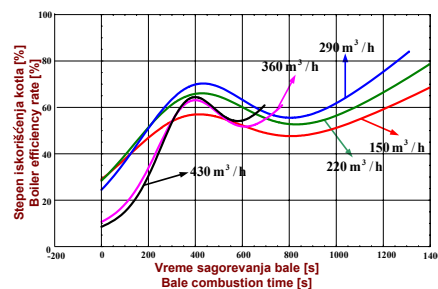
| R. koef. R. coef. | Bez recirkulacije, model (6), $R^2=89,84\%$ No recirculation model (6), $R^2=89.84\%$ | Recirkul. 16,5 %, model (7), $R^2=95,12\%$ Recircul. 16.5 %, model (7), $R^2=95.12\%$ |
|----------------------|--|--|
| b8 | 0,00649 | 0,00781 |
| b9 | 12,76336 | 17,95523 |

Modeli (6) i (7) predstavljeni su na slikama 6 i 7. Uočljivo je da je veći maksimalni stepen iskorišćenja kotla kada nema recirkulacije produkata sagorevanja u ložište kotla i to u režimima protoka vazduha 150, 220 i 290 m³/h. U režimima 360 i 430 m³/h veći maksimalni stepen iskorišćenja kotla dobije se ako se koristi recirkulacija od 16,5 %. Takođe se može primetiti da pri recirkulaciji od 16,5 % nema naglog pada stepena iskorišćenja kotla kao u slučaju kada nema recirkulacije produkata sagorevanja.



Sl. 6. Promena stepena iskorišćenja kotla tokom sagorevanja bala pšenične slame, bez recirkulacije

Fig. 6. Correlation between boiler energy efficiency rate and wheat straw bale combustion time, no recirculation



Sl. 7. Promena stepena iskorišćenja kotla tokom sagorevanja bala pšenične slame, recirkulacija 16,5 %

Fig. 7. Correlation between boiler energy efficiency rate and wheat straw bale combustion time, recirculation 16,5 %

Maksimum funkcija na slikama 6 i 7 u nekom vremenu τ dostiže određuje se pomoću prvog izvoda funkcija u (6) i (7) po vremenu τ . Rešavanjem jednačine $\eta'_{\tau}(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}, \Delta m) = 0$ po τ za oba tipa recirkulacije, dobija se za koje je vreme τ dostignut maksimalni stepen

iskorišćenja kotla za svaki režim rada kotla (tabela 5). U tabeli 5, takođe su dati i podaci o termičkoj snazi, pri maksimalnom stepenu iskorišćenja kotla.

Tab. 4. Maksimalna termička snaga i njoj odgovarajući stepen iskorišćenja kotla
Tab. 4. Maximal thermal power and boiler energy efficiency rate

| Režim rada kotla Boiler operating regime | Recir. | | \dot{V} , m ³ /h | | | | |
|---|--------|----------------|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| | | | 150 | 220 | 290 | 360 | 430 |
| Vreme dostizanja maksimalne toplotne snage i stepen iskorišćenja kotla Time of reaching the maximal thermal power and boiler energy efficiency rate, | 0 % | τ [s] | 416 | 400 | 388 | 346 | 338 |
| | | P_{max} [kW] | 70,62 | 84,05 | 97,97 | 116,96 | 132,19 |
| | | η [%] | 61,44 | 72,37 | 76,39 | 51,41 | 56,11 |
| | 16,5 % | τ [s] | 377 | 376 | 373 | 362 | 360 |
| | | P_{max} [kW] | 53,31 | 68,66 | 84,84 | 112,07 | 133,44 |
| | | η [%] | 57,88 | 65,77 | 68,89 | 61,81 | 62,71 |

Tab. 5. Maksimalni stepen iskorišćenja i njoj odgovarajuća termička snaga kotla
Tab. 5. Maximal boiler energy efficiency rate and thermal power

| Režim rada kotla Boiler operating regime | Rec. | | \dot{V} , m ³ /h | | | | |
|--|--------|------------------|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| | | | 150 | 220 | 290 | 360 | 430 |
| Vreme dostizanja maksim. stepena iskorišćenja i termička snaga kotla Time of reaching the maximal boiler energy effic. rate and ther. power | 0 % | τ [s] | 840 | 490 | 454 | 396 | 372 |
| | | η_{max} [%] | 66,14 | 74,10 | 77,99 | 53,30 | 57,53 |
| | | P [kW] | 59,33 | 81,59 | 95,63 | 112,59 | 128,94 |
| | 16,5 % | τ [s] | 442 | 437 | 433 | 400 | 399 |
| | | η_{max} [%] | 58,77 | 66,83 | 70,27 | 63,09 | 64,41 |
| | | P [kW] | 52,54 | 67,57 | 83,23 | 109,73 | 129,95 |

Koeficijent viška vazduha

Koeficijent viška vazduha λ očitava se sa mernog uređaja, a 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 promenu koeficijenta viška vazduha u funkciji od vremena. Dobijena funkcionalna zavisnost je oblika:

$$\lambda(\tau) = b1 \cdot \text{Exp}(b2 \cdot \tau), \quad (9)$$

gde su $b1$ i $b2$ koeficijenti koji se ocenjuju regresionom analizom (tabele 6 i 7).

Na slikama 8 i 9, predstavljene su funkcije dobijene pomoću modela (9) i ocena regresionih parametara iz tabela 7 i 8 i to kada nema recirkulacije i kada je recirkulacija 16,5 %, redom. Sa slike 8 uočava se da se, pri sagorevanju bez recirkulacije, koeficijent viška vazduha nalazio u intervalu od oko 0,4 do 12,4. Najsporiji rast je bio pri režimu rada kotla 220 m³/h, a najbrži pri režimu 430 m³/h.

Tab. 6. Ocene regresionih parametara modela (9), bez recirkulacije

Tab. 6. Regression parameters estimation for model (9), no recirculation

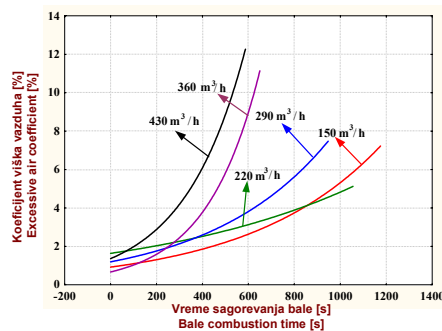
| Režim rada kotla Boiler operating regime | | 150 (m ³ /h) | 220 (m ³ /h) | 290 (m ³ /h) | 360 (m ³ /h) | 430 (m ³ /h) |
|---|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Regresioni parametri Regression parameters | b1 | 0,9212 92 | 1,63733 0 | 1,19485 0 | 0,66829 4 | 1,36290 2 |
| | b2 | 0,0017 53 | 0,00108 1 | 0,00193 6 | 0,00432 9 | 0,00374 3 |
| Koeficijent determinacije Coefficient of determination | R ² [%] | 85,03 | 89,11 | 86,70 | 88,88 | 76,01 |

Tab. 7. Ocene regresionih parametara modela (9), recirkulacija 16,5 %

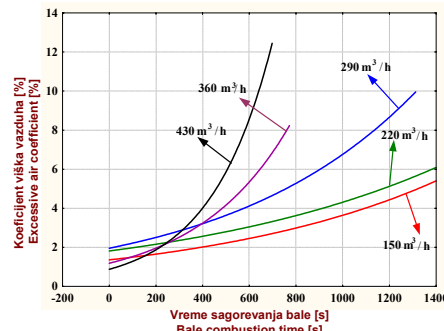
Tab. 7. Regression parameters estimation for model (9), recirculation 16.5 %

| 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 | 1,3588 20 | 1,81530 5 | 1,95713 9 | 1,18610 9 | 0,87614 9 |
| | b2 | 0,0009 86 | 0,00086 5 | 0,00124 0 | 0,00251 0 | 0,00380 2 |
| Koeficijent determinacije Coefficient of determination | R ² [%] | 91,37 | 72,91 | 93,43 | 79,44 | 88,29 |

U režimu 220 m³/h, koeficijent viška vazduha nije prešao vrednost 5. Pri recirkulaciji 16,5 % (slika 9), koeficijent viška vazduha kretao se od 0,8 pa do preko 12,8. Najbrži rast je i ovaj put u režimu 430 m³/h.



Sl. 8. Promena koeficijenta viška vazduha tokom sagorevanja bala pšenične slame, bez recirkul.
Fig. 8. Correlation between excessive air coefficient and wheat straw bale combustion time, no recirculation



Sl. 9. Promena koeficijenta viška vazduha tokom sagorevanja bala pšenične slame, recirkul. 16,5 %
Fig. 9. Correlation between excessive air coefficient and wheat straw bale combustion time, recirculation 16.5 %

Važno je istaći da se produžilo vreme sagorevanja bale, a da se koeficijent viška vazduha u režimima 150, 220, 290 i 360 m³/h kretao u zadovoljavajućim granicama. U tabeli 8, date su vrednosti koeficijenta viška vazduha pri maksimalnoj termičkoj snazi i pri maksimalnom stepenu iskorišćenja kotla.

Tab. 8. Vrednosti koeficijenta viška vazduha pri maksimalnoj termičkoj snazi kotla i pri maksimalnom stepenu iskorišćenja kotla

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

| Režim rada kotla Boiler operating regime | Recirc. | 150 (m ³ /h) | 220 (m ³ /h) | 290 (m ³ /h) | 360 (m ³ /h) | 430 (m ³ /h) |
|---|---------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Vrednosti za λ pri maks. termičkoj snazi kotla Values for λ at max. boiler thermal power | 0 % | 1,910 | 2,523 | 2,532 | 2,989 | 4,830 |
| | 16,5 % | 1,845 | 2,415 | 3,002 | 2,928 | 3,444 |
| Vrednosti za λ pri maks. energ. efikas. kotla Values for λ at max. boiler energy effic. rate | 0 % | 4,017 | 2,781 | 2,878 | 3,711 | 5,485 |
| | 16,5 % | 3,961 | 5,446 | 3,097 | 3,237 | 4,244 |

Iz tabele 8 zaključujemo da je koeficijent viška vazduha bio manji u svim režimima, osim u režimu 290 m³/h, kada je recirkulacija bila 16,5 % i to pri maksimalnoj termičkoj snazi kotla. U vremenu maksimalnog stepena iskorišćenja kotla, koeficijent viška vazduha je bio manji u režimima 150, 360 i 430 m³/h kada je recirkulacija bila 16,5 %.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize rezultata ispitivanja kotla, pri sagorevanju bala pšenične slame, može se zaključiti da porastom protoka vazduha kroz ložište kotla raste snaga kotla i skraćuje se vreme kada je bala potpuno sagorela. U slučaju recirkulacije produkata sagorevanja od 16,5 %, u svim režimima rada kotla, vreme sagorevanja bale se produžilo. Time se manji broj bala iskoristi za isti period grejanja u odnosu na slučaj kada nema recirkulacije. Pri sagorevanju bala pšenične slame, porastom protoka vazduha raste i stepen iskorišćenja kotla, ali samo kod prva tri protoka vazduha (150, 220 i 290 m³/h), dok kod četvrtog i petog (360 i 430 m³/h) stepen iskorišćenja je manji nego u prethodnim protocima vazduha. Najveći stepen iskorišćenja kotla dobijen je u režimu 290 m³/h. Kod svih režima sagorevanja bala pšenične 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. Opadanje mase bale je sporije pri recirkulaciji od 16,5 % nego kada nema recirkulacije. Povećanjem protoka fluida, koeficijent viška vazduha raste. Vrednosti koeficijenta viška vazduha iznose od 0,4 do 12,4 (kod sagorevanja bez recirkulacije), odnosno od 0,8 do 12,8 (pri recirkulaciji od 16,5 %) u toku celokupnog procesa sagorevanja.

5. LITERATURA

- [1] Babić M, Babić Ljiljana, Matić-Kekić Snežana, Pavkov I, Karadžić B. 2005. Održivi energetski model proizvodnje sušenog voća kombinovanom tehnologijom. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi-PTEP* 9: 109-118.
- [2] Babić Ljiljana, Babić M, Turan J, Matić-Kekić Snežana, Radojčin M, Mehandžić-Stanišić Sanja, Pavkov I, Zoranović M. 2011. Physical and stress-strain properties of wheat (*Triticum aestivum*) kernel. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91: 1236-1243.
- [3] Bates D.M, Watts D.G. 1988. *Nonlinear Regression Analysis and Its Application*. Wiley. New York, USA.
- [4] Brkić Ljiljana, Živanović T. 2006. Termički proračun parnih kotlova. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [5] 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.
- [6] Bogner M. 1992. *Termotehničar 1. Poslovna politika*. Beograd.
- [7] Dedović N, Igić S, Janić T. 2008. 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] Dedović N, Igić S, Matić-Kekić Snežana, Janić T. 2010. Koeficijent viška vazduha pri sagorevanju bala slame i prikaz matematičkih modela. *Savremena poljoprivredna tehnika* 36(4): 344-356.
- [10] Dedović N, Konjik Sanja, Matić-Kekić Snežana. 2003. Hiperbolični sistemi zakona održanja. *Savremena poljoprivredna tehnika* 29 (4): 251-257.
- [11] 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.
- [12] Hertmann H, Thuncke K, Holdrich A, Robmann P. 2003. *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Gülzow, Nemačka.
- [13] Igić S. 2008. Uticaj vrste i stanja balirane slame te količine i sastava ulaznog vazduha na efikasnost kotlovskeg postrojenja. Ph.D. diss, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [14] Janić T. 2000. Kinetika sagorevanja balirane pšenične slame. Ph.D. diss, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [15] Janić T, Brkić M, Erdeljan Z. 1998. Sagorevanje balirane biomase. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi* 2(3): 117-121.
- [16] Janić T, Brkić M, Igić S, Dedović N. 2008. Termoenergetski sistemi sa biomasom kao gorivom. *Savremena poljoprivredna tehnika* 34(3-4): 212-219.
- [17] Janić T, Brkić M, Igić S, Dedović N. 2009. Gazdovanje energijom u poljopriv. preduzećima i gazdinstvima. *Savremena poljoprivredna tehnika* 35(1-2): 127-133.
- [18] Jones J.M, Pourkashanian M, Williams A, Hainsworth D. 2000. A comprehensive biomass combustion model. *Renewable Energy* 19(1-2): 229-344.
- [19] Matić-Kekić Snežana, Mudrinski V. 2004. Neki novi 2-dizajni. *Letopis naučnih radova* 28: 68-74.
- [20] Matić-Kekić Snežana, Ljiljana Babić, Babić M, Pavkov I. 2007. Izračunavanje površine polutke kajsije. *PTEP* 11: 172-176.
- [21] Matić-Kekić Snežana, Bodroža-Pantić Olga, Dedović N. 2008. Jedan model nastave matematike. *Letopis naučnih radova* 32: 14-26.

- [22] Matić-Kekić Snežana, Mudrinski V. 2009. Some new 2-designs from a wreath product on 18 points. *Mathematica Moravica*, 13(1): 37-41.
- [23] Matić-Kekić Snežana. 2006. Optimalan ugao solarnog kolektora u odnosu na vertikalu. *Letopis naučnih radova Poljoprivrednog fakulteta* 30(1): 161-168.
- [24] Matić-Kekić Snežana. 2008. Određivanje zapremine krošnji piramidalnog, kupastog, elipsoidnog i sfernog oblika u prirodi, *Letopis naučnih radova Poljoprivrednog fakulteta* 32: 17-34.
- [25] Oka S. 1998. Korišćenje otpadne čvrste biomase u energetske svrhe. *Energetika, ekonomije, Ekologija* 3(2): 61-66.
- [26] Ostojić M, Simin R, Igić S. 2003. Upotreba biomase za proizvodnju toplotne energije na farmi. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi* 7(5): 121-123.
- [27] Pešenjanski I. 2000. Kinetika sagorevanja pšenične slame. Mr. teza, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [28] Pešenjanski I, Stepanov B. 2005. Rezultati ispitivanja kotla za sagorevanje biomase 250 kW i predlog tehničko-organizacionih mera za povećanje energetske efikasnosti postojećih kotlovskih postojenja. *Savremena poljoprivredna tehnika* 31(4): 197-203.
- [29] Strasser H. 1985. *Mathematical Theory of Statistics*, New York, USA.
- [30] Šečić Đ. 1991. Istraživanje kriterijuma za ocenjivanje efektivnosti postupka valorizacije slame. Ph.D. diss, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [31] Wayne C, Turner J. 1997. *Energy management handbook*. The Fairmont Press. Third edition. Lilburn, Georgia, USA.
- [32] Wolfram S. 1991. *Mathematica: A System for Doing Mathematics by Computer*. Second Edition. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Illinois, USA.

DEFINING MATHEMATICAL MODELS OF BIOMASS COMBUSTION PRODUCTS RECIRCULATION

Nebojša Dedović, Saša Igić, Snežana Matić-Kekić, 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. As a fuel, there were used wheat straw bales. 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 combustion time, as well as mass decreasing during the bale combustion and we gave corresponding mathematical models. These correlation were given in the case of no recirculation of combustion products and in the case of recirculation 16.5 %. In the case of no combustion products recirculation, average boiler thermal power rate ranges from 63.47 to 90.90 kW (from 43.00 to 88.12 kW for 16.5 % recirculation). Maximum boiler thermal power is 130.94 kW in the case of no recirculation (122.44 kW for 16.5 % recirculation). Increasing the air throughput in the firebox, increases the thermal capacity of the boiler, while the bale combustion time is reduced. In the case of no recirculation, total combustion time ranges between 587 and 1,175 (from 698 to 1485 s for 16.5 % recirculation). It is given the excessive air coefficient values at maximal boiler thermal power and maximal boiler energy efficiency rate. Excessive air coefficient values are between 0.4 and 12.4 (during wheat straw bale combustion with no recirculation), and from 0.8 to 12.8 (for wheat straw bale combustion with 16.5 % recirculation). Bale mass decreasing is slower during the combustion process with recirculation of 16.5 %. One can conclude that it is better to use recirculation of 16.5 % because the same number of straw bales can be used for longer period than when there is no recirculation of combustion products. All examinations are covered by suitable mathematical models and graphic presentation of those models.

Key words: wheat straw bale, boiler thermal power, boiler efficiency rate, excessive air coefficient, recirculation, mathematical models

Ovaj 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”, 2006-2008, kojeg je finansiralo Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije.

Primljeno: 16. 01. 2011.

Prihvaćeno: 27. 01. 2011.