

REZULTATI ISPITIVANJA SAGOREVANJA BALIRANE BIOMASE NA KOTLU TOPLOTNE SNAGE 70 kW

RESULTS OF BALLED BIOMASS COMBUSTION INVESTIGATION IN BOILER WITH THERMAL POWER OF 70 kW

**BRANISLAV S. REPIĆ, DRAGOLJUB V. DAKIĆ,
DEJAN M. ĐUROVIĆ i ALEKSANDAR M. ERIĆ,**
INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE „VINČA“,
LABORATORIJA ZA TERMOTEHNIKU I ENERGETIKU, BEOGRAD

Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za termotehniku i energetiku, poslednjih nekoliko godina ulaže velike napore u promovisanje korišćenja nusproizvoda iz poljoprivredne proizvodnje. Radi se o tehnologiji cigaretnog sagorevanja balirane biomase koja je i od strane Evropske unije označena kao najpogodnija za tu namenu. Prednost ovog načina sagorevanja su minimalan utrošak električne energije za pripremu goriva, zadovoljavanje ekoloških kriterijuma sagorevanja, niski eksploatacioni i investicioni troškovi i mogućnost automatizacije rada. U tom cilju razvijen je kotao toplotne snage 70 kW za sagorevanje malih bala poljoprivredne biomase koje proizvode praktično svi ratari. Kotao je predviđen za rad sa malim četvrtastim balama dimenzija 40 cm × 50 cm × 80 cm. U radu su izloženi rezultati ispitivanja sagorevanja balirane biomase na pomenutom kotlu. Ispitivanja su izvršena sa više uvodnika bala (skraćeni, kosi i horizontalni). Sva ispitivanja su bila praćena odgovarajućim temperaturnim merenjima, kao i merenjima sastava produkata sagorevanja.

Ključne reči: biomasa; cigaretno sagorevanje, kotao, slama; ispitivanje.

At the Vinca Institute of Nuclear Sciences, the Laboratory for Thermal Engineering and Energy has for the last few year made a lot of efforts in promoting the usage of residues of agricultural production. The method concerned is cigarette burning biomass combustion technology, which was evaluated by the European Union as very suitable for that purpose. The advantages of this type of combustion are minimal electricity consumption for fuel preparation, the meeting of ecological criteria, lower exploitation and investment costs and possibilities of operation process automation. For that purpose, a boiler of 70 kW heat power for small bale biomass combustion was developed. The producers of small bales are practically all agricultural workers. The boiler was designed for using small square bales with dimensions 40x50x70 cm. The results of the baled biomass combustion investigation in the above-mentioned boiler are presented in the paper. The investigations were performed with several types of baled feeders (shortened, inclined and horizontal). All the investigations were followed with adequate temperature and flue gas composition measurements.

Key words: biomass; cigarette combustion; boiler; straw; investigation

1. UVOD

Srbija raspolaže značajnim obnovljivim izvorima energije. Tako na primer, postoje ogromne količine suvišne slame kao i otpadnog drveta koji predstavljaju veliki energetski potencijal. Biomasa nastala iz poljoprivredne proizvodnje ili iz šumske proizvodnje može Srbiji obezbediti energije od oko 110.000 TJ/godišnje [1]. Pri tome biomasa iz poljoprivredne proizvodnje čini oko 60% ovog potencijala, od čega je skoro 62% biomasa iz ratarske proizvodnje, a ostatak čini biomasa iz voćarstva i vinogradarstva i stočarske proizvodnje. Ekološki i ekonomski faktori su glavni činioci sve šireg korišćenja obnovljivih izvora energije u svetu jer cene fosilnih goriva, posebno gasa i nafte, značajno rastu a ekološki zahtevi koji se postavljaju u njihovom korišćenju su sve strožiji. Zbog toga Srbija, kao energetski veoma siromašna zemlja mora oslonac svog energetskog razvoja naći u što širem korišćenju obnovljivih izvora energije, a pre svega biomase kao neutralnog goriva u pogledu emisije ugljen dioksida.

Za širu komercijalnu upotrebu biomase potrebni su odgovarajući uređaji, kotlovi i ložišta na biomasu. Ti uređaji koji bi sagorevali biomasu mogli bi da se koriste naročito u malim mestima i seoskim sredinama, u poljoprivredi (plasticnici, staklenici, staje, živinarske farme i dr.), u malim preduzećima koja se bave preradom poljoprivrednih proizvoda (mini mlekare, klanice, sušare), za grejanje manjih i većih objekata, izolovanih farmi, delova naselja itd. To ukazuje da bi mnogi objekti mogli u potpunosti postati energetski nezavisni korišćenjem lokalnih izvora biomase, prvenstveno jeftine biomase iz poljoprivredne odnosno ratarske proizvodnje. To je jedan od glavnih razloga što Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za termotehniku i energetiku, više poslednjih godina ulaže velike napore u promovisanju korišćenja nus proizvoda iz poljoprivredne proizvodnje i razvoju tehnologije za komercijalno sagorevanje biomase posebno iz poljoprivredne proizvodnje.

2. NAČINI KORIŠĆENJA BIOMASE

Biomasa se može koristiti na više načina, počevši od upotrebe samlevene biomase i sagorevanja u letu do transformacije početne forme u formu peleta i briketa. Tehnologije koje zahtevaju promenu forme biomase iziskuju veliku „sopstvenu“ potrošnju električne energije, što je u isto vreme praćeno velikim investicionim i eksploatacionim troškovima. Tehnologije koje koriste transformisane forme biomase su pogodne za korišćenje u užim urbanim celinama, ili ukoliko već imamo usitnjenu biomasu na raspolaganju. Nasuprot tome je tehnologija pomoću koje se sagoreva biomasa u formi kako se i prikuplja na njivama i skladišti, odnosno u baliranom stanju.

Postoje dva načina korišćenja biomase u izvornom baliranom stanju bez bilo kakvih naknadnih priprema što znači da se troši vrlo mala količina električne energije za sopstvenu potrošnju. Jedna tehnologija odnosi se na ubacivanje celih bala u ložište, a druga je sagorevanje po principu cigarete. Prva tehnologija ne omogućava dobru kontrolu sagorevanja koja se pri cigaretnom sagorevanju može kontrolisati. Kontrolom procesa sagorevanja postiže se bolji kvalitet sagorevanja što je praćeno smanjenom emisijom štetnih produkata i povećanim stepenom korisnosti postrojenja. Tehnologije preporučene od strane Evropske Unije za pojedine vrste biomasa prikazane su u Tabeli 1 [2]. Cigaretnog sagorevanja je preporučena kao najpogodnija za sagorevanje balirane biomase. Sistemi sagorevanja (1-3) su pogodni za kotlove manje snage, a (4-10) su pogodni za veća postrojenja.

Tabela 1. Biomasa za potrebe grejanja [2]

	Drvo	Drvno iverje	Drvna prašina	Peleti	Briketi	Slama
1. Otvoreno ložište	0	-	-	-	0	-
2. Ručno loženje	+	-	-	-	+	-
3. Automatski gorionik	--	+	-	++	--	+
4. Sagorevanje u sloju	0	--	--	--	-	+
5. Kosa nepokretna rešetka	--	+	-	+	-	-
6. Pokretna rešetka	--	++	-	++	-	+
7. Vibraciona rešetka	--	+	-	+	-	+
8. Doziranje odozdo	--	+	-	+	--	-
9. Gorionik za prašinu	--	--	+	--	--	-
10. Cigaretno sagorevanje	--	--	--	--	--	++

Legenda: (- -) Nije moguće; (-) Nije pogodno; (0) Prednosti i nedostaci se međusobno anuliraju; (+) Pogodno; (++) Veoma pogodno.

3. TEHNOLOGIJA CIGARETNOG SAGOREVANJA

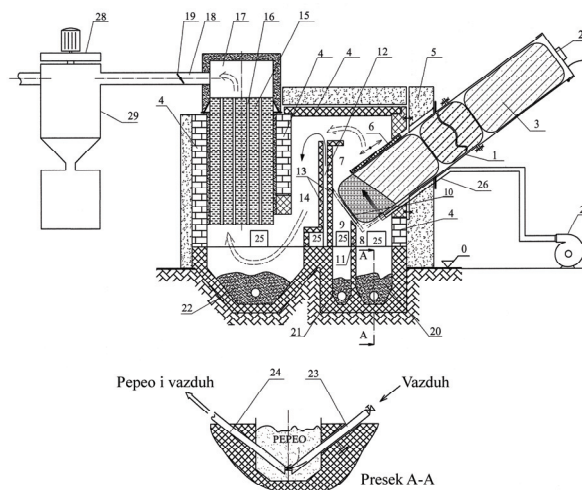
Cigaretno sagorevanje balirane biomase nastale iz poljoprivredne proizvodnje predstavlja kombinaciju sistema doziranja bala biomase i kotlova sa kosom rešetkom. Tehnologija ne zahteva nikakvu prethodnu priprema bala što značajno snižava eksploatacione troškove rada ovakvih postrojenja. Zadnjih nekoliko godina sprovode se intenzivna istraživanja na razvoju tehnologije cigaretne sagorevanja. Istraživanja su usmerena na sagorevanju malih četvrtastih bala poljoprivredne biomase dimenzija 40x50x80 cm i velikih bala valjkastog oblika dimenzija $\varnothing 1,80 \times 1,20$ m i paralelopipednog oblika dimenzija 0,80-1,20x0,70x1,50-2,50 m.

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja kotla predviđenog za cigaretne sagorevanje malih bala poljoprivredne biomase. Eksperimentalno-demonstracioni kotao izgrađen je kod individualnog korisnika u mestu Stapar kod Sombora sa ciljem: ispitivanja procesa sagorevanja balirane biomase u realnim ložišnim uslovima; ispitivanja procesa doziranja i delimičnog skladištenja balirane biomase; dobijanja konstruktivnih podataka neophodnih za dimenzionisanje i projektovanje sistema i uređaja za sagorevanje, transport, doziranje i skladištenje balirane biomase i dr.

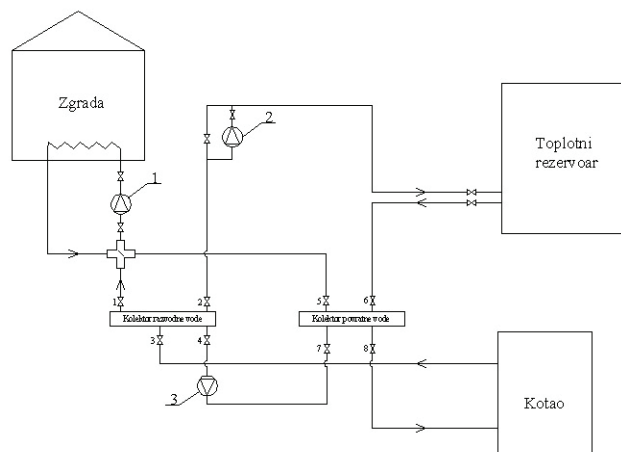
Na Slici 1 prikazana je šema eksperimentalno-demonstracionog kotla [3]. Balirana biomasa ubacuje se kroz uvodnik (1) u ložišni prostor (7) gde sagoreva. Ložišni prostor je izrađen od šamotnog ozida (4) oko kojeg je postavljena toplotna izolacija (5) i zaštitni lim. Svež vazduh za sagorevanje ubacuje se u ložišni prostor preko distributora (26) koji je povezan sa ventilatorom svežeg vazduha (27). Promenom položaja distributora svežeg vazduha reguliše se koji deo bale učestvuje u sagorevanju te se na taj način, posredno reguliše i toplotna snaga kotla. U zoni (14) odvija se proces konačnog dogorevanja.

Proizvedena toplota od sagorevanja biomase razmenjuje se u razmenjivaču toplote gas-voda (15). Dimni gas prolazi kroz dimne cevi razmenjivača toplote (16) i ide u sabirnik izlaznih dimnih gasova (16). Preko dimnjače (18) dimni gasovi se vode u ciklonski separator čestica (29), odakle prečišćeni dimni gasovi pomoću ventilatora dimnog gasa (28) odlaze u dimnjak, i zatim se ispuštaju u okolnu atmosferu. Pepeo nastao u procesu sagorevanja balirane biomase sakuplja se kolektoru pepela (20, 21 i 22), kao i u bunkeru ciklonskog separatora čestica. Da bi postrojenje radilo na određenoj nominalnoj ili ustaljenoj snazi napravljen je i ugrađen odgovarajući akumulator toplote (toplotni rezervoar) zapremine 5 m³. Na taj način je obezbeđeno da bez obzira na trenutne potrebe za grejanjem, kotao uvek radi sa nominalnom snagom. Kotao je opremljen i odgovarajućim upravljačko-regulacionim

sistemom [4]. Toplotna šema razvodnog postrojenja je prikazana na Slici 2. Na njoj se mogu uočiti sledeći toplotni krugovi: a) Topla voda iz kotla ide direktno u zgradu koja se greje; b) Topla voda iz kotla ide samo u toplotni rezervoar; c) Topla voda iz kotla ide istovremeno i u zgradu i u toplotni rezervoar; d) Topla voda iz toplotnog rezervoara ide u zgradu.



Slika 1. Šema kotla za sagorevanje malih bala toplotne snage 70 kW



Slika 2. Razvod tople vode do potrošača

4. REZULTATI ISPITIVANJA KOTLA

Na ovom kotlu izvršena su različita ispitivanja sagorevanja balirane poljoprivredne biomase. Ispitivani toplovodni kotao spada u kotlove namenjene za centralno grejanje čvrstim gorivom tako da podleže standardu JUS M.E6.110 [5] i DIN 4702. S obzirom da su vršena ispitivanja prototipa kotla u razvojne svrhe, primenjene su samo pojedine odredbe ovih standarda.

Tokom sprovedenih ispitivanja vršena su merenja neophodnih veličina kako bi se stekao uvid u procese koji se dešavaju na postrojenju i to: merenje temperatura dimnog gasa na tri mesta: t_1 u ložišnom prostoru, t_2 u zoni dogorevanja i t_3 iza izmenjivača toplote; merenje temperature fluida (vode) na dva mesta: t_4 temperatura izlazne (zagrejane) vode, t_5 temperatura povratne vode; merenje sastava dimnih gasova, koje je vršeno uzimanjem uzorka

dimnog gasa na izlazu iz kotla; merenje podpritiska u kotlu; merenje protoka svežeg vazduha Pito sondom; merenja potrošnje goriva. Potrošnja goriva, je određivana posredno, preko merenja količine goriva koja se ubacuje u ložište i preko merenja vremena sagorevanja određene količine goriva u ložištu kotla.

Ispitivanja su vršena sa kratkim, kosim i horizontalnim uvodnikom bala (Slika 3) [6]. U kratki uvodnik bala smešta se po 1 i 1/2 bala, a u ova dva poslednje pomenuta uvodnika moglo je da se istovremeno smesti po 3 bale slame. Na ovaj način u uvodniku se uvek nalazilo dovoljno biomase tako da u dužem periodu vremena nije bilo potrebe za remećenjem stacionarnog režima rada kotla.



Slika 3. Kosi (a) i horizontalni (b) uvodnik bala

Ispitivanja su sprovedena sa dve vrste biomase i to sa sojinom i pšeničnom slamom. Urađene su tehničke analize i analize topivosti pepela uzoraka slame. Ispitivanja sagorevanja balirane biomase su sprovedena pri više radnih režimima. Podaci o pojedinim režimima rada dati su u Tabeli 2. Izvršena ispitivanja su pokazala da sojina i pšenična slama dobro sagorevaju u ovom kotlu. Inicijalno paljenje slame prilikom ispitivanja vršeno je bakljom tj. otvorenim plamenom kroz revizioni otvor na kotlu.

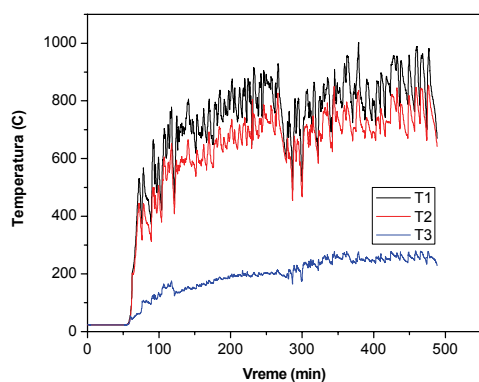
Pri svim pomenutim režimima rada protok goriva je održavan u proseku od 17,3 do 22,7 kg/h, a kontrolisan je preko brzine ubacivanja novih bala u uvodnik bala. Mereni protok goriva, računajući da je stepen korisnosti kotla oko 0.73 odgovara toplotnoj snazi kotla od 50-71 kW. Toplotna snaga kotla regulisana je promenom položaja uvodnika vazduha postavljenom u ložištu ispod bala (Slika 1). Protok vazduha je određivan posredno preko merenja brzine vazduha u kanalu pomoću Pito sonde.

Na Slici 4 prikazane su promene temperature dimnih gasova (Sl. 4a) i temperature fluida - razvodne i povratne vode (Sl. 4b) za ispitivani režim br. 5. Temperatura gasova u ložištu kotla kretala se oko 800°C, u zoni dogorevanja oko 750°C, a na izlazu iz izmenjivača toplote kotla oko 200°C. Prema ostvarenim temperaturama dimnih gasova može se zaključiti da je ostvareno dobro i kontrolisano sagorevanje sojine i pšenične slame i da je postignuta optimalna temperatura dimnih gasova na izlazu iz izmenjivača toplote.

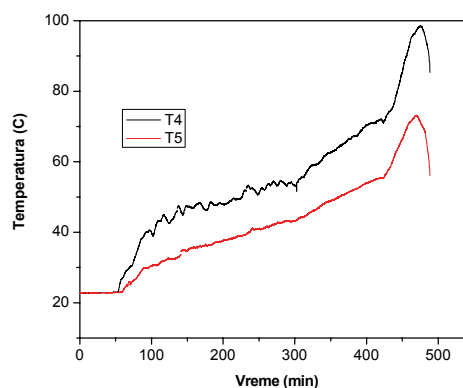
Prilikom sprovedenih ispitivanja temperatura dimnih gasova kontrolisana je preko upravljačkog sistema kotla. To je vršeno regulacijom protoka svežeg vazduha potrebnog za sagorevanje i podpritiska u ložištu kotla korišćenjem ventilatora dimnih gasova. Upravljanje sa oba ventilatora ostvareno je pomoću frekventnih regulatora pri čemu je vođeno računa da temperatura dimnih gasova u ložištu kotla ne pređe vrednost 820°C kada se postiže optimalno sagorevanje slame. Ovo se, sa druge strane, povoljno odrazilo na efikasnost razmene toplote u izmenjivaču toplote tako da je temperatura dimnih gasova na izlazu iz izmenjivača toplote oko 200°C i to vrlo stabilna u dužem periodu merenja. Na ovaj način upravljački sistem kotla i za kotlove manje snage potpuno potvrđuje svoj smisao jer se postiže visoka i efikasna razmena toplote u izmenjivaču toplote a time i optimalni stepen korisnosti kotla.

Tabela 2. Osnovni parametri eksperimentalnog ispitivanja sagorevanja

Ispitivanje broj	1	2	3	4	5	6
Boj utrošenih bala	1,5	2,0	5	6	12	11
Utrošena slama (kg)	22,7	24,6	61,3	75,9	166	144
Prosečni protok goriva (kg/h)	22,7	21,1	18,4	19,8	20,8	17,3
Protok vazduha (m ³ /h)	176	169	187	173	166	169
Proračunata toplotna snaga kotla (kW)	65,8	71,3	53,5	57,4	60,3	50,2
Višak vazduha meren na izlazu iz kotla l (-)	1,69 -3,03	1,38 -2,35	1,45 -4,27	1,62 -4,27	1,35 -2,52	1,09 -2,82
Vreme trajanja testa (min)	60	75	200	230	480	560
Uvodnik bala	Kosi	Kosi	Kosi	Kosi	Kosi	Horizont-talni
Gorivo	Sojina slama	Sojina slama	Sojina slama	Sojina slama	Sojina i pšenična slama	Sojina i pšenična slama



a)



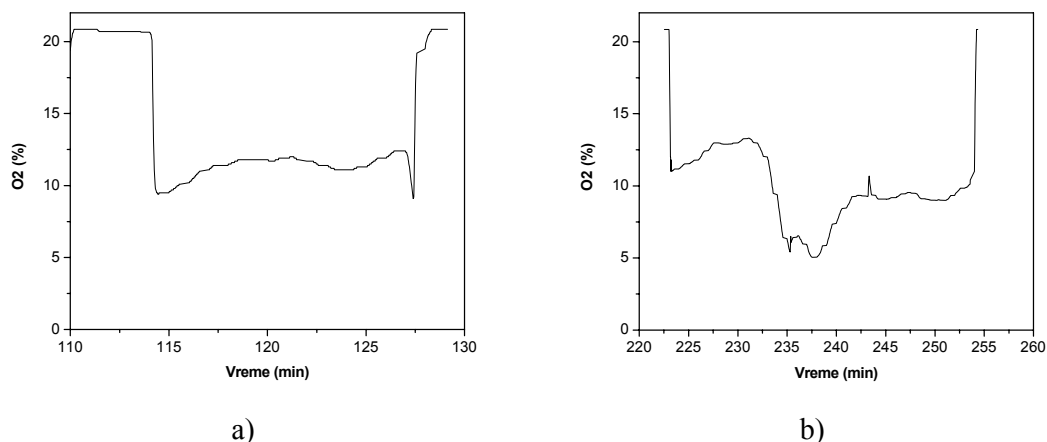
b)

Slika 4. Izmerene temperature gasa i vode za režim 5

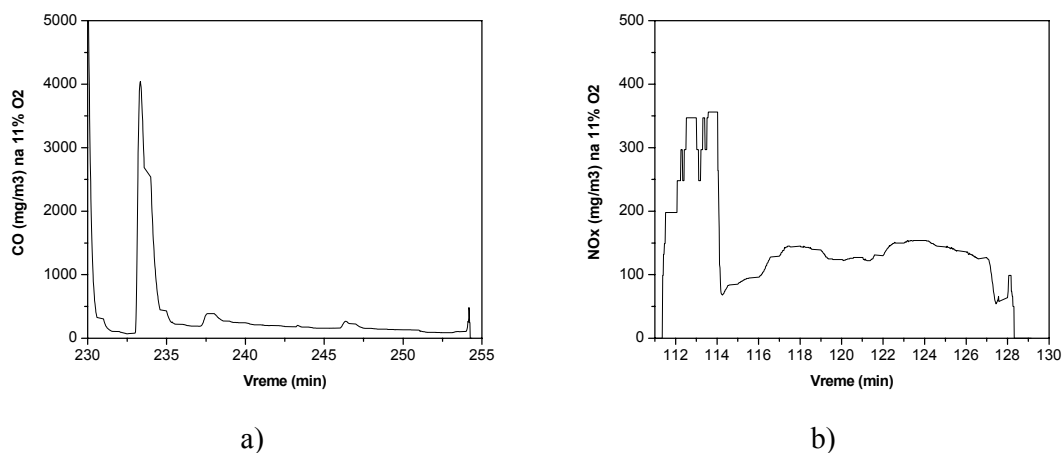
Izmerene temperature izlazne odn. zagrejane vode i povratne vode kretale su se u zadovoljavajućim opsezima. Temperatura zagrejane vode kretala se oko 80°C, a temperatura povratne vode oko 60°C (Slika 4). Prilikom ovih ispitivanja u rad je periodično uključivan i akumulator toplote (toplotni rezervoar) kako bi se ispitala funkcionalnost njegovog rada, kao i funkcionalnost celog sistema razvoda tople vode do potrošača. Ispitivanja su pokazala da je funkcionalno lako promeniti tok strujanja tople vode tako da se ona odvodi ili direktno do potrošača ili u akumulator toplote.

Merenje sadržaja kiseonika u izlaznim dimnim gasovima (na kraju kotla) pokazalo je da se on kretao od 10-14 % zavisno od režima sagorevanja. Na slici 5 prikazana je promena sadržaja O₂ u dimnim gasovima tokom radnog režima br. 5. Uporedo sa merenjem sadržaja O₂ vršeno je merenje sadržaja CO i NO_x. Naime, Pravilnikom [7] je propisano da kotlovi i ložišta koja sagorevaju drvo, briket i otpatke poljoprivrednih kultura (biomasu) moraju da zadovolje određene propisane emisije CO i NO_x oksida. Iako je ispitivani kotao malog kapaciteta i ne podleže ograničenju emisije produkata sagorevanja (prema JUS M.E6.110 [5]) smatra se da će sa pooštavanjem domaćih propisa i kotlovi male snage morati zadovoljavati određene propisane granične vrednosti emisije. Ispitivanja su pokazala da emisija CO varira u

širokom opsegu vrednosti. Kada se uspostavi stabilan režim sagorevanja emisija CO (Sl. 6a) zadovoljava propisane granične vrednosti emisije iz Pravilnika [7] koji za kotlove i ložišta toplotne snage od 1-50 MW iznosi 250 mg/m^3 (svedeno na 11% O_2). Emisija azotnih oksida (Sl. 6b) je u velikoj većini slučajeva daleko ispod granične vrednosti emisije propisane za pomenuta ložišta koja iznosi 500 mg/m^3 .



Slika 5. Izmeren sadržaj O_2 za režim 5



Slika 6. Izmerene emisije CO i NO_x za režim 5

Ispitivanja su pokazala da kotao sa sagorevanjem malih bala poljoprivredne biomase u celini radi na zadovoljavajući način i sa predviđenim kapacitetima. Rad sa baliranom sojinom i pšeničnom slamom je pokazao da nema lepljenja pepela na zidove ložišta ili izmenjivača toplote što je posebna pogodnost ovako koncipiranog kotla. Ispitivanja kotla su omogućila dobijanje projektnih parametara za proračun i projektovanje kotlova na baliranu biomasu različitih toplotnih snaga.

5. ZAKLJUČAK

Izvršena su ispitivanja balirane biomase iz poljoprivredne proizvodnje (malih bala sojine i pšenične slame) na kotlu toplotne snage 70 kW koji radi na principu cigaretnog sagorevanja bala. Ispitivanja su pokazala da su postignute optimalne temperature u ložištu kotla koje najviše pogoduju sagorevanju balirane biomase po navedenom principu sagorevanja. Ispitivanja su pokazala da je moguće zagrejati

toplu vodu na određenu temperaturu dovoljnu za funkciju grejanja određenih objekata direktno ili preko akumulatora toplote. Emisija štetnih gasovitih produkata sagorevanja je umerena i znatno niža u odnosu na druge tehnologije sagorevanja poljoprivredne biomase

ZAHVALNOST

Rad je realizovan u okviru projekta Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije „Razvoj tehnologije cigaretnog sagorevanja balirane poljoprivredne biomase sa analizom mogućnosti kombinovane proizvodnje toplotne i električne energije”, Evidencioni broj projekta TR-18216A.

LITERATURA

- [1] Repić, B.S., Dakić, D.V., Paprika, M.J., Mladenović, R.V., Erić, A.M., Soya straw bales combustion in high efficient boiler, *Thermal Science*, 12 (2008), 4, pp. 51-60.
- [2] J B. Kavalov, S.D. Peteves, "Bioheat applications in the European Union: An Analysis and Perspective for 2010", European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Energy, 2004.
- [3] Repić, B., Dakić, D., Paprika, M., Mladenović, R., Erić, A., An efficient boiler burning small soya straw bales, *4th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of energy, Water and Environment Systems*, Dubrovnik, Croatia, 4-8 June 2007, Proceedings on CD ROM, Edited by: Guzović Z., Duić, N., Ban, M., pp.1-8, ISBN 13: 978-953-6313-87-7 and ISBN 10: 953-6313-87-1.
- [4] Repić, B., Dakić, D., Mladenović, R., Erić, A. Upravljački i regulacioni sistem kotla za sagorevanja balirane biomase, 21 međunarodni kongres o procesnoj industriji PROCESING 2008, Subotica, 4-6 jun 2008, Zbornik radova na CD ROM-u, Urednici: S. Genić, I. Kovačević, rad br. 38, Grupa V: Inženjerstvo životne sredine i održivi razvoj, zaštita životne i radne sredine, racionalno korišćenje energije, obnovljivi izvori energije, str.1-8.
- [5] JUS M.E6.110, Generatori toplote za grejanje, Kotlovi za čvrsta goriva, Konstrukcija i zahtevi kvaliteta, Zavod za standardizaciju, Beograd, 1987.
- [6] Repić, B., Dakić, D., Mladenović, R., Erić, A., Nemoda, S., Paprika, M., Đurović, D. Nadogradnja postrojenja i završna ispitivanja sagorevanja balirane biomase na eksperimentalno-demonstracionom postrojenju, NIV-ITE-375, Beograd-Vinča, Jun 2008.
- [7] Republika Srbija, Ministarstvo zaštite životne sredine, Pravilnik o graničnim vrednostima emisije, načinu i rokovima merenja i evidentiranja podataka, SG RS br. 30, 1997.