Biblid: 0350-2953 (2016) 42(4): 225-236

UDK: 621.4;697

Originalni naučni rad

Original scientific paper

TOPLOTNA SNAGA MANJIH KOTLOVA SA RUČNIM OPSLUŽIVANJEM

THERMAL POWER OF SMALL SCALE MANUALLY FED BOILER

Janić T.¹, Igić S.², Dedović N.¹, Janić V.³

¹ Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 8

² Fakultet za ekonomiju i inženjerski menadžment, Novi Sad, Cvečarska 2

³ Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6

e-mail: jtodor@polj.uns.ac.rs

REZIME

U ovom radu su prikazani rezultati pri postizanju toplotnih snaga kod sagorevanja prizmatičnih bala sojine slame u kotlovskom postrojenju nazivne toplotne snage od 120 kW sa ručnim opsluživanjem. Ispitivanja su vršena tako što je promena snage kotla praćena u kontinuiranom radu pri različitim zapreminskim protocima vazduha za sagorevanja od 150, 220, 290, 360 i 430 m³ h⁻¹ i različitim udelima recikulisanih dimnih gasova od 0%, 16,5% i 33%. Za određivanje toplotne snage kotla korišćena je direktna metoda.

Korelacija između postizanih toplotnih snaga kotla i vremena sagorevanja bala slame je ustanovljena i prikazana empirijskom jednačinom. Opšti zaključci su sledeći: u režimu bez recirkulacije dimnih gasova u vazduh za sagorevanje sojine slame povećanjem protoka ulaznog vazduha za sagorevanje u ložište smanjuje se vreme sagorevanje bala i povećava toplotna snaga kotla. U tom režimu kod protoka vazduha za sagorevanje od 360 m³ h⁻¹ i 430 m³ h⁻¹ toplotna snaga kotla je bila veća od nominalno deklarisanе snage kotla. U režimu sa ulaznim protokom vazduha za sagorevanje od 290 m³ h⁻¹ toplotna snaga kotla bila je jednaka nominalnoj snazi od 120 kW. Uvođenjem recikulisanih dimnih gasova u vazduh za sagorevanje sa udelom od 16,5% povećava se vreme sagorevanja bala slame i smanjuje prosečna toplotna snaga kotla u svim režimima, osim u režimu sa ulaznim protokom vazduha za sagorevanje od 220 m³ h⁻¹.

Ključne reči: kotao, toplotna snaga, sagorevanje sojine slame

1. UVOD

Korišćenje biomase kao energenta u Srbiji nije novost. U Vojvodini, se najčešće za produkciju energije koriste balirani biljni ostaci ratarske proizvodnje, kao što su: slama pšenice, ječma i soje ili kukurozovine (Brkić i sar., 2012).

Balirana biomasa se u Srbiji uglavnom sagoreva u toplovodnim kotlovima, pri čemu su kao najbrojniji i najrasprostranjeniji posebno interesantni kotlovi toplotnih snaga od 50 do 120 kW sa ravnim nepokretnim rešetkama za sagorevanje (Janić i sar., 2010).

Unapređenje konstrukcije i tehnologije rada toplovodnih kotlova sa ravnom nepokretnom rešetkom toplotnih snaga do 120 kW je od suštinske važnosti, pošto je u

njihovom radu izraženo mnogo problema od kojih se u najkraćem mogu navesti: velika variranja u intenzitetu produkovane toplotne snage, česta termička preopterećenja ložišnog prostora, nagla pothlađivanja ložišta (prilikom ubacivanja bala biomase), emisije dimnih gasova sa velikim sadržajem nesagorelih jedinjenja (CO , H_2 , CH_4 i dr) koji povremeno imaju visoke temperature (i preko 650°C), posebno kada se želi postići što veća izlazna toplotna snaga kotlovskog postrojenja. Pored navedenog poseban problem pri radu kotlovskih postrojenja u kojima se sagoreva biomasa nastala u procesima poljoprivredne proizvodnje predstavlja topljenje pepela na relativno nižim temperaturama (Repić, 2008), što dovodi do začepljavanja otvora za dovodjenje primarnog vazduha i samim tim do nepotpunog ili čak nemogućeg sagorevanja biomase (Turanjanin i sar, 2010).

Svesni toga da će se u Srbiji još dugi niz godina i dalje koristiti kotlovska postrojenja sa ravnom nepokretnom rešetkom snaga do 120 kW izvršena su ispitivanja sa ciljem da se u što većoj meri utvrde zavisnosti i međuzavisnosti uticajnih faktora na proces sagorevanja balirane sojine slame i donesu zaključci kojim bi se unapredio rad navedenih postrojenja.

Istraživanja u ovom radu su usmerena na definisanje korelacije između izlazne toplotne snage i količine i sastava vazduha za sagorevanje balirane sojine slame kod njihovog sagorevanja u toplovodnom kotlovskom postrojenju sa ravnom, nepokretnom i vodom hlađenom rešetkom.

Dobijeni rezultati se mogu koristiti za poboljšanje tehnologije rada kotlovskog postrojenja (načina i dinamike loženja i dodavanja vazduha za sagorevanje), uvođenje automatizacije u radu takvih postrojenja i poboljšanje njihovih konstrukcionih rešenja.

2. MATERIJAL I METOD RADA

Kao materijal u radu odabrane su male četvrtaste bale sojine slame, za koje je poznato da u fizičko-hemijskom pogledu zadovoljavaju većinu zahteva da bi se primenjivale kao biogorivo. Slama je na istoj parceli balirana odmah posle žetve i na njivi je izabrano 250 bala indentičnih dimenzija i mase, a samim tim i stepena sabijenosti, tj. gustine (Igić, 2008). Prosečne karakteristike bala su sledeće: dimenzije bala $0,35 \times 0,5 \times 0,8$ m, masa bala 11 kg, gustina bala $78,57 \text{ kg/m}^3$. Donja toplotna moć slame je iznosila $14,029 \text{ kJ/kg}$, a sadržaj volatila $71,73\%$.

Navedeni pokazatelji su određivani u Laboratoriji za termotehniku i procesnu tehniku na Poljoprivrednom fakultetu u Novom Sadu, Laboratoriji Naučnog instituta za ratarstvo i povrtarstvo iz Novog Sada i laboratoriji Termoelektrane-toplane Novi Sad.

Ispitivanje uticaja količine i sastava vazduha za sagorevanje na izlazne toplotne snage kotla je vršeno na ručno loženom toplovodnom kotlu nominalne snage od 120 kW (sl. 1). Kotao je kutijasti, izrađen od kotlovskog lima (bez šamotnog ozida) koji je obložen sa termo izolacijom debljine od 50 mm. Posmatrano po vertikalni kotao ima četiri funkcionalne celine koje se međusobno nadovezuju i to: pepeljaru, ložište, komoru za sekundarno sagorevanje (volatila) i dimne cevi za konvektivnu razmenu toplote između dimnih produkata sagorevanja i vodenog plašta kotla.

Na slici 2 prikazan je presek kotla zajedno sa najvažnijom merno-regulacionom opremom sa kojom su vršeni eksperimenti.

Eksploatacija kotla se zasniva na ručnom ubacivanju bala biomase ili nekog drugog čvrstog goriva u kotao sa učestalošću kojom bi se obezbedila željena temperatura u grejnom sistemu (do 110oC). Kotao je predviđen da radi u sistemu prirodne promaje ili da se vazduh za sagorevanje ubacuje ventilatorom kroz dovodnu perforiranu cev koja prolazi kroz vrata pepeljare i nalazi se ispod rešetke za sagorevanje, kao što je u ovim ispitivanjima i urađeno.

Navedena konstrukcija kotla je predviđena da se u njoj sagorevaju male četvrtaste bale biomase, preporučene vlažnosti do 25%.

Sl 1. Toplovodni kotao proizvođača “Eko produkt” iz Novog Sada u vremenu ispitivanja sa prikazom funkcionalnih celina: pepeljara, ložište, komora za dodatno sagorevanje i dimne cevi

Fig 1. The hot water boiler of manufacturer "Ekoprodukt" from Novi Sad at the time of research with functional parts: ashtray, furnace, secondary combustion chamber and the flue gas tube

Prilikom sagorevanja bala biomase postoji više faktora koji određuju mogućnost postizanja željene izlazne termičke snage kotla. Jedan od najvećih problema u istraživanju predstavljala je činjenica da se bale u kotlu sagorevaju šaržno, što uslovljava čitav niz negativnosti, kao što su: neravnomerno sagorevanje, različita potreba za količinom vazduha za sagorevanje (koeficijentom viška vazduha), neravnomerno produkovanje toplotne snage, izuzetno neujednačen sastav dimnih produkata sagorevanja sa većim koncentracijama čađi, CO i drugih nesagorelih produkata i dr (Obaidullah i sar, 2012).

Zbog svega navedenog, a u želji da se eliminišu mnogi faktori koji bi doveli do pogrešnih zaključaka, eksperimenti u ovim istraživanjima su rađeni u pojedinačnom režimu u kojem su mnogi uticajni faktori eliminisani ili su održavani na konstantnom nivou.

U cilju utvrđivanja uticaja količine i sastava vazduha za sagorevanje na produkovanu toplotnu snagu kotlovskog postrojenja pored ostalog je mereno: protok, temperatura i pritisak vazduha za sagorevanje, temperatura izlaznih dimnih produkata sagorevanja i njihov sastav, protok i temperatura recirkulisanih gasova, kao i protok, temperatura i pritisak ulazne i izlazne vode grejnog sistema. Mesta za postavljanje mernih sondi su prikazana na slici 2.

Sl. 2: Kotlovsko postrojenje sa merno regulacionom opremom (1- ventilator vazduha za sagorevanje, 2- dovodna cev vazduha za sagorevanje, 3- toplovodni kotao, 4- dimnjača, 5- dimnjak, 6- cev za recirkulaciju dimnih produkata sagorevanja, 7- zaporni ventil za regulaciju udela recirkulišućih dimnih produkata sagorevanja, 8- merna blenda, 9- diferencijalni mikromanometar, 10- termometarska sonda, 11- merač pritiska, 12- ultrazvučni merač protoka, analizator dimnih produkata sagorevanja)

Fig. 2: Boiler plant with the measuring and regulation equipment (1– fan of air for combustion, 2- tube of air for combustion, 3- hot-water boiler, 4- chimneys, 5- chimney, 6- tube of racirculation flue gas, 7- valve of racirculation flue gas, 8- standard orifice flow meter, 9- differential pressure transmitters, 10- probe for temperature measuring, 11- sensor for pressure measuring, 12- ultrasonic water flowmeter, 13- flue gas analyzer)

Primenjeni naučni metod istraživanja se bazirao na naučnom metodu matematičko-statističke analize na osnovu kojeg je moguće utvrditi uticaj količine i sastava vazduha za sagorevanje na proces sagorevanja malih četvrtastih bala sojine slame (disperzionom analizom), analitički oblik tih uticaja (regresionom analizom), kao i značaj tih uticaja na posmatrani proces (koeficijentima korelacije i determinacije) (Janić, 2001).

U radu je predviđeno praćenje količine i sastava ulaznog vazduha za sagorevanje i stepena recirkulacije, kao veoma značajnih faktora koji utiču na proces sagoravanja balirane sojine slame, tj. produkovanu termičku snagu eksperimentalnog postrojenja. Ostali faktori, čiji je uticaj izražen u procesu sagorevanja su se održavali na konstantnom nivou.

Izabranom metodom istraživanja se u što većoj meri težilo simuliranju stvarnih, procesa sagorevanja da bi dobijeni rezultati imali što veću primenljivost u praksi.

Svesni ograničenih mogućnosti izbora faktora i opsega u kojima se mogu analizirati određeno je da se promena protoka vazduha za sagorevanje posmatra na 5 nivoa (150, 220, 290, 360 i 430 m³ h⁻¹), a stepen recirkulacije dimnih produkata sagorevanja na 3 nivoa (0, 16,5 i 33%). Procentualni udeli dimnih produkata sagorevanja

se odnose na ukupnu zapreminu vazduha za sagorevanje (smeše okolnog vazduha i recirkulisanih dimnih gasova).

Prema planu istraživanja eksperimenti su izvođeni u minimalno tri ponavljanja. Nakon ubacivanja nove bale slame uključivan je sistem za automatsko prikupljanje podataka sa postavljenih son-di. Svi podaci su beleženi svakih 5 sekundi.

Prikupljeni podaci su odmah prikazivani dijagramski i u slučaju većeg odstupanja eksperimenti su izvođeni i veći broj puta, dok se nisu dobili rezultati sa čijim su se prosečnim vrednostima dalje vršile disperzione i regresione analize.

Merenja su vršena u saglasnosti sa standardima SRPS EN 303-5:2007 i DIN 4702 prema kojima se određuje toplotna snaga kotlova, tj. određen je protok vode kroz kotao sa njenim ulaznim i izlaznim temperaturama. Izlazna toplotna snaga kotla je izračunavana na osnovu jednačine 1:

$$P = \dot{m}_w c_p (t_{ow} - t_{iw}) \quad (1)$$

gde je: P – toplotna snaga kotla [kW], $\dot{m}_w$ - maseni protok vode kroz kotao [kg s⁻¹], c_p - specifična toplota vode [kJ kg⁻¹ K⁻¹], t_{ow} - temperatura vode na izlazu iz kotla [K] i t_{iw} - temperatura vode na ulazu u kotao [K].

Iako recirkulacija gasova nije predviđena u osnovnoj konstrukciji kotlovskog postrojenja u radu se pored uobičajenog rada kotla pokušao sagledati i njegov rad kada se sa vazduhom za sagorevanje ubacuje i deo recirkulisanih gasova. Takav način rada je interesantan sa više aspekata, kao što su: predgrevanje vazduha za sagorevanje, snižavanje temperature sagorevanja, smanjenje emisije NO_x, ali je osnovna hipoteza za ispitivanje bila da se sa uvođenjem recirkulisanih gasova u proces sagorevanja može uticati na izlaznu termičku snagu kotlovskog postrojenja i njegovu efikasnost rada.

Eksperimentalni podaci su obrađeni analizom nelinearne regresije (softverskim paketima: mathematica 6 i statistika 10).

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

U radu su izmerene prosečne vrednosti ukupnog vremena za sagorevanje bala sojine slame, kao i prosečne izlazne snage kotla tokom celog vremena sagorevanja, što je prikazano u tabeli 1.

Opšte konstatacije koje se mogu izneti na osnovu prikazanih podataka iz tabele 1 su sledeće: u režimu bez recirkulacije dimnih gasova u vazduh za sagorevanje sojine slame povećanjem protoka ulaznog vazduha za sagorevanje u ložište smanjuje se vreme sagorevanje bala i povećava toplotna snaga kotla. U tom režimu kod protoka vazduha za sagorevanje od 360 m³ h⁻¹ i 430 m³ h⁻¹ toplotna snaga kotla je bila veća od nominalno deklarisanе snage kotla. U režimu sa ulaznim protokom vazduha za sagorevanje od 290 m³ h⁻¹ toplotna snaga kotla bila je jednaka nominalnoj snazi od 120 kW. Uvođenjem recirkulisanih dimnih gasova u vazduh za sagorevanje sa udelom od 16,5% povećava se vreme sagorevanja bala slame i smanjuje prosečna toplotna snaga kotla u svim režimima, osim u režimu sa ulaznim protokom vazduha od 220 m³ h⁻¹.

Tab. 1: Izmerene vrednosti vremena za sagorevanje bala i prosečne toplotne snage

Tab. 1: Values of the measured bale burn out time and average boiler thermal power

	Stepen recirkulacije Degree of recirculation	Radni režimo kotla [m ³ h ⁻¹] Boiler operating regime [m ³ h ⁻¹]				
		150	220	290	360	430
Prosečno vreme ukupnog sagorevanja bala (s) Average time when bale totally burnt (s)	0%	1258	713	670	453	400
	16.0%	1335	642	763	532	427
	33%	943	667	587	480	348
Prosečna toplotna snaga kotla (kW) Average boiler thermal power (kW)	0%	75,66	92,24	113,12	96,63	112,94
	16.0%	69,33	85,06	88,98	97,72	111,21
	33%	72,32	77,48	95,01	97,49	114,94

Pored opštih konstatacija tokom izrade ovog rada definisan je i matematički oblik korelacije između toplotne snage kotla i definisanih režima rada kotlovskog postrojenja koji su se uspostavljali različitim protocima vazduha za sagorevanje i udelom recikulisanih dimnih produkata sagorevanja u tom vazduhu. Za različite režime rada kotlovskog postrojenja, a na osnovu detaljne analize prikupljenih podataka formulisani su matematički modeli uzajamnih zavisnosti i međuzavisnosti koji su prikazani u jednačini 2:

$$P(\tau, \tau_{kr}, \dot{v}) = b_1 + b_2 \dot{v} \exp\left(-\left(b_3 \frac{(\tau - b_4)}{t_{kr}}\right)^2\right) + b_5 \dot{v} \sin\left(b_6 \frac{(\tau - b_7)}{t_{kr}}\right) \quad 2)$$

gde su: $b_1, b_2, \dots, b_7$ - regresioni koeficijenti prikazani u tabelama 2, 3 i 4, τ - vreme sagorevanja bala u ložištu [s], P - toplotna snaga kotla [kW], $\dot{v}$ - zapreminski protok vazduha [m³ h⁻¹] i τ_{kr} - vreme kada je bala u potpunosti sagorela [h].

Tab. 2: Određivanje empirijskih regresionih koeficijenata i analiza varijanse jednačine (2), bez recirkulacije

Tab. 2: Estimation of empirical regression coefficients and analysis of variance of equation (2), no recirculation P

Nivo poverenja: 95%, Koeficijent determinacije: R ² = 90,58% Level of confidence: 95%, Determination coefficient: R ² = 90,58%							
	Ocena Estimate	Standardna greška Standard error	t-test t-test	Interval poverenja Confidence interval		Suma kvadrata Sum of squares	F - test F - test
b1*	44,7503	0,8204	54,55	(43,139, 46,362)	Regresija Regression	5,671,081	
b2*	0,3392	0,0058	58,09	(0,328, 0,351)	Ostatak Residual	14,846	31,707
b3*	-2,3073	0,0405	- 57,02	(-2,387, -2,228)	Ukupno Total	5,685,926	
b4*	264,8410	4,3550	60,81	(256,286, 273,394)			
b5*	0,1272	0,0037	34,11	(0,120 , 0,135)			
b6*	3,7176	0,0908	40,96	(3,539, 3,896)			
b7*	411,0314	9,0842	45,24	(393,190, 428,873)			

* regresioni koeficijenti za prag značajnosti od P<0,05

* significant coefficients at significance level of P<0,05

Tab. 3: Određivanje empirijskih regresionih koeficijenata i analiza varijanse jednačine (2), sa recirkulacijom od 16,5%

Tab. 3: Estimation of empirical regression coefficients and analysis of variance of equation (2), recirculation 16,5%

Nivo poverenja: 95%, Koeficijent determinacije: R ² = 89,02% Level of confidence: 95%, Determination coefficient: R ² = 89,02%							
	Ocena Estimate	Standardna greška Standard error	t-test t-test	Interval poverenja Confidence interval		Suma kvadrata Sum of squares	F - test F - test
b1*	46,4998	0,7769	59,85	(44,975, 48,025)	Regresija Regression	5,344,348	
b2*	0,2664	0,0048	55,42	(0,257, 0,276)	Ostatak Residual	25,052	21,333
b3*	2,2642	0,0673	33,64	(2,132, 2,396)	Ukupno Total	5,369,400	
b4*	369,1090	3,5189	104,89	(362,200, 376,018)			
b5*	0,0771	0,0028	27,23	(0,0715, 0,0826)			
b6*	3,5358	0,1644	21,51	(3,2130, 3,8586)			
b7*	624,9482	14,3991	43,40	(596,678, 653,219)			

* regresioni koeficijenti za prag značajnosti od P<0,05

* significant coefficients at significance level of P<0,05

Na osnovu prezentovanih podataka može se konstatovati da se u radu kotlovskog postrojenja bez recirkulacije i sa recirkulacijom od 16,5% u režimima rada sa 220 and 290 m³ h⁻¹ ukupno vreme sagorevanja bala je za 50%, odnosno 100% duže nego u režimima od 360 do 430 m³ h⁻¹.

Tab. 4: Određivanje empirijskih regresionih koeficijenata i analiza varijanse jednačine (2), sa recirkulacijom od 33%

Tab. 4: Estimation of empirical regression coefficients and analysis of variance of equation (2), recirculation 33%

Nivo poverenja: 95%, Koeficijent determinacije: R ² = 88,75% Level of confidence: 95%, Determination coefficient: R ² = 88,75%							
	Ocena Estimate	Standardna greška Standard error	t-test t-test	Interval poverenja Confidence interval		Suma kvadrata Sum of squares	F - test F - test
b1*	47,2398	0,7830	60,33	(45,701, 48,778)	Regresija Regression	4,201,967	
b2*	-0,0575	0,0039	- 14,68	(-0,0652, -0,050)	Ostatak Residual	21,620	13,978
b3*	-4,0827	0,3235	- 12,62	(-4,718, -3,447)	Ukupno Total	4,223,588	
b4*	179,1803	5,3252	33,65	(168,718, 189,643)			
b5*	0,2129	0,0049	43,29	(0,203, 0,223)			
b6*	2,0180	0,0399	50,60	(1,940, 2,096)			
b7*	-77,9528	6,1746	- 12,62	(-90,084, -65,822)			

* regresioni koeficijenti za prag značajnosti od P<0,05; * significant coefficients at significance level of P<0,05

Eksperimentalni podaci i empirijska korelacija prikazana jednačinom 2 za termičku snagu kotla u odnosu na ukupno vreme sagorevanja bala sojine slame bez recirkulacije dimnih produkata sagorevanja su predstavljeni na slikama 3 i 4. Bez recirkulacije dimnih produkata sagorevanja tri operativna režima rada se mogu smatrati optimalnim i to od 220, 290 i 360 m³ h⁻¹. Pri radnom režimu od 220 m³ h⁻¹, maksimalna toplotna snaga kotla iznosi 108,12 kW sa τ_{kr} = 713 s. Pri radnom režimu od 290 m³ h⁻¹, maksimalna toplotna snaga kotla iznosi 120,02 kW i τ_{kr} = 670 s, a u režimu od 360 m³ h⁻¹ maksimalna toplotna snaga kotla iznosi 126,42 kW i τ_{kr} = 573. Daljim povećanjem zapreminskog protoka vazduha za sagorevanje, povećava se i maksimalna toplotna snaga kotla, smanjuje se vreme sagorevanja bala, ali se smanjuje efikasnost rada kotla.

Sl. 3. Korelacija između toplotne snage kotla i vremena sagorevanja bala slame, recirkulacija 0%

Fig. 1. Correlation between boiler thermal power and bale residence time, experimental data, recirculation 0%

Sl. 4. Korelacija između toplotne snage kotla i vremena sagorevanja bala slame, model (2), recirkulacija 0%

Fig. 2. Correlation between boiler thermal power and bale residence time, model (2), recirculation 0%

Sl. 5. Korelacija između toplotne snage kotla i vremena sagorevanja bala slame, recirkulacija 16,5%

Fig. 5: Correlation between boiler thermal power and bale residence time, experimental data, recirculation 16.5%

Sl. 6. Korelacija između toplotne snage kotla i vremena sagorevanja bala slame, model (2), recirkulacija 16,5%

Fig. 6: Correlation between boiler thermal power and bale residence time, model (2), recirculation 16.5%

Eksperimentalni podaci i empirijska korelacija prema jednačini 2 za režime sa 16,5% i 33% recirkulacije dimnih produkata sagorevanja se može videti na slikama 5, 6, 7 i 8. Ako se koristi dimnih gasova od 16,5% (ili 33%), ukupno vreme sagorevanja bala je duže, ali je prosečna toplotna snaga kotla manja u odnosu na režime sa nultom recirkulacijom dimnih produkata sagorevanja.

Sl. 7. Korelacija između toplotne snage kotla i vremena sagorevanja bala slame, recirkulacija 33%

Fig. 7: Correlation between boiler thermal power and bale residence time, experimental data, recirculation 33%

Sl. 8. Korelacija između toplotne snage kotla i vremena sagorevanja bala slame, model (2), recirkulacija 33%

Fig. 8: Correlation between boiler thermal power and bale residence time, model (2), recirculation 33%

Da bi se utvrdila usklađenost između analiziranih režima rada i nominalne snage kotla, potrebno je saznati u koje vreme, počev od trenutka sagorevanja bale slame se postiže maksimalna toplotna snaga kotla. Vrednosti postignutih maksimalnih toplotnih snaga kotla i potrebno vreme da se ona realizuje je prikazano u tab. 5 za sve ispitivane režime rada.

Tab. 5: Vreme postizanja maksomalne toplotne snage kotla

Tab. 5: Time of reaching the maximum boiler thermal power

	Stepen recirkulacije Degree of recirculation	Operativni režimi rada kotla [m3 h ⁻¹] Boiler operating regime [m3 h ⁻¹]				
		150	220	290	360	430
Vreme potrebno da se realizuje max. toplotna snaga τ (s) Time necessary to reach max. power τ (s)	0%	435	415	520	385	325
	16,5%	880	630	485	505	375
	33%	840	465	505	465	275
Max. toplotna snaga Pmax (kW) Max. thermal power Pmax (kW)	0%	94,05	108,12	120,02	126,42	138,61
	16,5%	74,57	78,55	103,24	101,91	127,01
	33%	71,66	98,56	110,49	116,28	122,56

Iz navedenih podataka se može videti da kotao dostiže maksimalnu toplotnu snagu u prvoj polovini vremenskog perioda neophodnog za ukupno sagorevanje bala. U režima sa zapreminskim protokom vazduha od 150 i 220 m³ h⁻¹ i sa 0% recirkulacije maksimalna toplotna snaga kotla je manja od nominalne (120 kW). U režimu sa zapreminskim protokom vazduha za sagorevanje od 290 m³ h⁻¹ maksimalna toplotna snaga kotla je

identična sa nominalno deklarisanom snagom od 120 kW. U režimu od 360 i 430 m³ h⁻¹, maksimalna toplotna snaga kotla je veća od nominalne.

U režimima rada sa niskim zapreminskim protocima vazduha za sagorevanje, primena režima sa recirkulacijom uslovljava lošije uslove za sagorevanje bala soje slame, što dovodi do umanjjenja toplotne snage kotla. Recirkulacija dimnih produkata sagorevanja od 16,5%, za veće brzine strujanja vazduha ima pozitivan uticaj na uslove sagorevanja bala slame. Povoljni uslovi za sagorevanje omogućavaju veću maksimalnu termičku snagu kotla i veću efikasnost kotla u odnosu na slučaj kada nema recirkulacije dimnih produkata sagorevanja. Režimi sa visokim stepenom recirkulacije (od 33%), nisu dali pozitivne rezultate, kao što se i očekivalo. Za ovaj nivo recirkulacije se dobijaju bolji parametri sagorevanja bala pri većim protocima vazduha. Generalno, može se konstatovati da recirkulacija od 33% nije adekvatna i treba je izbegavati.

4. ZAKLJUČAK

Rezultati dobijeni tokom ispitivanja produkcije toplotnih snaga kotla u zavisnosti od režima rada, tj. zapreminskih protoka vazduha za sagorevanje i udela recirkulisanih dimnih produkata sagorevanja u tom vazduhu tokom realnih uslova eksploatacije kotla pokazuju da se optimalni operativni režimi rada kotla postižu kada protok vazduha za sagorevanje kroz ložište kotla dostigne vrednost od 220 i 290 m³ h⁻¹, respektivno i sa nultom recirkulacijom. Stepem recirkulacije dimnih produkata sagorevanja od 33% pogoršava radne karakteristike kotla.

Prosečna toplotna snaga kotla se kreće u granicama između 75,66 i 113,12 kW, bez recirkulacije dimnih produkata sagorevanja. Toplotna snaga kotla za stepen recirkulacije od 16,5% se kreće između 69,33 i 111,21 kW i od 72,32 do 114,94 kW sa 33% recirkulacije.

Predstavljena empirijska korelaciona jednačina se može smatrati ispravnom za navedene uslove pod kojima su izvršeni eksperimenti. Analitički pristup u iznalaženju i primeni empirijske korelacione jednačine se može koristiti u različite svrhe inženjeringa. Osim što daje osnovne informacije o načinu sagorevanja malih prizmatičnih bala sojine slame može se koristiti za određivanje energetske efikasnosti sličnih kotlova u realnim radnim uslovima. Takođe, rezultati se mogu primeniti tokom projektovanja novih sličnih kotlova, kao i za rekonstrukciju i za automatizaciju postojećih kotlovskih postrojenja.

5. LITERATURA

- [1] Brkić M, Janić T, Igić S. 2012. Assessment of species and quantity of biomass in serbia and guidelines of usage, *Thermal Science*, 16(1): 79-86
- [2] Igić S. 2008. Uticaj vrste i stanja balirane slame te količine i sastava ulaznog vazduha na efikasnost kotlovskog postrojenja, doktorska teza, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 243
- [3] Janić T. 2001. Kinetika sagorevanja balirane pšenične slame, doktorska disertacija, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 126
- [4] Janić T, Brkić M, Igić S, Dedović N. 2010. Biomasa – energetski resurs za budućnost, *Savremena poljoprivredna tehnika* 36(2): 167-177,

[5] Obaidullah M, Bram S, Verma V, K, De Ruyck J, A. 2012. Review on Particle Emissions from Small Scale Biomass Combustion, International Journal of Renewable Energy Research- IJRRER, 2(1): 147-159

[6] Repić B, Dakić D, Paprika M, Mladenović R, Erić A. 2008. Soya straw bales combustion in high-efficient boiler, Thermal Science, 12(4): 51-60

[7] Turanjanin V, Đurović D, Dakić D, Erić A, Repić B. 2010. Development of the boiler for combustion of agricultural biomass by products, Thermal Science, 14(3), 707-714

THERMAL POWER OF SMALL SCALE MANUALLY FED BOILER

Janić T.¹, Igić S.², Dedović N.¹, Janić V.³

¹ University of Novi Sad, Faculty of agriculture, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 8, Serbia

² Faculty of Economics and Engineering Management, Novi Sad, Cvećarska 2, Serbia

³ Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, Serbia

e-mail: jtodor@polj.uns.ac.rs

SUMMARY

This study reviews test results of the combustion of prismatic soybean straw bales used as fuel in manually fed boiler with nominal thermal power of 120 kW. The influence of the of the volume flow rate (150, 220, 290, 360 and 430 m³ h⁻¹) of the inlet air and share of the flue gas recirculation (0%, 16.5% and 33%) fed to the boiler furnace was continuously monitored. Direct method was used for determination of the boiler thermal power.

Correlation between boiler thermal power and bale residence time was developed and simple empirical correlation has been derived. General conclusions are as follows: the increase of the flow rate of inlet air fed to the boiler furnace has as a consequence decrease of the bale burning time and increase of the boiler thermal power. Share of the flue gas recirculation of 16.5% increases bale residence time and decreases average boiler thermal power in all regimes except in the regime with inlet air flow rate of 220 m³ h⁻¹. In regime with 0% flue gas recirculation boiler thermal power was greater than nominal in regimes with 360 and 430 m³ h⁻¹ inlet air flow rates. In regimes having inlet air mass flow rate of 290 m³ h⁻¹ boiler thermal power is equal to the nominal power of 120 kW.

Key words: boiler, thermal power, soybean straw combustion

Napomena: Rad predstavlja deo istraživanja na projektu III 42011 „Razvoj i unapređenje tehnologija za energetske efikasno korišćenje više formi poljoprivredne i šumske biomase na ekološki prihvatljiv način, uz mogućnost kogeneracije“, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Srbije.

Primljeno: 17. 12. 2016. god.

Prihvaćeno: 18. 12. 2016. god.