Biblid: 0350-2953 (2018) 44(1): 1-10
UDK: 697:662.6/9; 62-97

Originalni naučni rad
Original scientific paper

ANALIZA KRITERIJUMA ZA PROCENU FORMIRANJA NASLAGA NA KOTLOVSKIM GREJNIM POVRŠINAMA PRI SAGOREVANJU BIOMASE

ANALYSIS CRITERIA FOR THE ASSESSMENT OF DEPOSITS FORMATION ON BOILERS HEAT SURFACES DURING BIOMASS COMBUSTION

Mladenović Milica, Repić Branislav, Paprika Milijana, Marinković Ana

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča"

Laboratorija za termotehniku i energetiku, 11351 Beograd, Mike Petrovića Alasa 12-14

e-mail: mica@vinca.rs

SAŽETAK

Sagorevanje goriva u kotlovskim ložištima dovodi do stvaranja naslaga na ozračenim i konvektivnim kotlovskim grejnim površinama. Ovo nije nov problem, ali je postao jedan od glavnih operativnih problema u kotlovima koji koriste ugljeve lošeg kvaliteta i neke vrste biomasa, posebno poljoprivredne. U radu su prikazani rezultati analize kriterijuma za procenu formiranja naslaga na kotlovskim grejnim površinama u slučaju sagorevanja biomase. Takođe, razmatrani su problemi uzrokovani pepelom tokom sagorevanja biomase u kotlovskom ložištu. Testirane su ključne empirijske korelacije za lepljenje i zaprljanje u slučaju sagorevanja uglja ili biomase dobijene na osnovu ispitivanja različitih vrsta goriva u laboratorijskim i realnim ložišnim uslovima. Analiza je pokazala da mnoge vrste agro biomase kao i Kosovski lignit imaju veliku sklonost ka lepljenju i zaprljanju što potvrđuju indikatori bazirani na hemijskom sastavu pepela goriva i temperaturama topivosti pepela.

Ključne reči: Kotao, biomasa, sagorevanje, lepljenje, zaprljanje, indikator.

1. UVOD

Korišćenje biomase za proizvodnju toplotne i električne energije može postati značajno za Srbiju jer biomasa predstavlja jedan od najvažnijih obnovljivih izvora energije (Repić i dr. 2018). Na proces termalnog iskorišćenja čvrstih biogoriva utiče vrsta biogoriva koje se koristi, njegove fizičke karakteristike (veličina čestica, gustina, vlažnost, kalorična vrednost) i hemijski sastav. Zahvaljujući dosadašnjim istraživanjima tehnologija sagorevanja biomase je dostigla visok nivo razvoja ali i konkretnu praktičnu primenu. Mada su na početku primene biomase građena postrojenja male toplotne snage koja su služila samo za proizvodnju toplotne energije, daljim razvojem i usavršavanjem tehnologija sada se došlo do izgradnje velikih energetske objekata koja proizvode toplotnu i električnu energiju tzv. CHP postrojenja. I pojedini blokovi postojećih termoenergetskih postrojenja koja su koristila ugalj kao energent prevode se na korišćenje biomase.

Međutim, nedostatak korišćenja ove vrste goriva su tehnički problemi koji su u vezi sa lepljenjem pepela i formiranjem naslaga pepela na ozračenim i konvektivnim

grejnim površinama kotlovskih ložišta u toku procesa sagorevanja čime se ograničava primena biomase kao goriva (Oberberger, 1998). Različite vrste poljoprivredne biomase sadrže najvećim delom slične koncentracije C, H i O, ali pokazuju značajne razlike u koncentracijama osnovnih komponenti pepela (Si, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, Al, Fe, Mn), u koncentracijama teških metala (Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V, Hg) i koncentraciji N. Maseni procenti na suhu osnovu za C, H i O kreću se od 30 do 60%, 5 do 6% i 30 do 45% respektivno. Međutim, N, S i Cl mogu da se nađu u količinama koje su manje od 1% suve materije (Oberberger, 1998).

Kada se poredi sa ugljem, biomasa generalno posmatrano, ima manje C, više O, Cl, K i Ca, a manje Al i S. Ovi neorganski elementi utiču na procese sagorevanja biomase kao i na topivost pepela biomase, a samim tim i na korozione procese i procese lepljenje pepela na zidovima ložišta i kotlovskim grejnim površinama. Stoga je veoma važno da se znaju količine neorganskih elemenata u različitim biogorivima i reakcije i efekti koje oni prouzrokuju tokom sagorevanja, kako bi se pravilno projektovala postrojenja za sagorevanje tih vrsta goriva. Pored toga ti podaci bi se koristili za procenu sklonosti tih goriva ka lepljenju njihovih pepela i na osnovu toga predvideli odgovarajući sistemi za održavanje kotlovskih grejnih površina u čistom stanju.

2. MATERIJAL I METOD

Praktično korišćenje biomase, kao i u slučaju domaćih lignita, uslovljeno je problemom pepela koji je naročito izražen na pojedinim delovima postrojenja. Ovaj problem u velikoj meri opredeljuje mogućnost racionalnog korišćenja biomase u energetske svrhe.

Većina kotlova na poljoprivrednu biomasu u eksploataciji susreće se sa problemom stvaranja naslaga na ekranskim, pregrejačkim i konvektivnim grejnim površinama kotla. Priroda nastanka ovih naslaga je različita što povlači i njihove različite osobine u pogledu mehaničke čvrstoće, sastava, brzine rasta i sl., ali i u pogledu mogućnosti njihovog uklanjanja sa grejnih površina (Radojević i dr. 2010).

Posledice naslaga po rad kotla mogu biti veoma značajne (Repić, 1979). Naime, naslage na grejnim površinama imaju veliki toplotni otpor čime se snižava prenos toplote sa gasa na radni fluid. Ovo može uzrokovati predimenzionisanje grejnih površina, povećanu potrošnju goriva zbog povišenja temperature izlaznih gasova. Kada naslage narastu iznad određenih granica dolazi do nedostatka promaje, povećanja izlaznih ložišnih gubitaka, visoko i nisko temperaturske korozije čime se oštećuje materijal cevi i dr. Narasle naslage zahtevaju zaustavljanje rada kotla i njegovo čišćenje. Ponovno puštanje u rad kotla dovodi do dodatnog naprezanja metalnih elemenata i smanjenje veka trajanja postrojenja.

Zbog velikog broja fizičko-hemijskih faktora koji uzrokuju stvaranje naslaga one se mogu razvrstati po nekoliko osnova (Repić, 1979):

- a) Po mestu nastanka na cevi: čeone, temene, bočne;
- b) Prema karakteru veze čestica: čvrste, rastresite i rastopljene;
- v) Prema mestu nastanka: sa ekranskih, pregrejačkih i konvektivnih grejnih površina;
- g) Prema temperaturskoj zoni obrazovanja: visoko i nisko temperaturske naslage;
- d) Prema hemijskom sastavu: alkalne, sulfatne, fosfatne, aluminosilikatne i dr.

Istraživanja koja su vršena kod nas, na eksperimentalnim aparaturama i u realnim ložišnim uslovima, imala su za cilj utvrđivanje sklonosti različitih domaćih ugljeva ka formiranju naslaga na grejnim površinama. Na bazi tih istraživanja definisani su određeni kriterijumi koji su to praktično potvrđivali (Repić, 1979, Mladenović, 2005).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Postoje brojne empirijske korelacije za procenu ponašanja pepela i njihov mogući efekat na formiranje naslaga, kako na zidovima ložišta – lepljenje, tako i na konvektivnim grejnim površinama - zaprljanje (Werther et al. 2000, Vamvuka and Zografos, 2004, Maraver et al. 2017). Na osnovu obimne baze podataka sakupljene za domaće ugljeve i korelativne analize postojećih polu-empirijskih kriterijuma razvijeni su pokazatelji (indikatori) tendencije pepela goriva za stvaranje naslaga na grejnim površinama. Ključne empirijske korelacije razvijene kod nas su (Repić, 1979, Mladenović, 2005, Mladenović et al. 2009):

a) Interval između početne deformacije (t_1) i temperature topljenja pepela (t_4). Ako je interval mali, tanak, tečni sloj šljake biće formiran na zidovima ložišta i njega je izuzetno teško kontrolisati pomoću duvača čađi. U suprotnom, s porastom intervala, veza između cevi i naslaga postaje slabija i naslage se lako mogu ukloniti pomoću duvača čađi.

b) Indikatori za lepljenje i zaprljanje na osnovu sastava pepela. Ovi indikatori (Tabela 1) mogu se definisati kao (Repić, 1979, Pronobis, 2005, Mladenović, 2005, Mladenović et al. 2009, Maraver et al. 2017):

Bazni broj (%): $B = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$

Kiselinski broj (%): $A = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$

Odnos baza i kiselina (-): B/A

Pojednostavljeni odnos baza i kiselina (-): $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$

Indeks topivosti (-): $It = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$

Silikatna vrednost (%): $So = \text{SiO}_2 \cdot 100 / (\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})$ za pepele goriva koji sadrže $\text{Na}_2\text{O} \leq 2.5\%$ ili $\text{CaO} \leq 7.5\%$.

Indeks aglomeracije fluidizovanog sloja: $BAI = \text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$.

Korelaciona analiza testiranih domaćih goriva dala je tačnu funkcionalnu zavisnost kriterijuma B, B/A, It i So (Repić, 1979, Mladenović et al. 2009). Granice za primenu ovih kriterijuma su u skladu sa time i stoga se bilo koji od ovih četiri kriterijuma može koristiti za procenu tendencije lepljenja pepela domaćih lignita (Tabela 1).

Tab. 1. Indikatori lepljenja bazirani na sastavu pepela (preporučene granice)

Tab. 1. Indicators for slagging based on ash composition (suggested limits)

Indikator Indicator	Jako lepljenje High slagging	Srednje lepljenje Medium slagging	Slabo lepljenje Low slagging
B (%)	34-67	17-34	<17 i/and > 67
B/A (-)	0.64-3.5	0.24-0.64	<0.24 i/and >3.5
It (-)	0.20-1.5	1.50-4.60	<0.2 i/and >4.6
So (%)	21-50	50-78	<21 i/and >78

Prema ASTM standardu (Winegartner, 1974), mogu se razlikovati dva različita tipa pepela:

a) Bituminozni tip pepela (pepeo sa kiselom reakcijom) kada je: $(\text{CaO}+\text{MgO}) < \text{Fe}_2\text{O}_3$ ili alternativno $\text{SiO}_2 > (\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ i

b) Tip lignitnog pepela (pepeo sa baznom reakcijom) kada je: $(\text{CaO}+\text{MgO}) > \text{Fe}_2\text{O}_3$ ili alternativno $\text{SiO}_2 < (\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$.

Indikatori za ocenu sklonosti pepela ka lepljenju na osnovu sastava pepela (Tabela 2) mogu se definisati kao (Mladenović et al. 2009, Winegartner, 1974):

(1) Sadržaj natrijuma u pepelu (%): Na_2O

(2) Ukupni sadržaj alkalnih sastojaka u pepelu (%): $\text{Na}_2\text{O}_\Sigma = \text{Na}_2\text{O} + 0.6589 \cdot \text{K}_2\text{O}$

(3) Ukupan sadržaj alkalnih sastojaka u gorivu (%): $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq u gorivu}} = (\text{Na}_2\text{O} + 0.6589 \cdot \text{K}_2\text{O}) \cdot \text{Pepeo} / 100$ (Primenjena: ugljevi sa bituminoznim pepelom)

(4) Faktor prljanja (%): $R_f = (\text{B}/\text{A}) \cdot \text{Na}_2\text{O}$ (Primenjena: ugljevi sa bituminoznim pepelom)

(5) Sadržaj hlora u uglju (%): Cl.

Kao odgovarajući kriterijum za procenu potencijala pepela goriva za lepljenje treba uzeti kriterijum "ukupan sadržaj alkalnih sastojaka u pepelu", jer uzima u obzir uticaj K_2O na proces lepljenja pepela.

Tab. 2. Indikatori zaprljanja bazirani na sastavu pepela

Tab. 2. Indicators for fouling based on ash composition

Indikator Indicator	Zaprljanje / fouling			
	Slabo Low	Srednje Medium	Jako High	Ozbiljno Severe
(1,2) Bituminozni pepeo/Bituminous ash	<2	2-6	6-8	>8
(1,2) Lignitni pepeo/Lignitic ash	<0.5	0.5-1	1-2.5	>2.5
(3)	<0.3	0.3-0.45	0.45-0.6	>0.6
(4)	<0.2	0.2-0.5	0.5-1	>1
(5)	<0.2	0.2-0.3	0.3-0.5	>0.5

Rezultati primene pokazatelja lepljenja i zaprljanja pepela za odgovarajući hemijski sastav pepela goriva - uglja i biomase (Tabela 3 i 4) ukazuju na sledeće. Kako su pokazatelji indikatora srpskih ugljeva dobijeni iz baze podataka u kojoj oko 88% čini ugalj lignit, njihova primena na pepele iz biomase, upoređenjem sa pepelom iz lignite, treba da potvrdi tendenciju i ovih goriva za stvaranje naslaga na kotlovskim grejnim površinama. Rezultati gore navedenih kriterijuma za procenu sklonosti pepela goriva na lepljenje i zaprljanje primenjeni su na dva laboratorijska pepela Kolubarskog i Kosovskog uglja i laboratorijske pepele 16 vrsta biomase (Repić, 1979, Jenkins et al.1998, Vamvuka and Zografos, 2004, Vassilev et al. 2010, Marinković i dr. 2013, Maraver et al. 2017).

Tab. 3. Hemijska analiza laboratorijskog pepela biomasa i ugljeva (suva osnova)

Tab. 3. Chemical analysis of biomass and coal laboratory ash (dry base)

Pepelo Ash type	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Mg O (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	Ash (%)
(1)	43,48	2,98	0,18	1,18	5,65	3,05	12,74	22,32	1,78	6,62	12,8
(2)	69,56	3,21	0,05	1,82	6,57	2,67	3,92	6,54	3,77	1,89	6,45
(3)	50,35	1,54	0,09	0,88	8,21	2,74	3,52	24,89	3,54	4,24	12,8
(4)	49,95	5,06	0,29	2,53	14,73	4,49	0,16	18,53	2,42	1,84	7,70
(5)	37,79	4,69	0,24	2,17	12,03	4,45	0,72	26,84	6,14	4,93	5,90
(6)	50,78	0,67	0,08	0,95	9,89	2,87	1,39	28,18	2,97	2,22	5,30
(7)	40,80	5,45	0,29	2,00	30,68	2,00	0,44	13,45	2,22	2,67	6,63
(8)	33,70	3,10	0,10	3,80	15,40	7,90	1,30	30,40	3,20	1,10	1,50
(9)	23,66	8,75	0,15	4,27	15,31	7,33	0,8	28,53	7,13	4,07	3,10
(10)	66,73	4,62	0,25	2,08	5,73	3,07	0,59	11,88	4,61	0,45	8,97
(11)	66,25	2,22	0,28	1,36	10,21	4,71	0,58	9,64	3,92	0,83	8,97
(12)	23,15	5,75	1,20	3,27	37,35	7,26	2,57	11,59	2,90	4,95	0,20
(13)	53,15	12,64	0,57	6,24	11,66	3,06	4,47	4,85	1,37	1,99	5,40
(14)	12,40	0,12	0,10	1,10	68,19	11,50	0,90	2,60	2,30	0,80	7,80
(15)	29,93	4,27	0,39	4,20	15,56	5,92	2,00	31,99	1,90	3,84	0,30
(16)	48,95	9,49	0,10	8,49	17,48	1,10	0,50	9,49	1,80	2,60	0,50
(17)	33,06	6,90	0,00	8,09	39,08	3,35	0,63	0,51	0,00	8,38	19,0
(18)	54,17	31,77	0,00	5,51	2,22	1,38	0,62	1,33	0,00	2,99	22,1

Legenda: (1) pšenična slama netretirana; (2) pšenična slama okvašena; (3) slama pšenice; (4) kukuruzna slama; (5) slama ovsa; (6) slama ječma; (7) slama uljane repice; (8) ljuska lešnika; (9) suncokretova ljuska; (10) otkos trave; (11) otkos trave; (12) drvo; (13) drveni ostatak; (14) bukova kora; (15) hrastova piljevina; (16) hrastovo drvo; (17) ugalj Kosovo; (18) ugalj Kolubara.

Legend: (1) wheat strow untreated; (2) wheat strow soaked; (3) wheat strow; (4) corn strow; (5) oat strow; (6) barley strow; (7) rape strow; (8) hazelnut shells; (9) sunflower husks; (10) switch grass; (11) switch grass; (12) wood; (13) wood residue; (14) beech bark; (15) oak sowdast; (16) oak wood; (17) Kosovo coal; (18) Kolubara coal.

Tab. 4. Hemijska analiza laboratorijskog pepela biomasa i ugljeva

Tab. 4. Chemical analysis of biomass and coal laboratory ash

Pepeo/Ash type	t ₁ (°C)	t ₂ (°C)	t ₃ (°C)	t ₄ (°C)	Cl (%)
(1)	760	800	1110	1290	0,36
(2)	860	1080	1160	1220	0,33
(3)	880	920	1100	1160	0,61
(4)	1010	1040	1075	1100	0,64
(5)	879	-	1080	1172	0,09
(6)	879	-	1080	1172	0,27
(7)	1100	1270	1400	1420	0,03
(8)	979	-	1242	1268	0,20
(9)	979	-	1242	1268	0,10
(10)	1126	-	1214	1221	0,08
(11)	1126	-	1214	1221	0,08
(12)	1329	-	1447	1458	0,01
(13)	1256	-	1402	1430	0,05
(14)	1329	-	1447	1458	-
(15)	979	-	1242	1268	0,01
(16)	1126	-	1214	1221	-
(17)	1050	1190	1200	1205	-
(18)	900	1435	1575	1590	-

Temperatura: t₁ - omekšavanja, t₂ - deformacije, t₃ - polulopte, t₄ – razlivanja (topljenja)

Temperature: t₁ – shrinkage starting, t₂ - deformation, t₃ - hemisphere, t₄ - melting

Na osnovu primenjenih indikatora može se zaključiti sledeće (Tabela 5):

a) Kolubarski ugalj (uzorak br. 18) ima bituminoznu vrstu pepela (B) i nema tendenciju lepljenja niti zaprljanja kotlovskih grejnih površina;

b) Kosovski ugalj (br. 17) ima lignitsku (L) vrstu pepela i pokazuje naglašenu tendenciju za lepljenje i zašljakivanje kotlovskih grejnih površina;

v) Sve ispitane biomase (od 1 do 16) imaju lignitsku (L) vrstu pepela;

g) Okvašena pšenična slama (br. 2), otkos trave (10 i 11) i ostaci od drveta (13) pokazuju umerenu tendenciju ka zaprljanju, dok je hrastovo drvo (16) na granici tendencije ka izraženom i umerenom zaprljanju;

d) Bukova kora (14) nema tendenciju ka zaprljanju;

đ) Sva druge vrste biomase pokazuje snažnu tendenciju ka lepljenju odn. zaprljanju;

e) Kako se pepeo biomase karakteriše visokim sadržajem K₂O, a kao što je po pravilu sa pepelom iz lignita, jedini kriterijum za procenu sklonosti ka lepljenju ovog tipa goriva je ukupan sadržaj alkala u pepelu biomase Na₂O_Σ. Uzimajući ovo u obzir, i kako je očekivano na osnovu gore navedenog, sva ispitivana biomasa ukazuje na ozbiljnu sklonost ka velikom zaprljanju konvektivnih grejnih površina kotlova.

Tab. 5. Procena sklonosti goriva ka lepljenju/zaprljanju
 Tab. 5. Assessment of the fuel slagging/fouling tendency

Gorivo	B	B/A	It	So	Pepeo	Na ₂ O	Na ₂ O _Σ	Na ₂ O _{eq}	R _f
Fuel	Lepljenje/Slagging			Ash		Zaprljanje/Fouling			
(1)	44,94	0,96	1,03	-	L	12,74	27,45	-	-
(2)	21,52	0,30	3,38	-	L	3,92	8,23	-	-
(3)	40,24	0,77	1,29	-	L	3,52	19,92	-	-
(4)	40,44	0,73	1,36		L	0,16	12,37	-	-
(5)	46,21	1,08	0,92		L	0,72	18,40	-	-
(6)	43,28	0,84	1,19	-	L	1,39	19,96	-	-
(7)	48,57	1,04	0,95	-	L	0,44	9,30	-	-
(8)	58,80	1,59	0,63	-	L	1,30	21,33	-	-
(9)	56,24	1,73	0,58	-	L	0,80	19,60		-
(10)	23,35	0,33	3,06	85,98	L	0,59	8,42	-	-
(11)	26,50	0,39	2,58	80,27	L	0,58	6,93	-	-
(12)	62,05	2,06	0,47	-	L	2,57	10,21	-	-
(13)	30,28	0,46	2,17	-	L	4,47	7,67	-	-
(14)	84,28	6,68	0,15	13,30	L	0,90	2,61	-	-
(15)	59,67	1,73	0,57	-	L	2,00	23,08	-	-
(16)	37,06	0,63	1,58	-	L	0,50	6,75	-	
(17)	51,67	1,29	0,77	-	L	0,63	0,97	-	-
(18)	11,06	0,13	7,77	85,60	B	0,62	1,50	0,33	0,08

Lepljenje/zaprljanje - slagging/fouling tendency: Tip pepela/Ash type:

	Slabo/Low	L – Lignitski/lignitic
	Srednje/Medium	B – Bituminozni/bituminous
	Jako/High	
	Ozbiljno/Severe	

4. ZAKLJUČAK

Sagorevanje različitih vrsta goriva, ugljeva i biomasa, u kotlovskim ložištima dovodi do obrazovanja naslaga na ozračenim i konvektivnim kotlovskim grejnim površinama. Ovaj problem je postao jedan od glavnih operativnih problema u kotlovima koji koriste ugljeve lošeg kvaliteta i neke vrste biomasa, posebno poljoprivredne. U cilju da se ovaj problem predupredi i blagovremeno predvidi, na osnovu dosadašnjih istraživanja i iskustava sa domaćim ugljevima, izvršena je analiza kriterijuma za procenu formiranja naslaga na kotlovskim grejnim površinama u slučaju sagorevanja biomase.

Sprovedeno testiranje ključnih empirijskih korelacija za lepljenje i zaprljanje, u slučaju sagorevanja uglja ili biomase, koje su definisane na osnovu ispitivanja različitih vrsta goriva u laboratorijskim i realnim ložišnim uslovima pokazalo je da mnoge vrste biomase, posebno iz poljoprivredne proizvodnje, kao i Kosovski lignit imaju veliku sklonost ka lepljenju i zaprljanju. To su potvrdili indikatori bazirani kako na hemijskom sastavu pepela goriva tako i na i temperaturama topivosti pepela. Analiza je obuhvatila veliki broj različitih vrsta biomasa koji su potvrdili uspostavljene kriterijume. Rezultati ovih

analiza mogu naći konkretnu praktičnu primenu kod projektanata i konstruktora kotlova na biomasu, koji na osnovu prethodnih analiza goriva mogu da predvide odgovarajuće sisteme za uklanjanje naslaga i odžavanje kotlovskih grejnih površina u čistom stanju.

5. LITERATURA

- [1] Jenkins B.M, Baxter L.L, Miles T.R, Jr, Miles T.R. (1998). Combustion Properties of Biomass. *Fuel Processing Technology* 54(1-3): 17-46.
- [2] Maraver A.G, Sanchez J.M, Carpio M, Jimenez J.A. (2017). Critical Review of Predictive Coefficients for Biomass Ash Deposition Tendency. *Journal of the Energy Institute* 90(2): 214-228.
- [3] Marinković A, Repić B, Dakić D, Radojičić A, Erić A. (2013). Karakteristike poljoprivredne biomase izložene procesu kvašenja i ispiranja. *Savremena poljoprivredna tehnika* 39(4): 229-236.
- [4] Mladenović M. (2005). Izbor kriterijuma za procenu tendencije domaćih lignita ka formiranju naslaga na kotlovskim grejnim površinama. MSc rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [5] Mladenović M, Mladenović R, Manović V, Radovanović M, Stoilković D. (2009). Criteria Selection for the Assessment of Serbian Lignites Tendency to Form Deposits on Power Boilers Heat Transfer Surfaces. *Thermal Science* 13(4): 61-78.
- [6] Obernberger I. (1998). Decentralized Biomass Combustion – State of the Art and Future Development. *Biomass and Bioenergy* 14(1): 33-56.
- [7] Pronobis M. (2005). Evaluation of the Influence of Biomass co-combustion on Boiler Furnace Slagging by Means of Fusibility Correlations. *Biomass and Bioenergy* 28(4): 375–383.
- [8] Radojević A, Repić B, Dakić D, Erić A. (2010). Analiza i ispitivanje pepela poljoprivredne biomase i potencijalnih aditiva. *Savremena poljoprivredna tehnika* 36(4): 357-365.
- [9] Repić B. (1979). Kinetika obrazovanja naslaga pepela na konvektivno ozračenim grejnim površinama kotlovskih ložišta koja koriste sprášeni lignit. MSc rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [10] Repić B, Erić A, Nemoda S, Dakić D. (2018). Technical and economic consideration of the construction of CHP plant using agricultural or forest biomass. In Proc. Int. Conf. „Energy and Ecology Industry EEI2018“, 130-137. Belgrade, 10-13 October.
- [11] Vamvuka D, Zografos D. (2004). Predicting the Behaviour of Ash from Agricultural Wastes During Combustion. *Fuel* 83(14-15): 2051-2057.
- [12] Vassilev V.S, Baxter D, Andersen L.K, Vassileva C.G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89(5): 913-933.
- [13] Werther J, Saenger M, Hartge E.U, Ogada T, Siagi Z. (2000). Combustion of Agricultural Residues. *Progress in Energy and Combustion Science* 26(1): 1–27.
- [14] Winegartner E.C. (1974). Coal Fouling and Slagging Parameters. ASME Research Committee on Corosion and Deposits from Combustion Gases. ASME, USA.

ANALYSIS CRITERIA FOR THE ASSESSMENT OF DEPOSITS FORMATION ON BOILERS HEAT SURFACES DURING BIOMASS COMBUSTION

Milica Mladenović, Branislav Repić, Milijana Paprika, Ana Marinković

SUMMARY

Combustion of different fuels in boiler furnaces leads to formation of fireside deposits on irradiated as well as on convective surfaces. This problem is not a new one, but it became one of the main operational problems in boilers using low rank coal and some sort of biomass, especially agricultural. In the paper presents the results of the analysis of the criteria for estimating the formation of deposits on heating surfaces of boilers in the case of biomass combustion. Also, the ash related problems during biomass combustion in the boiler furnace were considered. Key empirical correlations have been tested for slagging and fouling in case of coal or biomass combustion based on testing of different types of fuel in laboratory and real furnace conditions. The analysis has shown that many sorts of agricultural biomass as well as the Kosovo lignite have a high fouling and slagging tendency, as confirmed by indicators based on the chemical composition of fuel ash and ash solubility temperatures.

Keywords: Boiler, biomass, combustion, fouling, slagging, indicator.

Napomena: Rad je realizovan u okviru istraživanja na projektima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije: „Razvoj i unapređenje tehnologija za energetske efikasno korišćenje više formi poljoprivredne i šumske biomase na ekološki prihvatljiv način, uz mogućnost kogeneracije“ (III42011) i „Unapređenje industrijskog postrojenja sa fluidizovanim slojem u okviru razvoja tehnologije za energetske efikasno i ekološki opravdano sagorevanje različitih otpadnih materija u fluidizovanom ložištu“ (TR33042).

Primljeno: 11. 02. 2018. god.

Prihvaćeno: 15. 02. 2018. god.