

ISPITIVANJE PODOBNOSTI SAGOREVANJA PAPIRNOG MULJA U TOPLOVODNOM KOTLU SA FLUIDIZOVANIM SLOJEM

EXAMINATION OF SUITABILITY OF PAPER SLUDGE COMBUSTION IN HOT-WATER FLUIDIZED BED BOILER

Milica R. Mladenović*, Dragoljub V. Dakić**, Stevan Đ. Nemoda*, Aleksandar M. Erić*,
Milijana J. Paprika*, Dejan M. Đurović*, Branislav S. Repić*

¹*Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, P.Fah 522, 11001 Beograd*

²*Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16,
11120 Beograd*

Email – mica@vinca.rs

Rezime: Među definisanim ciljevima održivog razvoja energetike Srbije nalaze se: poboljšanje energetske efikasnosti, sigurnost i stabilnost snabdevanja energijom, korišćenje obnovljivih izvora energije, upravljanje otpadom i smanjenje zagađenja životne sredine. Jedan od načina za istovremeno ispunjavanje ovih ciljeva je i korišćenje nekonvencionalnih, alternativnih goriva poput papirnog mulja - otpada iz prerade reciklažnog papira, uz primenu tehnologije sagorevanja u fluidizovanom sloju koja omogućava zadovoljenje ekoloških normi. U radu su prikazani rezultati eksperimenata sagorevanja papirnog mulja (otpad iz proizvodnje papira u fabrici hartije UMKA), koji su obavljeni na industrijskom demonstraciono-eksperimentalnom kotlu za sagorevanje nekonvencionalnih čvrstih i tečnih goriva, odnosno otpadnih industrijskih materija, u fluidizacionom ložištu. Merenja obuhvataju temperatursko polje po visini ložišta, analizu sastava dimnih gasova na izlazu iz ložišta kao i ostale parametre sagorevanja predmetnog goriva u fluidizovanom sloju. Na osnovu dobijenih rezultata data je ocena podobnosti sagorevanja papirnog mulja u toplovodnom kotlu sa fluidizovanim slojem i mogućnost iskorišćenja njegovog energetskeg potencijala.

Ključne reči: papirni otpad; fluidizovani sloj; sagorevanje; ispitivanje.

Abstract: Among the defined objectives of the Sustainable Energy Development of Serbia are: improving energy efficiency, reliability and stability of fuel supply, use of renewable energy, waste management and pollution abatement. A way for simultaneously fulfill the series of these goals is the use of unconventional, alternative fuels such as paper sludge - waste from the recycled paper processing, with use of the technology of fluidized bed combustion, which allows meeting environmental standards. This paper presents experimental results of paper sludge combustion (waste from paper production in the factory stock UMKA), which were carried out on an industrial demonstrational and experimental boiler used for combustion of non-conventional solid and liquid fuels, and industrial waste material in fluidized bed. Based on these results, an assessment of the suitability of paper sludge combustion in hot water boilers with fluidized bed and the possibility of using its energy potentials is given.

Key words: paper waste; fluidized bed; combustion; investigation.

1. UVOD

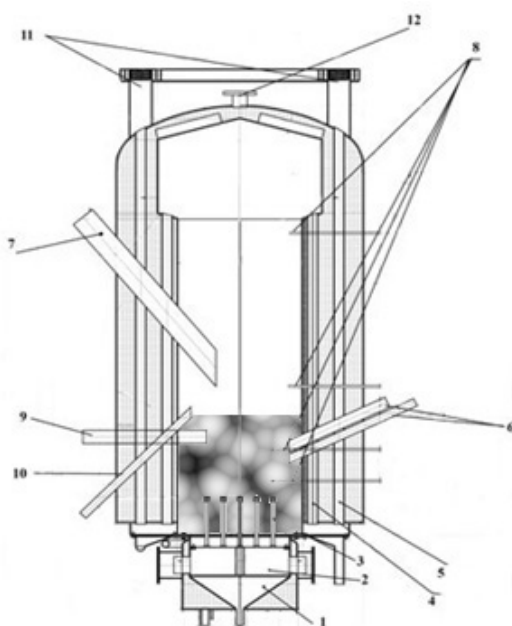
Sa tačke gledišta potreba za uklanjanjem otpadnih i nepotrebnih materija iz procesa proizvodnje, privreda Srbije iskazuje urgentnu potrebu za uklanjanjem/iskorišćenjem više vrsta otpadnih materijala u koje spada i otpad iz proizvodnje papira i celulozne industrije. Predmet ovog rada je sagorevanje papirnog mulja iz tehnologije prerade reciklažnog papira u fluidizovanom sloju (FS) uz iskorišćenje energetskih efekata, a u skladu sa normama o zaštiti životne sredine. Tehnologija sagorevanja u FS je preporučena od EU za sagorevanje otpadnih materija [1, 2], zbog svoje velike termičke inertnosti i uobičajene temperature sagorevanja ($\approx 850^{\circ}\text{C}$) - optimalne sa aspekta smanjene emisije NO_x -a u dimnim gasovima, kao i efikasnosti odsumporavanja krečnjakom u samom ložištu [3], kada je to neophodno.

Laboratorija za termotehniku i energetiku INN "Vinča" duži niz godina se bavi proučavanjem fenomena sagorevanja u fluidizovanom sloju i razvojem ložišta i kotlova sa ovim načinom sagorevanja [4-8]. Radi dobijanja pouzdanijih projektnih parametara realnih postrojenja izgrađen je industrijski FS demo-kotao na kome će se, pored sagorevanja papirnog mulja ubuduće ispitivati parametri sagorevanja i drugih nekonvencijalnih otpadnih goriva.

2. EKSPERIMENT

2.1. Opis toplovodnog kotla za sagorevanje nekonvencionalnih goriva

Kotao je vertikalne konstrukcije (slika 1), snage ≈ 500 kW, sa radnim režimom $90/65^{\circ}\text{C}$. Prečnik ložišta demo- industrijskog postrojenja je moguće podešavati u zavisnosti od toga da li se proces sagorevanja izvodi sa ili bez hlađenja FS, što zavisi od toplotne moći ispitivanog goriva. Pri sagorevanju materija male toplotne moći, kao u slučaju eksperimenata sagorevanja papirnog mulja, ložište se izoluje, pa se proces sagorevanja u FS odvija u adijabatskim uslovima. Dimni gasovi nakon dogorevanja u prostoru iznad FS ulaze u vertikalne cevi prve i druge „promaje“ uronjene u vodeni omotač kotla (hladnjak dimnih gasova). Pri prelasku iz prve (pozicija 4 sa sl.1.) u drugu promaju (poz. 5), deo čestica letećeg pepela/inertnog materijala sloja se, usled inercije odvađa iz struje dimnih gasova, a na izlazu iz cevi druge promaje, u separatoru čestica-ciklonu (poz. 11 sa sl. 2).

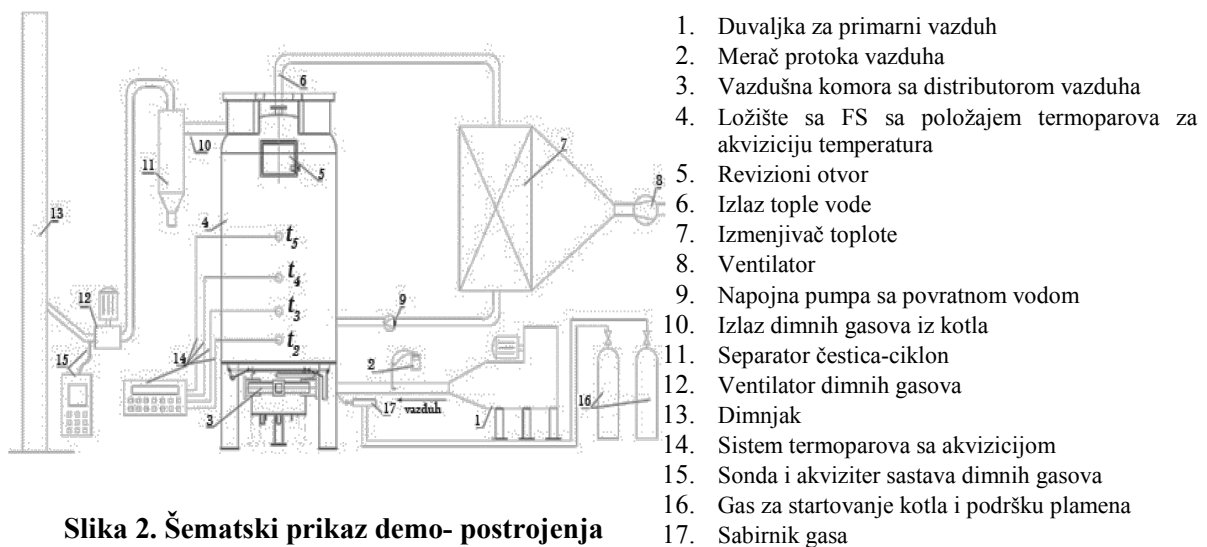


Legenda

1. Sabirnik sa vodenim hlađenjem za odvođenje pepela i inertnog materijala sloja
2. Sabirna komora distributora vazduha za fluidizaciju
3. Pečurke distributora vazduha
4. Cevi prve promaje dimnih gasova
5. Cevi druge promaje dimnih gasova
6. Kosi uvodnici za pneumatsko doziranje u sloj
7. Kosi uvodnik za doziranje na sloj
8. Keramičke cevi za smeštaj termoparova za akviziciju temperature u i iznad sloja
9. Horizontalni uvodnik za doziranje čvrstog goriva u sloj
10. Prelivna cev za odvođenje pepela iz sloja
11. Sabirni dimni kanal
12. Izlaz vode iz kotla

Slika 1. Skica kotla sa fluidizovanim slojem sa pozicijama

U slučaju sagorevanja materija sa višom toplotnom moći vrši se hlađenje FS kako bi se sprečile visoke temperature nepovoljne sa stanovišta redukcije NO_x-a i za odsumporavanje u samom sloju. Iz iskustava ranijih eksperimentalnih ispitivanja najpogodnije radne temperature FS su one bliske temperaturi od 850°C [9]. Kotao omogućava eksperimente sa doziranjem u (sl. 1., poz. 6 i 9) i na sloj (sl. 1, poz. 7), kako tečnog tako i čvrstog goriva. Na sloj se materijal dozira mehaničkim dozatorom i gravitacionim uvođenjem goriva, što je slučaj kod eksperimenata sagorevanja papirnog mulja. Doziranje u sloj se vrši pneumatskim transportom. Šematski prikaz instalacije sa industrijskim FS demo-kotlom, sa naznačenim mernim mestima (2, 14 i 15) i sistemom za startovanje kotla gasom (16 i 17) dat je na slici 2. Papirni mulj je doziran na sloj pomoću specifičnog sistema za doziranje, sastavljenog od konusnog uvodnika i pužnog dozatora (slika 3) sa frekventnom regulacijom broja obrtaja.



Slika 2. Šematski prikaz demo- postrojenja



Slika 3. Sistem za doziranje krupnijeg čvrstog i muljevitog materijala iznad FS.

Rezultati tehničke i elementarne analize papirnog mulja predstavljeni su tabelama 1 i 2. Za startovanje kotla korišćen je gas i to u eksperimentu I (režim I) - mešavina propan-butana, a u eksperimentu II (režimi II i III) korišćen je čist propan.

2.2. Režimi sagorevanja papirnog mulja

Materijal sloja čini kvarcni pesak srednjeg prečnika $d_p=0.96$ mm, nasipne gustine $\rho_b=1380/m^3$. Visina sloja je $H_o=325$ mm. Gas za startovanje kotla i podršku sagorevanja u režimu I je propan-butan, a za ispitivanje je korišćen uzorak I papirnog mulja (tabela 1). Kolubarski ugalj, granulacije 3-30 mm, je korišćen zajedno sa gasom za stabilizovanje

procesa zagrevanja sloja i ostvarivanje stacionarnih parametara za uvođenje papirnog mulja u sloj (konstantni protok vazduha za fluidizaciju i postizanje temperature sloja $\approx 800^{\circ}\text{C}$). Rezultati ispitivanja za režim I prikazani su na slikama 4-6.

Tabela 1. Tehnička i elementarna analiza

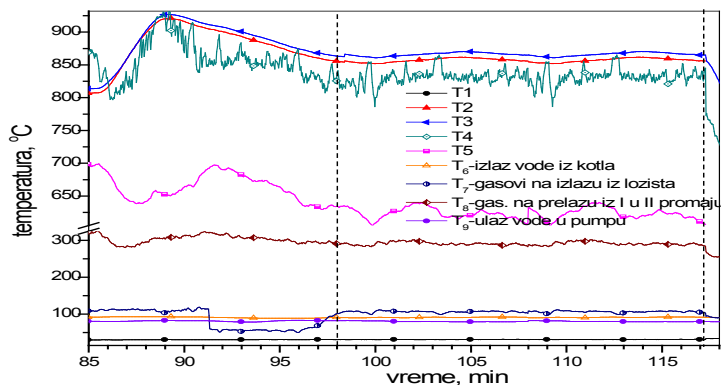
Papirni mulj		Sa dostavnom vlagom		
		Uzorak I	Uzorak II	
Vlaga	%	46,09	56,84	
Pepeo		13,94	11,16	
Sumpor ukupni		0,14	0,11	
Sumpor u pepelu		0,02	0,02	
Sumpor sagorljiv		0,12	0,10	
Koks		14,56	11,66	
C-fix		0,62	0,50	
Isparljivo		39,35	31,50	
Sagorljivo		39,97	32,00	
Gornja		kJ/kg	6442	5158
Donja			4829	3342
Ugljenik ukupni	%	15,99	12,80	
Vodonik		2,68	2,15	
Sumpor		0,12	0,09	
Azot		0,73	0,59	
Kiseonik		20,46	16,38	

Tabela 2. Tačke topivosti pepela

Gorivo	Papirni mulj
Početak sinterovanja	950
Tačka omekšavanja	1060
Tačka polulopte	1280
Tačka razlivanja	1420

Tabela 3. Toplotna moć gasa

Donja toplotna moć, kJ/kg	C (%)	H (%)	
Propan (C_3H_8)	46100	81.82	18.18
Butan (C_4H_{10})	45460	82.76	17.24



-T₁-temperatura vazduha na ulazu u distributor vazduha

Položaj termoparova u ložištu je:

-T₂-5 cm iznad pećurki distributora vazduha

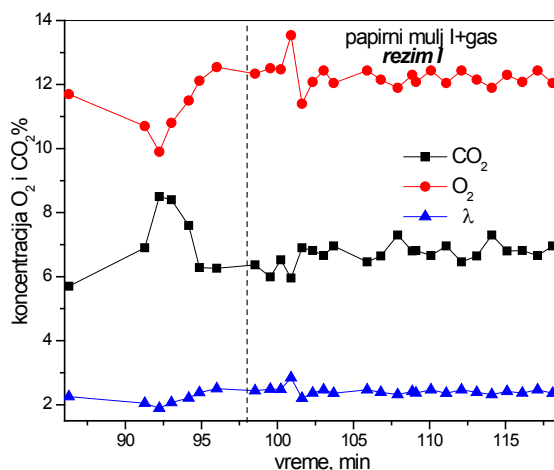
-T₃-20.5 cm iznad T₂

-T₄-40 cm iznad T₃

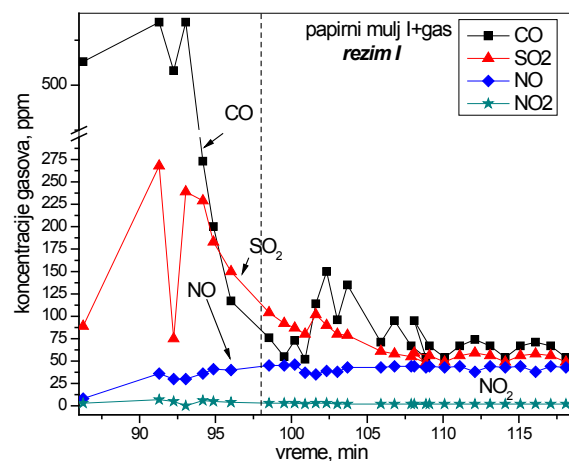
-T₅-97 cm iznad T₄

Od 98-118 min postignut je stacionaran režim doziranja goriva

Slika 4. Deo eksperimenta sa sagorevanjem papirnog mulja uz podršku gasa (režim I)

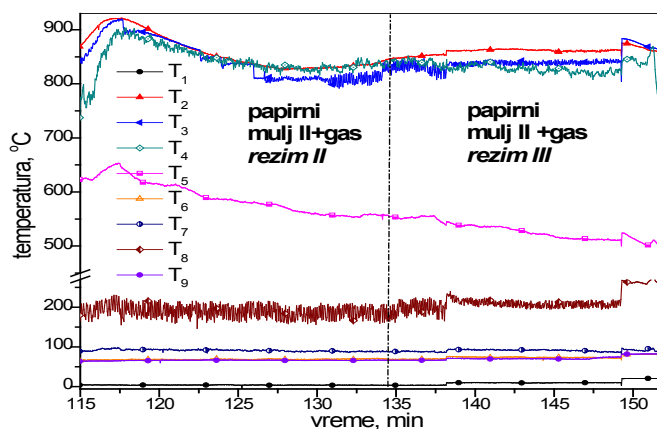


Slika 5. Koncentracije gasova (režim I)

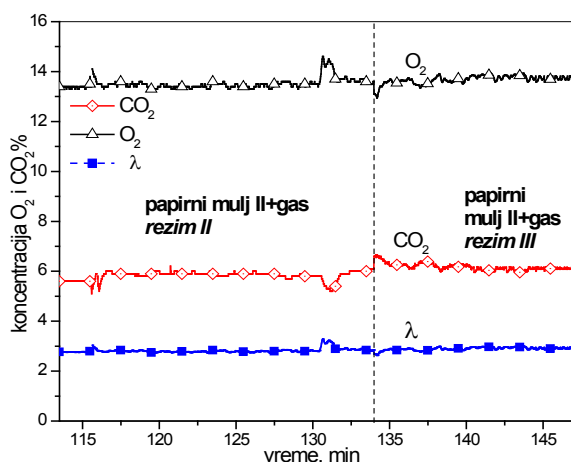


Slika 6. Koncentracije gasova (režim I)

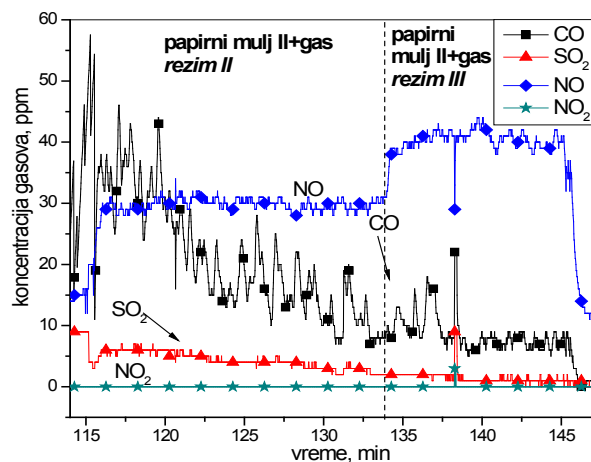
Materijal sloja, visina sloja i položaj termoparova u ložištu za režime II i III, su isti kao u režimu I, pri čemu je gas za startovanje kotla i podršku sagorevanja propan, a ispitivan je vlažniji uzorak II goriva (tabela 1). Rezultati eksperimenta II sa režimima II i III sagorevanja vlažnog goriva pri različitim protocima gasa za podršku i goriva prikazani su na sl. 7-9.



Slika 7. Dijagram toka eksperimenta II



Slika 8. Koncentracije gasova (režim II i III)

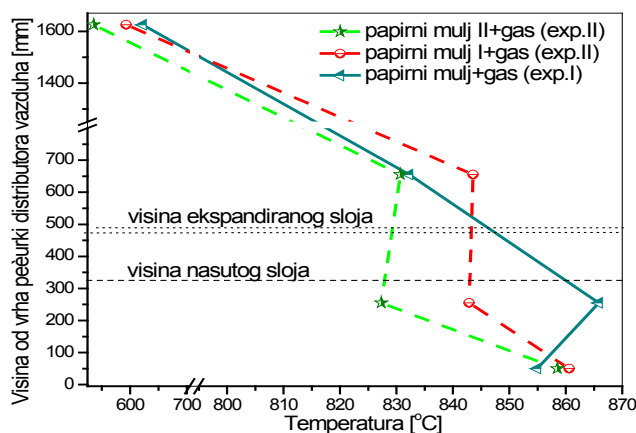


Slika 9. Koncentracije gasova (režim II i III)

3. DISKUSIJA REZULTATA

Proces sagorevanja se u svim režimima ispitivanja obavljao u adijabatskim uslovima jer je ložište izolovano šamotom od vodenog omotača koji je obavljao ulogu hladnjaka dimnih gasova, pa izmereni viškovi vazduha približno odgovaraju viškovima vazduha pri teorijskim temperaturama sagorevanja goriva (tabela 5). U cilju poređenja svih izbranih režima na Sl. 10 data je promena izmerenih temperatura po visini ložišta, kao i zbirna tabela 4 sa parametrima sagorevanja i izmerenim koncentracijama jedinjenja koja ulaze u sastav dimnih gasova.

Na osnovu izmerenih koncentracija gasova i λ (Sl. 5-9) ostvareni su povoljni parametri sagorevanja. Može se primetiti skok koncentracije CO u dimnim gasovima pri prelasku sa režima sagorevanja uglja i gasa na režim I-sagorevanja gasa i papirnog mulja, da bi nakon 95-tog minuta i ostvarivanja stacionarnih parametara sagorevanja, koncentracija CO pala ispod 200 ppm. Takođe, pri prelasku na sagorevanje papirnog mulja primećuju se nešto veće koncentracije SO₂ u dimnim gasovima kao posledica dogorevanja S iz uglja zaostalog iz prethodnog procesa zagrevanja i ostvarivanja stacionarnih uslova u sloju. Koncentracije NO_x u svim režima sagorevanja papirnog mulja i gasa su niske što je posledica temperatura sagorevanja u FS koje nisu prelazile 865°C, sem u početnim trenucima doziranja goriva.



Slika10. Promena temperature po visini ložišta

Tabela 4. Zbirna tabela izmerenih parametara režima sagorevanja goriva u FS

Režim	T _{sr u sloju} [°C]	m' vaz [kg/s]	N [-]	H _{exp} [mm]	m' gasa [kg/h]	m' hartije [kg/h]	CO ₂	O ₂	CO	SO ₂	NO	NO ₂	λ	Max snaga lož. kW
							%		ppm					
Papir. mulj I+gas/I	861.4	0.186	4.6	489	17.17	58.1	7.2	11.7	87	78	42	2.4	2.43	300
Pap. mulj II+gas /II	851.7	0.18	4.4	482	16.13	28.8	5.7	13.5	20	4	31	0	2.82	236
Pap. mulj II+gas /III	842.9	0.18	4.4	480	14.12	36.1	5.5	14.2	7	1	36	0	2.91	217

Tabela 5. Sastav ekvivalentnog goriva i sračunata temperatura sagorevanja

Papirni mulj I+gas/Režim I	Sastav ekvivalentnog goriva						
	Vlaga	Pepeo	C	H	O	N	S
	% (dostavna masa)			% (goriva masa)			
	35.56	10.76	58.05	11.33	29.41	1.04	0.17
	Toplotna moć ekvivalentnog goriva [kJ/kg]				14259		
	Maseni protok goriva [kg/h]				Specifična toplota čistog ekvivalentnog goriva [kJ/(kgK)]		
	Papirni mulj	Gas: 35% C ₃ H ₈ /65 %C ₄ H ₁₀	Ekvivalentno gorivo		1.46		
	58	17.17	75.17				
	λ=2.43	Teorijska temperatura sagorevanja [°C]		983	Energetski učinak gasa [%]		73
	Papirni mulj II+gas/Režim II	Sastav ekvivalentnog goriva					
Vlaga		Pepeo	C	H	O	N	S
% (dostavna masa)			% (goriva masa)				
36.44		7.15	66.62	14	18.16	0.68	0.1
Toplotna moć ekvivalentnog goriva [kJ/kg]				18890			
Maseni protok goriva [kg/h]				Specifična toplota čistog ekvivalentnog goriva [kJ/(kgK)]			
Papirni mulj		Gas- C ₃ H ₈	Ekvivalentno gorivo		1.5		
28.8		16.13	44.93				
λ=2.82		Teorijska temperatura sagorevanja [°C]		888	Energetski učinak gasa [%]		87.6
Papir. mulj II+gas/Režim III		Sastav ekvivalentnog goriva					
	Vlaga	Pepeo	C	H	O	N	S
	% (dostavna masa)			% (goriva masa)			
	40.86	8.02	63.01	13.03	23.02	0.82	0.12
	Toplotna moć ekvivalentnog goriva [kJ/kg]				15516		
	Maseni protok goriva [kg/h]				Specifična toplota čistog ekvivalentnog goriva [kJ/(kgK)]		
	Papirni mulj	Gas- C ₃ H ₈	Ekvivalentno gorivo		1.48		
	36.1	14.12	50.22				
	λ=2.91	Teorijska temperatura sagorevanja [°C]		854	Energetski učinak gasa [%]		84

U tabeli 5 dati su elementarni sastavi ekvivalentnog goriva u sva 3 režima, sračunati na osnovu masenih udela gasa i papirnog mulja i njihovih elementarnih sastava. Elementarni sastavi mešavine gasova propan-butana i čistog propana su sračunati na osnovu udela molova C i H u gasu/mešavini gasova sa pretpostavkom da se u bocama ne nalaze drugi ugljovodonici ili druge nečistoće. Na osnovu sastava ekvivalentnog goriva i izmerenih vrednosti viška vazduha u sva tri režima, u tabeli 5 su date sračunate vrednosti teorijske temperature sagorevanja koje bi se postigle u adijabatskim uslovima sagorevanja. Poređenjem dijagrama sa slike 10 i vrednosti sračunatih temperatura iz tabele 5 može se primetiti da nema velikih odstupanja izmerenih temperatura i teorijske temperature sagorevanja sem u režimu I sagorevanja papirnog mulja i gasa, gde je ta razlika nešto veća od 100°C, što se objašnjava većim toplotnim gubicima na višim temperaturama sagorevanja. Papirni mulj doziran u režimu I, sa dostavnom vlagom od 46,09% (tab. 1) sagorevao je sa najvišom usrednjenom temperaturom $T_3=864^{\circ}\text{C}$ izmerenom u samom sloju – pa se proces intezivnog sagorevanja odvijao u sloju, što ukazuje na dobru organizaciju sagorevanja.

Pri sagorevanju papirnog mulja i gasa u režimima II i III, zona sagorevanja je takođe u sloju ali je izmerena temperatura u sloju bliže distributoru T_2 viša od T_3 u oba režima. Ovo se objašnjava činjenicom da je papirni mulj koji se koristio u ovim režimima veće vlažnosti - 56,84% (tab.1) od korišćenog u režimu I (eksperiment I). Pored toga smanjena je snaga ložišta smanjenim doziranjem gasa i papirnog mulja. Povećana vlažnost papirnog mulja doziranog na sloj, s jedne, i smanjeni protok gasa, s druge strane, doveo je do prikazanog rasporeda temperatura u sloju i neposredno iznad njega (sl. 10).

Podaci o energetskom učešću gasa u procesu ko-sagorevanja papirnog mulja i gasa, iz tabele 5, pokazuju da je u režimu I energetski učinak gasa 73%, a u zadnja 2 režima, prelazi 80%. S obzirom na ovako visoko energetsko učešće gasa može se reći da se radi o inseneraciji – spaljivanju papirnog mulja u kotlu sa fluidizovanim slojem, koje je uspešno izvedeno. Pri tome je u režimu I sagorevanjem papirnog mulja supstituisano 27% gasa (propan butana), u režimu II - 12% , a u režimu III - 16% propana (tab. 5). Daljim podešavanjem režima rada kotla uz moguć povraćaj dela dimnih gasova u ložište i smanjenjem koncentracije O_2 u produktima sagorevanja na 10÷11% (što je zadatak budućih eksperimenata na ovom postrojenju), energetski efekti sagorevanja papirnog mulja bili bi još veći.

4. ZAKLJUČAK

Ispitivanja pokazuju da je u gasovitim produktima sagorevanja koncentracija CO bila znatno niža od zakonom dozvoljenih vrednosti [10] ($\text{CO} \ll 250\text{mg/m}^3 = 220\text{ ppm}$), što znači da su gubici usled nedogorelog u gasovitim produktima sagorevanja zanemarljivi. Kvalitet sagorevanja sa stanovišta zadovoljenja ekoloških propisa je takođe povoljan. U svim režimima kosagorevanja papirnog mulja i gasa emisija SO_2 i NO_x ne prelazi zakonom dozvoljene granice ($\text{SO}_2 \ll 700\text{ppm}$ i $\text{NO}_2 \ll 532\text{ppm}$). Na osnovu izmerenih temperatura po visini ložišta može se konstatovati da je prilikom sagorevanja papirnog mulja uz podršku gasa zona intezivnog sagorevanja bila locirana u FS što ukazuje na dobru organizaciju sagorevanja.

Eksperimentima je pokazano da se pri sagorevanju papirnog mulja može supstituisati 12÷27% energije koja bi se za istu snagu kotla morala dobiti od nekog komercijalnog goriva, što su pozitivni i ni malo zanemarljivi efekti, koji bi se još poboljšali recirkulacijom dimnih gasova. Na osnovu dobijenih podataka ispitivanja režim I je uspešniji od druga dva. U njemu je ostvaren veći stepen fluidizacije uz manji višak vazduha, pa viši stepen fluidizacije treba koristiti i u realnim postrojenjima. Imajući u vidu sve veću potebu i neophodnost rešavanja problema iskorišćenja otpada iz industrije papira u Srbiji, moguće je graditi savremene, efikasne i ekološki prihvatljive kotlove sa sagorevanjem u FS za proizvodnju energije u industriji i u sistemima daljinskog grejanja sagorevajući goriva koja se u kotlovima drugih

tipova ne mogu sagorevati, ili se ne može ostvariti potrebna efikasnost sagorevanja i zadovoljiti obavezne ekološke norme.

ZAHVALNOST

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

LITERATURA

- [1] Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants, European Commission, July 2006.
- [2] BAT Guidance Note on Best Available Techniques for the Energy Sector (Large Combustion Plant Sector), Environmental Protection Agency (EPA), January 2008, ISBN 1-84095-292-X,
<http://www.epa.ie/pubs/advice/bat/BAT%20Guidance%20Note%20Energy%20Sector%20%28LCP%29.pdf>
- [3] Saxena, S.C., Jotshi, C.K., Fluidized Bed Incineration of Waste Materials, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 20 (1994), 281-324.
- [4] Grubor, B., Oka, S. Ilić, M., Dakić, D., Arsić, B., Biomass FBC Combustion – Bed Agglomeration Problems, *Proceedings, 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, 1995, ASME, Vol. 1, pp. 515-522.
- [5] Oka, S., Grubor, B., Arsić, B., Dakić, D., The Methodology for the Investigation of Fuel Suitability for FBC and Results of Comparative Study of Different Coals, *Fluidized Bed Combustion in Practice: Clean, Versatile, Economic*, Ed. Institute of Energy, London, December 1988, pp. I/8/1-19.
- [6] Mladenović, M., Dakić, D., Nemoda, S., Mladenović, R., Erić, A., Repić, B., Komatina, M., Combustion of Low Grade Fractions of Lubnica Coal in Fluidized Bed, *Thermal Science*, 16 (2012), No. 1, pp. 297-311.
- [7] Nemoda, S., Mladenovic, M., Belosevic, S., Mladenovic, R., Dakic, D., Numerical Model of Gaseous Fuel Jet Injection into a Fluidized Furnace, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009) 3427–3438.
- [8] Mladenović, M., Dakić, D., Nemoda, S., Belošević, S., Mladenović, R., Erić, A., Repić, B., Ispitivanje sagorevanja istrošenih ulja i masti na poluindustrijskoj aparaturi sa fluidizovanim slojem, *Termotehnika*, 34 (2008), 2-3, str. 147-160.
- [9] Robin, W.H., Dennis, Y.L., Edward, J.A., Arturo, M., Design, process simulation and construction of an atmospheric dual fluidized bed combustion system for in situ CO₂ capture using high-temperature sorbents, *Fuel Processing Technology*, 86 (2005), 14–15, 1523–1531.
- [10] Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vazduh, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 71/2010 i 6/2011.