

# PROCENA EFIKASNOSTI KONVERZIJE KOKSNOG OSTATKA U ZONI SAGOREVANJA BALIRANE POLJOPRIVREDNE BIOMASE

## ESTIMATING THE CHAR CONVERSION EFFICIENCY IN AGRICULTURAL BALED BIOMASS COMBUSTION ZONE

**Andrijana Stojanović, Stevan Nemoda, Aleksandar Erić, Branislav Repić, Dragoljub Dakić, Dejan. Đurović**

*Institute of Nuclear Sciences „Vinca“, Laboratory for Thermal Engineering and Energy, P.O.Box 522, 11001 Belgrade, Serbia*

**Abstract:** The burn-out of char in power facilities is commercially important. Interest in the burn-out of biomass char is growing because biomass is increasingly being fired to reduce the carbon dioxide emissions. The Laboratory for Thermal Engineering and Energy of the Vinca Institute, has developed a technology for combustion of biomass bales of various sizes and shapes for energy production. Experimental facility of 1,5 MW has been built with cigarette type of combustion for the purposes of greenhouse and office heating in the PKB. In it's lower part char is burning-out in fluidized bed. This paper attempts to estimate combustion efficiency and performance for this experimental facility calculating the unburnt char fraction in the zone of baled biomass combustion. The mass and heat balances have been written for part of the boiler where unburnt char is burning out in fluidized bed. On the basis of known temperatures, air mass flows and char temperature, which has been accepted to be equal to the temperature of baled biomass combustion, mass flow of char, which is falling into the burning zone with fluidized bed, has been estimated.

**Keywords:** mass and heat balance; char conversion; biomass

### 1. UVOD

U Institutu za nuklearne nauke Vinča, Laboratorija za termotehniku i energetiku, razvijeno je ložište za sagorevanje balirane poljoprivredne biomase. Ložište je potpuno originalne konstrukcije i rezultat domaćeg razvoja potpomognutog od strane resornog Ministarstva. Sagorevanje balirane biomase se odvija po principu sagorevanja cigarete i dogorevanja koksnog ostatka u fluidizovanom sloju sopstvenog pepela. Prvo postrojenje-kotao ovog tipa, snage 1,5 MW je izgrađeno i pušteno u rad u poljoprivrednom kombinatu PKB. Prednost ovog načina sagorevanja je minamalan utrošak električne energije za pripremu goriva, zadovoljavanje ekoloških kriterijuma sagorevanja, niski eksploatacioni i investicioni troškovi i mogućnost potpune automatizacije rada postrojenja. Ovakva ložišta se mogu primeniti u svim vrstama kotlova kao i agregata za proizvodnju toplog, odnosno, vrelog vazduha ili gasa.

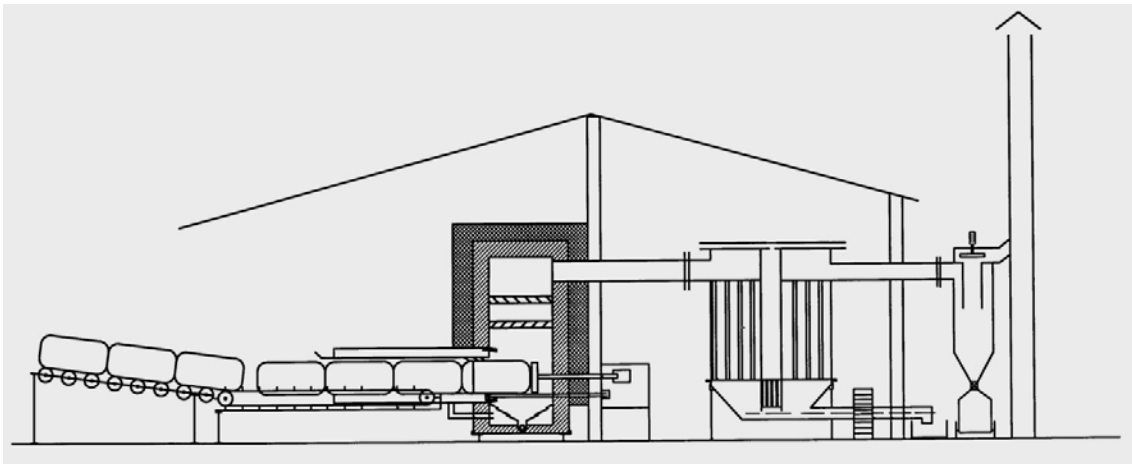
Nakon izgradnje eksperimentalnog postrojenja i dobijanja zadovoljavajućih rezultata prišlo se projektovanju i izradi industrijskog, demonstracionog i eksperimentalnog vodogrejnog kotla snage 1,5 MW za zagrevanje 1 ha plastenika u

okviru korporacije PKB. Kotao je pušten u rad početkom februara 2008 godine. Radi ispravljanja „pikova“ u potrošnji energije uveden je akumulator toplote.

Jedan od ključnih zadataka pri razvoju ovog kotla je poboljšanje efikasnosti sagorevanja, da bi se što bolje iskoristila hemijska energija sadržana u gorivu. Sa tim u vezi u ovom radu su ispitane karakteristike rada kotla u dva slučaja: kada koksni ostatak sagoreva u donjem delu ložišta i kada u ovoj zoni nema sagorevanja, radi procene dela koksno ostataka biomase koji ne sagoreva u glavnoj zoni sagorevanja i pada u donji deo ložišta. Na osnovu energetske bilansa u oba razmatrana slučaja izvršena je procena udela koksno ostataka biomase koji ulazi u donji deo ložišta.

## 2. KONCEPCIJA RADA KOTLA

Šema kotla prikazana je na slici 1. Kao gorivo kotao koristi bale sojine slame, dimenzija 0,7x1,2x2,7m. Prosečna donja toplotna moć goriva je 13686kJ/kg, a gustina 132,27kg/m<sup>3</sup>. Gorivo, odnosno balirana sojina slama se uvodi u ložište pomoću dozatora bala koji je pogonjen elektromotorom, a protok goriva se reguliše promenom broja obrtaja pomoću frekventnog regulatora. Deo kanala u blizini ložišta napravljen je od duplih čeličnih zidova između kojih struji primarni vazduh, koji ujedno i hladi zidove kanala. Kompletno ložište je napravljeno od šamota i kompletno izolovano. Primarni vazduh se u ložište uvodi okolo bale, a deo ispod vodom hlađene rešetke. Sekundarni vazduh se u zonu sagorevanja uvodi kroz vodom hlađeni uvodnik sekundarnog vazduha sa čeonog strane bale. Ovaj uvodnik ima mogućnost translacionog i delimično rotacionog kretanja. Pomoću translacionog kretanja uvodnika sekundarnog vazduha vrši se regulisanje snage ložišta ( omogućavanjem da manja ili veća količina biomase učestvuje u procesu sagorevanja ), a rotacionim kretanjem skidanje pepela i delimično sagorele biomase sa vrha bale.



*Slika 1. Vertikalni presek postrojenja*

Dimni gasovi koji napuštaju ložište najpre prolaze kroz vodom hlađenu plameno-dimnu cev, a zatim ulaze u prvu sekciju razmenjivača, zatim kroz separator krupnih čestica pepela, pa kroz drugu sekciju razmenjivača. Nakon prolaska kroz multiciklon, gasovi se

pomoću ventilatora dimnog gasa, kroz dimnjak izbacuju u atmosferu. Pepeo se iz ložišta izbacuje pomoću transportera. Rad svih uređaja kotla se može regulisati pomoću SCADA sistema preko računara.

Princip rada ložišta sa cigaretnim tipom sagorevanja balirane biomase se u osnovi sastoji u kontinualnom doziranju goriva u zonu sagorevanja. Pri tome biomasa prolazi kroz tri osnovne faze u procesu sagorevanja: sušenje, devolatilizaciju i sagorevanje volatila, i sagorevanje koksnog ostatka. Na ulasku u ložište temperatura u bali je relativno niska, ali dovoljna za isparavanje grube i analitičke vlage, pa se u ovoj fazi odvija proces sušenja. Kako bala kontinualno nastavlja svoj put ka zoni sagorevanja, temperatura raste i počinju da se stvaraju uslovi za odvijanje procesa devolatilizacije. Oslobođeni volatili, usled visoke temperature i relativno velikog viška vazduha, počinju da sagorevaju. Daljim kretanjem biomasa, oslobođena vlage i volatila ( koksni ostatak biomase ), ulazi u zonu sagorevanja koksnog ostatka, koji se odvija na samom vrhu bale. Sagorevanje koksnog ostatka, kako kod svakog čvrstog goriva tako i kod biomase je najsporija, a samim tim i vremenski kontrolišuća faza u procesu sagorevanja.

### 3. OPIS EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

Na osnovu iznete koncepcije rada ložišta može se zaključiti da jedna količina fiksnog ugljenika sagoreva u poroznom sloju na čelu bale, dok preostala količina dogoreva u donjem delu ložišta u fluidizovanom sloju sopstvenog pepela. Radi procene dela koksnog ostatka biomase koji ne sagoreva u glavnoj zoni sagorevanja i pada u donji deo ložišta izvedena su dva eksperimenta, jedan pri kome smo imali sagorevanje koksnog ostatka u donjem delu ložišta a drugi bez sagorevanja, a nakon toga je izvršena provera rezultata metodom proračuna entalpijskog bilansa procesa sagorevanja.

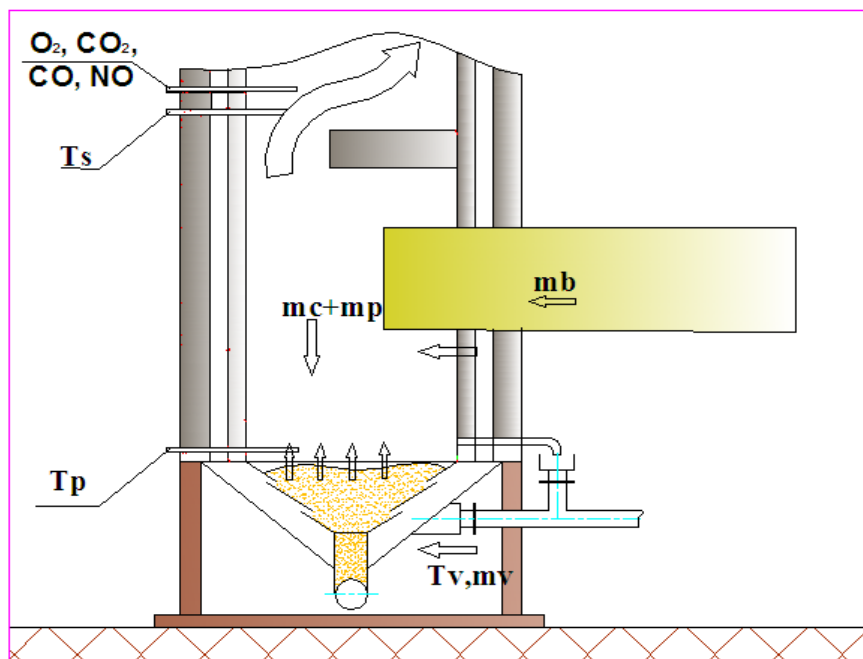
Eksperimentalna istraživanja su izvršena pri maksimalnoj snazi ložišta od 1.56 MW, pri čemu je sagorevan sojin ostatak čiji su podaci tehničke i elementarne analize sojine slame dati u Tabeli 1. Merene su veličine sledećih ulaznih parametara:

- maseni protoci vazduha po ulazima ;
- temperatura dimnog gasa na izlazu iz fluidizovanog sloja pepela  $T_p$  ;
- maseni protok goriva ( baliranog sojinog ostatka )  $\dot{m}_b$  ;
- temperatura dimnog gasa na izlaznom preseku modela  $T_s$  i

Temperature dimnog gasa na izlazu iz fluidizovanog sloja sopstvenog pepela  $T_p$  i temperatura na izlaznom poprečnom preseku  $T_s$  su merene kotinualno.

Doziranje baliranog sojinog ostatka se vrši pomoću hidrauličnog dodavača, ali kvazikontinualno tako da u ciklusu od jednog minuta određeni broj sekundi bala putuje ka ložištu, a ostatak do jednog minuta miruje.

Na osnovu izmerenog protoka vazduha na ulazu u sloj pepela  $\dot{m}_v$  i razlike temperature ulaznog vazduha i temperature izlaznih dimnih gasova  $T_s$  moguće je odrediti stepen konverzije koksnog ostatka u osnovnoj zoni sagorevanja.



*Slika 1. Šema kotla*

**Tabela 1. Elementarna i tehnička analiza goriva – sojine slame**

Elementarna analiza				Tehnička analiza				
C	H	N	O	W	Volatili	$C_{fix}$	A	$H_d$
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MJ/kg]
45.2	7.0	0.5	47.3	11.35	60.73	20.91	7.049	13.981

#### 4. ODREĐIVANJE UDELA KOKSNOG OSTATKA KOJI DOGOREVA U DONJEM DELU LOŽIŠTA

Koksnim ostatkom nazivamo gorivu materiju biomase preostalu posle oslobađanja gorivih isparljivih materija. Sagorevanje koksnog ostatka, koje se sastoji od  $C_{fix}$  i pepela, podrazumeva da kiseonik/oksidant bude dopremljen na površinu koksnog ostatka procesima molekularne difuzije i konvekcije gde biva apsorbovan. Kiseonik/oksidant reaguje heterogenim reakcijama na površini čestice sa  $C_{fix}$ . Nastali proizvod ( ugljen-monoksid i ugljen-dioksid ) ovim reakcijama difundira sa površine čestice u okolinu. Konačno sagorevanje CO se odvija u gasnoj fazi i kontrolisanom homogenom hemijskom kinetikom. Površinske reakcije na čestici biomase su kontrolisane heterogenom hemijskom kinetikom. U poređenju sa homogenim sagorevanjem, heterogeno sagorevanje je najčešće sporije. U tom slučaju je važno omogućiti dovoljno vreme prisustva biomase u ložišnom prostoru koje odgovara vremenu potrebnom za zagrevanje, sušenje, devolatilizaciju i heterogeno sagorevanje. Dužina trajanja procesa sagorevanja čestica koksnog ostatka je za red veličine veća od perioda oslobađanja i sagorevanja gorivih isparljivih materija i zbog toga presudno utiče na mnoge karakteristike sagorevanja i

ložišta. Nesagoreli ugljenik smanjuje oslobođenu toplotu i samim tim utiče na efikasnost sagorevanja.

Deo koksnog ostatka koji dogoreva u donjem delu ložišta se može eksperimentalno odrediti na osnovu analize uzoraka pepela, tj. merenjem udela nesagorelog dela pepela, kada ložište radi bez sagorevanja u donjem delu. Ova merenja daju podatak o masenom udelu nesagorelog koksnog ostatka u pepelu, što praktično daje odnos masenog protoka dela koksnog ostatka koji pada u donji deo ložišta i protoka pepela, pod uslovom da je u donjem delu ložišta zaustavljeno sagorevanje. Na osnovu navedenog može se izvesti izraz za maseni protok kosnog ostatka koji pada u donji deo ložišta:

$$\dot{m}_c = u_{cp} \dot{m}_b u_p$$

gde je:  $u_{cp}$  - maseni udeo nesagorelog koksnog ostatka u pepelu (koji se meri),  $\dot{m}_b$  - maseni protok goriva (balirane slame) i  $u_p$  - udeo pepela u gorivu – slami.

Odavde se lako može odrediti udeo masenog protoka kosnog ostatka koji pada u donji deo ložišta u ukupnom masenom protoku koksnog ostatka balirane biomase, koja ulazi u ložište:

$$u_{cn} = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_b u_c} = \frac{u_{cp} u_p}{u_c} \quad (1)$$

gde je:  $u_c$  - maseni udeo koksnog ostatka u gorivu tj. baliranoj biomasi.

Prilikom probnih merenja na postrojenju u PKB, kada je sagorevanje u donjem delu ložišta bilo obustavljeno, tehnička analiza pepela je pokazala da pepeo sadrži 13,4% kosnog ostatka ( $u_{cp}=0,134$ ). Na osnovu ovog podatka i vrednosti iz Tabele 1. određeno je da udeo protoka kosnog ostatka koji pada u donji deo ložišta, u ukupnom protoku biomase koja ulazi u ložište, iznosi oko 5%.

Udeo koksnog ostatka koji sagoreva u donjem delu ložišta se, takođe, može odrediti i na osnovu energetske bilansa u ovom delu ložišta, uz kontinualno merenje temperatura u ložištu i protoka vazduha i bala slame, pri poznatom tehničkom sastavu biomase. Prednost ovog metoda je u tome što se praćenje udela koksnog ostatka, koji sagoreva u donjem delu ložišta, može pratiti kontinualno, u toku rada postrojenja i podatak se može dobiti odmah, bez čekanja rezultata analiza pepela.

Analiza dogorevanja koksnog ostatka se može izvesti za dva slučaja: kada nema sagorevanja u donjem delu ložišta i kada sav koksnostatak sagoreva u donjem delu ložišta. U prvom slučaju vazduh koji ulazi u donji deo ložišta se zagreva od entalpija pepela i koksnog ostatka koji padaju u donji deo ložišta, kao i od toplote razmenjene zračenjem sa dimnih gasova iz zone sagorevanja bale. U drugom slučaju se mora uzeti u obzir i toplota sagorevanja koksnog ostatka koji ulazi u donji deo ložišta. Prema tome bilans toplotnih protoka kada nema sagorevanja u donjem delu ložišta se može izraziti kao:

$$Q_c + Q_p + Q_r = Q_v \quad (2)$$

odnosno kada u donjem delu ložišta ima sagorevanja:

$$Q_c + Q_p + Q_r + Q_s = Q_v \quad (3)$$

gde su:  $Q_c$  – toplotni protok usled entalpije koksnog ostatka koji ulazi u donji deo ložišta,  $Q_p$  – toplotni protok usled entalpije pepela;  $Q_r$  – toplotni protok usled zračenja,  $Q_s$  – izvor toplote od sagorevanja koksnog ostatka u donjem delu ložišta;  $Q_v$  – toplotni protok koji se troši na zagrevanje protoka vazduha ka donjem delu ložišta.

Navedeni toplotni protoci su definisani sledećim izrazima:

$$\begin{aligned} Q_c &= \dot{m}_c c_c (t_s - t_p) \\ Q_p &= \dot{m}_p c_{p,p} (t_s - t_p) \\ Q_v &= \dot{m}_v c_{p,v} (t_p - t_v), \\ Q_s &= \dot{m}_c \Delta H_c \end{aligned}$$

gde su:

$\dot{m}_c$  - maseni protok koksnog ostatka;

$\dot{m}_p$  - maseni protok pepela koji možemo izračunati formulom:  $\dot{m}_p = \dot{m}_b \cdot u_p$ , gde je  $\dot{m}_b$  - maseni protok goriva – biomase,  $u_p$  - udeo pepela u biomasi;

$\dot{m}_v$  - maseni protok svežeg vazduha koji ulazi u donji deo ložišta;

$c_c$  - specifični toplotni kapacitet koksnog ostatka;

$c_{p,p}$  - specifični toplotni kapacitet pepela;

$c_{p,v}$  - specifični toplotni kapacitet vazduha;

$t_s$  - temperatura vazduha u glavnoj zoni sagorevanja biomase;

$t_p$  - temperatura u donjem delu ložišta;

$t_v$  - temperatura svežeg vazduha koji ulazi u donji deo ložišta;

$\Delta H_c$  - donja toplotna moć koksnog ostatka.

Sve navedene veličine, osim  $\dot{m}_c$ , se mogu izmeriti, dobiti tehničkim analizama pepela i goriva ili naći u termofizičkim tablicama.

Toplotni protok usled zračenja se može izračunati primenom sledećeg postupka:

$$Q_r = \varepsilon'_2 C_c \left[ \varepsilon_g \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \alpha_g \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 \right] \cdot A,$$

gde su:  $\varepsilon'_2$  - efektivni koeficijent emisije sive površine,  $\varepsilon'_2 = 0.5(1 + \varepsilon_2) = 0.965$ ,  $\varepsilon_2 = 0.93$  - koeficijent emisije sive površine;  $C_c = 5.67 W / m^2 K^4$  - konstanta zračenja apsolutno crnog tela; A- površina poprečnog preseka donjeg dela ložišta;  $\varepsilon_g$  - koeficijent emisije smeše gasova:  $\varepsilon_g = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} = 0.7$ , gde je  $\varepsilon_{CO_2} = 0.2$  koeficijent emisije ugljendioksida,  $\varepsilon_{H_2O} = 0.5$  koeficijent emisije vodene pare;  $\alpha_g$  - koeficijent apsorpcije

smeše gasova:  $\alpha_g = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O}$ ,  $\alpha_{CO_2}$  koeficijent apsorpcije ugljen dioksida,  $\alpha_{H_2O}$  - koeficijent apsorpcije vodene pare;

Rešavanjem bilansa (2), odnosno (3), po veličini  $\dot{m}_c$ , uz merenje odgovarajućih ostalih podataka, mogu se dobiti podaci o masenom protoku koksog ostatka koji pada u donji deo ložišta. Predložena analiza je sprovedena za dva slučaja čiji su rezultati navedeni u nastavku.

*Kada nije bilo sagorevanja u donjem delu ložišta*, pri izmerenoj temperaturi sagorevanja  $t_s = 830^\circ\text{C}$  i temperaturi iznad donjeg dela ložišta  $t_p = 150^\circ\text{C}$ , protoku ulazne biomase  $\dot{m}_b = 0.11 \text{ kg/s}$ , i protoku ulaznog vazduha  $\dot{m}_v = 0.365 \text{ kg/s}$ , dobija se da je udeo

nesagorelog ugljenika u pepelu sa koksnim ostatkom  $\frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_p + u_c} = 15 \%$  a udeo koksnog

ostatka koji pada u donji deo ložišta u odnosu na ukupni kokсни ostatak koji ulazi sa biomasom  $\frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_b \cdot u_c} = 5,78 \%$ .

*Kada je bilo sagorevanja u donjem delu ložišta*, pri izmerenoj temperaturi sagorevanja  $t_s = 889^\circ\text{C}$  i temperaturi iznad donjeg dela ložišta  $t_p = 420^\circ\text{C}$ , protoku ulazne biomase  $\dot{m}_b = 0.11 \text{ kg/s}$ , protoku ulaznog vazduha  $\dot{m}_v = 0.238 \text{ kg/s}$  i njegovoj temperaturi  $t_v = 25^\circ\text{C}$  dobija se da je udeo nesagorelog ugljenika u pepelu sa koksnim ostatkom

$\frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_p + u_c} = 15 \%$  a udeo koksnog ostatka koji pada u donji deo ložišta u odnosu na ukupni

kokсни ostatak koji ulazi sa biomasom  $\frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_b \cdot u_c} = 6,24 \%$ .

Kako se iz navedenih analiza vidi, oko 6% od ukupnog protoka koksnog ostatka biomase koja ulazi u ložište, pada u donji deo ložišta. Podaci dobijeni na osnovu navedena dva merenja, obrađeni predloženom metodom, se dobro slažu sa rezultatima tehničke analize pepela, iznetim u prvom delu ovog poglavlja.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je predložen postupak određivanja udela koksnog ostatka balirane biomase koji sagoreva u donjem delu ložišta. Data procedura se bazira na energetskom i masenom bilansu u ovom delu ložišta, pri čemu se pretpostavlja da se protok vazduha, koji ulazi u zonu dogorevanja koksnog ostatka, zagreva entalpijama koksnog ostatka i pepela, koji padaju iz zone sagorevanja bale, kao i energijom prenetom zračenjem i toplotom sagorevanja koksnog ostatka (u slučaju kada je kada u ovoj zoni ima sagorevanja). Na osnovu rezultata kontinualnog merenja temperatura u ložištu, protoka vazduha i bala slame i pri poznatom tehničkom sastavu biomase, primenom predloženog postupka proračuna može se proceniti udeo koksnog ostatka balirane biomase koji sagoreva u donjem delu ložišta. Obradena su dva primera: kada nema sagorevanja u donjem delu ložišta i kada sav kokсни ostatak sagoreva u donjem delu ložišta, koji su upoređeni sa metodom koja se zasniva na tehničkoj analizi pepela. Prednost metode koja se bazira na analizi energetskih bilansa je u tome što se praćenje udela koksnog ostatka, koji sagoreva u donjem delu ložišta, može pratiti kontinualno, u toku rada postrojenja, bez čekanja

rezultata analiza pepela. Rezultati dobijeni na osnovu energetskog bilansa, kao i na osnovu tehničke analize pepela, pokazuju da oko 6% od ukupnog protoka koksnog ostatka biomase koja ulazi u ložište, pada u donji deo ložišta. Ovaj podatak potvrđuje potrebu za obraćanjem posebne pažnje prilikom konstruisanja dela ložišta za dogorevanje koksnog ostatka, što znači da je primena ložišta sa fluidizovanim slojem, u ovoj zoni, potpuno opravdana.

## LITERATURA

[1] Simeon N. Oka, *Sagorevanje u fluidizovanom sloju*, Jugoslovensko društvo termičara, Beograd 1994

[2] A. Erić, B.Repić, S. Nemoda, G. Živković, M. Mladenović, N. Mirkov, M. Erić, D. Đurović, D. Dakić, *Rezultati termičkih ispitivanja PKB kotla sa cigaretnim sagorevanjem balirane sojine slame*, Interni izveštaj, Laboratorija za termotehniku i energetiku, Institut za nuklearne nauke Vinča

[3] A. Erić, B.Repić, D. Dakić, M. Paprika, *Analiza karakteristika više tipova biomase iz poljoprivredne proizvodnje*, Interni izveštaj, NIV-ITE-315, Lab. za termotehniku i energetiku, Institut za nuklearne nauke Vinča

[4] M. Radovanović, *Goriva*, Mašinski fakultet u Beogradu 1994.