

**ODREĐIVANJE STAGNANTNE TOPLOTNE PROVODLJIVOSTI  
BALIRANOG SOJINOG OSTATKA**  
**DETERMINATION OF STAGNANT THERMAL CONDUCTIVITY  
COEFFICIENT FOR BALED SOY BEAN RESIDUE**

A. Erić<sup>1</sup>, D. Dakić<sup>1</sup>, S. Nemoda<sup>1</sup>, M. Komatina<sup>2</sup>, B. Repić<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za termotehniku i energetiku, Mike Petrovića Alasa 12-14, Beograd

<sup>2</sup> Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd

E-mail: erica@vinca.rs

**SAŽETAK**

U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalnih istraživanja određivanja stagnatne toplotne provodljivosti poroznog sloja balirane biomase, koja predstavlja jednu od najvažnijih termofizičkih karakteristika ovog materijala sa tačke gledišta sagorevanja u potisnim ložištima (sa tzv. cigaretnim sagorevanjem). Dobijena zavisnost značajna je za optimalizaciju procesa sagorevanja balirane biomase, kao i za proces modeliranja transportnih fenomena u poroznom sloju balirane biomase, pri tzv. cigaretnom sagorevanju.

Radi određivanja stagnatne toplotne provodljivosti balirane sojine slame, osmišljena je odgovarajuća eksperimenatlna metoda i projektovana i izrađena odgovarajuća eksperimentalna instalacija. Eksperimentalnim istraživanjima ispitivan je uticaj, relevantnog parametra balirane biomase (poroznosti sloja) na stagnatnu toplotnu provodljivost. Na osnovu sprovedenih merenja, kao i analize eksperimentalnih rezultata, definisana je funkcionalna zavisnost stagnatne toplotne provodljivosti od poroznosti u opsegu od 0,45-0,8. Dobijeni rezultati pokazuju da smanjenjem poroznosti sloja dolazi do smanjenja vrednosti stagnatne toplotne provodljivosti, što može da se objasni smanjenjem zapremina pora, odnosno vazduha, koji aktivno učestvuje u procesu prenošenja toplote kroz porozni sloj.

Stagnatna toplotna provodljivost, kao i njena zavisnost poroznosti, polazne su osnove u matematičkom modeliranju procesa sagorevanja balirane biomase po principu cigarete, a takođe mogu biti veoma značajni pri analizi eventualnih konstrukcionih izmena na ložištu, koje radi na ovom principu.

**Ključne reči:** stagnatna toplotna provodljivost, balirana sojina slama, cigaretno sagorevanje

**1. UVOD**

sagorevanje balirane biomase po principu cigaretnog sagorevanja je nova i nedovoljno istražena tehnologija [Bech 1996 i Mladenović 2008]. U cilju teorijskog i eksperimentalnog

izučavanja procesa sagorevanja balirane biomase, kao i njegove praktične primene, u Laboratoriji za termotehniku i energetiku, Instituta „Vinča“ osmišljen je, konstruisan i izrađen industrijsko-demonstracioni kotao snage 1,5 MW u okviru Poljoprivrednog kombinata „Beograd“ sa sagorevanjem otpadne balirane sojine slame za grejanje 1ha plastenika. Sagorevanje u ložištu kotla obavlja se po principu „cigaretnog sagorevanja“ [Mladenović 2008, Miltner 2007], pri čemu se kao gorivo koriste bale dimenzija 0,7×1,2×2,0 m. Gorivo (balirana biomasa) ulazi u ložište kontinualno, pri čemu se u bali formiraju zone sušenja, devoaltilizacije i sagorevanja koksnog ostatka. Složenost transportnih procesa koji formiraju pomenute zone je povećana činjenicom da se oni odvijaju u poroznom sloju, čije karakteristike su nepoznate. Za modeliranje transportnih fenomena u poroznom sloju balirane biomase neophodno je poznavanje termofizičkih karakteristika o kojima u literaturi nema dovoljno podataka [Bech 1996 i Miltner 2007]. Najvažnije termofizičke karakteristike koje je potrebno definisati pri numeričkoj simulaciji sagorevanja baliranog sojinog ostatka su: poroznost, permeabilnost i toplotna provodljivost.

Prema modelu trenja [Kaviany], koji se najčešće koristi za opisivanje pojava prenošenja u poroznoj sredini, toplota se provođenjem unutar same sredine naizmenično ili paralelno prenosi i kroz čvrstu i kroz gasovitu fazu, a ova pojava je intenzivnija ako u poroznoj sredini postoji strujanje gasovite faze unutar pora. Model trenja, u suštini, pojednostavljuje ovaj složen oblik prenošenja toplote uvođenjem jednog koeficijenta koji u obzir uzima sve ove mehanizme i pretpostavlja kao da se toplota u poroznoj sredini prenosi samo provođenjem. Odatle se i taj koeficijent definiše tako da odgovara koeficijentu provođenja toplote i naziva se efektivna toplotna provodljivost ( $\lambda_{eff}$ ), [Kaviany, Nield 2006 i Nemoda 2004].

Ova termička veličina je veoma složena i zavisi od mnoštva faktora, kao što su: geometrijska karakteristika porozne sredine (poroznost, veličina i oblik pora, zakrivljenost pora, procenat zatvorenih pora itd.), toplotna provodljivost čvrste i gasovite faze, hidrodinamičkih osobina gasovite faze (brzina, pritisak i temperatura), karakteristika strujanja (laminarno i turbulentno) itd. Prema ovoj grupi uticajnih faktora efektivna toplotna provodljivost, pri laminarnom strujanju, može da se podeli na dva suštinska dela i to na stagnatnu ( $\lambda_o$ ), disperznu ( $\lambda_{dis}$ ) toplotnu provodljivost:

$$\lambda_{eff} = \lambda_o + \lambda_{dis} \quad (1)$$

Toplotna disperzija je pojava koja se javlja u poroznoj sredini kao posledica mešanja gasovite faze na nivou pora, koje je uzrokovano nekim spoljašnjim uticajem [Kaviany i Nield 2006].

Stagnatna toplotna provodljivost predstavlja toplotnu provodljivost porozne sredine u uslovima mirovanja gasovite faze. Na nju, u tom slučaju, kvantitativno i kvalitativno utiču sledeći faktori porozne sredine: veličina poroznosti ( $\varepsilon$ ), toplotna provodljivost čvrste ( $\lambda_s$ ) i gasovite faze ( $\lambda_f$ ), kao i raspored pora i čvrste matrice u odnosu na pravac prenošenja toplote (gradijent temperature). Ako se pretpostavi da se prenošenje toplote kroz poroznu sredinu obavlja paralelno kroz pore i čvrstu materiju, onda stagnatna toplotna provodljivost će imati oblik sledeće zavisnosti [Nield 2006]:

$$\lambda_o = (1 - \varepsilon) \lambda_s + \varepsilon \lambda_f \quad (2)$$

Drugi slučaj orijentacije matricne strukture, kod koje se pore i čvrsta materija smenjuju naizmenično u pravcu prostiranja toplote, može da se predstavi u sledećem obliku [Niield 2006]:

$$\frac{1}{\lambda_o} = \frac{1-\varepsilon}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon}{\lambda_f} \quad (3)$$

Iz ove dve jednačine jednostavnom matematičkom analizom može da se zaključi da je vrednost toplotne provodljivosti, pri aritmetičkoj raspodeli, uvek veći od toplotne provodljivosti, osim u slučaju jednakosti koeficijenata  $\lambda_s$  i  $\lambda_f$ .

Za praktične primene u literaturi [Niield 2006] pominje se još jedna zavisnost između  $\lambda_s$  i  $\lambda_f$ , pri definisanju stagnatne toplotne provodljivosti:

$$\lambda_o = \lambda_s^{1-\varepsilon} \cdot \lambda_f^\varepsilon \quad (4)$$

Ova zavisnost, međutim, ne daje dobre rezultate u slučaju kada je razlika u vrednosti koeficijenata  $\lambda_s$  i  $\lambda_f$  izrazito velika (za red veličina). Dobri rezultati stagnatne toplotne provodljivosti, u praksi, nisu samo uslovljeni poznavanjem vrednosti koeficijenata  $\lambda_s$  i  $\lambda_f$ , nego i poznavanjem i postojanjem pravilne geometrije porozne sredine. Naime, u slučaju porozne sredine vlaknaste strukture, ako je prostiranje toplote duž ose vlakana, onda je ispravno koristiti aritmetičku zavisnost, pri definisanju stagnatnog koeficijenta provođenja toplote. U drugom slučaju, poprečnog prostiranja toplote u odnosu na orijentaciju vlakana, treba koristiti harmonijsku zavisnost. Međutim, u praksi se najčešće ne sreću ovako pravilno definisani problemi, pa svako ovakvo razmatranje može da dovede do nekorektnih ili netačnih podataka. Stoga se najčešće pribegava eksperimentalnom određivanju stagnatne toplotne provodljivosti.

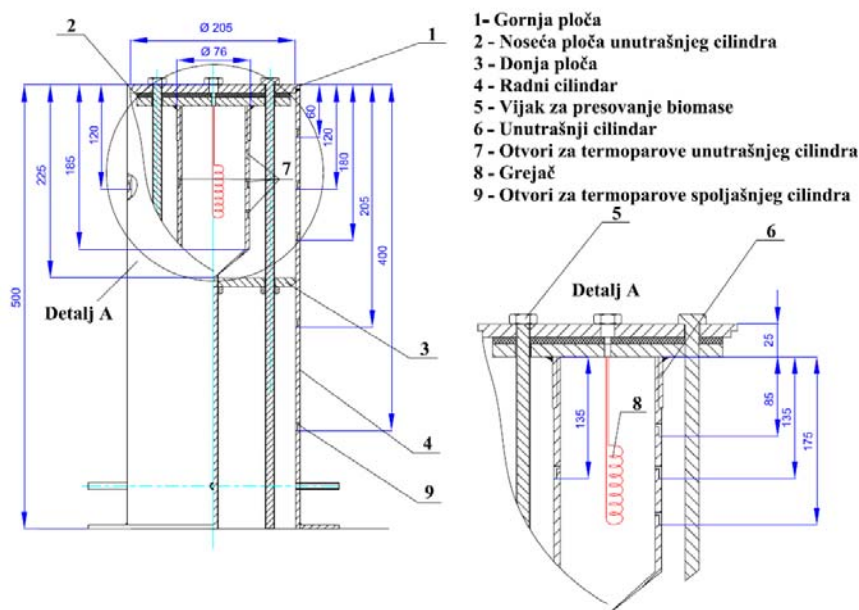
## 2. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Analizom dostupnih komercijalnih aparatura za određivanje toplotne provodljivosti raznih materijala utvrđena je nemogućnost primene za dati slučaj baliranog sojinog ostatka, jer bi uzorak koji bi reprezentovao pojave u vezi sa prenošenjem toplote bio znatno veće zapremine od radne zapremine aparature. Stoga je za izvođenje eksperimenata, radi određivanja stagnatne toplotne provodljivosti baliranog sojinog ostatka konstruisana i izrađena sopstvena eksperimentalna aparatura na kojoj je moguće određivati  $\lambda_o$ , pri različitim vrednostima poroznosti (Slika 1). Aparatura omogućava da se promenom zapremine radnog dela (poz. 4), u kojem se nalazi uzorak konstantne mase, varira njegova poroznost u izabranom opsegu. Zbog karaktera porozne matrice sloja balirane biomase, u mnogome je opravdana usvojena pretpostavka da ispitivani uzorci imaju izotropan karakter. Pored toga, pretpostavlja se da način promene poroznosti, promenom zapremine uzorka samo u jednom pravcu (aksijalno), ne utiče bitno na pojavu anizotropnosti ispitivanog materijala. Radni deo aparature je dovoljno veliki tako da omogućava rad sa 1kg uzorka u slobodnoj formi, što predstavlja dovoljnu količinu kojom bi se u znatnoj meri smanjio uticaj eventualne anizotropnosti uzorka na krajnji rezultat.

Radni deo aparature prikazan je na poz. 4, ima svrhu da obezbedi željenu poroznost presovanjem sojinog ostatka između gornje (poz.1) i donje ploče (poz. 3) pomoću vijaka (poz. 5), a centralni cilindar (poz. 6) ima ulogu toplotnog izvora. Unutrašnji cilindar je

postavljen na nosećoj ploči (poz. 2). Izvor toplote se obezbeđuje pomoću električnog grejača (poz. 8) podesive snage, a toplotni protok se ostvaruje sa centralnog cilindra ka spoljašnjem cilindru (poz. 4). Mesta za merenje temperature na površini unutrašnjeg i spoljašnjeg cilindra prikazana su na pozicijama 7 i 9. Kupasti deo na unutrašnjem cilindru konstruktivno je predviđen, radi lakšeg presovanja baliranog sojinog ostatka. Između gornje ploče i radnog cilindra postavljen je sloj izolacije, radi sprečavanja toplotnog mosta između ova dva dela aparature, tako da je provođenje toplote s unutrašnjeg cilindra na spoljašnji preko gornje ploče sveden na najmanji mogući. Kada je reč o donjoj ploči kontakt između nje i radnog cilindra se u najboljem slučaju ostvaruje u jednoj tački, jer se radi o kružnim oblicima različitog prečnika (199 mm – prečnik donje ploče i 205 mm – unutrašnji prečnik radnog cilindra), pa je toplotni protok, takođe, sveden na minimum. Odavde se može zaključiti da se prolaženje toplote s unutrašnjeg cilindra na spoljašnji odvija uglavnom provođenjem kroz sloj sojinog ostatka.

Otvori za merenje temperatura na predstavljenoj aparaturi prikazani su na slici 1, kao i pozicije na kojima su oni postavljeni. Radi sagledavanja pravilne, ravnomerne raspodele temperatura po obimu oba cilindra, predviđen je po jedan otvor na suprotnoj strani na mestu gde je merenje temperature najznačajnije sa polazišta određivanja stagnatne toplotne provodljivosti.

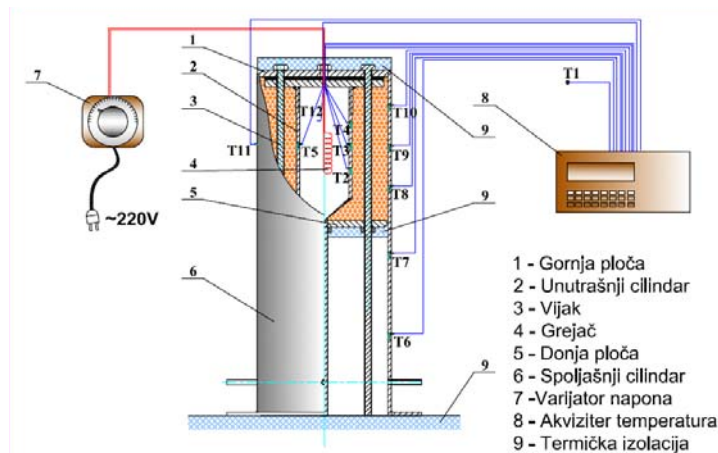


Slika 1. Eksperimentalna aparatura za određivanje toplotne provodljivosti

Figure 1. Experimental installation for thermal conductivity determination

Šema aparature za izvođenje eksperimenata prikazana je na slici 2. Princip merenja toplotne provodljivosti se, kao što je rečeno, zasniva se na merenju temperatura spoljašnjeg

i unutrašnjeg cilindra, kao i okolne temperature pomoću termoparova (T1–T12), koja je potrebna za određivanje toplotnog protoka sa spoljašnjeg cilindra, što ujedno predstavlja isti toplotni protok kroz sloj biomase. Prikupljanje podataka o temperaturama obavljeno je pomoću akvizitera temperatura KEITHLEY (poz. 8). Radi smanjenja toplotnih gubitaka aparatura je izolovana stiroporom (poz. 9). Regulacija temperature unutrašnjeg cilindra, koja ne bi trebalo da pređe granicu od 100°C obavljena je pomoću regulatora napona (poz. 7).



Slika 2. Šema eksperimentalne aparature za određivanje stagnatne toplotne provodljivosti  
Figure 2. Scheme of experimental installation for stagnant thermal conductivity determination

Osnovna jednačina koja je korišćena prilikom određivanja stagnatne toplotne provodljivosti je jednačina koja proističe iz Fourier-ovog zakona da je toplotni protok kroz neku sredinu proporcionalan gradijentu temperature, a koeficijent te proporcionalnosti se naziva toplotna provodljivost [Milinčić 1989]. Za slučaj stacionarnog provođenja toplote kroz cilindrični zid konduktivnost može da se napiše u sledećem obliku:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{(2\pi l \Delta T) \ln(d_2/d_1)} \quad (5)$$

gde su  $d_2$  i  $d_1$  spoljašnji i unutrašnji prečnik cilindra,  $l$  dužina cilindra,  $\dot{Q}$  količina toplote koja prođe kroz uzorak, a  $\Delta T$  gradijent temperature. Na taj način, merenjem razlike temperatura između spoljašnjeg i unutrašnjeg cilindra, kao i toplotnog protoka između ova dva cilindra, moguće je jednostavno odrediti toplotnu provodljivost. Ova metodologija je primenjena za slučaj određivanja toplotne provodljivosti baliranog sojinog ostatka, što je prikazano u ovom radu.

Računsko određivanje toplotnog protoka obavljeno je na osnovu procene količine toplote predate okolini na dva načina. Prvi način je pomoću određivanja srednjeg Nuselt-ovog broja opšteprihvaćenom formulom iz literature [Kozic 1999] u sledećem obliku:

$$|Nu| = 0,76 (Gr \cdot Pr_f)^{0,25} (Pr_f / Pr_A)^{0,25} \quad (6)$$

gde su  $Pr_f$  i  $Pr_A$  Prandtl-ovi brojevi za temperaturu fluida u slobodnoj struji i temperaturu fluida u blizini zida. Odavde se količina toplote predata okolini, odnosno toplota koja prolazi kroz uzorak, može da se odredi kao [8]:

$$|\dot{Q}| = \alpha D_2 \pi L (T_{sp}^{sr} - T_{ok}) \quad (7)$$

gde je  $\alpha = Nu \lambda / L$ ,  $\lambda$  – toplotna provodljivost vazduha na okolnoj temperaturi ( $T_{ok}$ ),  $D_2 = 0,215$  m - prečnik spoljašnjeg zida, a  $T_{sp}^{sr}$  - srednja temperatura spoljašnje površine zida. Ovde je bitno napomenuti da je zbog velike vrednosti toplotne provodljivosti materijala zida pretpostavljeno da se temperatura duž debljine zida može smatrati konstantnom. Određivanje temperature  $T_{sp}^{sr}$  obavljeno je ponderisanjem na površinu čiju temperaturu reprezentuju, tako na primer, temperatura  $T_{10}$  reprezentuje površinu cilindra prečnika 0,215 m i visine 0,09 m itd, pa srednja temperatura zida može da se predstavi formulom:

$$T_{sp}^{sr} = (T_{10} \cdot 0,09 + T_9 \cdot 0,06 + T_8 \cdot 0,06 + T_7 \cdot 0,130 + T_6 \cdot 0,160) / 0,5 \quad (8)$$

Kada je reč o određivanju razlike temperatura  $\Delta T$  iz jednačine (5) potrebno je napomenuti da je usvojena još jedna pretpostavka, a to je jednakost temperature zida i površine uzorka, koji je u kontaktu sa njim. Za karakteristične temperature na spoljašnjoj i unutrašnjoj površini uzorka usvojene su srednje temperature zidova na datim deonicama, pa  $\Delta T$  može da se predstavi kao:

$$\Delta T = [(T_2 + T_3 + T_4) - (T_8 + T_9 + T_{10})] / 3 \quad (9)$$

Unutrašnji „cilindar“, kao što može da se vidi sa slike 1 nije celom dužinom cilindričnog oblika, nego na svom kraju sadrži kupu visine 0,04 m, pa je u skladu sa time obavljena i korekcija njegove dužine. Korekcija je obavljena tako što je na cilindrični deo dužine 0,16 m dodat još jedan cilindar dužine 0,0218 m, čija je površina jednaka površini kupe. Tako uz pomenutu korekciju dužina  $l$  iz jednačine (5) iznosi  $l = 0,1818$  m. Spoljašnji prečnik unutrašnjeg cilindra iznosi  $d_1 = 0,076$  m, a unutrašnji prečnik spoljašnjeg cilindra  $d_2 = 0,205$  m. Tačnost izložene metodologije određivanja toplotnog protoka sa spoljašnjeg cilindra na okolinu je potvrđeno formiranjem jednostavnog slučaja prirodne konvekcije u kavitetu velikih dimenzija u programu FLUENT. Između ove dve metode primećeno zadovoljavajuće slaganje, pa je stoga izabrana je jednostavnija i brža metoda, pomoću jednačine (5-9).

Validacija metode na prikazanoj aparaturi obavljena je poređenjem rezultata dobijenih merenjem poroznog materijala poznate toplotne provodljivosti. U tu svrhu korišćen je referentni materijal ekspanzirani polistiren (u daljem tekstu: stiropor) poznate toplotne provodljivosti  $\lambda = 0,045$  W/(mK), čija je toplotna provodljivost uporediva s očekivanom toplotnom provodljivošću baliranog sojinog ostatka.

### 3. ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Na prikazanoj aparaturi prema predstavljenoj metodologiji obavljeno je pet eksperimenata sa baliranim sojinim ostatkom i jedan eksperiment validacije metode, odnosno određivanja apsolutne greške aparature sa stiroporom. Izbor temperatura  $T_1$ - $T_{12}$  je sproveden u stacionarnom režimu, nakon približno 20 časova rada. Eksperimenti su obavljeni sa četiri vrednosti poroznosti i to sa: 0,68 (referentna poroznost sojinog ostatka);

0,45 (minimalno moguća poroznost na datoj aparaturi); 0,78 (poroznost bala malih dimenzija) i 0,58 (srednja vrednost poroznosti). Temperature dobijene u eksperimen. koje su polazna osnova za određivanje stagnatne toplotne provodljivosti, prikazane su u tabeli 1.

Tab. 1. Temperature za određivanje toplotne provodljivosti

Tab. 1. Temperatures for determination of thermal conductivity

Temperatura	Poroznost					
	Stiropor	0,68	0,45	0,45*	0,58	0,78
T1, [°C]	13,10	18,19	17,69	17,93	18,36	19,42
T2, [°C]	70,30	60,73	66,52	66,81	60,01	58,25
T3, [°C]	70,41	62,61	67,18	67,43	62,26	60,03
T4, [°C]	64,72	59,03	62,08	62,32	58,70	56,60
T5, [°C]	69,90	61,93	66,61	66,89	61,66	59,39
T6, [°C]	20,54	21,66	21,50	19,93	20,18	20,72
T7, [°C]	21,66	22,67	22,49	21,04	21,29	21,82
T8, [°C]	22,76	23,78	23,45	22,25	22,48	22,89
T9, [°C]	23,60	24,62	24,09	23,22	23,45	23,61
T10, [°C]	24,52	25,47	24,63	24,30	24,54	24,44
T11, [°C]	23,61	24,68	24,10	23,23	23,42	23,60
T12, [°C]	62,80	62,88	63,31	64,08	61,14	60,83

\* rezultat je ponovljen radi provere reproduktivnosti metode.

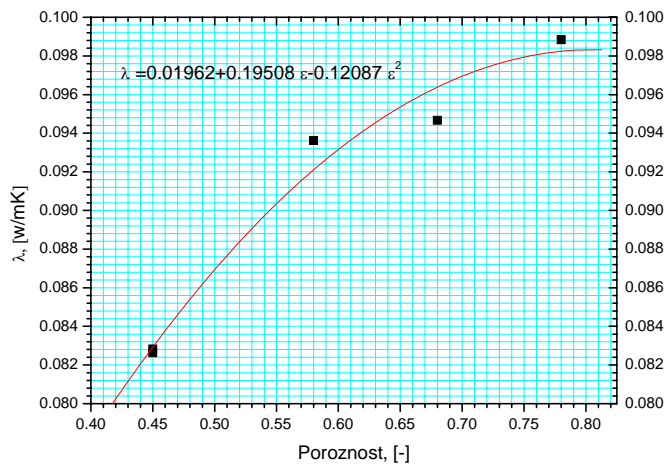
Rezultati proračuna toplotne provodljivosti prema prikazanoj metodologiji su predstavljeni u tabeli 2 i slici 3. Razlika koja je dobijena merenjem toplotne provodljivosti stiropora, čija je kataloška vrednost  $\lambda=0,045$  W/(mK), usvojena je kao apsolutna greška aparature, koja najverovatnije nastaje usled nesavršenosti izolovanja i postojanja izvesnih toplotnih mostova.

Tab. 2. Proračun stagnatne toplotne provodljivosti baliranog sojinog ostatka

Tab. 2. Calculation of stagnant thermal conductivity for baled soy bean residue

Proračunski parametri	Poroznost					
	Stiropor	0,68	0,45	0,45*	0,58	0,78
$\Delta T$ , [K]	51,00	37,16	42,00	42,03	36,68	33,67
$T_{vaz}$ , [K]	286,1	291,2	290,7	290,9	291,3	292,4
$T_{spsr}$ , [K]	289,3	295,1	294,6	294,9	295,2	296,2
$Gr \times 103$ , [-]	64,057	72,922	73,129	72,998	71,639	69,125
$Nu$ , [-]	62,235	64,285	64,331	64,302	64,000	63,431
$\alpha$ , [W/(mK)]	3,1491	3,3814	3,3838	3,3822	3,3664	3,3365
$\dot{Q}$ [W]	3,489	4,661	4,670	4,663	4,561	4,376
$\lambda$ , [W/(mK)]	0,0606	0,1104	0,0986	0,0984	0,1094	0,1145
$\lambda_{kor}$ , [W/(mK)]	0,01565	0,0948	0,0829	0,08276	0,0937	0,0989

\* rezultat je ponovljen radi provere reproduktivnosti metode.



Slika 3. Zavisnost stagnatne toplotne provodljivosti baliranog sojinog ostatka od poroznosti  
 Figure 3. Dependence of stagnant thermal conductivity of balirano soy bean on porosity

Na dijagramu sa slike 3 može da se vidi da stagnatna toplotna provodljivost baliranog sojinog ostatka raste sa porastom poroznosti. Ako se sada analiziraju jednačine za stagnatnu toplotnu provodljivost (2-4), može da se primeti neslaganje sa trendovima krivih. Jednačina (2) podrazumeva paralelan način provođenja toplote kroz pore i matricu i prema njoj toplotna provodljivost matrice iznosi  $\lambda_s=0,26 \text{ W/(mK)}$  za vrednost toplotne provodljivosti gasne faze  $\lambda_f=0,025 \text{ W/(mK)}$  [Kozic 1999]. Zamenjujući ovu vrednost u jednačini (2) dobija se jednačina kod koje opada stagnatna toplotna provodljivost sa povećanjem poroznosti, pa je zaključak da se ova jednačina ne može da se koristi za ovaj razmatrani slučaj. Razmatrajući jednačinu za serijski model provođenja toplote kroz poroznu sredinu (3), za dati slučaj dobija se negativna vrednost toplotne provodljivosti matrice, pa ni ova jednačina nije pogodna za upotrebu. Jednačina (4) pretpostavlja harmonijski model provođenja toplote i za date uslove dobija se vrednost toplotne provodljivosti matrice od  $\lambda_s=1,92 \text{ W/(mK)}$ . Zamenjujući ovu vrednost u pomenutu jednačinu, takođe se primećuje trend opadanja vrednosti toplotne provodljivosti sa povećanjem poroznosti.

Iz ove analize se zaključuje da ni jedna od pomenutih jednačina za stagnatnu toplotnu provodljivost ne može da se upotrebi za ovaj model porozne sredine, u kojem su vrednosti toplotne provodljivosti matrice i fluida, koji ispunjava njene pore istog reda veličine. Objašnjenje pojave porasta stagnatne toplotne provodljivosti sa porastom poroznosti baliranog sojinog ostatka bi se moglo sagledati u činjenicama koje će sada biti razmatrane. Porozni sloj je sačinjen od otvorenih i zatvorenih pora. Zatvorene pore sprečavaju spoljašnje prinudno strujanje fluida kroz njih, koji je odgovoran za efekat toplotne disperzije. Međutim, unutar njih se nalazi zarobljen fluid, koji jedino može da cirkuliše između zidova koji ga okružuju. Na taj način fluid, prirodnom konvekcijom, obavlja prenošenje toplote sa jednog zida pore na drugi, čime pojačava efekat prenošenja toplote provođenjem. Iz ove pretpostavke može se izvesti određena analogija između ove pojave i efekta disperzije, uz konstataciju da je efekat toplotne disperzije znatno snažniji zbog intenzivnijeg (prinudnog) strujanja fluida, pa se ova pojava možda može nazvati



„kvazidisperzija“. Smanjenjem poroznosti uzorka sojinog ostatka u predloženoj aparaturi, osim smanjenja zapremine otvorenih pora, dolazi i do deljenja zapremine zatvorenih pora. Tako se od manjeg broja većih pora pravi veći broj pora manje zapremine. Usled smanjenja zapremine zatvorenih pora fluid unutar njih ima smanjenu mogućnost cirkulacije, a samim tim i smanjen intenzitet prenošenja toplote između zidova. Na taj način može da se objasni činjenica koja je dobijena eksperimentalnim istraživanjem toplotne provodljivosti baliranog sojinog ostatka, da provodljivost opada sa smanjenjem poroznosti.

Kao rezultat ovih eksperimentalnih istraživanja može da se prikaže opšta jednačina za stagnatnu toplotnu provodljivost baliranog sojinog ostatka u zavisnosti od poroznosti u sledećem obliku:

$$\lambda_o = 0,01962 + 0,19508\varepsilon_{eff} - 0,12087\varepsilon_{eff}^2 \quad (10)$$

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak eksperimentalnog određivanja stagnatne toplotne provodljivosti poroznog sloja balirane sojine slame, kao i uticaja promene poroznosti na njenu vrednost. Uticaj ove karakteristike na stagnatnu toplotnu provodljivost obavljena je u cilju simulacije realnih uslova, prilikom eksploatacije ložišta za sagorevanje balirane sojine slame po principu „cigaretnog sagorevanja“. Razmatran je širok opseg promene uticajnih karakteristika goriva i to poroznosti u opsegu od 0,45-0,8. Primenjena eksperimentalna metoda prilagođena je potrebama dobijanja podataka iz uzoraka koji odgovaraju realnim, eksploatacionim uslovima u ložištu za potisno („cigaretno“) sagorevanje balirane sojine slame. Izvedeni eksperimenti su pokazali da se toplotna provodnost balirane slame smanjuje, smanjenjem poroznosti uzorka, što može da se objasni pojavom smanjenja zapremine zatvorenih pora, pa fluid unutar njih ima smanjenu mogućnost cirkulacije, a samim tim i smanjen intenzitet prenošenja toplote između zidova pora. Pri tome je usvojena pretpostavka da porozna matrica balirane slame ima izotropan karakter. Empirijska zavisnost stagnatne toplotne provodljivosti sloja balirane sojine slame od poroznosti (10) koristiće se prilikom projektovanja ložišta. Podaci dobijeni sprovedenim istraživanjima su značajni prilikom formiranja detaljnih CFD modela procesa u ložištima za „cigaretno“ sagorevanje balirane slame.

#### LITERATURA

- [1] Bech, N., Wolff, L., Germann L. (1996).. Mathematical Modeling of Straw Bale Combustion in Cigar Burners, Energy & Fuels, No 10, pp. 276-283.
- [2] Mladenović R., Erić A., Mladenović M., Repić B., Dakić D. (2008). „Energy production facilities of original concept for combustion of soya straw bales“, 16<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition – From Research to Industry and Markets, Proceedings on DVD-ROM, ISBN 978-88-89407-58-1, Valencia, Spain, 2-6 June.
- [3] Miltner M., Miltner A., Harasek M., Friedl A. (2007). Process simulation and CFD calculations for the development of an innovative baled biomass-fired combustion chamber, Applied Thermal Engineering 27 1138–1143.
- [4] Kaviany M. (2006). Principles of Heat Transfer in Porous Media, Second Edition, Springer.
- [5] Nield D. A., Bejan A. (2006). Convection in Porous Media, Springer Science Business Media, Inc.

- [6] Nemoda S., Trimis D., Zivkovic G. (2004). Numerical simulation of porous burners and hole plate surface burners, *Thermal Science*, Vol. 8, No. 1, S. 3-17.
- [7] Milinčić D. (1989). *Prostiranje toplote*, Peto dopunjeno i prerađeno izdanje, Naučna knjiga, Beograd.
- [8] Kozić Đ., Vasiljević B., Bekavac V. (1999). *Priručnik za termodinamiku, u jedinicama SI sistema*, Mašinski fakultet, Beograd.

#### SUMMARY

The paper presents results of experimental determination of the stagnant thermal conductivity coefficient of a porous bed formed by biomass bales. The said coefficient represents one of the most important parameters of the bed material specified when considering its combustion in the pusher-type furnaces (i.e. combustion of biomass bales in cigar burners). Correlation obtained is deemed very important for optimization of biomass bale combustion, as well as for modelling transport phenomena occurring in the porous bed formed by biomass bales during their combustion in cigar burners.

In order to determine stagnant thermal conductivity coefficient of soy bean straw bales, appropriate experimental method and suitable experimental apparatus were designed and constructed. Experimental investigation was conducted in order to study the effects of relevant biomass bale parameter, i.e. porosity on the stagnant thermal conductivity coefficient. Based on analysis of the said measurement, the results of the functional dependencies of the stagnant thermal conductivity coefficient on the porosity, which was varied in the range 0.6 – 0.8, were defined. Performed experiments have shown that the stagnant thermal conductivity of baled straw decreases with decreasing porosity of the sample, which can be explained by reduction of the closed pores volume, and, accordingly, fluid within them has reduced ability of circulation which causes reduced intensity of heat transfer between the pore walls. The data obtained through investigation are deemed very useful in developing a detailed CFD model for combustion of straw bales in cigar burners.

**Key words:** stagnant thermal conductivity, soy bean straw bales, „cigarette“ combustion

Primljeno: 22.9.2010.

Prihvaćeno: 4.10.2010.