

Александар М. Ерић<sup>1\*</sup>, Мирко С. Комајина<sup>2</sup>,  
Стеван Ђ. Немода<sup>1</sup>, Драгољуб В. Дакић<sup>3</sup>,  
Бранислав С. Рейић<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Лабораторија за термотехнику и енергетику,

Институт за нуклеарне науке „Винча”, Универзитет у Београду, Београд, Србија

<sup>2</sup> Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

<sup>3</sup> Иновациони центар, Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

## Одређивање стагнантне топлотне проводљивости балираног пољопривредног остатка

Оригинални научни рад

У овом раду приказани су резултати експериментално одређивања стагнантне топлотне проводљивости балиране биомасе, која представља важну термодинамичку карактеристику материјала са особинама порозног слоја. Добијена зависност значајна је за оптимизацију процеса сагоревања балиране биомасе, као и за процес моделирања трансферних феномена у порозном слоју балиране биомасе.

Ради одређивања стагнантне топлотне проводљивости балиране пољопривредне биомасе, осмишљена је експериментална метода и израђена одговарајућа експериментална инсталација. Експерименталним испитивањима испитиван је утицај порозности слоја на стагнантну топлотну проводљивост. На основу сprovedених мерења, као и анализе експерименталних резултата, дефинисана је функционална зависност стагнантне топлотне проводљивости од порозности у опсезу од 0,50–0,85. Добијени резултати показују да смањењем порозности слоја до вредности од 0,65 долази до смањења вредности стагнантне топлотне проводљивости, што може да се објасни смањењем времена пора, односно ваздуха, који активно учествује у процесу преношења топлоте кроз порозни слој. Смањењем величине порозности испод 0,65 долази до пораста вредности топлотне проводљивости, што се објашњава тиме да доминантни начин у преношењу топлоте постаје кондукција кроз чврсту и гасовиту фазу.

Стагнантна топлотна проводљивост, као и њена зависност порозности, полазне су основе у математичком моделирању процеса сагоревања балиране биомасе по принципу „цигаретно” сагоревања, а ипак може бити веома значајни при анализи могућих конструкционих измена на ложисти, које ради на овом принципу.

Кључне речи: стагнантна топлотна проводљивост, балирана пољопривредна биомаса, „цигаретно” сагоревање

\* Одговорни аутор; електронска адреса: erica@vinca.rs

## Увод

Сагоревање балиране биомасе по принципу „цигаретног“ сагоревања је нова и недовољно истражена технологија [1, 2]. У циљу теоријског и експерименталног изучавања процеса сагоревања балиране биомасе, као и његове практичне примене, у Лабораторији за термотехнику и енергетику Института „Винча“ осмишљен је, конструисан и израђен индустријско–демонстрациони котао снаге 1,5 MW у оквиру Пољопривредног комбината „Београд“ са сагоревањем отпадне балиране сојине сламе за грејање 1 ha пластеника. Сагоревање у ложишту котла обавља се по принципу „цигаретног“ сагоревања [2, 3], при чему се као гориво користе бале димензија  $0,7 \times 1,2 \times 2,0$  m. Гориво (балирана биомаса) улази у ложиште континуално, а у бали се формирају зоне сушења, деволатилације и сагоревања коксног остатка. Сложеност транспортних процеса који формирају поменуте зоне је повећана чињеницом да се они одвијају у порозном слоју, чије су карактеристике непознате. За моделирање транспортних феномена у порозном слоју балиране биомасе неопходно је познавање термофизичких карактеристика о којима у литератури нема довољно података [1, 3]. Најважније термофизичке карактеристике које је потребно дефинисати при нумеричкој симулацији сагоревања балираног сојиног остатка су: порозност, пермеабилност и топлотна проводљивост.

Према моделу трења [4], који се најчешће користи за описивање појава преношења топлоте у порозној средини, топлота се провођењем унутар саме средине наизменично или паралелно преноси и кроз чврсту и кроз гасовиту фазу, а ова појава је интензивнија ако у порозној средини постоји струјање гасовите фазе унутар пора. Модел трења, у суштини, поједностављује овај сложени облик преношења топлоте увођењем коефицијента који у обзир узима све ове механизме (конвективни и кондуктивни) и претпоставља да се топлота у порозној средини преноси само провођењем. Одатле се и тај коефицијент дефинише тако да одговара коефицијенту провођења топлоте и назива се ефективна топлотна проводљивост ( $\lambda_{\text{eff}}$ ) [4–6].

Ова термичка величина је веома сложена и зависи, у општем случају, од мноштва фактора, као што су: геометријска карактеристика порозне средине (порозност, величина и облик пора, закривљеност пора, проценат затворених пора итд.), топлотна проводљивост чврсте и гасовите фазе, хидродинамичких особина гасовите фазе (брзина, притисак и температура), карактеристика струјања (ламинарно и турбулентно) итд. Према овој групи утицајних фактора ефективна топлотна проводљивост, при ламинарном струјању, може да се подели на два суштинска дела и то на стагнантну ( $\lambda_o$ ) и дисперзну ( $\lambda_{\text{dis}}$ ) топлотну проводљивост:

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

Топлотна дисперзија је појава која се јавља у порозној средини као последица струјања гасовите фазе на нивоу пора, које је узроковано неким спољашњим утицајем [4, 5].

Стагнантна топлотна проводљивост представља топлотну проводљивост порозне средине у условима мировања гасовите фазе. На њу, у том случају, квантитативно и квалитативно утичу фактори порозне средине: величина порозности ( $\varepsilon$ ), топлотна проводљивост чврсте ( $\lambda_s$ ) и гасовите фазе ( $\lambda_f$ ), као и распоред пора и чврсте матрице у односу на правац преношења топлоте (градијент температуре). Ако се

претпостави да се преношење топлоте кроз порозну средину обавља паралелно кроз поре и чврсту материју, онда ће стагнантна топлотна проводљивост имати облик зависности [5]:

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

Други случај оријентације матричне структуре, код које се поре и чврста материја смеђују наизменично у правцу простирања топлоте, може да се представи у облику [5]:

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

Из ове две једначине једноставном математичком анализом може се закључити да је вредност стагнантне топлотне проводљивости, при аритметичкој расподеле, увек већи од топлотне проводљивости чврсте фазе, осим у случају када је  $\lambda_s \leq \lambda_f$ .

За практичне примене у литератури [5] помиње се још једна зависност између  $\lambda_s$  и  $\lambda_f$ , при дефинисању стагнантне топлотне проводљивости:

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

Ова зависност, међутим, не даје добре резултате у случају када је разлика у вредности коефицијената  $\lambda_s$  и  $\lambda_f$  изразито велика (за ред величина). Добри резултати стагнантне топлотне проводљивости, у пракси, нису само условљени познавањем вредности коефицијената  $\lambda_s$  и  $\lambda_f$ , него и познавањем и постојањем правилне геометрије порозне средине. Наиме, у случају порозне средине влакнасте структуре, ако је простирање топлоте дуж осе влакана, онда је исправно користити аритметичку зависност, при дефинисању стагнантног коефицијента провођења топлоте. У другом случају, попречног простирања топлоте у односу на оријентацију влакана, треба користити хармонијску зависност. Међутим, у пракси се најчешће не срећу овако правилно дефинисани проблеми, па свако овакво разматрање може да доведе до некоректних или нетачних података. Стога се најчешће прибегава експерименталном одређивању стагнантне топлотне проводљивости, користећи општу формулу [7]:

$$\lambda(T) = -\frac{\dot{q}}{\nabla T} \quad (5)$$

где  $\dot{q}$  представља специфични топлотни проток по јединичној површини. Често се у практичним проблемима узима линеарна зависност топлотне проводљивости и температуре, односно:

$$\lambda_o = \lambda_o^0 (1 \pm bT) \quad (6)$$

при чему је  $\lambda_o^0$  – стагнантна топлотна проводљивост на стандардној температури  $T_0$ , а  $b$  – линеарни коефицијент добијен експерименталним путем. У случају да се коефицијент  $\lambda_o$  не мења линеарно са температуром онда се његова средња вредност између температура  $T_1$  и  $T_2$  може израчунати на следећи начин:

$$\bar{\lambda}_o = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \lambda_o(T) dT \quad (7)$$

Основна једначина која је коришћена приликом одређивања стагнантне топлотне проводљивости је једначина која проистиче из *Fourier*-овог закона да је топлотни проток кроз неку средину пропорционалан градијенту температуре:

$$\bar{Q} = -\lambda \text{grad}T \quad (8)$$

Одавде је лако очљиво да се  $\lambda$ , за једнодимензионални случај бесконачног равног зида у апсолутним вредностима, може представити на следећи начин:

$$\lambda = \frac{|\dot{Q}|}{\frac{\Delta T}{\Delta x}} \quad (9)$$

или за случај цилиндричног зида у облику:

$$\lambda = \frac{|\dot{Q}|}{2\pi l \Delta T} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (10)$$

где су  $d_2$  и  $d_1$  спољашњи и унутрашњи пречник цилиндра, а  $l$  је дужина цилиндра.

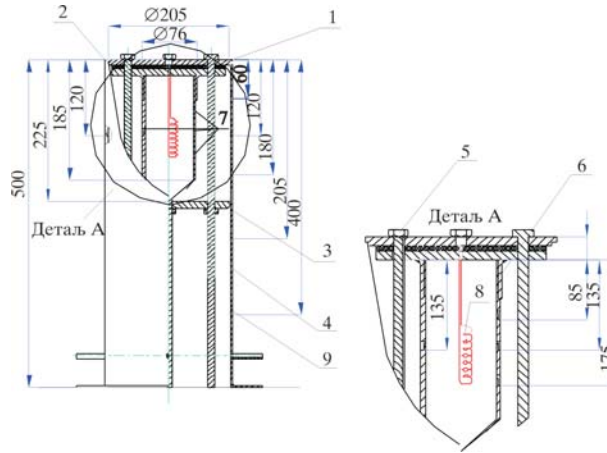
На овај начин, мерењем разлике температура између спољашњег и унутрашњег зида цилиндра, као и топлотног протока између ова два зида цилиндра, могуће је једноставно одредити коефицијент провођења топлоте. Ова методологија је примењена за случај одређивања топлотне проводљивости балиране уљане репице, приказано у наредном поглављу.

### Опис експерименталног истраживања и грешка мерења

Анализом доступних комерцијалних апаратура за одређивање топлотне проводљивости разних материјала утврђена је немогућност примене за дати случај балиране уљане репице, јер би узорак који би репрезентовао појаве у вези са преносењем топлоте био знатно веће запремине од радне запремине апаратуре. Стога је за извођење експеримената, ради одређивања стагнантне топлотне проводљивости конструисана и израђена сопствена експериментална апаратура на којој је могуће одређивати  $\lambda_o$ , при различитим вредностима порозности (сл. 1). Стагнантна топлотна проводљивост је одређивана на основу модела провођења топлоте кроз цилиндрични зид, у чију сврху је обављено мерење разлике температура на спољашњој и унутрашњој страни зида. Апаратура омогућава да се променом запремине радног дела (поз. 4), у којем се налази узорак константне масе, варира његова порозност у изабраном опсегу. Због карактера порозне матрице слоја балиране биомасе, у многоме је оправдана усвојена претпоставка да испитивани узорци имају изотропан карактер. Поред тога, претпоставља се да начин промене порозности, променом запремине узорка само у једном правцу (аксијално), не утиче битно на појаву анизотропности испитиваног материјала. Радни део апаратуре је довољно велики тако да омогућава рад са 1 kg узорка у слободној форми, што представља довољну количину којом би се у знатној мери смањило утицај евентуалне анизотропности узорка на крајњи резултат.

**Слика 1. Радни део експерименталне апаратуре за одређивање топлотне проводљивости**

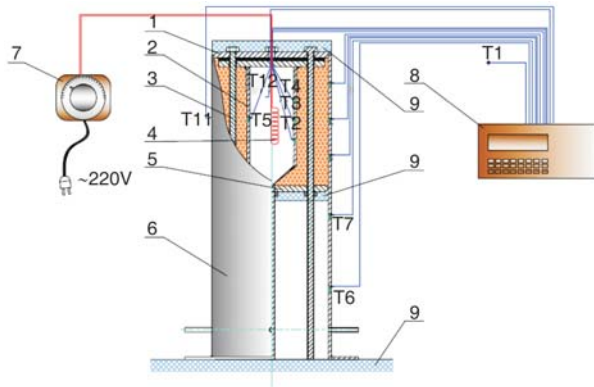
(1) – горња плоча,  
(2) – носећа плоча унутрашњег цилиндра, (3) – доња плоча,  
(4) – радни цилиндар,  
(5) – вијак за пресовање биомасе,  
(6) – унутрашњи цилиндар,  
(7) – отвор за термопарове,  
(8) – грејач, (9) отвор за термопарове спољашњег цилиндра  
(слику можете видети у електронској верзији у пуном колору)



Радни део апаратуре приказан је на позицији (4), има сврху да обезбеди жељену порозност пресовањем уљане репице између горње (1) и доње плоче (3) помоћу вијака (5), а централни цилиндар (6) има улогу топлотног извора. Унутрашњи цилиндар је постављен на носећој плочи (2). Извор топлоте се обезбеђује помоћу електричног грејача (8) подесиве снаге, а топлотни проток се остварује са централног цилиндра ка ануларном цилиндру (4). Места за мерење температуре на површини унутрашњег и ануларног цилиндра су на позицијама (7) и (9). Купасти део на унутрашњем цилиндру конструктивно је предвиђен, ради лакшег пресовања биомасе. Између горње плоче и радног цилиндра постављен је слој изолације, ради спречавања топлотног моста између ова два дела апаратуре, тако да је провођење топлоте с унутрашњег цилиндра на спољашњи преко горње плоче сведен на минимум. Када је реч о доњој плочи контакт између ње и радног цилиндра се у најбољем случају остварује у једној тачки, јер се ради о кружним облицима различитог пречника (199 mm – пречник доње плоче и 205 mm – унутрашњи пречник радног цилиндра), па је топлотни проток, такође, сведен на минимум. Одавде се може закључити да се пролажење топлоте с унутрашњег цилиндра на спољашњи (ануларни) одвија углавном провођењем кроз слој биомасе.

Отвори за мерење температура на представљеној апаратури су приказани на сл. 1, као и позиције на којима су они постављени. Ради сагледавања правилне, равномерне, расподеле температура по ободу оба цилиндра, предвиђен је по један отвор на супротној страни на месту где је мерење температуре најзначајније са становишта одређивања стагантне топлотне проводљивости.

Шема апаратуре за извођење експеримената је приказана на сл. 2. Принципи мерења топлотне проводљивости се, као што је речено, заснива на мерењу температура спољашњег и унутрашњег цилиндра, као и околне температуре помоћу термопарова (Т1–Т12), која је потребна за одређивање топлотног протока са спољашњег цилиндра, што уједно представља исти топлотни проток кроз слој биомасе. Прикупљање података о температурама је обављено помоћу аквизитера температура KEITHLEY (8). У циљу смањења топлотних губитака апаратура је изолована стиропором (9). Регулација температуре унутрашњег цилиндра, која не би требало да пређе границу од 100 °C обављена је помоћу регулатора напона (7).



**Слика 2. Шема експерименталне апаратуре за одређивање стагантне топлотне проводљивости**

(1) – горња њлоча,  
(2) – унутрашњи цилиндар,  
(3) – вијак,  
(4) – грејач,  
(5) – доња њлоча,  
(6) – спољашњи цилиндар,  
(7) – варијатор напона,  
(8) – аквизићер температуре,  
(9) – термоичка изолација  
(шему можете видети у електронској верзији у пуном колору)

Одређивање топлотног протока из једн. (10) се заснива на посматрању топлотног протока са спољашњег зида ануларног цилиндра на околину, при чему се средњи *Nusselt*-ов број одређује применом опште прихваћане формуле [8], која се може изразити у облику:

$$\overline{Nu} = 0,76 (Gr Pr_f)^{0,25} \left( \frac{Pr_f}{Pr_A} \right)^{0,25} \quad (11)$$

где су  $Pr_f$  и  $Pr_A$  *Prandtl*-ови бројеви флуида и зида. Одавде се количина топлоте предата околини у једн. (11) једноставно може одредити као:

$$|\dot{Q}| = \alpha D_2 \pi L (T_{sp}^{sr} - T_{ok}) \quad (12)$$

где је  $\alpha = \overline{Nu} \lambda / L$ ,  $\lambda$  – топлотна проводљивост ваздуха на околној температури ( $T_{ok}$ ),  $D_2 = 0,215$  m – пречник спољашњег зида, а  $T_{sp}^{sr}$  – средња температура спољашње површине зида. Овде је битно напоменути да је, због велике вредности топлотне проводљивости материјала зида, претпостављено да се температура дуж дебљине зида може сматрати константном. Одређивање температуре  $T_{sp}^{sr}$  је обављено пондерисањем на површину чију температуру репрезентују, тако на пример, температура  $T_{10}$  репрезентује површину цилиндра пречника 0,215 m и висине 0,09 m итд., па се средња температура зида може представити формулом:

$$T_{sp}^{sr} = \frac{T_{10} \cdot 0,09 + T_9 \cdot 0,06 + T_8 \cdot 0,06 + T_7 \cdot 0,130 + T_6 \cdot 0,160}{0,5} \quad (13)$$

Када је у питању одређивање резликe температура  $\Delta T$  из једн. (10) потребно је напоменути да је усвојена још једна претпоставка, а то је једнакост температуре зида и површине узорка који је у контакту са њим. За карактеристичне температуре на спољашњој и унутрашњој површини узорка усвојене су средње температуре зидова на датим деоницама, па се  $\Delta T$  може представити као:

$$\Delta T = \frac{(T_2 + T_3 + T_4) - (T_8 + T_9 + T_{10})}{3} \quad (14)$$

Унутрашњи „цилиндар”, што се може видети са сл. 1, није целом дужином цилиндричног облика, већ на свом крају садржи купу висине 0,04 m, па је у складу са тиме извршена и корекција његове дужине. Корекција је урађена тако што је на цилиндрични део дужине 0,16 m додат још један цилиндар дужине 0,0218 m чија је површина једнака површини купе. Тако уз поменуту корекцију, дужина  $l$  из једн. (10) износи  $l = 0,1818$  m. Спољашњи пречник унутрашњег цилиндра износи  $d_1 = 0,076$  m, а унутрашњи пречник спољашњег цилиндра  $d_2 = 0,205$  m.

Приказана апаратура, као и метода одређивања нису прошле пут акредитације, јер она није првенствено намењена комерцијалној употреби, већ само за потребе експерименталног рада, па је у том циљу извршена валидација методе поређењем резултата добијених мерењем порозног материјала познате топлотне проводљивости. У ову сврху коришћен је референтни материјал – експандирани полистирен (у даљем тексту: стиропор) познате топлотне проводљивости  $\lambda = 0,045$  W/mK, чија је топлотна проводљивост упоредива са очекиваном топлотном проводљивошћу балираног сојиног остатка.

На основу резултата добијених мерењем топлотне проводљивости стиропора по описаној методологији, дошло се до корективне вредности за топлотну проводљивост сојиног остатка.

Грешка која је могла бити начињена током мерења је једнака грешки мерења коришћених термопарова типа К, која на опсегу од 0–100 °C износи 0,5 °C, а приликом одређивања топлотног протока се може претпоставити да грешка не може бити већа од 5%.

### Анализа експерименталних резултата

На приказаној апаратури према представљеној методологији извршено је девет експеримената са уљаном репицом и један експеримент валидације методе, односно одређивања апсолутне грешке апаратуре са стиропором. Избор температура  $T_1$ – $T_{12}$  обављен је у стационарном режиму након приближно 24 часа рада. Температуре добијене у поменутим експериментима које су полазна основа за одређивање стагантне топлотне проводљивости су приказане у табл. 1.

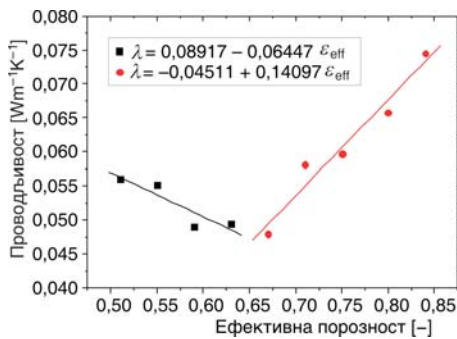
Таблица 1. Температуре за одређивање топлотне проводљивости

Порозност	Температура [°C]											
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$
Стиропор	13,10	70,30	70,41	64,72	69,90	20,54	21,66	22,76	23,60	24,52	23,61	62,80
0,84	17,38	58,47	60,88	57,50	60,25	19,44	20,37	21,29	21,75	22,6	21,92	60,75
0,80	16,25	62,35	63,94	59,93	63,43	18,38	19,26	20,14	20,50	21,37	20,86	60,14
0,75	16,53	56,59	58,88	55,97	58,31	18,26	19,19	20,01	20,31	20,89	20,61	59,65
0,71	16,56	60,33	62,00	57,93	61,59	18,38	19,25	20,09	20,49	21,17	20,63	59,92
0,67	19,13	70,23	71,17	66,34	70,83	21,04	21,86	22,69	23,06	23,70	23,15	66,98
0,63	18,23	73,43	74,21	68,84	73,87	20,15	21,10	22,08	22,58	23,38	22,58	67,93
0,59	18,92	76,32	76,71	71,15	76,28	20,86	21,82	22,86	23,41	24,24	23,55	67,84
0,55	16,26	72,55	72,13	66,80	71,58	18,15	19,21	20,34	20,97	21,94	20,77	64,41
0,51	19,51	74,16	74,8	69,49	74,20	21,69	22,63	23,59	24,00	24,80	24,17	69,61

Резултати прорачуна топлотне проводљивости према приказаној методологији су представљени у табл. 2 и сл. 3. Разлика која је добијена мерењем топлотне проводљивости стиропора, чија је каталожна вредност  $\lambda = 0,045 \text{ W/mK}$ , је усвојена као апсолутна грешка апаратуре, која највероватније настаје услед несавршености изоловања и постојања извесних топлотних мостова.

**Таблица 2. Прорачун стагантне топлотне проводљивости**

Порозност	Nu [-]	$\alpha [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	$ \dot{Q}  [\text{W}]$	$\lambda [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	$\lambda_{\text{кор}} [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$
Стиропор	62,23571	3,149127	3,48936	0,060650	0,01565
0,84	62,30117	3,277041	3,816919	0,090495	0,07447
0,80	62,60178	3,292854	3,839044	0,081796	0,06578
0,75	60,20605	3,166838	3,170601	0,075692	0,05967
0,71	60,75434	3,195678	3,319538	0,074119	0,0581
0,67	60,30438	3,17201	3,333626	0,063932	0,04791
0,63	61,62075	3,241252	3,662114	0,065501	0,04948
0,59	61,81089	3,251253	3,760245	0,065007	0,04899
0,55	62,95606	3,311489	3,949901	0,071243	0,05522
0,51	62,32851	3,278479	3,958971	0,072021	0,056



**Слика 3. Зависност стагантне топлотне проводљивости уљане репице од порозности**

На дијаграму са сл. 3. се може видети да стагантна топлотна проводљивост уљане репице опада са смањењем порозности до вредности порозности од 0,65, а затим са даљим смањењем порозности почиње да расте. Анализирајући најчешће коришћене моделе провођења топлоте кроз порозни слој, који су приказани преко једначина (2)–(4), може се приметити да све три функционалне зависности карактерише пораст стагантне топлотне проводљивости са смањењем порозности. Ова тврдња важи за област када је топлотна проводљивост чврсте фазе већа од топлотне проводљивости флуидне фазе ( $\lambda_s/\lambda_f > 1$ ), јер се тада флуид понаша као одређена врста изолатора па пораст количине флуидне фазе, односно порозности, доводи до смањења преношења топлоте. Овде се мора увести и претпоставка да су поре довољно мале да у њима нема струјања флуида између њихових зидова. Случај који се разматра у овим експерименталним истраживањима припада поменутој области јер је вредност топлотне проводљивости флуидне фазе једнака топлотној проводљивости ваздуха за средњу температуру од приближно  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  износи  $\lambda_f = 0,026 \text{ W/mK}$ , док је претпостављена топлотна проводљивост чврсте фазе око  $\lambda_s = 0,1 \text{ W/mK}$ .



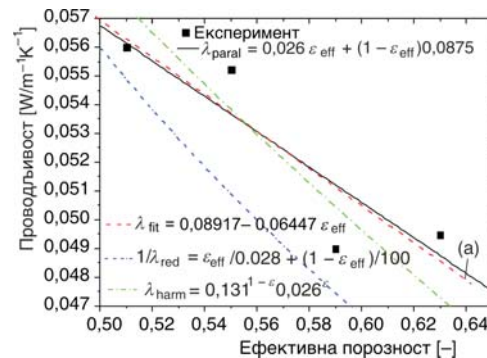
Објашњење појаве пораста стагнантне топлотне проводљивости са порастом порозности може се сагледати у чињеницама које ће бити разматране. Како је већ напоменуто, у порозној средини каква је била уљане репице постоје отворене и затворене поре. Међутим, како се ради о стагнантној топлотној проводљивости (без спољашњег ступања флуида) на њену величину истоветно делују и отворене и затворене поре, а једина разлика се може огледати у њиховој величини. Анализирајући структуру порозног слоја бале, закључује се да су отворене поре знатно веће од затворених пора које се налазе у самој стабљаци. Стога при пресовању (смањење порозности) најпре долази до смањења запремина отворених пора, односно пора које се налазе између стабљика. Унутар пора се налази флуид, који (ако нема спољашњег струјања) може једино да струји унутар пора између зидова који га окружују. На тај начин флуид, природном конвекцијом, преноси топлоту са једног зида поре на други, чиме појачава ефекат преношења топлоте кроз порозни слој. Смањењем порозности узорка сојиног остатка у предложеној апаратури долази до смањења запремина отворених пора као и њиховог дељења. Услед ове појаве флуид унутар њих има смањену могућност циркулације, а самим тим и смањену могућност преношења топлоте између зидова. На тај начин се може објаснити чињеница која је добијена експерименталним истраживањем топлотне проводљивости уљане репице, да проводљивост опада са смањењем порозности до вредности од 0,65.

Са даљим смањењем порозности експериментални резултати показују другачији карактер (сл. 3). Претпоставка је да су отворене поре до те мере смањене да су постале реда величина затворених пора, тако да унутар њих нема циркулације флуида и утицаја на интензивније преношење топлоте. Даље смањење порозности се сада одвија, како на рачун смањења отворених, тако и на рачун затворених пора. Детаљнији приказ са анализом ове појаве (применом познатих модела  $\lambda_o$ ), до које долази након смањења ефективне порозности испод вредности од 0,65, приказан је на сл. 4.

Црвена испрекидана линија (а) представља линеарну функционалну зависност добијену фитовањем експерименталних резултата методом најмањих квадрата. Одавде може да се примети веома добро слагање ове зависности са функционалном зависношћу модела који претпоставља паралелан начин преношења топлоте у порозном слоју за вредности топлотне проводљивости флуидне фазе од  $\lambda_f = 0,026 \text{ W/mK}$  и чврсте фазе од  $\lambda_s = 0,0875 \text{ W/mK}$  [9].

$$\lambda_{\text{par}} = 0,026\epsilon_{\text{eff}} + 0,0875(1 - \epsilon_{\text{eff}}) \quad (15)$$

Нешто лошије слагање се примећује када је у питању хармонијски модел преношења топлоте за вредности топлотне проводљивости флуидне фазе од  $\lambda_f = 0,026 \text{ W/mK}$  и чврсте фазе од  $\lambda_s = 0,131 \text{ W/mK}$  [9]:



Слика 4. Зависност стагнантне топлотне проводљивости уљане репице од порозности за вредности испод 0,65

$$\lambda_{\text{harm}} = 0,131^{1-\varepsilon_{\text{eff}}} 0,026^{\varepsilon_{\text{eff}}} \quad (16)$$

Најлошије слагање се примећује када је у питању редни модел. Иначе, овај модел је на слици приказан само поређења ради, како би се видело да је његова примена практично немогућа на разматраном порозном слоју, јер не показује слагање са експерименталним резултатима чак и када су узете нереалне вредности топлотне проводљивости флуидне и чврсте фазе од  $\lambda_f = 0,028 \text{ W/mK}$  и  $\lambda_s = 100 \text{ W/mK}$  [9]:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{eff}}} = \frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{0,028} + \frac{1-\varepsilon_{\text{eff}}}{100} \quad (17)$$

Међутим, формално гледано ни један од разматраних модела не може бити примењен на случај балиране уљане репице, јер форма паковања чврсте и флуидне фазе нема правиан карактер, већ треба користити фитоване експерименталне податке.

Одавде проистиче закључак да до вредности ефективне порозности од 0,65 смањење запремина пора се одвија на рачун отворених пора, а након тога када отворене поре постану реда величина затворених пора, преношење топлоте конвекцијом унутар њих губи на значају, па се процеси преношења топлоте одвијају по стандардним моделима. Као резултат ових експерименталних истраживања могу се приказати две једначине за стагантну топлотну проводљивост у зависности од порозности у следећем облику:

$$\lambda_o = 0,08917 - 0,06447\varepsilon_{\text{eff}} \quad \text{за } \varepsilon_{\text{eff}} < 0,65 \quad (18)$$

$$\lambda_o = -0,4511 + 0,14097\varepsilon_{\text{eff}} \quad \text{за } \varepsilon_{\text{eff}} < 0,65 \quad (19)$$

### Закључак

У раду је приказан поступак експерименталног одређивања стагантне топлотне проводљивости порозног слоја балираног пољопривредног остатка, као и утицаја промене порозности на њену вредност. Утицај ове карактеристике на стагантну топлотну проводљивост обављена је у циљу симулације реалних услова, приликом експлоатације ложишта за сагоревање балиране пољопривредне биомасе по принципу „цигаретног” сагоревања. Разматран је широк опсег промене утицајних карактеристика горива и то порозности у опсегу од 0,50–0,85. Примењена експериментална метода прилагођена је потребама добијања података из узорака који одговарају реалним, експлоатационим условима у ложишту за „цигаретно” сагоревање балиране биомасе.

Изведени експерименти су показали да се топлотна проводност балиране биомасе смањује, смањењем порозности узорка до вредности порозности од 0,65, што може да се објасни појавом смањења запремине затворених пора, па флуид унутар њих има смањену могућност циркулације, а самим тим и смањен интензитет преношења топлоте између зидова пора. При томе је усвојена претпоставка да порозна матрица балиране биомасе има изотропан карактер. Смањењем величине порозности испод 0,65 долази до пораста вредности топлотне проводљивости, што се објаш-

њава тиме да доминантни начин у преношењу топлоте постаје кондукција кроз чврсту и гасовиту фазу. Добијене експерименталне зависности стагантне топлотне проводљивости слоја балиране уљане репице од порозности, једн. (18) и (19), могу се користити приликом пројектовања ложишта. Осим тога подаци добијени спроведеним истраживањима су значајни и приликом формирања детаљних *CFD* модела процеса у ложиштима за „цигаретно” сагоревање балиране биомасе.

### Ознаке

### Индекси

$d$	– пречник, [m]	A	– зид
Gr	– <i>Grashof</i> -ов број, [–]	eff	– ефективно
$L$	– висина порозног слоја, [m]	dis	– дисперзно
$l$	– висина цилиндра, [m]	f	– флуид
Nu	– <i>Nusselt</i> -ов број, [–]	s	– чврсто
Pr	– <i>Prandtl</i> -ов број, [–]	o	– стагантно
$Q$	– топлотни проток, [W]		
$T$	– температура, [°C]		
$x$	– координата, [m]		

### Грчки симболи

$\alpha$	– коефицијент прелажења топлоте, [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	– порозност, [–]
$\lambda$	– топлотна проводљивост, [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]

### Литература

- [1] Bech, N., Wolff, L., Germann, L., Mathematical Modeling of Straw Bale Combustion in Cigar Burners, *Energy & Fuels*, 10 (1996), 2, 276-283
- [2] Mladenović, R., *et al.*, 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*, 2008, Valencia, Spain, June 2-6, ISBN 978-88-89407-58-1
- [3] Miltner, M., *et al.*, Process Simulation and CFD Calculations for the Development of an Innovative Baled Biomass-Fired Combustion Chamber, *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007), S, 1138-1143
- [4] Kaviany, M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, 2<sup>nd</sup> ed., Springer, Berlin, 1995
- [5] Nield, D. A., Bejan, A., Convection in Porous Media, Springer Science Business Media, Inc., Berlin, 2006
- [6] Nemoda, S., Trimis, D., Živković, G., Numerical Simulation of Porous Burners and Hole Plate Surface Burners, *Thermal Science*, 8 (2004), 1, 3-17
- [7] Милининчић, Д., Вороњец, Д., Термодинамика, II издање, Машински факултет Београд, 1991
- [8] Козић, Ђ., Васиљевић, Б., Бекавац, В., Приручник за термодинамику, у јединицама СИ система, Машински факултет, Београд, 1999
- [9] Ражњевић, К., Термодинамичке таблице, Школска књига, Загреб, 1975

**Abstract****Determination of Stagnant Thermal Conductivity of Baled Agricultural Residue**

by

*Aleksandar M. ERIC<sup>1\*</sup>, Mirko S. KOMATINA<sup>2</sup>,  
Stevan Dj. NEMODA<sup>1</sup>, Dragoljub V. DAKIĆ<sup>3</sup>, and Branislav S. REPIĆ<sup>1</sup>*<sup>1</sup> **Laboratory for Thermal Engineering and Energy,  
Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia**<sup>2</sup> **Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Belgrade, Belgrade, Serbia**<sup>3</sup> **Innovation Centre, Faculty of Mechanical Engineering,  
University of Belgrade, Belgrade, Serbia**

This paper presents the results of experimental determination of the baled biomass stagnant thermal conductivity, which is an important thermophysical characteristic of the porous layer. The resulting dependence is important for the optimization of the combustion process, and the process modeling of transport phenomena in a porous layer of baled biomass.

In order to determine the stagnant thermal conductivity baled agricultural biomass, the experimental method has been developed and made appropriate experimental installations. The influence of porosity layer on stagnant thermal conductivity has been experimentally investigated. Based on the performed measurements and analysis of experimental data, the functional dependence of stagnant thermal conductivity on porosity in the range of 0.50 to 0.85 was defined. The results show that the reduction of porosity layer to the value of 0.65 are reducing values of stagnant thermal conductivity, which can be explained by the pore size reducing, and decreasing volume of the air which actively participates in the process of heat transfer through the porous layer. By reducing the size of porosity below 0.65, thermal conductivity increase, which could be explained by the fact that the dominant mode of heat transfer becomes conduction through the solid phase.

Stagnant thermal conductivity, as well as its dependence on porosity, are the starting point in the mathematical modelling of the so called cigarette combustion of the baled biomass, and may also be very important in the analysis of possible structural changes in the combustion chamber, which works on this principle.

Key words: *stagnant thermal conductivity, baled agricultural biomass, cigarette combustion*

\* Corresponding author; e-mail: erica@vinca.rs

Рад примљен: 18. новембра 2012.  
Рад ревидиран: 8. марта 2013.  
Рад прихваћен: 18. марта 2013.