

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ**

**Машински факултет**

### **НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Загорке М. Брат, маг.инж.маш

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 580/3 од 4.4.2024. године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Загорке М. Брат, маг.инж.маш. под насловом

#### **МОДЕЛИРАЊЕ КИНЕТИКЕ ПРОЦЕСА ПИРОЛИЗЕ МЕШАВИНА ЛИГНИТА СА БИОМАСОМ И ОТПАДОМ**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### **ИЗВЕШТАЈ**

#### **1. УВОД**

##### **1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације**

Кандидаткиња Загорка Брат уписала је први пут Докторске академске студије (ДАС) – Машинско инжењерство на Универзитету у Београду – Машинском факултету 2010/11 године. Након поновног уписа и наставка студија у школској 2017/8. години, кандидаткиња је испите из свих предмета предвиђених планом и програмом ДС положила са просечном оценом 9.86 (деветцелихосамдесетшест). Статус мировања користила је током школске 2022./23. године.

Кандидаткиња је **14.12.2020.** поднела захтев број **1963/1** да јој се одобри израда докторске дисертације са темом „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ под менторством др Драгославе Стојиљковић, редовног професора и др Небојше Манића, ванредног професора, на који је сагласност дала Катедра за технологију материјала. Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. **215/4** од **18.03.2021.** Загорки М. Брат, маг.инж.маш. прихвата се тема докторске дисертације „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ и именује се комисија за подношење реферата о теми докторске дисертације у саставу:

- др Александар Јововић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Владимир Јовановић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Бојан Јанковић, научни саветник, Институт за нуклеарне науке „Винча“.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. **215/2** од **11.02.2021.** године, за менторе наведене докторске дисертације именују се др Драгослава Стојиљковић, редовни професор и др Небојша Манић, ванредни професор.

На основу Извештаја наведене комисије за подношење реферата о теми докторске дисертације бр. **215/3** од **09.03.2021.** године, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду **18.03.2021.** године доноси Одлуку број **215/4** да се прихвата научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да кандидаткиња Загорка М. Брат, маг.инж.маш. испуњава услове за израду докторске дисертације под насловом „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“. Веће научне области техничких наука Универзитета у Београду **31.03.2021.** године доноси Одлуку бр. **61206-1348/2-21** да се даје сагласност на одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о прихватању теме докторске дисертације Загорке М. Брат под називом „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ и одређује за менторе докторске дисертације др Драгославу Стојиљковић, редовног професора, и др Небојшу Манића, ванредног професора.

На основу обавештења др Драгославе Стојиљковић, редовног професора и др Небојше Манића, редовног професора да је кандидаткиња Загорка М. Брат завршила докторску дисертацију, као и предлога колегијума наставника Катедре за технологију материјала, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду **4.4.2024.** године доноси Одлуку број **580/3** о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Александар Јововић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Владимир Јовановић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Милош Радојевић, научни сарадник, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Бојан Јанковић, научни саветник, Институт за нуклеарне науке „Винча“,
- др Милан Вујановић, ванредни професор, Универзитет у Загребу – Факултет стројарства и бродоградње.

## **1.2. Научна област дисертације**

Докторска дисертација Загорке М. Брат под називом „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ припада научној области Машинско инжењерство – ужа научна област Технологија материјала за коју је

Машински факултет Универзитета у Београду матичан. Дисертација је рађена под менторством др Драгославе Стојиљковић, редовног професора, која у протеклих 10 година има 36 објављених радова категорије M21-M23, и др Небојше Манића, редовног професора, који у протеклих 10 година има објављених 55 радова категорије M21-M23, а из уже научне области Технологија материјала.

### **1.3. Биографски подаци о кандидату**

Загорка (Милован) Брат, маг.инж.маш. рођена је 27.09.1986. године у Београду, Република Србија. Основну школу „Доситеј Обрадовић“ у Сефкерину и средњу Машинску школу „Панчево“ у Панчеву завршила је као носилац Вукове дипломе и звања ученика генерације.

На Машински факултет Универзитета у Београду уписала се школске 2005/06 године. Основне академске студије – Машинско инжењерство завршила је 2008. године са просечном оценом 9,83 (деветцелихосамдесеттри). Школске 2008/09. године уписала је Мастер академске студије – Машинско инжењерство на Модулу за термоенергетику, а завршила их је 2010. године са просечном оценом 9,75 (деветцелихседамдесетпет). У току студија, награђивана је за изванредан успех постигнут у току школске 2005/06, 2007/08, 2008/09. године и као најбољи студент у школској 2006/07 и 2009/10 години. На завршној години мастер академских студија била је стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије – Доситеја. Школске 2010/11 уписала је Докторске студије – Машинско инжењерство на Машинском факултету Универзитета у Београду, са прекидом и наставком у школској 2017/2018 години (број индекса Д45/2017), где је положила све испите са просечном оценом 9,86 (деветцелихосамдесетшест).

Након дипломирања заснива радни однос у предузећу IMG Engineering & Construction doo на позицији пројектанта – сарадника на пројекту Модернизације Рафинерије нафте Панчево. 2011. године прелази у Именовано тело PED Inspect doo на позицију водећег инспектора и оцењивача за опрему под притиском где ради на пословима инспекције и оцењивања усаглашености опреме под притиском у водећим компанијама у Републици Србији и иностранству. 2018. године заснива радни однос у компанији НИС а.д. Нови Сад у Блоку Прерада, на позицији инжењера специјалисте за RBI, RCM и NDT где напредује до позиција водећег инжењера за RBI и руководиоца Службе оперативне поузданости на којој и данас ради. Главне одговорности на наведеним радним местима представљају имплементација методологије и развој савременог рачунарског система за спровођење RBI анализе стационарне опреме, као и управљање и организација рада Службе оперативне поузданости (ротационе, електро и инструменталне опреме), у чијој надлежности је имплементација RCM методологије и управљање спровођењем поступака методологије RCA у оквиру Блока Прерада. 2014. године положила је Стручни испит за област машинство и поседује лиценце 330 и 430 за одговорног пројектанта и одговорног извођача радова термотехнике, термоенергетике, процесне и гасне технике. Поред наведених лиценци, 2020. положила је стручни испит за Координатора за безбедност и здравље на раду у фази израде пројекта и поседује IRCA сертификат за екстерног оцењивача система квалитета у складу са стандардом ISO 9001:2015.

На основу научно-истраживачког рада током Докторских као аутор или коаутор објавила је 3 рада у међународним часописима (1 категорије M22 и 2 категорије M23).

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **2.1. Садржај дисертације**

Докторска дисертација студента докторских студија, Загорке М. Брат, под насловом „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ представљена је на 135 страна А4 формата, писана је коришћењем серифног фонта *Times New Roman* величине 12pt са једноструким проредом. Садржи 86 слика, 32 табеле и 42 једначине, а структурирана је у следећих седам поглавља:

1. Увод;
2. Узорци;
3. Пиролиза;
4. Експериментална испитивања;
5. Резултати и дискусија;
6. Моделирање кинетике процеса пиролизе;
7. Закључак.

Поред тога, дисертација садржи и списак литературе са 196 литературних извора, организован по поглављима дисертације, као и резиме на српском и енглеском језику, садржај, биографију аутора, изјаву о ауторству, изјаву о истоветности штапане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

### **2.2. Кратак приказ појединачних поглавља**

У уводном поглављу дат је приказ тренутног стања у енергетском сектору Републике Србије и оцена потребе за истраживањем нових решења у циљу смањења емисије GHG и доступних количина отпада са негативним утицајем на животну средину. Поред тога, наведени су и предмет и научни циљ докторске дисертације, чији резултати налазе примену и у инжењерској пракси.

Друго поглавље односи се на детаљну карактеризацију анализираних материјала – појединачних узорака домаћих лигнита Костолац и Колубара, као и отпада (биомасе – SCG и гранулата отпадних гума – WRG) и њихових мешавина уз осврт на могуће начине формирања мешавина (намешавање на складишту или одвојено увођење у ложишта енергетских постројења) и разлике које потичу од начина намешавања. У оквиру анализе указано је на постојање значајних разлика и променљивих карактеристика анализираних отпада у случају примене отпада различитог порекла, што је нарочито заступљено код SCG.

Детаљна анализа процеса пиролизе као почетне фазе сагоревања дата је у оквиру трећег поглавља, у оквиру кога су приказани типични модели пиролизе појединачних компоненти мешавина, са освртом на могуће разлике које потичу од хемијског састава и структуре материјала. Такође, дефинисани су и приноси главних продуката пиролизе компоненти мешавина на различитим температурама процеса, чиме је омогућено пројектовање процеса пиролизе и предвиђање емисија различитих хемијских једињења

у односу на дефинисане граничне услове (излазне параметре процеса) и полазну претпоставку о адитивном понашању. Поред теоријске разраде процеса пиролизе, описане су и примењене термичке методе за експериментално испитивање процеса пиролизе засноване на промени масе – термогравиметријска анализа (TG) и диференцијална термогравиметријска анализа (DTG) као пример споре пиролизе, односно метода – реактор са усијаном мрежицом (WMR) за симулацију поступка „флеш“ пиролизе.

Теоријске и математичке подлоге за анализу хемијске кинетике процеса пиролизе дате су у оквиру трећег поглавља. Дефинисаним подлогама обухваћене су једначине и кинетички модели којима се описују процеси пиролизе у општем случају, уз примену изоконверзионог „*model-free*“ приступа, односно „*model-based*“ приступа који у потпуности дефинише посматране процесе.

Полазне основе и опис поступака спроведених експерименталних испитивања анализираних материјала – компоненти мешавина и формираних мешавина, дат је у оквиру поглавља 4. Осим детаљне теоријске анализе термичких разлагања материјала и њихових мешавина обухваћених истраживањем, описане су и примењене лабораторијске инсталације и дефинисани улазни параметри процеса пиролизе спроведених применом различитих метода – TGA и WMR.

Резултати спроведених истраживања и дискусија приказани су у оквиру поглавља 5. Карактеризација материјала – компоненти мешавина и формираних мешавина са масеним уделом отпада 10, 20 и 30%, спроведена је са становишта елементарне и техничке анализе, као и одређивањем термичких карактеристика применом поступака утврђених одговарајућим стандардима за анализирану врсту материјала, на основу којих је извршена оцена подобности примене анализираних отпада у различитим масеним уделима за намешавање са домаћим лигнитима. Поред наведеног, спроведена је анализа утицаја врсте материјала и масеног удела отпада, као и примењених експерименталних метода којима су обухваћени утицаји различитих брзина загревања и величине узорака на кинетичке параметре процеса пиролизе мешавина. Осим дефинисања утицаја променљивих улазних параметара на карактеристике процеса пиролизе, спроведена је и анализа реактивности лигнита и отпада, као и њихових мешавина са становишта различитих показатеља реактивности. Добијени резултати указали су на постојање синергетског деловања компоненти мешавина и продуката пиролизе, на супрот полазној претпоставци о адитивном понашању.

Анализирани поступци пиролизе компоненти мешавина, као и мешавина лигнита са биомасом и отпадом, моделирани су применом комерцијалног софтвера NETZSCH Kinetics Neo. За валидацију формираних кинетичких модела коришћени су резултати спроведених експерименталних испитивања, при чему је постигнуто средње квадратно одступање  $R^2 > 0.9995$  за све посматране моделе. Резултате моделирања представљају једначине и кинетички параметри који у потпуности описују посматране процесе пиролизе компоненти и формираних мешавина, при чему се могу користити за симулацију и предвиђање параметара процеса при различитим брзинама загревања. Наведени резултати дати су у оквиру поглавља 6.

Кључни резултати и закључци спроведених експерименталних анализа лигнита, биомасе и отпада у циљу карактеризације материјала, као и експерименталних

испитивања и моделирања процеса пиролизе/ко-пиролизе компоненти мешавина и формираних мешавина приказани су у оквиру поглавља 7. Поред тога, наведене су и препоруке за даља истраживања у овој области.

### **3. САВРЕМЕНОСТ И ОРИГИНАЛНОСТ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Докторска дисертација докторанда Загорке М. Брат под насловом „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ представља савремен и оригинални научни рад у области технологије материјала. У оквиру дисертације обухваћени су сви аспекти развоја нових горива применом различитих метода експерименталних испитивања, узевши у обзир најзначајније енергетске и еколошке карактеристике формираних мешавина, као и анализа и моделирање кинетике процеса пиролизе за потребе симулације реалних процеса. Добијени резултати представљају иновативно решење у смислу потпуног дефинисања нових, неконвенционалних горива и експериментално валидираних кинетичких модела процеса пиролизе намењених за пројектовање реалних процеса ко-сагоревања у енергетским постројењима у Републици Србији, као и свог значајног доприноса у погледу решавања актуелних проблема:

1) енергетске транзиције са фосилних горива на обновљиве изворе енергије (отпад) и смањење увозне зависности;

2) управљања отпадом које изискује велике трошкове и има значајан негативан утицај на животну средину у случају трајног депоновања (испуштање у земљиште и водене токове)

3) немогућности самосталне употребе за производњу енергије инсинерацијом анализираног отпада услед недозвољених емисија GHG и PAH у ваздух;

4) унапређења енергетске ефикасности и смањења енергетског интензитета домаће индустрије и енергетских постројења.

#### **3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу**

У оквиру докторске дисертације коришћени су референтни и актуелни литературни извори, пре свега радови из утицајних научних часописа, књиге и приручници. Извршен је детаљан преглед литературе која се односи на карактеризацију материјала и експерименталне методе, као и теоријске подлоге за формирање кинетичких модела. Резултати доступних истраживања коришћени су за упоредну анализу и верификацију добијених резултата спроведених експерименталних испитивања. Поред тога, извршено је и прикупљање и међусобна упоредна анализа доступних литературних података за дефинисане компоненте формираних мешавина из различитих извора, у циљу утврђивања утицаја разнородног порекла коришћеног отпада на карактеристике горива и параметре анализираних процеса.

На основу Правилника о поступку провере докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду извршена је провера оригиналности докторске дисертације

„Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ аутора Загорке М. Брат коришћењем програма iThenticate. Утврђен је индекс сличности од 4% уз свако појединачно преклапање мање од 1%. Приказана преклапања односе се на опште фразе које се употребљавају у публикацијама овог типа (назив институције, наслови уводних поглавља, нумерација страна...), синтагме од неколико речи које су у широкој употреби и слично. Све наведено је у складу са чланом 9. Правилника о поступку провере докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду.

### **3.3. Опис и адекватност примењених научних метода**

У току израде докторске дисертације коришћене су стандардне методе узорковања и испитивања горива утврђене међународним и хармонизованим стандардима, експерименталне методе испитивања применом стандардне лабораторијске инсталације за спровођење термичких анализа (поступак споре и „флеш“ пиролизе) и Matlab кодова за обраду резултата спроведених анализа развијених на Катедри за технологију материјала, као и комерцијална софтверска решења за моделирање хемијске кинетике различитих процеса (NETZSCH Kinetics Neo), базирана на теорији хемијске кинетике и валидирана у бројним објављеним научним радовима.

### **3.4. Применљивост остварених резултата**

Општа енергетска ситуација у Републици Србији и свету, као и велики допринос енергетског сектора на ефекат стаклене баште услед емисије GHG у атмосферу, уз постојање све веће количине отпада који поседује одговарајући енергетски потенцијал и који захтева адекватно управљање, наводе на чињеницу да је потребно спровести обимна истраживања у овом смеру и дати адекватна решења. Једно од потенцијалних решења којим се унапређује постојеће стање на свим наведеним пољима јесте и развој нових горива која представљају мешавине фосилних горива и отпада и која се могу сагоревати у постојећим ложиштима енергетских постројења. За разлику од доступних литературних извора, испитивања су вршена на мешавинама домаћих лигнита који су у употреби у термоелектранама у Републици Србији са доступним отпадом који представља специфична врста биомасе и гранулат отпадних пнеуматика у различитим масеним уделитема у мешавинама. Дефинисани кинетички модели и кинетички параметри који описују процесе пиролизе формираних мешавина валидирани су експериментално и применљиви су за конкретне случајеве пиролизе/сагоревања мешавина домаћих лигнита и отпада у постојећим ложиштима енергетских постројења. Формирани модели могу се користити у инжењерској пракси за предвиђање понашања мешавина горива при различитим параметрима процеса пиролизе.

### **3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад**

Током израде докторске дисертације, докторанд Загорка М. Брат, показала је способност да самостално препозна и решава научне и инжењерске проблеме коришћењем савремених метода, као и да самостално овладава новим научноистраживачким методама теоријског и експерименталног карактера користећи релевантне литературне изворе. Наведено представља добру основу за успешан самосталан научноистраживачки рад у будућности.

## 4. ОСТВАРЕН НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ кандидата Загорке М. Брат, остварен је следећи научни допринос:

- Идентификација синергијског деловања мешавина лигнита, биомасе и отпада развијеним и експериментално валидираним кинетичким моделом процеса термичке разградње.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа референтне литературе у области технологије материјала, констатујемо да су резултати истраживања спроведених у оквиру ове докторске дисертације значајни и научно утемељени. Предложено решење представља следећа унапређења у односу на постојеће приступе:

1. Развијена су неконвекционална горива са дефинисаним карактеристикама, потпуно испитана у лабораторијским условима и дозвољена за употребу у енергетици;
2. Доказани су утицаји свих променљивих параметара процеса пиролизе (врсте лигнита и отпада, количине отпада и брзине загревања) на синергетско деловање и кинетичке параметре процеса пиролизе;
3. Дефинисани су детаљни кинетички модели који омогућавају безбедну употребу неконвенционалних горива за пројектовање процеса сагоревања у постојећим ложиштима енергетских постројења;
4. Дефинисана је обимна теоријска подлога за наставак постојећег истраживања и развој технологија за примену сличних мешавина.

Осим наведеног, поређење добијених резултата са резултатима сличних истраживања различитих мешавина доступним у литературним изворима, показало је да је истраживање спроведено темељно и свеобухватно, при чему су узети у обзир сви могући варијабилни аспекти и дате препоруке за даља истраживања.

### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси наведени у Тачки 4.1. верификовани су радом категорије M23 чији је Загорка М. Брат први аутор и једини аутор без доктората:

1. Zagorka M. Brat, Bojan Ž. Janković, Dragoslava D. Stojiljković, Miloš B. Radojević, Nebojša G. Manić, *Assessment of synergistic effect on performing the co-pyrolysis process of coal and waste blends based on thermal analysis*, Thermal Science, 2022, Vol. 26 (3): pp. 2211-2224



## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа и анализе докторске дисертације „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ докторанда Загорке М. Брат, маг.инж.маш, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је дисертација успешно завршена у складу са предметом и постављеним циљевима истраживања и да представља оригинални научни рад са научним доприносом у научној области Машинско инжењерство и ужој научној области – Технологија материјала. Кандидаткиња је кроз спроведена истраживања дошла до оригиналних научних резултата који су успешно експериментално валидирани и који се могу применити у инжењерској пракси.

Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Научно-наставном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да усвоји овај Извештај и да се докторска дисертација под називом „Моделирање кинетике процеса пиролизе мешавина лигнита са биомасом и отпадом“ докторанда Загорке М. Брат, маг.инж.маш. прихвати, заједно са овим Извештајем стави на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

др Александар Јововић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Машински факултет

---

др Владимир Јовановић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Машински факултет

---

др Бојан Јанковић, научни саветник  
Институт за нуклеарне науке „Винча“

---

др Милош Радојевић, научни сарадник  
Универзитет у Београду – Машински факултет

---

др Милан Вујановић, ванредни професор  
Универзитет у Загребу – Факултет стројарства и бродоградње