

## **ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата  
..... Александра Р. Милићевића, маг. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком бр. 1227/3 од 31.05.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Александра Р. Милићевића под насловом

### **„МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА У ЛОЖИШТУ НА СПРАШЕНИ УГАЉ ПРИ ДИРЕКТНОМ КОСАГОРЕВАЊУ СА БИОМАСОМ”**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## **РЕФЕРАТ**

### **1. УВОД**

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

На докторске студије на Машинском факултету, кандидат Александар Р. Милићевић уписан је 2011. године по наставном плану који је Сенат Универзитета прихватио 2007. године на основу Закона о високом образовању из 2005. године, а по којем докторске студије не могу трајати дуже од 6 година. По овим правилима, Александра Р. Милићевић има обавезу да дисертацију одбрани до 30. септембра 2017. године.

На молбу кандидата Александра Р. Милићевића, Решењем број 2567/1 од 18.10.2017. године, сагласно одредбама Статута Универзитета у Београду, рок за одбрану дисертације је продужен за два семестра – до 30. септембра 2018. године.

По захтеву кандидата Александра Р. Милићевића број 2875/1 од 15.11.2016. године, и предлога проф. др Драгана Туцаковића и сагласности Катедре за термотехнику од 15.12.2016. године, да му се одобри пријава теме докторске дисертације и именује Комисија за подношење извештаја о прихватању теме, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је Одлуку број 3285/2 од 22.12.2016. године којом се прихвата тема докторске дисертације и именује ментор проф. др Драган Туцаковић и Комисија за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу:

- проф. др Драган Туцаковић (ментор) - редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- проф. др Драгослава Стојиљковић - редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, и
- др Срђан Белошевић - научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча” Универзитета у Београду.

На основу извештаја Комисије и Одлуке ННВ бр. 79/2 од 19.01.2017. године поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду које је на седници одржаној 30.01.2017. године, одлука бр. 61206-216/2-17, дала сагласност на предлог теме докторске дисертације Александра Р. Милићевића, маг.инж.маш. „**Математичко моделирање и оптимизација процеса у ложишту на спрашени угаљ при директном косагоревању са биомасом**” под менторством проф. др Драгана Туцаковића.

На основу обавештења проф. др Драган Туцаковића, ментора, да је докторанд Александар Р. Милићевић, маг.инж.маш. завршио докторску дисертацију под називом „**Математичко моделирање и оптимизација процеса у ложишту на спрашени угаљ при директном косагоревању са биомасом**”, предлога Катедре за термотехнику, Наставно-научно веће Машинског факултета донело је Одлуку број 1227/3 од 31.05.2018. године о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- проф. др Драган Туцаковић (ментор) - редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- проф. др Драгослава Стојиљковић - редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Горан Ступар - доцент Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Срђан Белошевић - научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча” Универзитета у Београду, и
- др Ненад Црномарковић - научни сарадник Института за нуклеарне науке „Винча” Универзитета у Београду.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Александра Р. Милићевића, под насловом „**Математичко моделирање и оптимизација процеса у ложишту на спрашени угаљ при директном косагоревању са биомасом**”, припада области техничких наука – машинство, ужа научна област термотехника, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

Израдом докторске дисертације руководио је др Драган Туцаковић, редовни професор групе предмета Енергетски парни котлови и шеф Катедре за термотехнику Машинског факултета Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор, публиковао је 17 радова у часописима са SCI листе (9 у категорији M21a, 4 у категорији M21, 2 у категорији M22 и 2 у категорији M23) из области термотехнике и термоенергетике.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Александар Милићевић је рођен 06.11.1987. у Александровцу (жупском), Република Србија. Након завршене основне школе уписао је средњу школу „Свети Трифун” (смер: Машински техничар за компјутерско конструисање) у Александровцу, коју је завршио 2006. као ђак генерације са Вуковом дипломом.

Машински факултет у Београду је уписао 2006. године. Основне академске студије (B.Sc.) завршио је 2009. године, а дипломске академске студије (мастер) на смеру термотехника је завршио 2011. Током свих година студирања добијао је Похвале уз одговарајуће дипломе поводом дана Машинског факултета у Београду за одличан успех. Докторске студије на Машинском факултету у Београду је уписао школске 2011/12.

У мају 2012. Друштво термичара Србије му додељује награду за најбољи мастер рад на свим техничким факултетима у Србији током 2011. године.

Од априла 2013. запослен је у Институту за нуклеарне науке „Винча” у Лабораторији за термотехнику и енергетику. Од пријема у радни однос ангажован је на пројекту Министарства науке: „Повећање енергетске и еколошке ефикасности процеса у ложишту за

угљени прах и оптимизација излазне грејне површине енергетског парног котла применом сопствених софтверских алата” - TP-33018 под покровитељством Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. У априлу 2015. у Институту „Винча” стиче звање истраживач – сарадник.

У оквиру научно-истраживачких активности аутор и коаутор је укупно 24 радова од којих су: 9 радова објављених у међународним часописима са SCI листе, 1 рад објављен у часопису националног значаја, 12 радова саопштених на скуповима међународног значаја и 2 техничка решења.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Александра Р. Милићевића, маг. инж. маш., под називом: „Математичко моделирање и оптимизација процеса у ложишту на спрашени угаљ при директном косагоревању са биомасом”, написана је на српском језику, ћириличним писмом, и садржи 199 страна формата А4, 57 слика, 35 табела, 157 нумерисаних израза и списак од 125 коришћених референци на 11 страна.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод;
2. Значај, карактеристике и проблеми поступка директног косагоревања спрашеног угља са биомасом;
3. Преглед приступа моделирању процеса сагоревања и косагоревања спрашених чврстих горива – угља и биомасе;
4. Математичко моделирање процеса, програмски код и нумеричке методе;
5. Валидација математичког модела за предвиђање сагоревања и косагоревања спрашеног угља и биомасе у лабораторијском реактору;
6. Нумеричке симулације директног косагоревања спрашеног угља са биомасом у ложишту парног котла ТЕ „Костолац” Б-2;
7. Закључак.

Осим наведеног, дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, садржај, преглед ознака, литературу, прилоге, биографију аутора, као и изјаву о ауторству, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **првом поглављу** наглашен је значај коришћења обновљивих извора енергије у енергетске сврхе. Приказана је структура обновљивих извора енергије у Републици Србији, где се уочава да је највећи потенцијал у искоришћењу пољопривредне биомасе. Главна мотивација за косагоревање угља и биомасе је смањење емисије CO<sub>2</sub> (као такозваног гаса стаклене баште који има највећи утицај на глобално загревање), али може допринети и редукацији емисија SO<sub>x</sub> и NO<sub>x</sub>, зависно од састава горива. Истакнуто је да је директно косагоревање угља и биомасе најчешћа опција за косагоревање биомасе и угља у ложиштима, при чему је нагласак на косагоревању спрашене биомасе и угља. Наглашен је значај математичког моделирања у истраживању двофазних вишекомпонентних реактивних турбулентних струјања. Указано је да је значајна мотивација и то што управо рад на развоју сопственог комплексног модела процеса представља најбољи начин за стицање знања и искустава у области моделирања и нумеричких симулација. Затим су дефинисани циљеви истраживања, који обухватају нумеричку анализу и оптимизацију поступка директног косагоревања спрашеног угља и биомасе са становишта емисије полутаната и енергетске ефикасности, у сврху унапређења садашњег познавања ове проблематике. У наставку су

разматрани научни допринос дисертације и могуће примене развијеног програма у техничкој пракси.

У **другом поглављу** су детаљније разматрани значај, карактеристике и проблеми поступка директног косагоревања спрашеног угља са биомасом, уз цитирање доступне литературе. Истакнуто је да косагоревање угља и биомасе у котловима на угаљ за производњу електричне енергије представља ефикасну и исплативу опцију која доприноси редукацији штетних емисија и искоришћењу биомасе као обновљивог извора енергије. Упоређене су физичке и хемијске карактеристике чврстих фосилних горива и различитих врста биомасе. Наглашава се да су честице биомасе релативно велике и несферичних облика у односу на честице угља које се апроксимирају да имају сферни облик. Указано је да биомаса нуди значајне предности као сировина за сагоревање због лакшег паљења услед великог садржаја волатила, као и велике реактивности горива и резултујућег коксног остатка. Међутим, напоменуто је да се косагоревање биомасе суочава са одређеним ризицима и ограничењима, као што су повећано прљање и ризик од зашљакивања грејних површина ложишта.

У **трећем поглављу** је указано на изузетан практични значај CFD моделирања поступка косагоревања, где многи аутори својим нумеричким испитивањима потврђују позитиван утицај процеса косагоревања на смањење садржаја штетних оксида у димним гасовима. Затим је у наставку дат преглед приступа моделирању сагоревања спрашених чврстих горива (угља и биомасе). Разматрани су специфичности појединачних подмодела: кретања честица у зависности од облика, загревања честица, испаравања влаге (сушења), деволатилизације, интеракције турбуленције и хемијске кинетике, сагоревања волатила и сагоревања коксног остатка. Затим је на основу прегледа у литератури најчешће коришћених подмодела сагоревања и кретања честица извршен одабир модела сагоревања спрашених горива за решавање разматраних проблема.

У **четвртном поглављу** је наглашено да одабрани математички модел треба да обезбеди тачност и стабилност прорачуна, као и пожељно што брже извођење прорачуна применом нумеричких метода и компјутерског кода. Након датих основних поставки математичког модела и прорачунског поступка, приказане су редом: једначине одржања масе и количине кретања за гасну фазу, моделирање турбуленције са усвојеним  $k-\epsilon$  моделом, једначина одржања енергије гасне фазе, једначина преноса топлоте зрачењем, једначине кретања и енергије дисперзне фазе, гранични и почетни услови неизотермног турбулентног струјања, моделирање појединачних фаза у процесу сагоревања честица угља и биомасе, моделирање образовања и деструкције азотних оксида, једначине масених удела компоненти гасне фазе. Потом су приказани додатни чланови услед дејства дисперзне и гасовите фазе на гасовиту фазу (PSI-CELL метод). У наставку је дат комплетан дводимензиони математички модел процеса у ложишту у цилиндричним координатама (пошто је у петом поглављу валидација развијеног модела спроведена поређењем са резултатима истраживања сагоревања и косагоревања у експерименталном ложишту са цилиндричним осносиметричним струјним простором), који се састоји од скупа свих моделираних диференцијалних једначина датих у развијеној форми и алгебарских израза, а које се решавају неком од нумеричких метода. Нумеричке симулације су спроведене користећи сопствени, развијени програмски код у FORTRAN-у, у коме су уграђени подмодели турбулентног двофазног гас-честице тока и хемијских реакција, дефинисани у претходном поглављу, током комплексног процеса сагоревања спрашеног чврстог горива (испаривање, деволатилизација, сагоревање волатила и сагоревање коксног остатка).

У **петом поглављу** је приказана валидација развијеног математичког модела, која је извршена поређењем нумеричких резултата са доступним експерименталним лабораторијским резултатима у цилиндричном лабораторијском реактору са вртложним гориоником. Провера развијеног модела изведена је посебно за сагоревање угљеног праха, затим за сагоревање спрашене биомасе, и на крају за случај косагоревања спрашеног угља и биомасе. У експерименталном ложишту тамо где су постојали референтни подаци мерења

спроведена је квантитативна анализа ваљаности развијеног модела. За величине за које нису постојала експериментална мерења, извршена је квалитативна анализа нумеричких резултата, тј. проверавало се да ли модел даје физички реалне резултате разматраних моделираних процеса. Поређења резултата симулација са референтним мерењима у реактору су сасвим задовољавајућа, поготово с обзиром на комплексност анализираних процеса и разматраног модела.

У **шестом поглављу** ложиште енергетског парног котла ТЕ „Костолац” Б-2 је одабрано за спровођење нумеричких експеримената употребом сопственог развијеног рачунарског кода у циљу оптимизације комплексних процеса током директног косагоревања спрашеног лигнита са пшеничном сламом, узимајући у обзир редукацију емисије полутаната и повећање ефикасности сагоревања. Пре параметарске анализе приказан је референтни тест-случај сагоревања спрашеног лигнита у ложишту парног котла, који је у наставку рада послужио као основа за поређења са нумеричким симулацијама, и проверен је утицај мреже на резултате прорачуна. За нумеричке симулације поступка косагоревања одабрана је пшенична слама. Параметарска анализа је извршена са посебним освртом на утицајне факторе у предметном ложишту, као што су: величина и облик честица биомасе, термални удео биомасе при косагоревању са угљем, локације и начин уношења биомасе у ложиште, расподела горива (угља и биомасе) и ваздуха по етажама горионика, као и садржај азота у угљеном праху. Приказана истраживања доприносе бољем разумевању процеса који се одвијају у ложишту енергетског парног котла при косагоревању спрашеног угља са биомасом. У најповољнијим тест-случајевима косагоревања од анализираних (са 10% термалног удела биомасе и средњим пречником честице биомасе од 500  $\mu\text{m}$ ), добијене су за 8 °C више средње температуре димног гаса на излазу из ложишта и 49,7% нижа емисија  $\text{NO}_x$  за двоструко нижи садржај азота у спрашеном лигниту у односу на референтни случај без косагоревања, односно за 18,2% нижа емисија  $\text{NO}_x$  за исти садржај азота у угљеном праху. Такође, у овим оптималним тест-случајевима добијени су релативно низак проценат честица које падају у левак и релативно висок масени степен сагорелости честица на излазу из ложишта, што подразумева мање губитке услед механичке непотпуности сагоревања у шљаци и пепелу. Паралелно са температуром димног гаса на излазу из ложишта, анализирани су и геометрија и положај пламена, који такође имају велики утицај при раду котла. У раду је наглашено и показано да разматрани проблем није једнозначан, већ да је комплексан и да зависи од много утицаја који се морају узети у обзир при анализи и оптимизацији поступка косагоревања, као што су: формираност централни вртлог у ложишту; количине и расподеле горива и ваздуха које се уводе у ложиште, шема рада, односно искључености горионика; пречници, облици и трајекторије честица итд. На основу параметарске анализе закључено је да развијени математички модел на задовољавајући начин описује сложене процесе при директном косагоревању угља са биомасом у ложишту предметног енергетског парног котла.

У **седмом поглављу** дати су закључци о приказаним и анализираним резултатима на основу истраживања у претходним поглављима дисертације. Закључено је да развијени модел представља добру основу за даља истраживања процеса директног косагоревања и омогућава анализу ширег опсега спрашених горива, тј. угља и биомасе, а истовремено је релативно једноставан за ефикасну практичну примену. Спроведеном параметарском анализом значајно је подигнут ниво анализе и познавања комплексних процеса и параметара који контролишу поступак директног косагоревања спрашеног угља са биомасом у ложиштима енергетских котлова. Истакнуто је да се по први пут код нас приступило развоју сложеног математичког модела и нумеричкој оптимизацији процеса при директном косагоревању спрашених горива (угља и биомасе) у веома сложеним условима рада реалног ложишта енергетског парног котла. С једне стране, развијени математички модел, нумерички поступак и рачунарски код могу се користити у научно-истраживачке сврхе ради даљих усавршавања модела и оптимизације процеса. С друге стране, добијени резултати дисертације имају практични значај пошто могу послужити као „база знања” и стручна

подршка потенцијаним експертским групама истраживача и инжењера, које би у оквиру сарадње допринеле увођењу технологије косагоревања биомасе у постојеће термоелектране на угаљ, у циљу повећања енергетске и еколошке ефикасности процеса, као и модернизације, ревитализације и продужења радног века домаћих термоенергетских блокова. На крају су дати предлози за рад на даљем усавршавању математичког модела и за практичну примену поступка директног косагоревања спрашених горива.

Након седмог поглавља, у дисертацији се налазе редом: ПРЕГЛЕД ОЗНАКА, ЛИТЕРАТУРА, ПРИЛОЗИ и БИОГРАФИЈА АУТОРА.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

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

Докторска дисертација „Математичко моделирање и оптимизација процеса у ложишту на спрашени угаљ при директном косагоревању са биомасом” даје савремен и оригиналан приступ истраживању проблема директног косагоревања спрашених горива у ложиштима.

Коришћењем фосилних горива у енергетске сврхе долази до непрестаног повећања концентрације  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  и других штетних оксида у атмосфери који доводе до појаве глобалног загревања, тј. ефекта „стаклене баште” и других нежељених утицаја, као што су киселе кише, фотохемијски смог итд. Европска унија је 2014. одредила следеће циљеве за област климе и енергије које треба остварити до 2030, у односу на референтни ниво из 1990. године: смањење укупних емисија гасова са ефектом стаклене баште за најмање 40%, повећање удела обновљивих извора енергије (енергија ветра, соларна енергија, хидроенергија, геотермална енергија, биомаса) на најмање 27% путем спровођења обавезујућих националних стратегија, и смањење потрошње енергије за 27% побољшањем енергетске ефикасности. Угаљ ће још годинама остати један од најважнијих извора за производњу електричне енергије, док се предвиђа да ће од обновљивих извора биомаса, а у домаћим условима пре свега остаци пољопривредне биомасе, играти важну улогу захваљујући значајним залихама. Двофазна вишекомпонентна турбулентна струјања са процесима сагоревања горива су изузетно сложена, са мноштвом међусобно спрегнутих утицаја. Сложеност струјања, комплексност постројења, недостатак мерне опреме и цена, често онемогућавају, односно отежавају експериментална испитивања. Због тога се приступа развоју и примени математичких модела базираних на теоријским разматрањима физичких и хемијских процеса, и емпиријским вредностима добијеним на основу експерименталних испитивања.

Оригиналност и научни допринос ове дисертације се огледа у развоју комплексног математичког модела за директно косагоревање спрашеног угља и биомасе. Кандидат је развио и унапредио математички модел струјно-термичких процеса у ложишту са прилагођеним подмоделима испаравања влаге, деволатилизације, хомогеног и хетерогеног сагоревања, као и потпрограмом за опис дисперзне фазе честица биомасе. Модел је проверен поређењем резултата нумеричких симулација са доступним експерименталним подацима у цилиндричном лабораторијском реактору са вртложним гориоником.

Кандидат је анализирао утицајне параметре на посматрани процес директног косагоревања спрашеног лигнита и пшеничне сламе у ложишту котла ТЕ „Костолац” Б-2. Анализирани тест-случајеви косагоревања угљеног праха и спрашене биомасе упоређени су са референтним тест-случајем сагоревања лигнита, узимајући у обзир вредности емисија  $\text{NO}_x$  и средње температуре димних гасова на излазу из ложишта, масени степен сагорелости честица на излазу и масени проток честица које падају у левак ложишта. Анализама је показано да се оптимизацијом предметног поступка директног косагоревања може остварити знатно смањење азотних оксида и прихватљива температура на излазу из ложишта,

релативно низак проценат честица које падају у левак и релативно висок масени степен сагорелости честица на излазу из ложишта, што подразумева мање губитке услед механичке непотпуности сагоревања у шљаци и пепелу. Процену енергетске ефикасности котла након примењеног поступка директног косагоревања могуће је спровести термичким прорачуном парног котла.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији у поглављу ЛИТЕРАТУРА цитирана је обимна коришћена литература из следећих области:

- механике флуида,
- теорије и праксе косагоревања фосилних горива и биомасе,
- моделирања косагоревања угља и биомасе у ложиштима,
- нумеричких метода за решавање турбулентних транспортних процеса,
- програмирања помоћу софтверских пакета.

На основу цитиране литературе, очигледно је да је кандидат користио и старију и новију литературу која је референтна и актуелна у наведеним областима (докторске дисертације, стручне књиге, радови у међународним и домаћим часописима, радови са међународних конференција и релевантни извештаји).

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживања чији су резултати приказани у овој дисертацији изведена су применом следећих научних метода:

- компаративне анализе алтернативних приступа моделирању разматраних процеса и хемијских реакција, у циљу избора оптималних подмодела појединачних струјно-термичких процеса и реакција при косагоревању спрашеног угља и биомасе,
- верификације нумеричког кода;
- валидације математичког модела поређењем са доступним експерименталним резултатима из литературе,
- математичког моделирања разматраних комплексних процеса у одабраном предметном ложишту енергетског парног котла са сагоревањем угљеног праха и директним косагоревањем са биомасом,
- нумеричке студије посматраних процеса и појава у разматраној геометрији предметног ложишта, нумеричких експеримената и параметарске анализе.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Изведена је оптимизација комплексних процеса током директног косагоревања спрашеног угља са биомасом, узимајући у обзир повећање ефикасности сагоревања и редукацију емисије гасовитих полутаната, употребом сопственог, развијеног рачунарског кода, у оквиру обимне нумеричке студије.

Формирана база података коју сачињавају резултати симулираних тест случајева може помоћи у унапређењу процеса косагоревања у индустријским применама, с обзиром на ефикасност процеса и редукацију полутаната, и приликом адаптације енергетских котлова на угљени прах за косагоревање са биомасом.

Значајно је подигнут ниво анализе и познавања комплексних процеса и параметара који контролишу поступак директног косагоревања спрашеног угља са биомасом у ложиштима.

Добијени резултати дисертације могу послужити као „база знања” и стручна подршка потенцијаним експертским групама истраживача и инжењера које би у оквиру сарадње допринеле увођењу технологије косагоревања биомасе у постојеће термоелектране на угаљ, у

циљу повећања енергетске и еколошке ефикасности процеса, као и модернизације, ревитализације и продужења радног века домаћих термоенергетских блокова.

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

Предмет дисертације и постављени научни циљеви захтевали су коришћење већег броја научних метода истраживања. Кандидат је показао значајан ниво знања и способности да самостално препозна и систематски решава инжењерске и научне проблеме, примењујући савремене методе теоријског и нумеричког карактера, да користи расположиву литературу и да успешно овлада савременим истраживачким методама. Добијени резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени су вишеструки резултати и доприноси ове дисертације, како научни, тако и практични:

- Истраживани су концепти, предности и проблеми при поступку директног косагоревања спрашеног угља и биомасе у ложиштима, на основу доступне литературе, са освртом на енергетску и еколошку ефикасност процеса, технологија и постројења;
- Приказани су преглед и анализа приступа моделирању струјно-термичких процеса и реакција при сагоревању и директном косагоревању угљеног праха и спрашене биомасе;
- Развијен је математички модел сагоревања спрашених чврстих горива (угља и биомасе), који описује све фазе сложеног процеса сагоревања горива различитог састава (издвајање влаге, деволатилизација, сагоревање волатила и сагоревање коксног остатка);
- Развијени комплексни математички модел је уграђен у сопствени нумерички код, а затим су извршена тестирања и верификација компјутерског кода и валидација модела поређењем нумеричких резултата са расположивим експерименталним лабораторијским резултатима из литературе (након изведених нумеричких симулација, као резултат се добијају поља међусобно спрегнутих променљивих у ложишту, која омогућавају даљу анализу и оптимизацију процеса);
- Помоћу спроведених нумеричких експеримената (параметарске анализе) испитан је велики број утицајних параметара у разматраном поступку директног косагоревања спрашеног угља и биомасе у ложишту предметног енергетског парног котла, као што су: термални удео биомасе у поступку косагоревања, величина и облик честица горива, место и начин уношења биомасе у ложиште, расподела горива и ваздуха по горионичким етажама, при различитим и променљивим радним условима;
- На основу параметарске анализе, изведена је оптимизација комплексних процеса током директног косагоревања спрашеног угља са биомасом, узимајући у обзир повећање ефикасности сагоревања и редукацију емисије гасовитих полутаната, употребом сопственог, развијеног рачунарског кода, у оквиру обимне нумеричке студије;
- Формирана је база података коју сачињавају резултати симулираних тест случајева, а која може помоћи у унапређењу процеса косагоревања у индустријским применама, с обзиром на ефикасност процеса и редукацију полутаната, и приликом адаптације енергетских котлова на угљени прах за косагоревање са биомасом;



- Значајно је подигнут ниво анализе и познавања комплексних процеса и параметара који контролишу поступак директног косагоревања спрашеног угља са биомасом у ложиштима.

Треба истаћи да се по први пут код нас приступило развоју сложеног математичког модела и, на основу тога, нумеричкој оптимизацији процеса при директном косагоревању спрашених горива (угља и биомасе) у веома сложеним условима рада реалног ложишта енергетског парног котла.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Подмодели појединачних фаза у процесу сагоревања честица угља и биомасе су одабрани на основу критеријума који представљају добар компромис између тачности резултата и прорачунске ефикасности.

Развој сопственог програмског кода за сагоревање и косагоревање спрашених горива је текао постепено и нумеричке симулације су првобитно изведене у дводимензионалном цилиндричном реактору ради провере имплементације и стабилности модела. Постигнута су добра слагања добијених резултата у дводимензионом ложишту са доступним експерименталним подацима. У поменутом ложишту за величине за које нису постојала референтна мерења извршена је квалитативна анализа нумеричких резултата (провера физикалности и хемизма). Развијени модел омогућава поуздано нумеричко предвиђање процеса при сагоревању ширег опсега спрашених чврстих горива (угља и биомасе).

Након тога модел је уграђен у тродимензионални нумерички код за прорачун ложишта парног котла.

После провере модела сагоревања спрашеног лигнита и утицаја мреже на крајње резултате, спроведен је параметарски прорачун косагоревања спрашеног лигнита са биомасом, са посебним освртом на утицајне факторе као што су: величина и облик честица биомасе, термални удео биомасе при косагоревању са угљем, локације и начин уношења биомасе у ложиште, расподела горива (угља и биомасе) и ваздуха по етажама горионика, као и садржај азота у угљеном праху

Приказана истраживања доприносе бољем разумевању процеса који се одвијају у ложишту енергетског парног котла при косагоревању спрашеног угља са биомасом. Добијени нумерички резултати представљају добру основу за оптимизацију рада котловских постројења.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Део резултата докторске дисертације објављен је у радовима које је кандидат публиковао у међународним часописима са SCI листе и домаћем часопису од националног значаја, као и у неколико радова саопштених на скуповима међународног значаја. Кандидат је публиковао и више радова у међународним часописима и на конференцијама, као и техничка решења из шире области моделирања и нумеричке анализе комплексних процеса у ложиштима.

#### Категорија M21a:

1. Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Milićević, A., Tucaković, D.: Numerical study of pulverized coal-fired utility boiler over a wide range of operating conditions for in-furnace SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> reduction, *-Applied Thermal Engineering*, vol. 94, pp. 657-669, 2016 (**IF=3.444**) (ISSN 1359-4311).

### Kategorija M22:

1. Crnomarkovic, N., Belosevic, S., Tomanovic, I., Milicevic, A.: Influence of the number of gray gases in the weighted sum of gray gases model on the calculation of the radiative heat exchange inside pulverized coal-fired furnaces, *-Thermal Science*, vol. 20, suppl. 1, pp. S197-S206, 2016 (**IF=1.222**) (ISSN 0354-9836).
2. Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Milićević, A., Tucaković, D.: Modeling and optimization of processes for clean and efficient pulverized coal combustion in utility boilers, *-Thermal Science*, vol. 20, suppl. 1, pp. S183-S196, 2016 (**IF=1.222**) (ISSN 0354-9836).

### Kategorija M23:

1. Milićević, A., Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Tucaković, D.: Development of mathematical model for co-firing pulverized coal and biomass in experimental furnace, *-Thermal Science*, vol. 22, no. 1, pp. 709-719, 2018 (**IF=1.093**) (ISSN 0354-9836).
2. Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Milićević, A.: Modeling of pulverized coal combustion for in-furnace NO<sub>x</sub> reduction and flame control, *-Thermal Science*, vol. 21, suppl. 3, pp. S597-S615, 2017 (**IF=1.093**) (ISSN 0354-9836).
3. Tomanović, I., Belošević, S., Milićević, A., Crnomarković, N., Tucaković, D.: Numerical tracking of sorbent particles and distribution during gas desulfurization in pulverized coal-fired furnace, *-Thermal Science*, vol. 21, suppl. 3, pp. S759-S769, 2017 (**IF=1.093**) (ISSN 0354-9836).
4. Stanković, B., Belošević, S., Crnomarković, N., Stojanović, A., Tomanović, I., Milićević, A.: Specific aspects of turbulent flow in rectangular ducts, *-Thermal Science*, vol. 21, suppl. 3, pp. S663-S678, 2017 (**IF=1.093**) (ISSN 0354-9836).
5. Crnomarkovic, N., Belosevic, S., Tomanovic, I., Milicevic, A.: Weighted sum of gray gases model optimization for numerical investigations of processes inside pulverized coal-fired furnaces, *-Journal of Thermal Science*, vol. 26, no. 6, pp. 552-559, 2017 (**IF=0.678**) (ISSN 1003-2169).
6. Tomanović, I., Belošević, S., Milićević, A., Tucaković, D.: Modeling of the reactions of a calcium-based sorbent with sulfur dioxide, *-Journal of the Serbian Chemical Society*, vol. 80, no 4, pp. 549-562, 2015 (**IF=0.970**) (ISSN 0352-5139).

### Kategorija M33:

1. Milićević, A., Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Tucaković, D.: "Mathematical model of pulverized coal devolatilization and combustion in a swirl burner – development and validation," *-Proceedings of the 18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia SIMTERM 2017*, Sokobanja, Serbia, 2017., pp. 658-666.
2. Tomanović, I., Belošević, S., Milićević, A., Crnomarković, N., Tucaković, D.: "Numerical optimization of pulverized coal furnace sorbent injection under various operating conditions," *-Proceedings of the 18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia SIMTERM 2017*, Sokobanja, Serbia, 2017., pp. 651-657.
3. Milićević, A., Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Tucaković, D.: "Importance, characteristics and mathematical modeling of processes during co-firing biomass with

pulverized coal in furnaces,” -*Proceeding of International Conference Power Plants 2016*, Zlatibor Serbia, 2016., pp. 680 – 689.

4. Crnomarković, N., Belošević, S., Tomanović, I., Milićević, A.: “A new method of the zonal model of radiative heat exchange application by which the correction of the surface zone total emissivities is possible,” -*Proceeding of International Conference Power Plants 2016*, Zlatibor Serbia, 2016., pp. 648 – 657.
5. Belošević, S., Nemoda, S., Crnomarković, N., Tomanović, I., Milićević, A.: “Prediction of in-furnace flue gas desulfurization by lime-based sorbent injection,” -*Proceedings of the 17th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia SIMTERM 2015*, Sokobanja, Serbia, 2015., pp. 284-289.
6. Crnomarković, N., Belošević, S., Tomanović, I., Milićević, A., Stojanović, A., Stupar, G.: “Influence of polynomial coefficients on the weighted sum of gray gases model optimization,” - *Proceedings of the 17th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia SIMTERM 2015*, Sokobanja, Serbia, 2015., pp. 853-858.
7. Milićević, A., Tomanović, I., Stojanović, A., Belošević, S., Stanković, B., Crnomarković, N., Sijerčić, M.: “Wall functions in the thermal energy equation within k- $\epsilon$  turbulence model,” - *Proceeding of International Conference Power Plants 2014*, Zlatibor, Serbia, 2014., pp. 719–728.

#### Категорија M52:

1. Milićević, A., Tomanović, I., Stanković, B., Belošević, S., Tucaković, D.: Izvodjenje transportnih jednačina trodimenzionalnog neizoternog turbulentnog strujanja u cilindričnim koordinatama, -*Termotehnika*, vol. XLII, no. 1, pp. 1-24, 2016 ISSN (0350-218X).

#### Категорија M85:

1. Црномарковић, Н., Белошевић, С., Томановић, И., Милићевић, А.: Софтвер за предвиђање радијационе размене топлоте у ложишту на угљени прах у условима постојања наслага на зидовима, -*Техничко решење: нови софтвер*, Институт за нуклеарне науке „Винча”, 2017.
2. Томановић, И., Белошевић, С., Црномарковић, Н., Милићевић, А.: Софтвер са новим корисничким интерфејсом за симулацију процеса при одсумпоравању уношењем спрашеног сорбента у ложиште, -*Техничко решење: нови софтвер*, Институт за нуклеарне науке „Винча”, 2017.

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом: **„Математичко моделирање и оптимизација процеса у ложишту на спрашени угаљ при директном косагоревању са биомасом”**, кандидата Александра Р. Милићевића, маг. инж. маш., студента докторских студија, Комисија за преглед, оцену и одбрану констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област Термотехника, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати Реферат Комисије и упути га Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на усвајање, а дисертацију „**Математичко моделирање и оптимизација процеса у ложишту на спрашени угаљ при директном косагоревању са биомасом**” кандидата Александра Р. Милићевића, маг. инж. маш., студента докторских студија, стави на увид јавности.

У Београду, 04.07.2018. године

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
Проф. др Драган Туцаковић, ментор,  
редовни професор, Универзитет у Београду,  
Машински факултет

.....  
Проф. др Драгослава Стојиљковић,  
редовни професор, Универзитет у Београду,  
Машински факултет

.....  
др Горан Ступар,  
доцент, Универзитет у Београду,  
Машински факултет

.....  
др Срђан Белошевић,  
научни саветник, Универзитет у Београду,  
Институт за нуклеарне науке „Винча”

.....  
др Ненад Црномарковић,  
научни сарадник, Универзитет у Београду,  
Институт за нуклеарне науке „Винча”