

## ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

**Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији студента докторских студија Душана М. Тодоровића, дипл. инж. маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета бр. 759/2 од 30.04.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације студента докторских студија Душана М. Тодоровића, дипл. инж. маш. под називом

**“EFFECT OF BIOMASS CHARACTERISTICS AND COMBUSTION PROSESS ON FLUE GASEOUS COMPOSITION AND ASH RELATED PROPERTIES”**

**(„УТИЦАЈ ОДАБРАНИХ ВРСТА БИОМАСЕ И ПРОЦЕСА САГОРЕВАЊА НА САСТАВ И КАРАКТЕРИСТИКЕ ГАСОВИТИХ И ЧВРСТИХ ПРОДУКАТА“)**

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

Кандидат Душан М. Тодоровић, дипл. инж. маш., број индекса D2/07, уписао је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду у школској 2007/2008 години. Током докторских студија у више наврата је боравио на Норвешком Универзитету за Науку и Технологију у Трондхајму, у циљу израде дела експерименталних истраживања докторске дисертације, а у оквиру програма докторских студија „*Sustainable energy and environment in Western Balkans*“ који је реализован у сарадњи са Норвешким Универзитетом за Науку и Технологију у Трондхајму (Norwegian University of Science and Technology-NTNU, Trondheim) и финансиран је од стране владе Краљевине Норвешке.

По захтеву кандидата Душана М. Тодоровића, и предлога проф. др Александра Јововића (ментора) и сагласности Катедре за процесну технику, 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 944/3 од 13.06.2013. године којом се прихвата тема докторске дисертације и именује ментор проф. др Александар Јововић и Комисија за подношење извештаја о прихватању теме у саставу:

- проф. др Александар Јововић, ментор;
- проф. др Мирослав Станојевић;
- проф. др Драгослава Стојиљковић;
- проф. др Дејан Радић;
- проф. др Нико Самец, Универзитет у Марибору, Машински факултет.

Комисија за писање извештаја о прихватању теме и оцену научне заснованости докторске дисертације у саставу:

- проф. др Александар Јововић, ментор;
- проф. др Мирослав Станојевић;
- проф. др Драгослава Стојиљковић;
- проф. др Дејан Радић;
- проф. др Нико Самец, Универзитет у Марибору, Машински факултет.

поднела је Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду извештај број 944/4 од 08.07.2013. године.

Одлуком Наставно-научног већа број 944/5 од 11.07.2013. године, прихваћен је предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације и за ментора је именован проф. др Александар Јововић.

На основу молбе кандидата Душана М. Тодоровића и уз сагласност шефа Катедре за процесну технику проф. др Мирослава Станојевића и ментора проф. др Александара Јововића, Комисија за докторске студије Машинског факултета је 11.07.2013. године донела одлуку број 9/8241 да се одобри статус мировања за школску 2010/2011 годину. Статус мировања је одобрен услед одсуства кандидата Душана М. Тодоровића са матичног факултета због стручног усавршавања на Норвешком Универзитету за Науку и Технологију у Трондхајму.

На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и о именовању ментора (број 944/5 од 11.07.2013. године), а на основу сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду са седнице од 16.09.2013. године, Декан је 17.09.2013. године донео Закључак број 1796/1 од 27.09.2013. године о одобравању рада на теми докторске дисертације под називом „Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката“. За ментора дисертације именован је проф. др Александар Јововић.

На основу молбе кандидата Душана М. Тодоровића и уз сагласност ментора проф. др Александара Јововића, Комисија за докторске студије Машинског факултета је 15.01.2014. године, а сагласно одредбама Статута Универзитета у Београду, донела одлуку број 9/9067 да се одобри продужетак рока за завршетак докторских студија за два семестра.

На основу извештаја проф. др Александра Јововића, ментора, да је докторант Душан М. Тодоровић, дипл. инж. маш, завршио докторску дисертацију „Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката“ и предлога Катедре за процесну технику (број 759/1 од 24.04.2015. године), Наставно-научно веће Машинског факултета донело је одлуку број 759/2 од 30.04.2015. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- проф. др Александар Јововић, ментор;

- проф. др Мирослав Станојевић;
- проф. др Драгослава Стојиљковић;
- проф. др Дејан Радић;
- проф. др Нико Самец, Универзитет у Марибору, Машински факултет.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Душана М. Тодоровића, под насловом „**Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката**“, припада области техничких наука – машинство, ужа научна област процесна техника, за коју је матичан Машински факултет, Универзитета у Београду.

Ментор проф. др Александар Јововић запослен је на Катедри за процесну технику Машинског факултета Универзитета у Београду и има 14 SCI радова из области процесне технике (4 у категорији M21 и 10 у категорији M23).

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Душан М. Тодоровић рођен је 06.06.1983. године у Краљеву. Основну школу „Живан Маричић“ у Жичи завршио је 1998. године, а Гимназију у Краљеву, природноматематички смер, 2002. године. Машински факултет у Краљеву Универзитета у Крагујевцу уписао је школске 2002/2003. године, а дипломирао на Групи за топлотну технику и заштиту животне средине 2007. године, са средњом оценом током студија 9,37 и оценом 10 на дипломском раду. Душан М. Тодоровић је награђен за постигнут изванредан успех на Машинском факултету у току студија. Докторске студије уписао је школске 2007/2008. године на Машинском факултету Универзитета у Београду.

У оквиру програма докторских студија „*Sustainable energy and environment in Western Balkans*“ који је реализован у сарадњи са Норвешким Универзитетом за Науку и Технологију у Трондхајму (Norwegian University of Science and Technology-NTNU, Trondheim) и финансиран од стране владе Краљевине Норвешке, кандидат је више пута боравио на поменутом Универзитету у циљу експерименталних истраживања везаних за докторску дисертацију.

Од 2008 до 2013. године био је запослен је на Машинском факултету у Београду на Катедри за процесну технику као сарадник, а у периоду 2013-2015. године као истраживач сарадник (Одлука број 21-1130/6 од 14.11.2013. године).

Од 06.03.2015. године запослен је као асистент за ужу научну област процесна техника на Машинском факултету у Београду (решење број 93/3 од 05.03.2015. године).

Током рада на Катедри за процесну технику, поред ангажовања на пројектима Министарства просвете, науке и технолошког развоја, активно учествује у извођењу наставе (одржавању аудиторних и лабораторијских вежби, припреми колоквијума и писмених испита) на предметима: Увод у процесно инжењерство и заштиту животне средине(ОАС), Мерења и управљање у процесној индустрији (ДАС), Биотехнологија (ДАС), Процеси и постројења за припрему воде (ДАС), Управљање отпадом и отпадним водама (ДАС), Принципи заштите животне и радне средине (ДАС).

У сарадњи са привредом учествовао је у изради више главних и идејних пројеката и техничких документација, великом броју индустријских мерења, испитивањима посуда под притиском, испитивању котлова (анализа и контрола сагоревања, мерење емисије, гаранцијска испитивања) као и изради Процена утицаја на животну средину.

У оквиру научноистраживачке делатности, аутор је или ко-аутор већег броја радова објављеним у научним часописима (водећим часописима са SCI листе и другим) и излаганим на симпозијумима и стручним скуповима.

Течно говори енглески језик (чита и пише). Активно користи рачунар и то софтверске пакете: Microsoft Office, Autodesk AutoCad, Corel Draw, MathCad, Adobe Photoshop, SCEREN3, AERMOD View.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Душана М. Тодоровића, дипл. инж. маш, под називом „Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката“ односно “Effect of biomass characteristics and combustion process on flue gaseous composition and ash related properties” написана је на енглеском језику, има 309 страна формата А4, 113 слика и дијаграма, 26 табела, 80 нумерисаних релација, списак коришћене литературе на 22 стране, као и 5 прилога на 49 страна.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод;
2. Биомаса као обновљиви извор енергије;
3. Карактеристике биомасе;
4. Термичка конверзија биомасе;
5. Продукти сагоревања биомасе;
6. Опис експерименталних истраживања;
7. Резултати и разматрања;
8. Закључак;
9. Литература;
10. Прилози.

Поред тога дисертација садржи предговор, резиме на српском и енглеском језику, садржај, као и биографију аутора 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 су изложена кратка уводна разматрања проблематике обрађене у дисертацији. Указано је на проблематику коришћења биомасе у енергетске сврхе. Такође, дат је предмет и циљ истраживања и истакнута научна оправданост докторске дисертације.

У другом поглављу дат је осврт на тренутно стање обновљивих извора енергије (потенцијали, искоришћење и тд.), као и процене будућих трендова, са посебним нагласком на биомасу, како на глобалном нивоу тако и у Републици Србији. Приказан је и преглед домаће и ЕУ легислативе која се односи на регулисање и подстицај коришћења биомасе у енергетске сврхе, као једне од главних инструмената замене коришћења фосилних горива биомасом.

У трећем поглављу приказан је преглед општих карактеристика биомасе која се користи у енергетске сврхе. Како особине биомасе имају једну од пресудних улога у адекватном одабиру типа термичке конверзије биомасе, неопходно је детаљно проучити све карактеристике исте. У овом поглављу су дефинисани целулоза, хемицелулоза и лигнин, као основни градивни елементи биомасе. Дат је осврт на техничке и елементарне анализе, дате су и очекиване вредности ових анализа, у зависности од врсте биомасе, као и поређења између различитих врста биомасе. Пепео, влага, испарљиве материје, фиксни угљеник, водоник,

кисеоник, азот, сумпор и угљеник као најбитнији елементи поменутих анализа су такође посебно разматрани. У зависности од поменутих карактеристика биомасе као и техничких особености самог постројења у коме се конверзија одвија, биомаса се може користити у различитим облицима. Припрема биомасе као горива углавном обухвата повећање енергетске густине, па су у овом поглављу описане методе балирања, истискивања, пелетирања, брикетирања, као и метода са ударним клипом.

У четвртом поглављу дат је детаљан преглед расположивих технологија за термичку конверзију биомасе. Посебна пажња је посвећена поступцима пиролизе, гасификације и сагоревања.

Пето поглавље је посвећено појединим продуктима сагоревања биомасе. Истакнута је  $\text{CO}_2$  „неутралност“, која је битна због проблема климатских промена, а разматрани су и примарни и секундарни механизми за редукују штетних продуката. Посебан акценат је стављен на азотне оксиде, који представљају и највећи проблем при сагоревању биомасе са аспекта заштите животне средине. Детаљно су разматрани следећи механизми настајања азотних оксида: термички (*Zeldovich*), промтни (*Fenimore*), гориви, као и  $\text{NO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  механизми. Поред механизма формирања азотних оксида посебно су разматране и примарне мере за редукују истих. Објашњени су принципи деловања вишестепеног довођење ваздуха за сагоревање, дат је осврт на вишестепено увођење горива у ложиште као и принцип рецикулације димних гасова. Како је велики број практичних проблема везаних за сагоревање биомасе или косагоревање са угљем или другим врстама фосилног горива, повезан са саставом и понашањем пепела као и других неорганских компонената које се налазе у биомаси, у овом поглављу разматране су могућности редукује ових непожељних појава (корозија, зашљакивање и тд.) применом адитива. Адитиви који су детаљније разматрани у овом поглављу, и који су коришћени у експерименталним истраживањима у оквиру ове дисертације, су каолин и пепео тресета.

У шестом поглављу детаљно је приказана експериментална инсталације са свом припадајућом мерно-регулационом опремом и мерним местима. Свакако средишњи део експерименталне инсталације представља реактор за сагоревање биомасе, са системом пнеуматског дозирања горива и који се загрева помоћу електричних грејача укупне снаге 16 kW. У овом поглављу су приказани и најсавременији уређаји за праћење, узорковање и анализу пепела (летећег и ложишног) и димних гасова. За анализу димног гаса коришћени су аутоматски гасни анализатори, гасни хроматограф, анализатор гасова типа FTIR, док је електростатички импактор (ELPI) коришћен за одређивање гранулометријске расподеле летећег пепела. Лабораторијске анализе обухватиле су техничке и елементарне анализе свих врста горива (чиста горива и њихове мешавине) која су се користитила у истраживањима, анализе пепела употребом скенирајућег електронског микроскопа са енергодисперзивним детектором рендгенских зрака (SEM/EDX), затим употребу спектроскопских метода ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry) и ICP-SFMS (Inductively Coupled Plasma-Sector Field Mass Spectrometry), као и анализе топливости пепела. Током експерименталних истраживања у оквиру дисертације коришћене су три врсте биомасе: чисто дрво, отпадна биомаса из процеса производње кафе, отпадна дрвна биомаса. Биомаса је сагоревана као „чиста“ и као мешана са осталим поменутих типовима биомасе, а у експериментима који су се односили на проблематику везану за пепео, били су додавани и адитиви у различитим масеним уделима (0-10%). У свим експериментима биомаса је сагоревана у форми пелета. Осми пелета од чистог дрвета, све остале врсте пелета, које су се користиле у експериментима, су припремане у лабораторији од стране кандидата, па је сходно томе у овом поглављу дат опис процедура припреме биомасе и самог процеса пелетирања. Ово поглавље укључује и план и детаљан опис експерименталних процедура као и начина обраде добијених резултата.

У седмом поглављу приказани су резултати експерименталних истраживања и дата је њихова анализа. У циљу приказивања остварених резултат на најјаснији начин ово поглавље је конципирано у пет подпоглавља, односно пет целина. У прва два подпоглавља приказан је утицај вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање, температуре, коефицијента вишка ваздуха, као и косагоревање (намешавање) разматраних врста биомасе на емисије азотних оксида при строго контролисаним условима, такође су приказани и резултати извршених техничких и елементарних анализа коришћене биомасе. У првом подпоглављу, разматрани су резултати утицаја вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање, при изотермским условима (850 °C) и приликом сагоревања различитих врста горива (биомасе), на емисије NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>O, као и на степен конверзије азота из горива (биомасе) у NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>O. Такође, приказану су резултати утицаја примарног као и укупног ваздуха за сагоревање на емисије NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>O, а одређен је и оптимални коефицијент вишка ваздуха у погледу емисија NO<sub>x</sub>. У оквиру друге целине овог поглавља разматрани су утицаји температуре (850, 900, 950, 1000 °C), времена задржавања, коефицијента вишка ваздуха као и вишестепеног довођења ваздуха приликом сагоревања отпадног дрвета, на емисије NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>O, као и на степен конверзије азота из отпадног дрвета у NO<sub>x</sub>.

Остала три подпоглавља приказују остварене резултате који се односе на проблеме везане за карактеристике пепела приликом сагоревања поменутих врста биомасе, које су разматране у оквиру ове докторске дисертације. Као и оквиру прва два подпоглавља, за све типове коришћене биомасе и њихове мешавине, извршене су техничке и елементарне анализе, које су такође приказане у оквиру одговарајућих подпоглавља. Треће подпоглавље приказује резултате експерименталних истраживања утицаја вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање и косагоревања (намешавања) биомасе на емисије HCl и SO<sub>2</sub>, фракциону расподелу и састав летећег пепела, састав ложишног пепела, карактеристике топливости ложишног пепела, као и на степен конверзије Cl и S из горива у HCl и ложишни пепео, односно SO<sub>2</sub> и ложишни пепео. У четвртом делу седмог поглавља приказан је утицај пепела тресета, као адитива приликом сагоревања отпадног дрвета, које је посебно проблематично за коришћење у енергетске сврхе, са становишта корозије, због високог удела цинка и олова. Експериментална истраживања обухватила су праћење утицаја различитих масених удела адитива (пепела тресета) (0, 1, 5, 10%) у условима са и без вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање и при различитим температурама (800, 850, 900 °C) на састав ложишног пепела са посебним акцентом на Zn и Pb, затим на фракциону расподелу и састав летећег пепела, као и расподела Cl и S из горива у HCl и ложишни пепео, односно SO<sub>2</sub> и ложишни пепео. У оквиру овог подпоглавља такође је, поред осталих параметара, разматран и утицај примарног ваздуха на већ поменуте продукте. Поред употребе пепела тресета као адитива, у циљу побољшања карактеристика пепела са становишта отклањања проблема везаних за корозију и депозицију, у оквиру ове докторске дисертације вршена су испитивања и са употребом каолина, а њихови резултати су приказани у последњем-петом делу седмог поглавља. У оквиру истраживања везаних за утицај каолина приказани су утицаји различитих масених концентрација каолина (0, 1, 5, 10%) и вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање при различитим односима примарног и секундарног ваздуха и изотермским условима (850 и 900 °C) на састав ложишног пепела, фракциону расподелу и састав летећег пепела, као и на расподелу Cl из горива у HCl и ложишни пепео. У свим целинама седмог поглавља поред приказаних и анализираних утицаја, приказани су резултати елементарних и техничких анализа биомасе (чистих или мешавина) која је коришћена у оквиру тих експеримената.

У завршном, осмом, поглављу дисертације изнети су детаљни закључци са критичком анализом остварених резултата спроведених истраживања. Истакнут је научни допринос дисертације као и могућност примене добијених резултата у реалним условима.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом „Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката“ представља савремен, оригиналан и значајан допринос разматраној проблематици.

Растући проблем заштите животне средине и константно смањење резерви фосилних горива довео је до све већег интереса за коришћењем обновљивих извора енергије у претходним деценијама. Климатске промене, изазване антропогеним факторима, последњих година такође представљају велику покретачку снагу развоја технологија за искоришћење обновљивих извора енергије. Биомаса данас представља највећи појединачни обновљиви извор енергије, са око 10% од укупне примарне производње енергије у Свету. Последње анализе показују да ће производња примарне енергије из биомасе са садашњих 50 EJ порастати на 160 EJ до 2050. године, од којих 100 EJ у термоенергетском сектору.

Приликом сагоревања биомасе настају гасови и чврсти продукти, који у већој или мањој мери, могу имати различита нежељена дејства.

Редукција штетних продуката сагоревања може се остварити кроз спречавање њиховог настајања (примарне мере) или њиховог уклањања из димног гаса (секундарне мере). Генерално, примарне мере представљају модификацију процеса сагоревања и горива, док је примена секундарних мера предвиђена након самог процеса сагоревања. У складу са тиме, до сада је пуно напора уложено на идентификацију и могућности редукције појединих штетних продуката.

Анализе животног циклуса показују да, са становишта заштите животне средине, највећи проблем приликом сагоревања биомасе представљају емисије азотних оксида. Према тој анализи, 40% износи удео  $\text{NO}_x$  у укупном утицају на животну средину свих продуката сагоревања, који обухватају  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ , неметанска испарљива органска једињења (NMVOC) и друго. Поред емисија штетних продуката сагоревања, веома битно је размотрити и проблеме везане за пепео (корозија и зашљакивање), а којима су изложена сама термоенергетска постројења. Проблеми око корозије се углавном везују за алкалне метале (Na, K) као и за Cl, Pb и Zn. Коришћење легура и премаза отпорних на корозију, побољшане конструкције ложишта, побољшање процеса сагоревања, боље методе чишћења као и употреба адитива представљају неке од мера за отклањање ових проблема. Истраживања су показала да поред доминантне улоге адитива велику улогу, на карактеристике пепела, може имати температура као и вишестепено довођење ваздуха за сагоревање. Битно је напоменути да осим неколико теоретских радова, до истраживања спроведених у оквиру ове докторске дисертације, није било значајнијег истраживања у вези утицаја вишестепеног довођења ваздуха на карактеристике пепела.

Предмет и научни допринос докторске дисертације представља истраживање могућих процеса смањења штетних продуката сагоревања применом примарних метода при сагоревању биомасе, односно експериментално испитивање могућности и степена смањења одређених штетних продуката сагоревања одабраних врста биомасе (сировог не третираног дрвета, отпадног дрвета и отпадне биомасе из процеса производње кафе, као и њихових мешавина) применом изабраних примарних мера.

Како су истраживања у оквиру израде докторске дисертације обухватила веома детаљне анализе продуката сагоревања биомасе, овим радом остварио се допринос проучавању утицаја вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање и модификације састава горива на састав гасовитих продуката сагоревања биомасе и карактеристике пепела. Приступ истраживању, добијени резултати као и приказане корелације између посматраних величина у докторској дисертацији омогућиће боље разумевање механизма формирања азотних оксида, емисија HCl и  $\text{SO}_2$ , карактеристика ложишног и летећег пепела, а представљаће и основу за будућа истраживања у овој области.

Област, у којој је остварен научни допринос, је веома актуелна, а посебан квалитет истраживању даје и могућност примене постигнутих резултата на шире подручје термичке конверзије биомасе, док свеобухватан приступ анализи продуката сагоревања и примена савремених научних метода указују на висок степен оригиналности који је присутан у овој докторској дисертацији.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе која је коришћена у дисертацији дат је у посебном поглављу. Прегледом листе коришћене литературе може се закључити да је кандидат располагао већином доступне референтне литературе и да ју је проучио у току израде дисертације. Ова литература је пре свега кандидату послужила као полазна основа за приказ постојећег стања у овој области, везано за проблематику која се тиче докторске дисертације.

Коришћена је литература из домаћих и међународних научних часописа, стручних уџбеника, релевантних међународних стандарда и референтних докумената. Кандидат је коректно проучио и цитирао литературне изворе који су му послужили као основа за систематизацију постојећих сазнања из области која је предмет дисертације.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Циљ докторске дисертације, кандидата Душана М. Тодоровића, је био проучавање утицаја вишестепеног (двостепеног) довођења ваздуха за сагоревање, температуре, коефицијента вишка ваздуха и модификације састава горива, као примарних мера, на смањење настанка појединих штетних продуката сагоревања три одабрана типа биомасе и њихових мешавина. За остваривање овог циља, кандидат је обавио довољан број експеримената како би се добили поуздани резултати на основу којих се дошло до извођења закључака о корелационим односима. Научне методе које је кандидат применио у дисертацији су:

- на основу прегледа литературе и анализе у њој приказаних резултата, утврђени су правци истраживања у докторској дисертацији. Посебно су ови подаци били битни за планирање експерименталних истраживања и предвиђање утицајних фактора;
- извршен избор и адекватна припрема репрезентативних узорака биомасе која се користила у истраживањима;
- за све врсте биомасе извршене су лабораторијске анализе, како техничке тако и елементарне;
- карактеризација и утврђивање концентрација гасовитих продуката сагоревања, који су били од интереса за ову дисертацију ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $N_2O$ ,  $SO_2$ ,  $HCl$ ,  $C_xH_y$ ,  $NH_3$ ,  $HCN$ ,  $HF$ ) извршена је помоћу гасних анализатора чији се рад заснива на методама: недисперзивне инфрацрвене апсорпције (NDIR), хемилуминисценције, парамагнетизма, спектроскопије са инфрацрвеном Фуријеовом трансформацијом (FTIR) и гасне хроматографије (GC);
- узорковање и одређивање концентрације и гранулометријског састава летећег пепела вршено је помоћу електростатичког нископритисног импактора (ELPI);
- извршене су комплетне хемијске анализе узорака ложишног пепела, а у ту сврху коришћене су спектроскопске методе: ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry) и ICP-SFMS (Inductively Coupled Plasma-Sector Field Mass Spectrometry), такође извршене су анализе карактеристика топљивости ложишног пепела;
- одређивање састава летећег пепела извршено је применом скенирајућег електронског микроскопа са енергодисперзивним детектором рендгенских зрака (SEM/EDX);
- понављањем експеримената више пута под истим условима (поновљивост резултата) доказана је тачност методе и резултата;



- добијени резултати експерименталних истраживања су детаљно анализирани како би се одбацили непоздани подаци, као и резултати који се односе на прелазне режиме;
- за обраду експерименталних резултата (поређења одступања експерименталних резултата од прорачунских вредности продуката сагоревања, израчунавања средњих вредности посматраних величина, одређивање максималних и минималних измерених вредности, свођења концентрација на референтни удео кисеоника, израду дијаграма на којима су приказане међусобне зависности и корелације) коришћен је рачунарски алат Fuelsim Average V1.2;
- извршена је анализа обрађених резултата експерименталних истраживања и изведени су закључци о утицају посматраних карактеристика процеса на одабране гасовите и чврсте продукте сагоревања;

На основу приказаног, може се закључити да су у изради докторске дисертације коришћене адекватне аналитичке и лабораторијске методе за испитивање карактеристика продуката сагоревања.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Азотни оксиди који настају приликом сагоревања биомасе, због своје токсичности и високих концентрације у димном гас, представљају највећи проблем са аспекта заштите животне средине. Све већа употреба обновљивих извора енергије, поготову биомасе, захтева свеобухватан у детаљан приступ решавању овог проблема. Примена секундарних мера за редукцију азотних оксида је могућа и економски оправдана само у постројењима великог капацитета. Због тога, примарне мере представљају једини начин за контролу емисије ових оксида у постројењима на биомасу мањег капацитета. Како је употреба секундарних мера генерално скупа, чак и када је економски оправдана, примарне мере имају примену и у постројењима поменутог великог капацитета, као једине или у комбинацији.

Поред систематизације и потврде досадашњих резултата, у погледу утицаја вишестепеног (двостепеног) довођења ваздуха за сагоревање, коефицијента вишка примарног и укупног ваздуха за сагоревање, као и температуре на емисије азотних оксида ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) и азот субоксида ( $\text{N}_2\text{O}$ ), као једног од индикатора формирања  $\text{NO}_x$ , у оквиру ове докторске дисертације, при условима двостепеног довођења ваздуха испитан је утицај и дате су зависности намешавања (косагоревања) три врсте биомасе са различитим уделима азота на емисије  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2\text{O}$  као и на конверзиони фактор азота из биомасе у поменута једињења. Како су истраживања у оквиру израде докторске дисертације обухватила веома детаљне анализе продуката сагоревања биомасе, овим радом остварен је допринос проучавању утицаја вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање, температуре и модификације састава горива на механизме формирања као и могућности редукције азотних оксида.

Поред азотних оксида, приликом сагоревања чврстог горива, поред гасовитих настају и чврсти продукти-пепео (ложишни и летећи). Проблеми везани за пепео могу бити посматрани како са аспекта заштите животне средине услед емисије летећег пепела (чврстих честица) тако и због проблема који се јављају у самом ложишти, а то су у највећој мери корозија и зашљакивање. У оквиру ове докторске дисертације, у циљу редукције проблема зашљакивања и корозије, испитан је утицај процеса сагоревања и адитива, каолина и летећег пепела тресета, на карактеристике пепела одабране биомасе. Резултати претходних истраживања показују да алуминосиликати из каолина реагују са базним једињењима и формирају једињења са вишом тачком топљења. Један од циљева доктората био је и истраживање реактивности каолина на алкална једињења у димном гасу, који се ослобађа при сагоревању отпадног дрвета, у зависности од његове масене концентрације и различитих услова процеса сагоревања. Пепео тресета, има могућност апсорпције алкалних једињења као и неких микроелемената ( $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ). Механизам дејства пепела тресета је комплексан, сходно саставу који је и сам веома сложен а често и веома променљив. Бројни радови,

углавном о косагоревању тресета са другим горивима, показују потенцијал ове врсте адитива. Приликом експерименталних истраживања са адитивима коришћена је отпадна дрвна маса. Разлога за одабир отпадног дрвета је висок садржаја цинка и олова, због кога се отпадно дрво сматра проблематичним, са гледишта корозије.

Закључци, изведени на основу остварених резултата у оквиру ове докторске дисертације, као и добијене зависности између, горе наведених, посматраних утицајних величина на процес сагоревања, свакако ће представљати основу за будућа истраживања у овој области. Резултати остварени у овом раду имаће практичан значај за оптимизацију и даља унапређења постројења за термичку конверзију биомасе без обзира на њихов капацитет и намену, што представља посебни допринос. Остварени резултати, и анализом утврђени утицајни параметри, ће се позитивно одразити и на проблеме везане за управљање отпадом, односно већу могућност коришћења отпадне биомасе (отпадна биомаса из процеса производње кафе и отпадна дрвна биомаса) у енергетске сврхе, као и коришћење пепела тресета.

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

Чланови комисије сматрају да је кандидат показао да има смисао и знања да самостално препозна и систематски решава инжењерске и научне проблеме, примењујући савремене методе теоријског и експерименталног карактера, да користи расположиву литературу и да успешно влада савременим истраживачким методама. Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научноистраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Ова дисертација је документовано проширила постојећа знања и остварила научни допринос у области процесне технике. Остварени научни допринос докторске дисертације „Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката“ се огледа у следећем:

- прегледном приказу научних сазнања која се односе на област истраживања дисертације;
- у циљу дефинисања оптималних услова сагоревања, са аспекта емисије азотних оксида, у експериментима у којима је као гориво коришћено отпадно дрво, одређено је да се оптимални коефицијент вишка ваздуха ( $\lambda$ ) при двостепеном довођењу ваздуха, креће у опсегу 0,8-0,95 за примарни ваздух, односно 1,6-1,9 када је у питању укупна вредност  $\lambda$ , што се добро слаже са доступним литературним подацима. Такође је потврђено да је поменута вредност  $\lambda$  адекватна и са аспекта емисија  $CO$ , као и да довођење вишестепеног ваздуха за сагоревање генерално доводи до виших емисија  $CO$ , у односу на процесе без вишестепеног довођења ваздуха.
- приликом експерименталног са намешавањем (косагоревањем) већ поменуте три различите врсте биомасе са различитим уделитема азота, и вишестепеним довођењем ваздуха за сагоревање, показано је да намешавање горива, односно повећање удела азота у тако новоформираном гориву, доводи до:
  - опадања фактора конверзије азота из горива у азотне оксиде и азот субоксид, док се додатно смањење може постићи у условима сагоревања са вишестепеним довођењем ваздуха; овакви резултати су последица реакција прекурсора азотних оксида ( $NH_3$  и  $HCN$ ), који настају у већој мери код горива са вишим уделом азота, са  $NO$  што доводи до веће конверзије азота из горива у  $N_2$ ; у дисертацији су дате корелационе криве, којима је могуће утврдити вредности фактора конверзије азота у азотне оксиде и азот субоксид у функцији удела азота у биомаси;
  - ефекта да емисије азотних оксида, при сагоревању без вишестепеног довођења ваздуха, благо експоненцијално расту у опсегу од 0,14, код чисте дрвне биомасе, до

1,34%, што је удео азота у мешавини са једнаким уделима чисте дрвне биомасе и отпадне биомасе из процеса производње кафе, док посматрајући даљи раст удела азота у мешавини горива (1.34 до 2,80%) практично се не могу уочити промене у вредностима емисија, односно емисије су готово константне; у случају сагоревања са вишестепеним довођењем ваздуха јасан је тренд редукације азотних оксида, при чему су емисионе вредности за различите уделе азота у намешаном гориву и у овом случају готово константе, осим за чисту дрвну биомасу где су емисије неколико пута ниже, услед изузетно ниског удела азота; услед механизма стварања азотних оксида, уочено је вишеструко повећање емисије  $N_2O$  али је, обзиром на константно смањење емисије  $NO_x$  у условима са вишестепеним довођењем ваздуха, укупни утицај на животну средину емисије азотних оксида смањен;

- утврђени су потенцијали за редукацију азотних оксида за сваку од коришћених биомаса као и за њихове мешавине, док су паралелно са потенцијалима редукације азотних оксида дати потенцијали повећања азот субоксида, услед супротног утицаја вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање на ово једињење;
- утврђено је да мешање различитих врста биомасе може бити ефикасан метод којим се утиче на распоред појединих хемијских елемената у оквиру једињења која улазе у састав пепела, такође се дошло до закључка да процес пелетирања биомасе додатно утиче на ову појаву;
- показано је да сагоревање биомасе при условима вишестепеног довођења ваздуха, својим утицајем на формирање аеросола, односно уоченом тенденцијом њиховог укрупњавања са испод  $0,1 \mu m$  на преко  $0,1 \mu m$ , може бити веома корисно у смислу редукације проблема корозије, јер упућује на промене у механизму њиховог настајања и њиховим емисијама, а треба имати на уму да су аеросоли као најситније истовремено и најкорозивније честице летећег пепела;
- радом на овој дисертацији учињен је један од првих покушаја утврђивања свеобухваног утицаја летећег пепела тресета, као адитива, на састав ложишног пепела, летећег пепела и састав димног гаса, при строго контролисаним условима сагоревања отпадног дрвета; посебан акценат је стављен на понашање цинка, олова, калијума, натријума, хлора и сумпора; приказане су и зависности, тј. утицаји температуре и пепла тресета, на гранулометријски састав летећег пепела;
- развијена је метода за одређивање састава летећег пепела, „сланог дела“ аеросола (сулфати и хлориди калијума, натријума, цинка и олова), заснована на примени скенирајућег електронског микроскопа са енергодисперзивним детектором рендгенских зрака (SEM/EDX);
- анализиран је утицај каолина, као адитива, на једињења хлора при различитим температурама, дистрибуцији ваздуха за сагоревање; такође су приказани утицаји на гранулометријски састав летећег пепела;
- показано је да је каолин веома ефикасан у редукацији концентрације хлора како у летећем тако и у ложишном пепелу, док је утицај температуре незнатан.
- анализом експерименталних резултата установљено је да каолин има позитиван утицај на топљивост ложишног пепела, тј. да са уделом каолина расте и температура топљивости пепела.

Остварени научни допринос докторске дисертације се заснива на оригиналном приступу експерименталним истраживањима, обради и анализи добијених резултата, као и коначним корелацијама и закључцима.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У докторској дисертацији је на адекватан начин извршена систематизација постојећих сазнања из области термичке конверзије биомасе и проблема везаних за њу. Истраживања

спроведена у оквиру докторске дисертације обухватила су интеграцију експерименталних истраживања и аналитичких метода у циљу дефинисања зависности између посматраних параметара процеса сагоревања и гасовитих и чврстих продуката.

Услед сложених интеракција које се јављају током процеса сагоревања, односно механизма формирања различитих продуката и могућности утицања на њих посредством вођења и припреме самог процеса, а у сврху дефинисања одговарајућих корелационих односа, оваква свеобухватна и детаљна истраживање су се показала као неопходна.

Резултати спроведених истраживања у оквиру докторске дисертације, услед своје обимности, дају потпуну слику о утицају вишестепеног довођења ваздуха за сагоревање, температуре, модификације састава горива на емисије азотних оксида, као најпроблематичнијих гасовитих продуката приликом сагоревања биомасе, као и на карактеристика ложишног и летећег пепела, који су одговорни за проблеме корозије и зашљакивања у термоенергетским постројењима.

Иако су други гасовити продукти практично праћени као индикатори процеса сагоревања, а у случају  $SO_2$  и  $HCl$  и као показатељи расподеле сумпора и хлора између гасовитих и чврстих продуката, ти резултати су дали велики допринос и без њих се не би могло доћи до адекватних закључака.

Треба свакако напоменути да су у оквиру овог рада начињена једна од првих истраживања свеобухватног утицаја летећег пепела тресета, као адитива, на продукте сагоревања, док је развој методе за одређивање састава летећег пепела свакако посебан допринос ове дисертације.

Поред несумљивог научног доприноса, практичан значај остварених резултата треба посматрати из три правца: 1) заштита животне средине (редукција емисија штетних продуката сагоревања, искоришћење отпадних материјала); 2) борба против климатских промена (редукција емисија  $N_2O$ , допринос проучавању могућности супституције фосилних горива биомасом); 3) унапређење термоенергетских постројења која сагоревају биомасу (оптимизација процеса сагоревања, решавање проблема корозије и зашљакивања).

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Доприноси докторске дисертације су верификовани кроз следеће радове које је аутор објавио у међународним часописима који су на SCI листи.

##### Категорија M21:

1. Houshfar, E., Skreiberg, Ø., Løvås, T., **Todorovic, D.** and Sørnum, L. *Effect of temperature on  $NO_x$  emission from biomass combustion in the staged-air combustion scenario*, Energy and Fuels, 25 (10), pp. 4643-4654 (2011) (**IF2011=2.721**) (ISSN 0887-0624)

Према ISI/Web of Science, рад 1 је цитиран 12 пута.

2. Becidan, M., **Todorovic, D.**, Skreiberg, Ø., Khalil, R., Beckman, R., Goile, F., Skreiberg, A., Jovovic, A. and Sørnum, L., *Ash related behaviour in staged and non-staged combustion of biomass fuels and fuel mixtures*, Biomass and Bioenergy, 41, pp. 86-93, (2012), (**IF2012=2.975**) (ISSN 0961-9534)

Према ISI/Web of Science, рад 2 је цитиран 4 пута.

3. Houshfar, E., Skreiberg, Ø., **Todorovic, D.**, Løvås, T., Skreiberg, A., Løvås, T., Jovovic, A. and Sørnum, L.  *$NO_x$  emission reduction by staged combustion in grate combustion of biomass fuels and fuel mixtures*, Fuel, 98, pp. 29-40 (2012) (**IF2012=3.357**) (ISSN 0016-2361)

Према ISI/Web of Science, рад 3 је цитиран 11 пута.

4. Backman, R., Khalil, R., **Todorovic, D.**, Skreiberg, Ø., Goile, F., Skreiberg, A. and Sørum, L. *The effect of peat ash addition on the combustion of demolition wood under well controlled conditions*, Fuel Processing and Technology, 105, pp. 20-27 (2013) (**IF2013=3.019**) (ISSN 0378-3820)

Према ISI/Web of Science, рад 4 је цитиран 5 пута.

Категорија M23:

5. Khalil, R., **Todorovic, D.**, Skreiberg, Ø., Becidan, M., Backman, R., Goile, F., Skreiberg, A. and Sørum, L., *The effect of kaolin on the combustion of demolition wood under well-controlled conditions*, Waste Management & Research, 30 (7), pp. 672-680 (2012), (**IF2012=1.047**) (ISSN 0734-242X)

Према ISI/Web of Science, рад 5 је цитиран 1 пута.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом „**Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката**“, кандидата Душана М. Тодоровића, дипл. инж. маш, представља савремен и оригиналан научни допринос кроз свеобухватно сагледавање и иновативни приступ решавању проблема. Кандидат је при решавању постављеног задатка користио савремене методе, стандардну стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологије излагања су у складу са универзитетским нормама.

Ценећи оно што је приказано у докторској дисертацији и чињеницу да је анализирана проблематика актуелна у научној јавности, са задовољством се констатује да је кандидат Душана М. Тодоровића, дипл. инж. маш, успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима докторске дисертације.

Треба истаћи да је кандидат дошао до оригиналних и проверљивих резултата и показао висок ниво способности и самосталности у доношењу и спровођењу одлука у току израде докторске дисертације. На тај начин је демонстрирао способност за самостални научни рад. Остварени научни и практични резултати су верификовани публикавањем четири рада у врхунским међународним часописима (M21) и једног рада у међународном часопису (M23).

На основу прегледа докторске дисертације под називом „**Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката**“, кандидата Душана М. Тодоровића, дипл. инж. маш, 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 Универзитета у Београду.

**Комисија предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом „Утицај одабраних врста биомасе и процеса сагоревања на састав и карактеристике гасовитих и чврстих продуката“, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.**

Београд, 08.06.2015. године

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

проф. др Александар Јововић, редовни  
професор, ментор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

проф. др Дејан Радић, ванредни професор,  
Универзитет у Београду, Машински  
факултет

---

проф. др Мирослав Станојевић, редовни  
професор,  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

проф. др Нико Самец, редовни професор,  
Универзитет у Марибору, Машински  
факултет

---

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