

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији мр Сање Петровић Бећировић, дипл. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета бр. 772/2 од 07.04.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације студента докторских студија мр Сање Петровић Бећировић, дипл. инж. маш. под називом

“УТИЦАЈ ПРОМЕНЕ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА САГОРЕВАЊА НА ЕНЕРГЕТСКЕ И ЕКОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПЕЋИ НА ПЕЛЕТ”

(„IMPACT OF VARIATION IN COMBUSTION PARAMETERS ON ENERGY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF PELLET STOVE“)

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

Кандидаткиња мр Сања Петровић Бећировић, дипл. инж. маш., број индекса 363/94, поднела је пријаву за израду докторске дисертације бр. 927/1 од 26.04.2013. године. По захтеву кандидаткиње мр Сања Петровић Бећировић, дипл. инж. маш., и предлога проф. др Драгославе Стојиљковић (ментора) и сагласности Катедре за технологију материјала, да се кандидаткињи одобри пријава теме докторске дисертације и именује Комисија за подношење извештаја о прихватању теме и оцену научне заснованости докторске дисертације, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је Одлуку број 927/3 од 13.06.2013. године којом се прихвата тема докторске дисертације и именује ментор проф. др Драгослава Стојиљковић и Комисија за подношење извештаја о прихватању теме и оцену научне заснованости докторске дисертације у саставу:

- проф. др Драгослава Стојиљковић, ментор;
- проф. др Александар Јововић,
- проф. др Мирко Коматина;
- проф. др Петар Гверо, Машински Факултет Универзитета у Бања Луци;
- др Небојша Манић.

Комисија за прихватање теме и оцену научне заснованости докторске дисертације у саставу:

- проф. др Драгослава Стојиљковић, ментор;
- проф. др Александар Јововић,
- проф. др Мирко Коматина;
- проф. др Петар Гверо, Машински Факултет Универзитета у Бања Луци;
- др Небојша Манић.

поднела је Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду извештај број 927/4 од 24.6.2013.

Одлуком Наставно-научног већа број 927/5 од 27.6.2013. прихваћен је предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације и за ментора је именована проф. др Драгослава Стојиљковић.

На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидаткиње за израду докторске дисертације и о именовану ментора (927/5 од 27.6.2013.), а на основу сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду са седнице од 16.09.2013. године (Одлука бр. 61206-3385/4-13 од 16.09.2013.), Декан је 17.09.2013. године донео Закључак број 1803/1 од 27.09.2013. године о одобравању рада на теми докторске дисертације под називом „Утицај промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет”. За ментора дисертације именована је проф. др Драгослава Стојиљковић.

На основу обавештења проф. др Драгослава Стојиљковић, ментора, да је докторант мр Сања Петровић Бећировић, дипл. инж. маш., завршила докторску дисертацију „Утицај промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет“ и предлога Катедре за технологију материјала (број 772/1 од 1.04.2016. године), Наставно-научно веће Машинског факултета донело је одлуку број 772/2 од 7.04.2016. године о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Драгослава Стојиљковић, ред. проф., ментор;
- др Александар Јововић, ред. проф.
- др Небојша Манић, доц.
- др Петар Гверо, ред. проф., Машински Факултет, Универзитета у Бања Луци;
- др Раде Карамарковић, доц., Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација мр Сање Петровић Бећировић, дипл. инж. маш., под насловом „**Утицај промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет**“, припада области техничких наука – машинство, ужа научна област технологија материјала - погонски материјали и сагоревање, за коју је матичан Машински факултет, Универзитета у Београду.

Ментор проф. др Драгослава Стојиљковић запослена је на Катедри за технологију материјала Машинског факултета Универзитета у Београду и има 8 SCI радова из области технологије материјала - погонски материјали и сагоревање.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидаткиња мр Сања Петровић Бећировић, дипл. инж. маш., рођена је 1975. године у Чачку. Основу школу и Гимназију природно-математичког смера завршила је у Чачку са одличним успехом и стеченим Вуковим дипломама за завршено основно и средњешколско образовање. Добитник је и других награда са такмичења из математике, физике и српског језика. Школске 1994/95. године је уписала Машински факултет Универзитета у Београду, где је 2000. године дипломирала на одсеку за Термотехнику, са одбрањеним дипломским радом на тему “Карактеризација угља, угљеног праха и пепела блока А2 на Термоелектрани Никола Тесла А”. Након завршетка основних студија на Машинском факултету у Београду, кандидаткиња Сања Петровић Бећировић своје студијско образовање наставила је у иностранству, на катедри за Пренос топлоте Машинског факултета Универзитета *McMaster*. Као добитник стипендије канадске владе, кандидаткиња се у оквиру поменутих магистарских студија бавила истраживачким радом који се заснивао на испитивању феномена из области конвективног преноса топлоте (тзв. Марангони конвекције), који је препознат као механизам преноса топлоте који би своју пуну примену могао наћи у микрогравитацијској средини. Поред полагања испита предвиђених планом и програмом магистарских студија, програм студија захтевао је и осмишљавање и реализацију експерименталних испитивања и истраживања, чији би резултати и закључци били презентовани у оригиналном магистарском раду. Упоредо са радом на експерименталној апаратури, развијан је и оригиналан нумерички модел који адекватно одсликава термичке ефекте Марангони конвекције при потхлађеном нуклеационом кључању тј. при анализираном феномену преноса топлоте. Кандидаткиња је своје магистарске студије завршила у планираном двогодишњем периоду, тачније од 2001. до 2003. године. Упоредо са студијским обавезама, током магистарских студија била је ангажована и као асистент на катедри за Пренос топлоте, где је била задужена за спровођење показних лабораторијских вежби из области преноса топлоте, организовање контролних тестова знања, као и бодовање и завршно рангирање студената. Магистарски програм завршила је након успешно одбрањене магистарске тезе под називом “*Marangoni Heat Transfer in Subcooled Nucleate Pool Boiling*” у јулу 2003. године. чиме је кандидаткиња стекла звање Магистра примењених техничких наука (*Master of Applied Sciences*).

Научно-наставно веће Машинског факултета Универзитета у Београду на седници од 29.4.2004. године донело је Решење (бр. 283/4 од 5.5.2004.):

1. да се нострификује диплома магистра техничких наука мр Сањи Петровић, дипл.инж.маш. коју је стекла на *McMaster University*, Hamilton, Ontario, Канада издате 14.11.2003. године и
2. да се тиме изједначава са дипломом о завршеним магистарским студијама на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Овим решењем кандидаткиња Сања Петровић Бећировић је стекла академски назив магистра техничких наука, област Машинство.

Од 2004. године кандидаткиња је запослена у компанији ЕНЕРГОПРОЈЕКТ ЕНТЕЛ а.д. Београд, где тренутно обавља функцију Руководиоца бироа за енергетске, економске и еколошке студије. Учествовала је на многобројним пројектима у којима је разматран рад постојећих енергетских објеката у Републици Србији са аспекта заштите животне средине, сагледавана усаглашеност њиховог рада са регулаторним нормама из области заштите животне средине, како у погледу законске регулативе која је на снази у Републици Србији, тако и захтева које намеће регулатива Европске Уније са којом се Србија постепено

усаглашава. Поред анализе постојећег стања, у пројектима на којима је учествовала су, кроз мултидисциплинарни приступ, анализирани и предлагани мере за унапређење еколошких карактеристика рада термоенергетских постројења и разрађивана пројектна решења система за смањење емисија загађујућих материја у животну средину (унапређење електрофилтарских постројења, изградња постројења за смањење емисије сумпорних оксида, побољшање енергетске ефикасности итд.). Учествовала је, такође, и на изради студија и пројеката у којима је разматрана потенцијална изградња нових електроенергетских капацитета у Србији (блок 3 на ТЕ Никола Тесла Б, блок 3 на ТЕ Костолац Б, завршетак изградње ТЕ Колубара Б), у оквиру којих је била ангажована на разматрању еколошких аспеката и обезбеђивању испуњења законских норми и обавеза у погледу спречавања загађења животне средине. У оквиру великог броја пројеката и студија финансираних од стране различитих министарстава Републике Србије, али и приватних инвеститора, учествовала је у анализама и сагледавањима могућности коришћења алтернативних (обновљивих) извора енергије и уклапања нових, “зелених”, производних капацитета у енергетску мрежу Србије. Такође, учествовала је и у националним пројектима газдовања енергијом у општинама Србије и првој организованој обуци општинских енергетских менаџера у Србији. Поред тога, била је и члан експертског тима њеног матичног предузећа који је био ангажован на успешном, вишегодишњем пројекту унапређења енергетске ефикасности 90 јавних објеката у Србији (болница, школа и установа социјалне заштите). Присуствовала је великом броју међународних и националних конференција и скупова на којима су излагана и разматрана савремена сазнања из области енергетике, заштите животне средине и енергетске ефикасности. Поседује сертификате о успешном похађању радионица на тему различитих биогорива. Члан је Инжењерске коморе Србије, Друштва термичара Србије, Савеза енергетичара Србије и представник Енергопројект Ентел а.д. у Координационом телу система Енергопројект за енергетску ефикасност и зелену градњу. У оквиру научноистраживачке делатности, аутор је или ко-аутор већег броја радова објављених 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, Adobe Photoshop, AERMOD View.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација мр Сање Петровић Бећировић, дипл. инж. маш., под називом „Утицај промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет“ односно „Impact of variation in combustion parameters on energy and environmental performance of pellet stove“ napisana је на српском језику, има 255 страна формата А4, 99 слика и дијаграма, 28 табела, 73 нумерисане релације, списак коришћене литературе на 12 страна, као и 6 прилога на 13 страна.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод;
2. Обновљиви извори енергије у глобалној енергетици;
3. Улога биомасе у сектору производње топлотне енергије;
4. Карактеристике биомасе као обновљивог извора енергије;
5. Пелети од биомасе и уређаји за њихово сагоревање;
6. Моделовање и нумеричка симулација процеса сагоревања пелета у уређајима мале снаге;

7. Експериментална испитивања радних карактеристика пећи на пелет са аспекта промене параметара процеса сагоревања;
8. Преглед и анализа резултата експерименталних испитивања;
9. Моделовање и нумеричка симулација сагоревања пелета у испитиваној пећи на пелет;
10. Резултати моделовања и нумеричке симулације процеса сагоревања;
11. Закључна разматрања;
12. Литература;
13. 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 стретешко опредељење Европске Уније и Републике Србије ка повећаном коришћењу обновљивих извора енергије. Посебно је истакнут значај коришћења биомасе у сектору домаћинства. Такође, дат је предмет и циљ истраживања и истакнута научна оправданост докторске дисертације.

У другом поглављу дат је осврт на тренутно стање глобалне енергетике, са посебним акцентом на учешћу различитих привредних сектора и очекивано високом учешћу које ће у наредном периоду имати сектор широке потрошње. Указано је на проблематику коришћења фосилних горива и значај који ће обновљиви извори имати у утемељивању одрживе енергетске будућности. Наведени су циљеви које су у погледу повећаног учешћа обновљивих извора енергије у бруто финалној потрошњи енергије дефинисале земље Европске Уније и дат је осврт на динамику остваривања усвојених циљева.

У трећем поглављу указано је на често занемарен значај сектора производње топлотне енергије у плановима за достизање повећаног учешћа обновљивих извора енергије. Наведено је посебно значајно имајући у виду традиционално ослањање на коришћење фосилних горива за добијање топлотне енергије, нарочито у сектору домаћинства. Из наведених разлога Европска Унија (ЕУ) уврстила је сектор производње топлотне и расхладне енергије у три приоритетна сектора (поред електроенергетског и сектора саобраћаја) у којима се захтева значајно повећање удела обновљивих извора енергије. При том, биомаса је идентификована као најзначајнији обновљиви извор енергије који ће се користити за подмиривање потреба за топлотном енергијом у периоду који долази. Приказан је и преглед ЕУ регулативе која се односи на регулисање и подстицај коришћења биомасе у енергетске сврхе, као и очекивани ефекти у погледу планова за повећано учешће овог енергента у сектору производње топлотне и расхладне енергије. Нарочито је указано на значај примене дефинисаних мера у сектору домаћинства који учествује са 21% у потрошњи топлотне енергије у ЕУ. На крају овог сагледавања дата је рекапитулација аспеката који указују на значај коришћења биомасе за потребе производње топлотне енергије у сектору домаћинства у ЕУ. Извршена је детаљна анализа стања у поменутој области у Републици Србији, као и релевантна национална законска регулатива која је усвојена у циљу усклађивања са регулативом ЕУ. Наведени су национални циљеви у погледу повећаног удела обновљивих извора и приоритетне мере које ће довести до остваривања усвојених циљева. Биомаса, као најзначајнији национални обновљиви извор енергије, препозната је као кључни обновљиви енергент за испуњавање усвојених циљева. Уз мере повећања енергетске ефикасности у зградарству, коришћење посебно припремљеног облика биомасе - пелета или брикета у индивидуалним ложиштима, за загревање домаћинства или објеката комерцијалне или јавне намене, и то као алтернатива

коришћењу еколошки неповољнијих фосилних горива, идентификовано је као један од најбољих начина енергетског искоришћења биомасе као обновљивог ресурса. На крају поглавља дата је рекапитулација аспеката који указују на значај коришћења биомасе за потребе производње топлотне енергије у сектору домаћинства у Републици Србији.

У четвртом поглављу приказан је преглед општих карактеристика биомасе која се користи у енергетске сврхе. Познавање карактеристика коришћеног горива представља основни податак који утиче на ефикасност и карактеристике процеса сагоревања, као и на емисије загађујућих материја које настају сагоревањем. Како би се омогућио развој ефикасних уређаја за сагоревање биогорива, потребно је познавати карактеристике горива за које се уређај пројектује и израђује, на основу којих се може спровести оптимизација процеса сагоревања и прилагођење конструкционих елемената ложног уређаја у циљу постизања максималног искоришћења енергије горива. Извршена је детаљна анализа међународних класификација биомасе и преглед технологија за искоришћење енергије биомасе. Процес сагоревања дрвне биомасе је детаљно анализиран са аспекта кључних параметара који утичу на његово одвијање. Дат је преглед и опсег снага уређаја за сагоревање чврсте биомасе, уз идентификацију проблема који се јављају при сагоревању разматране врсте горива. Указано је на разлоге који утичу на већу погодност коришћење дрвне биомасе у уређајима мале снаге у односу на пољопривредну биомасу. Дат је преглед и анализа загађујућих материја које настају сагоревањем биомасе и њихов утицај на климу, животну средину и здравље људи. Посебно је приказан истакнут значај оптимизације процеса сагоревања биомасе у уређајима мале снаге, који нису опремљени специјалним системима за спречавање или смањење емисије загађујућих материја, а са циљем постизања што ефикаснијег сагоревања горива уз што мање локално загађење животне средине.

У петом поглављу описане су карактеристике пелета као горива и утицај квалитета сировина које се користе за њихову производњу. Идентификоване су класе квалитета пелета на основу критеријума који обухватају порекло сировине, максимални дозвољен садржај пепела, доњу топлотну моћ и максимални дозвољен садржај азота, сумпора и хлора. У наставку поглавља описана је технологија производње пелета и указано на кључне аспекте који утичу на карактеристике крајњег производа. Дат је такође преглед класификације уређаја за сагоревање пелета мале снаге тј. снаге до 100 kWt и то по три класификациона критеријума: врсти уређаја, начину довода горива и конструкционим карактеристикама уређаја. Указано је на ЕУ регулативу која се односи на стандардизацију уређаја за сагоревање пелета, где је као посебно важан издвојен стандард EN 14785:2006 који дефинише захтеве који се односе на пројектовање, рад и испитивање карактеристика уређаја на дрвене пелете намењених за грејање домаћинства. Као нарочито значајна идентификована је неопходност унапређења актуелне праксе у погледу сертификације разматраних уређаја како би се крајњим корисницима пружио могућност разликовања добрих од лоших производа. Посебан део у овом поглављу посвећен је прегледу и анализи истраживања у области уређаја мале снаге за сагоревање пелета. Имајући у виду планове ЕУ који се тичу примене мера енергетске ефикасности и изградње зграда са ниском или нултом потрошњом енергије, који су између осталог дефинисани у Директиви 2010/31/ЕС о енергетским перформансама зграда, пећи и котлови снаге до 2-3 kW препознати су као уређаји који ће имати посебан значај у остваривању енергетских циљева ЕУ у сектору зградарства, на тај начин заузимајући све значајније место у актуелним научним и техничким истраживањима. Утврђено је да квалитет горива посебно битан у пећима и котловима за сагоревање пелета мале снаге, па је с тога велики број истраживања спровођен управо у овој области. Квалитет пелета се веома значајно одражава на рад поменуте групе уређаја, делом и због система аутоматског управљања који код уређаја мале снаге није тако софистициран као код великих постројења за сагоревање пелета, где комплексни системи регулације обезбеђују веома брзо интервенисање када дође до било каквих поремећаја у раду. Испитивања су такође показала

да пелети лошег квалитета могу довести до низа оперативних проблема у раду система за сагоревање, укључујући зашљакивање, корозију и проблеме у функционисању, као и да могу бити узрок значајних емисија загађујућих материја. Са друге стране, анализа и оптимизација радних параметара уређаја за сагоревање, као и пажљив одабир конструктивних карактеристика, у првом реду места увођења примарног и секундарног ваздуха у зоне сагоревања, али и места довода горива у ложиште, показали су се као адекватан начин за оптимизацију процеса сагоревања у уређајима мале снаге. Нека од истраживања такође су указала на значај управљачких система на повећање степена корисности рада уређаја мале снаге у којима се сагорева биомаса, такође идентификујући интервенције на управљачком систему ових уређаја као примарну меру која се спроводи у циљу смањења емисија загађујућих материја. Ипак, потребно је имати у виду да је економичност један од кључних критеријума за успешан пласман пећи и котлова мале снаге на тржиште, тако да конфигурација и комплексност управљачког система морају бити такви да обезбеде захтевану оптимизацију процеса сагоревања, али без драматичног повећања трошкова самог уређаја за сагоревање.

Шесто поглавље даје сагледавање улоге моделовања и нумеричких симулација у анализама сагоревања биомасе. Искакнуто је да моделовање сагоревања биомасе представља посебно велики изазов имајући у виду комплексност процеса разградње горива при турбулентним условима који се остварују у ложиштима уређаја за сагоревање, хетерогености реакција које се одвијају између чврсте и гасовите фазе током процеса сагоревања, хемијских реакција гасне фазе које се одвијају унутар ложишта и повезаности разматраног феномена са преносом топлоте зрачењем на зидове ложишта. Услед свега наведеног, број развијених модела који детаљно сагледавају хемијске процесе који се током процеса сагоревања биомасе одвијају како у чврстој фази сагореваног горива, тако и у гасној фази горивих испаривих компоненти, је релативно ограничен и предмет је сталних истраживања. Наведени су софтверски пакети који се најчешће користе за моделовања процеса сагоревања биомасе и дат је преглед неколико референтних модела развијених у циљу анализе проблематике која је сродна проблематици разматраној у докторској дисертацији.

У седмом поглављу детаљно су описана експериментална испитивања спроведена у циљу анализе утицаја промене параметара процеса сагоревања на рад испитиване пећи на пелет. Дат је опис експерименталне инсталације са свом припадајућом мерно-регулационом опремом и мерним местима. Кључне делове експерименталне инсталације на којој су спроведена експериментална испитивања чине пећ за сагоревање дрвних пелета декларисане снаге 8 kWt, систем за одвођење димног гаса, који обухвата димни канал, вентилатор димног гаса и клапну за регулацију потпритиска у каналу димног гаса, вага за мерење тренутне масе пећи и систем за аквизицију тј. прикупљање мерених параметара. Детаљно је описан принцип рада анализираних пећи на пелет, као и усвојени план и програм мерења. Планом мерења предвиђено је прикупљање података потребних за сагледавање утицаја промене радних и конструктивних параметара пећи на енергетске и еколошке перформансе рада анализираних уређаја, а у складу са захтевима EN 14785:2006. Сходно томе, планирано је сагледавање утицаја промене врсте горива, топлотне снаге горионика и вредности потпритиска у каналу димног гаса на остварену топлотну снагу и степен корисности разматране пећи, као и на емисије угљен монооксида. Поред горива које је препоручено од стране произвођача пећи, разматрано је сагоревање алтернативне, локално расположиве врсте пелета. У циљу анализе утицаја топлотне снаге горионика на радне карактеристике анализираних пећи испитан је утицај три горионика различитих топлотних снага (6, 8 и 10 kWt). На крају, за потребе разматрања утицаја промене потпритиска у каналу димног гаса на радне карактеристике пећи, испитан је утицај три различите вредности потпритиска и то 8 ± 2 Pa, 12 ± 2 Pa и 16 ± 2 Pa. Утицај поменутих параметара анализиран је како за номинално, тако и за редуковано топлотно оптерећење пећи. На поменути начин, током

експерименталног испитивања анализирано је укупно 36 радних режима са различитим комбинацијама претходно поменутих параметара. У поглављу је дат детаљан опис мерених параметара (маса пећи, температуре на различитим мерним местима, потпритисак у каналу димног гаса, састав димног гаса) и мерне опреме коришћене за прикупљање потребних података. За прикупљање података о измереним температурама карактеристичних површина пећи, као и вредности потпритиска у каналу димног гаса, коришћен је комерцијални систем за аквизицију података TESTO 454, док су параметри димног гаса, укључујући температуру, садржај O_2 , CO , CO_2 и NO_x у димном гасу, као и амбијентална температура у загреваној просторији, прикупљани комерцијалним гасним анализатором TESTO 350. Детаљно је описана процедура спровођења експерименталних испитивања, са прецизно дефинисаним карактеристичним периодима током извођења сваке кампање мерења. На крају поглавља дата је идентификација испитиваних радних режима у складу са усвојеним начином њиховог означавања. Подаци прикупљени током експерименталних испитивања омогућили су израчунавање енергетских и еколошких индикатора рада анализираних пећи у циљу поређења са захтеваним перформансама рада ложног уређаја, као и доношења закључака у погледу величине утицаја сваког од разматраних параметара на поменуте индикаторе рада пећи. Поред тога, прикупљени подаци омогућили су и дефинисање граничних услова у нумеричком моделу који је развијен у оквиру докторске дисертације, као и његову валидацију.

Осмо поглавље даје преглед и анализу резултата експерименталних испитивања, а са циљем квантификовања утицаја анализираних параметара на енергетске и еколошке карактеристике рада пећи на pellet, као и за потребе поређења измерених вредности са захтеваним параметрима које су дефинисане релевантним стандардом. Поглавље је подељено на три дела у којима су посебно дати: 1) резултати експерименталних испитивања, 2) обрада резултата експерименталних испитивања и 3) анализа резултата експерименталних испитивања. У циљу прегледнијег и јаснијег приказа, резултати мерења груписани су у три целине: резултати испитивања квалитета горива, резултати испитивања процеса сагоревања горива и резултати испитивања продуката сагоревања. Поред тога, обрадом резултата мерења добијени су енергетски и еколошки индикатори рада уређаја за сагоревање и то: остварена топлотна снага пећи, укупан степен корисности пећи и емисија угљен монооксида сведена на 13% O_2 (v/v) у димном гасу. У циљу испитивања квалитета pelletа извршена је њихова техничка и елементарна анализа. Поред тога, за сваку анализирану врсту дрвених pelletа одређене су и додатне физичке карактеристике и то: димензије, густина и насипна густина. Сирови резултати мерења параметара који су праћени у циљу анализе процеса сагоревања и продуката сагоревања дати су за два одабрана режима рада, док су у наставку поглавља приказане средње вредности праћених параметара за свих 36 анализираних радних режима. Наведени параметри обухватили су мерење потрошње горива, температуре димног гаса и температуре топлог ваздуха, температуре у ложишту пећи, температуре карактеристичних површина пећи, као и састав и температуру продуката сагоревања. Такође, за све испитиване радне режиме дат је и садржај несагорелог у пепелу, одређен на основу испитивања узорака пепела који су прикупљени за сваки испитивани радни режим. У другом делу поглавља у ком је спроведена обрада резултата експерименталних испитивања извршено је дефинисање параметара потребних за постављање одговарајућег математичког модела и нумеричку симулацију анализираних феномена, као и сагледавање енергетских и еколошких карактеристика рада пећи и упоређивање са захтевима релевантног стандарда. Одређен је коефицијент вишка ваздуха за све анализираних радних режиме, количина ваздуха за сагоревање, као и средње вредности температура граничних површина које ће бити коришћене у нумеричкој симулацији процеса сагоревања. Такође, одређене су средње вредности температуре димног гаса, као и садржај O_2 , CO , CO_2 и NO_x у димном гасу. Утврђивање енергетских карактеристика анализираних пећи обухватило је одређивање топлотне снаге и степена корисности испитиваног уређаја. Израчунате вредности степена

корисности омогућиле су упоређивање карактеристика рада испитиване пећи са захтевима наведеног стандарда и одређивање усаглашености рада уређаја са прописаним нормативима. У трећем, завршном делу поглавља, дата је детаљна анализа резултата експерименталних испитивања. Спроведена анализа обухватила је анализу квалитета испитиваних врста пелета, анализу еколошких и енергетских карактеристика рада анализираног ложног уређаја, као и анализу утицаја варирања радних параметара на процес сагоревања пелета у анализираној пећи. Детаљно је сагледан и описан утицај квалитета горива, утицај конструктивних промена (кроз промену коришћеног горионика), као и утицај варирања потпритиска у каналу димног гаса, како на карактеристике процеса сагоревања, тако и на разматране енергетске и еколошке перформансе рада пећи.

У деветом поглављу дефинисан је математички модел коришћен у нумеричким симулацијама процеса сагоревања дрвених пелета у разматраном уређају за сагоревање. Описана је методолошка поставка модела, као и претпоставке усвојене у циљу поједностављења анализираног феномена. Дефинисан је математички модел у ком је сагоревање горива (дисперзне фазе) описано преко подмодела основних процеса кроз које комад горива пролази током процеса сагоревања: 1) загревање и сушење, 2) деволатилизација, 3) сагоревање коксног остатка и 4) хлађење/загревање насталог пепела. Посебно су дефинисани кинетички параметри процеса сагоревања којима је одређена брзина одвијања хемијских реакција. Дефинисани математички модел је за познату геометрију уређаја за сагоревање решаван коришћењем софтверског пакета FLUENT 15.0. Геометрија анализиране пећи моделована је у софтверском под-програму Ansys Design Modeler 15.0. За решавање усвојеног модела дефинисан је нумерички домен, као и граничне површине којима је дефинисан простор нумеричке мреже унутар које је решавана математичка поставка модела. За поставку и решавање модела коришћен је модел коначних запремина, тако да је домен модела подељен на 67.201 коначних запремина за које су у FLUENT-у нумерички решаване једначине модела по принципу “од чвора до чвора”. Експериментално одређене вредности појединих параметара послужиле су за дефинисање граничних услова нумеричке симулације. Нумерички поступак решавања дефинисаног модела подразумевао је итеративни поступак до добијања задовољавајуће конвергенције решења, тако да је нумеричко решавање једначина спровођено до испуњавања услова да разлика између два узастопна решења не буде већа од 10^{-4} тј. 10^{-5} за једначину одржања енергије.

У десетом поглављу приказани су резултати моделовања и нумеричке симулације процеса сагоревања дрвених пелета у анализираном уређају за сагоревање. Нумеричка симулација спроведена је за радне режиме који одговарају конструкцији пећи предложеној од стране произвођача пећи, тј. за конструкцију са гориоником топлотне снаге 8 kWt. На тај начин, за поменуту конструкцију пећи нумеричком симулацијом обрађено је укупно 12 радних режима у којима је варирана врста коришћеног горива, топлотно оптерећење пећи и потпритисак у каналу димног гаса. У оквиру резултата моделовања, дат је приказ температурског, струјног и концентрационих поља кисеоника, угљен диоксида и угљен монооксида добијених нумеричком симулацијом за два изабрана режима рада. Валидација развијеног модела спроведена је упоређивањем резултата добијених моделовањем и нумеричком симулацијом са резултатима експерименталних испитивања. Поређене су вредности концентрација кисеоника у димном гасу, температуре у ложишту пећи, као и енергетски и еколошки показатељи рада пећи: остварена топлотна снага, степен корисности рада пећи и концентрација угљен монооксида у излазном димном гасу сведена на референтни садржај кисеоника од 13% v/v. У следећем делу поглавља дата је анализа резултата добијених моделовањем, при чему је закључено је да је с обзиром на велики број обрађених режима у којима је вариран већи број утицајних параметара остварено задовољавајуће слагање са резултатима експерименталних испитивања. Идентификовани су и могући разлози који су довели до одступања две групе података. На основу извршене валидације модела, утврђено је

да би развијени модел могао да се користи за побољшање рада анализираних врста ложних уређаја како би се омогућила оптимизација процеса сагоревања и испуњавање прописаних норматива у погледу захтеваних енергетских и еколошких карактеристика њиховог рада.

У завршном, једанаестом, поглављу дисертације таксативно су изнети детаљни закључци са критичком анализом остварених резултата спроведених истраживања. Истакнут је научни допринос дисертације, као и могућност примене добијених резултата у реалним условима. Посебно су истакнуте могућности и правци за даља истраживања у разматраној области, са освртом на даље могућности надоградње развијеног математичког модела.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом „Утицај промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет“ представља савремен, оригиналан и значајан допринос разматраној проблематици.

Обновљиви извори енергије идентификовани су као једно од кључних решења када је у питању утемељивање одрживе енергетике, сектора који у највећој мери утиче на економски развој, стање животне средине и здравље становништва сваке земље, али и целе планете. Европска Унија представља једног од пионира у борби за веће учешће ОИЕ у сектору енергетике. Доследним и систематским приступом, Европска Унија успешно повећава коришћење ОИЕ у земљама чланицама, промовише употребу “чистих” технологија и све значајније се окреће техничким решењима која мање нарушавају стање животне средине и здравље људи. Република Србија је као земља која претендује на чланство у ЕУ преузела читав низ обавеза у погледу већег коришћења ОИЕ које су произашле из потписивања или ратификације међународних споразума. Поменуте одлуке сведоче о озбиљној намери државе да повећа учешће ОИЕ у енергетски интензивним делатностима како би до 2020. године учешће ОИЕ у бруто финалној потрошњи енергије са актуелних 21,2% било повећано на 27%. У Стратегији развоја енергетике Републике Србије до 2025. године са пројекцијама до 2030. године, биомаса је идентификована као најзначајнији обновљиви ресурс којим Србија располаже, учествујући са чак 61% у укупном потенцијалу ОИЕ наше земље. Са друге стране, Србија је као један од кључних сектора за остваривање поменутог циља повећаног учешћа ОИЕ идентификовала сектор производње топлотне и расхладне енергије. У складу са Националним акционим планом Републике Србије за коришћење ОИЕ планирано је да учешће ОИЕ у поменутом сектору достигне 30% у 2020. години. Наведени циљ оствариће се највише порастом коришћења биомасе у индивидуалним домаћинствима, али и у когенеративним постројењима и системима даљинског грејања. При томе, загревање простора у домаћинствима и зградама коришћењем посебно припремљеног облика биомасе у облику пелета или брикета препознато је као посебно интересантна алтернатива постојећим индивидуалним ложним уређајима у којима се сагорева еколошки знатно неповољније фосилно гориво (угаљ, уље за ложење). Употреба пелета или брикета веома је атрактивна и као алтернатива електричној енергији која се тренутно, услед ниске регулисане цене, интензивно користи за грејање животног и радног простора у Србији. Сходно наведеном, јасно је да је тема обрађена у докторској дисертацији, која се односи на сагоревање пелета у уређајима мале снаге (до 100 kWt) намењеним за загревање домаћинства, актуелна и да представља истраживање у области чији је значај посебно истакнут у стратешким документима Републике Србије.

Како биомаса у складу са дефиницијом у ширем смислу обухвата широк спектар могућих производа, препозната је неопходност стандардизације одређених врста биомасе као горива чији ће тачно дефинисани квалитет омогућити да процеси сагоревања у постројењима

намењеним за сагоревање биогорива резултују очекиваном количином енергије и задовољавајућим радом постројења за сагоревање. Познавање карактеристика коришћеног горива представља основни податак који утиче на ефикасност и карактеристике процеса сагоревања, као и на емисије материја које загађују животну средину. Такође, како би се омогућио развој ефикасних уређаја за сагоревање биогорива, потребно је познавати карактеристике горива за које се уређај пројектује и израђује, на основу којих се може спровести оптимизација процеса сагоревања и прилагођење конструкционих елемената уређаја за сагоревање у циљу постизања максималног искоришћења енергије горива. Предност пелета у односу на неприпремљену биомасу огледа се у већој енергетској густини, хомогенијем саставу и форми, мањем садржају влаге и могућности лакшег и економичнијег транспорта и манипулације. Могућност потпуне аутоматизације процеса сагоревања пелета омогућили су њихову примену у широком опсегу снага постројења за производњу топлотне енергије, почевши од уређаја за грејање мале снаге, погодних за коришћење у домаћинствима, преко већих система даљинског грејања, па све до великих топлана или постројења за комбиновану производњу топлотне и електричне енергије. Имајући у виду да сагоревање пелета за потребе грејања домаћинства представља доминантан вид коришћења пелета, постројења снаге до 100 kWt представљају најважнију циљну групу за примену пелета од биомасе. Такође, с обзиром да уређаји мале снаге нису опремљени системима за спречавање емисија загађујућих материја, адекватан избор врсте горива и оптимизација процеса сагоревања представљају једине факторе којима се може утицати на повољније перформансе разматраних уређаја са аспетка смањења загађења. Истраживања су показала да најважније утицајне факторе представљају врста горива, конструктивне карактеристике уређаја за сагоревање, као и топлотно оптерећење уређаја за сагоревање.

Предмет и научни допринос докторске дисертације представљају резултати експерименталног истраживања утицаја управо наведених кључних параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет. Размотрен је утицај две врсте горива на рад анализираних уређаја: горива препорученог квалитета и алтернативног горива које је лако доступно на тржишту Србије. Поред утицаја врсте горива, размотрен је утицај конструктивних карактеристика ложишта и то кроз утицај топлоте снаге горионика. На тај начин у пећи декларисане снаге 8 kWt, разматрани су ефекти инсталације горионика топлотних снага 6, 8 и 10 kWt. Поред тога, како топлотно оптерећење уређаја за сагоревање представља још један параметар који утиче на ниво емисија загађујућих материја, анализиран је рад уређаја за сагоревање пелета при номиналном и редукованом топлотном оптерећењу. У оквиру спроведених истраживања додатно је размотрен и утицај потпритиска у каналу димног гаса и могућност да се променом овог параметра утиче на процес сагоревања у ложишту уређаја за сагоревање. Мередавним европским стандардом који дефинише захтевани начин испитивања и рада пећи на пелет прописано је да потпритисак у каналу димног гаса уређаја за сагоревање пелета износи 12 ± 2 Pa, али је произвођачима разматраних ложних уређаја остављена могућност да дефинишу алтернативну вредност потпритиска уколико то доприноси бољим радним перформансама њиховог уређаја. Сходно томе, у циљу анализе и квантификовања утицаја потпритиска на радне перформансе испитиване пећи размотрен је утицај три различите вредности потпритиска и то: 8 ± 2 Pa, 12 ± 2 Pa и 16 ± 2 Pa. Сходно свему наведеном, експериментално истраживање обухватило је испитивање и анализу 36 радних режима разматраног ложног уређаја са различитим комбинацијама утицајних параметара.

Такође, у оквиру докторске дисертације развијен је и сопствени математички модел који је коришћен у нумеричким симулацијама радних режима анализираних уређаја за сагоревање. Развијени модел омогућио је дефинисање температурног, струјног и концентрационог поља гасних компонената унутар усвојеног домена тј. ложишта анализираних пећи, указавши да се унутар ложишта јавља проблем неуниформног простирања пламена који за последицу има неуниформно температурно поље, неравномерно одвијање процеса сагоревања и неравномерно загревање ваздуха за загревање простора. Поређењем вредности кључних

параметара процеса сагоревања, као и енергетских и еколошких карактеристика пећи добијених моделовањем и експерименталним истраживањем утврђено је да је модел показао задовољавајућу способност да реагује на промену утицајних параметара и успешно предвиди промену анализираних контролних величина за већину разматраних режима.

Како су истраживања у оквиру израде докторске дисертације обухватила веома детаљне анализе утицаја промене радних параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет, овим радом остварен је допринос проучавању могућности унапређења рада анализираних уређаја мале снаге за сагоревање пелета, за које се очекује да ће имати веома велику улогу у достизању како европских, тако и националних циљева у погледу повећаног учешћа обновљивих извора енергије у сектору производње топлотне енергије. Приступ истраживању, добијени резултати, као и математички модел развијен у докторској дисертацији омогућиће боље разумевање обима утицаја појединих параметара процеса сагоревања на рад разматраних уређаја, а представљаће и основу за будућа истраживања у овој области у циљу побољшања радних перформанси пећи на пелет. Потребно је нагласити чињеницу да иако су значај, али и проблеми који се јављају код уређаја мале снаге намењених за сагоревање чврстих биогорива добро познати, до сада је развијен релативно мали број модела који симулира појаве које се одвијају у наведеним уређајима. Један од разлога представља комплексност анализираних процеса, али и већа усредсређеност стручне јавности на уређаје веће инсталисане снаге. Развијени математички модел применљив је у пракси јер омогућава произвођачима ложних уређаја да оптимизују рад својих уређаја, односно да развијени модел користе за развој нових или реконструкцију постојећих пећи на пелет.

Област у којој је остварен научни допринос је веома актуелна, а посебан квалитет истраживању даје и могућност примене постигнутих резултата на шире подручје унапређења енергетских и еколошких карактеристика савремених уређаја за сагоревање пелета од биомасе. Свеобухватан приступ анализи утицаја који на енергетске и еколошке карактеристике уређаја за сагоревање пелета имају промене радних параметара процеса сагоревања, спроведена кроз детаљно експериментално истраживање, као и кроз развој оригиналног математичког модела и нумеричку симулацију разматраног феномена, уз примену савремених научних метода и алата, 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 кандидаткиња располагала већином доступне референтне литературе и да је литературу детаљно проучила у току израде дисертације. Ова литература је пре свега кандидаткињи послужила као полазна основа за приказ постојећег стања у области која се односи на проблематику докторске дисертације, као и на сагледавање приступа истраживача у поступку спровођења експерименталних испитивања, али и нумеричког моделовања сагоревања пелета од биомасе у уређајима мале снаге. Кандидаткиња је користила литературу из међународних и домаћих научних часописа, стручних уџбеника, релевантних међународних стандарда и референтних докумената. Кандидаткиња је коректно проучила и цитирала литературне изворе који су јој послужили као основа за систематизацију постојећих сазнања из области која је предмет дисертације.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Циљ докторске дисертације кандидаткиње мр Сање Петровић Бећировић, дипл. инж. маш., је био проучавање утицаја промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке

карактеристике пећи на пелет. Анализиран је утицај већег броја параметара: врсте дрвних пелета, топлотне снаге горионика, топлотног оптерећења пећи и потпритиска у каналу димног гаса. За остваривање наведеног циља, кандидаткиња је обавила довољан број експеримената како би се добили поуздани резултати на основу којих се дошло до извођења закључака о корелационим односима. Поред тога, кандидаткиња је развила оригинални математички модел који је послужио за нумеричку симулацију процеса сагоревања пелета у испитиваној пећи на пелет, дефинисање температурног, струјног и концентрационих профила унутар ложишта пећи, као и сагледавање утицаја различитих параметара на енергетске и еколошке карактеристике рада испитиваног уређаја.

Научне методе које је кандидаткиња применила у дисертацији су:

- на основу прегледа литературе и анализе у њој приказаних резултата, утврђени су правци истраживања у докторској дисертацији, дефинисан је план и програм мерења и извршен избор параметара чији ће се утицај сагледавати;
- дефинисана је неопходна мерна опрема потребна за прикупљање података и праћење одабраних параметара;
- извршено је пројектовање и израда експерименталне инсталације на којој су спроведена експериментална истраживања;
- извршен је избор врсте горива чије ће се сагоревање анализирати;
- извршена је адекватна припрема репрезентативних узорака дрвних пелета која ће се користити у истраживањима;
- лабораторијске анализе извршене су за обе врсте коришћених дрвних пелета и обухватиле су како техничке, тако и елементарне анализе, као и одређивање додатних физичких карактеристика горива (димензије, густина, насипна густина) које су биле неопходне за тумачење резултата експерименталних испитивања; Карактеризација испитиваних врста горива спроведена је у складу са захтевима EN ISO 17225-2:2014;
- карактеризација и утврђивање концентрација гасовитих продуката сагоревања, који су били од интереса за ову дисертацију (O_2 , CO , CO_2 , NOx) извршена је помоћу гасног анализатора TESTO 350;
- извршене су хемијске анализе узорака ложишног пепела и циљу одређивања садржаја несагорелог, као додатне индикације квалитета процеса сагоревања;
- процедура експерименталног испитивања уређаја за сагоревање спроведена је у складу са захтевима релевантног стандарда EN 14785:2006;
- добијени резултати експерименталних истраживања су детаљно анализирани како би се одбацили непоуздани подаци, као и резултати који се односе на прелазне режиме; разматрани су само резултати у стационарном режиму рада уређаја за сагоревање;
- за обраду експерименталних резултата (израчунавања средњих вредности посматраних величина, одређивање максималних и минималних измерених вредности, одређивање разлика између компаративних величина, свођења концентрација на референтни удео кисеоника, израду дијаграма на којима су приказане међусобне зависности и корелације) коришћен је рачунарски алат Microsoft Excel 2010; при прорачуну експерименталних података, примењена је метода најмањих квадрата;
- извршена је анализа обрађених резултата експерименталних истраживања и изведени су закључци о утицају посматраних параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике рада пећи на пелет;
- постављен је одговарајући математички модел који одражава физичке и хемијске процесе који се одвијају током процеса сагоревања пелета у уређају мале снаге (загревање горивам сушење, деволатилизација, паљење, сагоревање), а у циљу омогућавања оптимизације процеса сагоревања, темељнијег разумевања самог процеса и детаљне анализе утицајних параметара на крајње продукте и карактеристике рада анализираног ложног уређаја;

- за нумеричко моделовање процеса сагоревања дрвних пелета у анализираној пећи на пелет коришћен је софтверски пакет Ansys Fluent 15.0, у оквиру кога је геометрија пећи моделована у софтверском под-програму Ansys Design Modeler 15.0;
- у циљу валидације развијеног модела, извршено је поређење резултата испитивања процеса сагоревања добијених експерименталним испитивањима са резултатима добијеним моделовањем и нумеричком симулацијом.

На основу приказаног, може се закључити да су у изради докторске дисертације коришћене адекватне аналитичке, лабораторијске и нумеричке методе за испитивање утицаја параметара сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике рада уређаја за сагоревање пелета.

3.4. Применљивост остварених резултата

Повољне карактеристике пелета као висококвалитетног горива гарантованог квалитета омогућиле су значајне погодности са аспекта технолошких решења предвиђених за њихово сагоревање, нарочито у поређењу са конвенционалним техничким решењима која се примењују за сагоревање чврстих горива. Једна од главних предности односи се на могућност аутоматизације процеса сагоревања и лакоћу коришћења уређаја за сагоревање од стране корисника, уз постизање задовољавајућих перформанси рада по питању енергетских и еколошких критеријума. Мередавни стандард у овој области прописује минимално захтеване енергетске и еколошке карактеристике рада уређаја мале снаге за сагоревање пелета, како при номиналном, тако и при редукованом режиму рада. Како уређаји мале снаге нису опремљени системима за смањење емисија штетних материја (што утиче на њихову економски повољнију цену), оптимизација процеса и адекватан избор горива представљају једини начин на који се може постићи побољшање перформанси њиховог рада.

Поред систематизације досадашњих резултата у погледу утицаја кључних параметара процеса сагоревања на рад ложних уређаја мале снаге намењених за сагоревање пелета, у оквиру докторске дисертације размотрен је и квантификован утицај који промена топлотне снаге горионика, уз промену врсте горива и нивоа топлотног оптерећења пећи за сагоревање пелета, може имати на енергетске и еколошке карактеристике рада ових уређаја. Измена горионика у непромењеној конструкцији пећи посебно је интересантна имајући у виду намеру произвођача ложних уређаја да једноставном изменом поменутог конструктивног елемента постигну промену декларисане снаге уређаја, уз задовољење свих енергетских и еколошких захтева. У оквиру дисертације приказане су зависности енергетских и еколошких карактеристика рада пећи на пелет од сваке промене утицајних параметара, као и испуњеност захтева стандарда у погледу енергетских и еколошких перформанси ложног уређаја за сваки од испитаних радних режима. У испитаним режимима варирано су параметри који утичу на процес сагоревања: врста горива, топлотна снага горионика, топлотно оптерећење пећи и вредност потпритиска у димном каналу. За сваку измену било ког утицајног параметра, размотрени су ефекти на остварену топлотну снагу пећи, степен корисности пећи и потпуност процеса сагоревања манифестован кроз емисију угљен монооксида. На описан начин, овом дисертацијом остварен је допринос проучавању утицаја промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке параметре рада уређаја за сагоревање пелета.

Један од циљева доктората било је и развијање посебног математичког модела сагоревања пелета у анализираној пећи. Нумеричке симулације процеса сагоревања применом савремених програмских пакета представљају веома користан алат који се често примењује у оптимизацији и побољшању карактеристика рада постројења и уређаја за сагоревање различитих врста горива. Прегледом расположиве литературе утврђено је да је до сада развијен релативно ограничен број модела за пећи мале снаге на дрвни пелет. Математички модел развијен у оквиру ове докторске дисертације омогућава да се применом савремених

софтверских алата спроведе симулација процеса сагоревања у пећи на пелет и размотре утицаји различитих параметара на перформансе њиховог рада. Такође, развијени модел омогућава да се сагледа температурна и струјна слика унутар ложишта пећи, на тај начин указујући на проблеме у одвијању процеса сагоревања и омогућавајући да се одреде начини за побољшање рада разматраног уређаја. Нумеричком симулацијом сагоревања пелета заснованом на развијеном математичком моделу омогућава се оптимизација и регулација рада, уз сагледавање потребних вредности параметара процеса сагоревања којима се обезбеђује испуњеност захтева по питању енергетских и еколошких перформанси уређаја за сагоревање и стварају предуслови за производњу пећи високог квалитета.

Закључци, изведени на основу остварених резултата у оквиру ове докторске дисертације, као и добијене зависности између, горе наведених, утицајних величина на процес сагоревања, свакако ће представљати основу за наставак истраживања у овој области. Резултати остварени у овом раду имаће практичан значај за оптимизацију и даља унапређења уређаја мале снаге за сагоревање пелета. Посебан значај односи се на развијени математички модел који ће омогућити анализу могућих побољшања конструкције пећи или система аутоматског управљања (кроз измену предефинисаних вредности протока ваздуха, дозирања горива) у циљу остваривања побољшаних перформанси рада и као минимум достизање декларисаних радних параметара. Додатно, развијени модел може да буде основ за развој комплекснијег модела који би обухватио и модел размене топлоте, узео у обзир формирање азотних оксида и прецизније одређене кинетичке параметре сваке од појединачних фаза процеса сагоревања. Имајући у виду изузетно велики потенцијал за примену разматраних уређаја у сектору широке потрошње у Републици Србији, првенствено услед значајног националног енергетског потенцијала биомасе, али и великог броја постојећих индивидуалних ложишта у којима се сагоревају фосилна горива (као и велики удео домаћинства која за загревање користе електричну енергију), а која би се могла заменити ложиштима на дрвни пелет, наведена испитивања су веома значајна, јер омогућавају унапређења рада пећи на пелет у циљу постизања бољих перформанси рада и задовољења енергетских и еколошких норматива. Добијени резултати могу наћи своју примену и у индустрији, јер омогућавају произвођачима ложних уређаја да оптимизују рад својих уређаја, односно да развијени модел користе за развој нових или реконструкцију постојећих пећи на пелет.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови комисије сматрају да је кандидаткиња показала 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 кандидаткиње 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 сагоревања дрвних пелета као савременог и атрактивног облика биомасе. Остварени научни допринос докторске дисертације „Утицај промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет“ огледа се у следећем:

- **Идентификација кључних параметара процеса сагоревања у пећима на пелет мале снаге (до 100 kW)**
 - прегледом приказа научних сазнања која се односе на област истраживања дисертације, како са аспекта експерименталних истраживања, тако и у погледу моделовања и нумеричких симулација анализираних процеса, идентификовани су кључни параметри који утичу на процес сагоревања у ложним уређајима мале снаге;
- **Утврђивање утицаја параметара процеса сагоревања на ефикасност рада пећи и емисију загађујућих материја**
 - у циљу анализе и квантификација могућих утицаја радних параметара на перформансе рада пећи на пелет, утврђено је да квалитет пелета има веома велики утицај на енергетске и еколошке карактеристике рада ложног уређаја; Најбоље радне перформансе постигнуте су за пелет препорученог квалитета, док је коришћење алтернативног, локално лакше доступног, пелета довело до смањења топлотне снаге пећи и снижавања ефикасности рада; Квалитет пелета се посебно изражено одражава на емисију угљен монооксида и то нарочито при редукованом топлотном оптерећењу пећи;
 - закључено је да се код уређаја мале снаге квалитет сировине и процес производње пелета у великој мери одражавају на енергетске и еколошке перформансе уређаја за сагоревање и да зато наведени уређаји захтевају коришћење горива највишег квалитета; Поред хемијских особина и топлотне моћи горива, утврђено је да велику улогу имају и физичке карактеристике пелета и то посебно насипна и комадна густина, које директно утичу на потрошњу горива, али и на дифузију кисеоника при сагоревању, вредност коефицијента вишка ваздуха у ложишту и даље на температуре димног гаса и ток одвијања процеса сагоревања у испитиваној пећи; Утврђено је да су се наведени параметри одразили и на садржај несагорелог у чврстим продуктима сагоревања који представља још један индикатор квалитета процеса сагоревања који је разматран у оквиру спроведених анализа; Већа комадна густина квалитетнијег горива довела је до већег садржаја несагорелог у пепелу у односу на пелет лошијег квалитета, иако је коришћење горива бољег квалитета генерално резултовало повољнијим перформансама рада пећи; Све наведено у складу је са подацима из литературе и до сада стеченим сазнањима;
- **Успостављање зависности између параметара процеса сагоревања**
 - испитана могућност да се изменом топлотне снаге горионика утиче на перформансе рада ложног уређаја, довела је до закључка да поменути параметар има већи утицај на еколошке него на енергетске карактеристике рада уређаја за сагоревање; Утврђено је да само измена горионика није довољна да се повећа/смањи декларисана снага пећи при непромењеним подешавањима система аутоматског управљања уређајем, већ је неопходно извршити и одговарајуће подешавање поменутог управљачког система за сваку конструктивну измену која утиче на процес сагоревања горива у ложишту; У оквиру наведених измена, предложена је измена подешавања поменутог система којом би се утицало на количину ваздуха која се доводи у ложиште, брзину вентилатора ваздуха, као и брзину кретања пужног дозатора којим се гориво доводи у горионик; С тим у вези, закључено је да је неопходно извршити оптимизацију рада уређаја и сагледати заједнички утицај промене конструктивних карактеристика и измењених параметара аутоматске регулације рада уређаја за сагоревање пелета;
 - са аспекта рада анализираних уређаја за сагоревање при различитим топлотним оптерећењима (номинално/редуковано топлотно оптерећење), закључено је да су степен корисности и емисије угљен монооксида значајно ниже при номиналним него при редукованим режимима за обе врсте коришћених пелета; На овај начин **утврђено** је да емисије угљен монооксида зависе од топлотног оптерећења пећи и то тако да су емисије загађујућих материја најниже при номиналном топлотном оптерећењу;

- испитана могућност да се варирањем потпритиска у каналу димног гаса утиче на процес сагоревања у ложишту и на перформансе рада ложног уређаја, довела је до закључка да потпритисак у каналу димног гаса, који је вариран у ширем опсегу, може у одређеној мери утицати на процес сагоревања горива у пећи на пелет како би се побољшале њене енергетске и еколошке карактеристике рада; Закључено је да нижа/виша вредност потпритиска у појединим режимима омогућава испуњавање захтева стандарда са аспекта минимално прописаних енергетских и еколошких перформанси, који при стандардној вредности потпритиска од 12 Pa нису били испуњени; Такође је закључено да утицај потпритиска у каналу димног гаса има већи значај на емисије угљен монооксида него на степен корисности анализираних уређаја за сагоревање; Утврђено је и да је утицај потпритиска директно повезан и са квалитетом коришћеног горива, тако да очекивани ефекти промене потпритиска у случају једне врсте горива не морају и најчешће немају идентичне ефекте у случају сагоревања алтернативног горива;
- **Развој математичког модела за симулацију процеса сагоревања у пећима на пелет мале снаге (до 100 kW)**
 - развојем математичког модела и нумеричком симулацијом процеса сагоревања пелета у анализираном ложном уређају утврђено је да се паљење горива и простирање пламена не одвија дуж централне осе симетрије ложишта, већ је померено ка његовој десној бочној површини; Услед наведеног, у ложишту долази до формирања неуниформног температурног поља тј. до образовања зона интензивнијег и мање интензивног сагоревања горива и догоревања угљен монооксида у угљен диоксид; Неуниформно простирање пламена и одвијање процеса сагоревања унутар ложишта доводи до неравномерног загревања ваздуха у измењивачу топлоте који се налази изнад ложишта; Такође је утврђено да је при редукованим режимима рада, зона простирања пламена нижа у односу на режиме са номиналним оптерећењима, уз мању зону појаве високих температура по уздужном пресеку ложишта у односу на режиме са номиналним топлотним оптерећењима;
 - Асиметрично простирање пламена и неравномерно загревање топлог ваздуха не погодује оптималном раду пећи и комфору корисника, тако да су у оквиру спроведене анализе предложена конструктивна унапређења пећи која би довела да униформније расподеле температура унутар ложишта;
- **Дефинисање радних параметара процеса сагоревања за различите радне режиме уз задовољење енергетских и еколошких карактеристика**
 - Поређењем резултата моделовања и нумеричке симулације са резултатима експерименталних испитивања, које је спроведено кроз поређење одрабраних параметара процеса сагоревања и показатеља енергетских и еколошких карактеристика рада ложног уређаја, закључено је да је модел адекватно успео да предвиди промену разматраних индикатора рада ложног уређаја као резултат промене варијабилних параметара процеса сагоревања;
 - Закључено је да се развијени модел може користити за побољшање рада разматраних ложних уређаја и дефинисање унапређења која ће омогућити испуњавање захтева у погледу прописаних енергетских и еколошких карактеристика уређаја за сагоревање пелета.

Остварени научни допринос докторске дисертације се заснива на оригиналном приступу експерименталним истраживањима, обради и анализи добијених резултата, дефинисању математичког модела који је коришћен у нумеричким симулацијама анализираних феномена и предложен за коришћење у циљу даљих унапређења ложних уређаја, 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 сагоревања пелета у уређајима мале снаге, намењеним за загревање домаћинства. Услед сложених интеракција које се јављају током процеса сагоревања биомасе, односно механизма формирања различитих продуката сагоревања и могућности утицања на рад ложног уређаја путем промене параметара процеса сагоревања, оваква свеобухватна и детаљна истраживање су се показала као изузетно корисна.

Истраживања спроведена у оквиру докторске дисертације обухватила су интеграцију експерименталних истраживања и аналитичких и нумеричких метода у циљу анализе зависности између посматраних параметара процеса сагоревања, као и њиховог појединачног и комбинованог утицаја на енергетске и еколошке карактеристике уређаја за сагоревање. Одређен је и квантификован појединачни и заједнички утицај промене врсте горива, топлотног оптерећења пећи, топлотне снаге горионика и потпритиска у каналу димног гаса на перформансе рада ложног уређаја. Утврђена су могућа унапређења уређаја за сагоревање пелета у циљу постизања бољих перформанси рада и испуњавања захтева у погледу енергетских и еколошких карактеристика ложног уређаја.

Поређењем резултата добијених експериментима и нумеричким симулацијама уочена су извесна одступања. Могући разлози за одступања могу бити усвојене претпоставке (у циљу поједностављења феномена сагоревања биомасе) у математичком моделу сагоревања пелета. Даљи рад у овој области може бити усмерен ка унапређењу модела и примени за даље сагладавање комбинованих ефеката идентификованих утицаја (нпр. ефеката који би се постигли интервенисањем у систему аутоматског управљања ложним уређајем у комбинацији са већ испитаним параметрима процеса сагоревања).

Поред несумљивог научног доприноса, практичан значај остварених резултата треба посматрати из три правца: 1) унапређење уређаја за сагоревање биомасе (оптимизација процеса сагоревања, постизање веће ефикасности рада); 2) заштита животне средине (редукција емисија штетних продуката сагоревања из уређаја за сагоревање пелета); 3) борба против климатских промена (допринос могућности супституције фосилних горива биомасом у сектору производње топлотне енергије).

4.3. Верификација научних доприноса

Доприноси докторске дисертације су верификовани кроз следећи рад које је кандидаткиња објавила у међународним часописима који су на SCI листи.

Категорија M21

1. Petrović Bećirović S., Vasić M., *Methodology and Results of Serbian Energy Efficiency Project*, Energy and Buildings, 62, pp. 258–267 (2013) (IF 2014=2.884) (ISSN 0378-7788).

Категорија M22

1. Petrović Bećirović S., Stojiljković D., Manić N., *Impact of Fuel Quality and Burner Capacity on the Performance of Wood Pellet Stove*, Thermal Science Journal, 19 (5), pp. 1855-1866, (2015) (IF 2014=1.222) (ISSN 0354-9836).
2. V. Pantović, S. Petrović Bećirović, *Rising Public Awareness of Energy Efficiency of Buildings Enhanced by “Smart” Controls of the Indoor Environment*, Thermal Science Journal, DOI [10.2298/TSCI140813145P](https://doi.org/10.2298/TSCI140813145P)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом „Утицај промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет“, кандидаткиње мр Сање Петровић Бећировић, дипл. инж. маш, представља савремен и оригиналан научни допринос кроз свеобухватно сагледавање и иновативни приступ решавању проблема. Кандидаткиња 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 кандидаткиња мр Сања Петровић Бећировић, дипл. инж. маш, успешно завршила докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима докторске дисертације.

Треба истаћи да је кандидаткиња дошла до оригиналних и проверљивих резултата и показала висок ниво способности и самосталности у доношењу и спровођењу одлука у току израде докторске дисертације. На тај начин је демонстрирала способност за самостални научни рад. Остварени научни и практични резултати су верификовани публикавањем радова у врхунским међународним часописима (M21) и у међународним часописима (M22).

На основу прегледа докторске дисертације под називом „Утицај промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет“ кандидаткиње мр Сање Петровић Бећировић, 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 промене параметара процеса сагоревања на енергетске и еколошке карактеристике пећи на пелет“, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 13.06.2016. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

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

др Небојша Манић, доцент
Универзитет у Београду, Машински факултет

проф. др Петар Гверо, редовни професор,
Универзитет у Бања Луци, Машински факултет

др Раде Карамарковић, доцент,
Универзитет у Крагујевцу, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву