

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГЈЕВЦУ

Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву

Факултет за машинство и грађевинарство
у Краљеву
Универзитета у Крагујевцу.
Број: 410
Датум: 17.06.2022 год.
Краљево, Доситејева 19

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертација кандидата Ненада Стојића, мастер инжењера машинства

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-350/10 од 18.05.2022. године, на предлог Наставно-научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву (Одлука бр. 276/1 од 27.04.2022. године), именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације

„РЕКУПЕРАТОРИ ЗА КОРИШЋЕЊЕ ОТПАДНЕ ТОПЛОТЕ СА РОТАЦИОНИХ ЦИЛИНДРИЧНИХ ПОВРШИНА“

кандидата Ненада Стојића, мастер инжењера машинства.

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештај комисије за оцену подобности кандидата и теме докторске дисертације, одобрене за израду Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-892/7 од 14.11.2018. године и Одлуком наставно-научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву број 1249/7 од 23.10.2018. године и Одлуке о продужењу рока за њену израду број 849/9 од 13.10.2021. године, а на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу следећи:

ИЗВЕШТАЈ

ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

У најопштијем, дисертација се бави коришћењем топлотних губитака ротационих цилиндричних површина са фокусом на коришћењу отпадне топлоте са плашта ротационих пећи. Написана је јасно и читко на 167 страна, има 72 слике, 38 табела и подељена је у десет поглавља:

- (1) Увод
- (2) Енергетска ефикасности у индустрији
- (3) Потенцијали за побољшање енергетске ефикасности ротационих пећи
- (4) Обогаћивање ваздуха за сагоревање кисеоником
- (5) Одређивање топлотног биланса ротационе пећи
- (6) Унапређење конструкције основног конвективно зрачног рекуператора
- (7) Моделирање конвективно зрачних рекуператора
- (8) Резултати и анализа
- (9) Одређивање оптималног облика рекуператора при коришћењу обогаћеног ваздуха за сагоревање
- (10) Закључци и правци даљег истраживања

Стилски и садржајно уводни део је написан као проширени апстракт дисертације. У њему аутор образлаже потребу за истраживањем, информише о проблемима који се решавају и дефинише научни темељ ком дисертација представља надградњу.

У **другом поглављу** коришћењем енергетских биланса и индикатора дат је пресек стања у области енергетске ефикасности у индустрији, набројане су могућности за њено побољшање и приказана упоредна анализа потрошње енергије зависно од врсте енергената у Републици Србији и свету.

Основно о индустријама цемента и магнезијума, као и основе о ротационим пећима и потенцијалима за побољшање њихове енергетске ефикасности су теме обрађене у **трећем поглављу** дисертације.

Четврто поглавље садржи теоријске основе о техничком кисеонику, начинима његове производње, позитивним странама примене у технолошким пећима и конструктивне детаље о начинима увођења кисеоника за сагоревање у ротационе пећи.

У **петом поглављу** приказане су основне техничке карактеристике и резултати експерименталног одређивања топлотног биланса ротационе пећи која се користи у производњи магнезијума. Сва решења и сви модели у дисертацији анализирани су на овој пећи. Набројана је сва коришћена мерна опрема а као „излаз“ из поглавља дати су аналитичка валидације губитака топлоте са плашта пећи и потенцијални начини за његово искоришћење.

Шесто поглавље приказује нова техничка решења за унапређење основне конструкције рекуператора, која је развијена пре нешто више од једне деценије и која је конструктивно врло једноставна, оригинална и веома ефикасна али је показала један

недостатак. Наиме, да би се са пећи користила топлота једнака тачно топлотном губитку неизоловане пећи долази до приближавања рекуператора и пећи у делу у ком предгрејан ваздух напушта рекуператор. Овај недостатак онемогућава примену основне конструкције код пећи са већим ротационим ексцентрицитетима. Због тога се у овом поглављу анализирају конструкције са којима се покушава решити наведени проблем: рекуператор топлоте са два пролаза, рекуператора топлоте са једним пролазом и додатном оребреном површином (конвективно зрачним ребрима) и рекуператор топлоте са увођењем додатне количине ваздуха у критичном сегменту. Основна конструкција, њена ефективност и перформансе су репер за анализу свих других решења.

У **седмом поглављу** су представљени ћелијски математички модели анализираних конструкционих решења и „CFD“ модел. Овај последњи је коришћен за симулацију и индиректну валидацију конструкционог решења рекуператора топлоте са једним пролазом и додатном оребреном површином, као и за симулацију основне конструкције рекуператора са једним пролазом. Поглавље се завршава објашњавањем поступка валидације развијених математичких модела на експерименталном постројењу.

Упознавши нас са предложеним техничким решењима и моделима за њихову анализу, аутор у **осмом поглављу** излаже резултате анализе. Утицај предложених мера, упоредан приказ решења и понашање рекуператора при промени технолошких параметара пећи се дају у анализи, која је изложена у логичном следу, сажето и јасно тако да омогућавају проверу закључака.

У **деветом поглављу** одређена је геометрија рекуператора топлоте у случају сагоревања горива ваздухом обогаћеним кисеоником. Тежило се решењу које ће омогућити да димензије рекуператора добијене за случај сагоревања горива са околним ваздухом остану исте и у случају када се користи обогаћени ваздух, а да се променом масеног протока искористи укупна доступна отпадна топлота.

На крају дисертације су набројани најважнији закључци и из перспективе аутора сагледани правци будућих истраживања.

Дисертацију завршавају литература са 105 библиографских јединица и прилог, у коме су дати програмски кодови математичких модела написаних у објектно оријентисаном програмском језику физичких модела „Modelica“.

ЗНАЧАЈ И ДОПРИНОС ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ СА СТАНОВИШТА АКТУЕЛНОГ СТАЊА У ОДРЕЂЕНОЈ НАУЧНОЈ ОБЛАСТИ

Гледано из инжењерског и технолошког угла, тема дисертације покрива акутни проблем енергетске ефикасности енергетски најинтензивнијих грана индустрије: производње цемента и обојених метала. У научној области дисертације неизбежна отпадна топлота ротационих пећи се користи за загревање ваздуха, воде, производњу

електричне енергије или њихову комбинацију у виду когенерационих система. Техничка решења која се предлажу у дисертацији су оригинална јер користе укупан топлотни губитак: зрачни и конвективни. Убедљиво највећи број решења користе само губитак зрачењем: за загревање воде у системима даљинског грејања, за загревање ваздуха или производњу електричне енергије р-п спојевима. Иако не изгледају најатрактивнија, због усвојеног принципа да користе „тачно онолико топлоте колико се у околину губи са ротационе пећи“ и због одсуства потребе за заптивањем, приказана решења су ефикасна и једноставна. Једноставан принцип предложених рекуператора и решавани проблеми, пре свих удаљавања површина уз задржавање топлотног протока, захтевали су адекватне математичке моделе. Кандидат је развио ћелијске математичке моделе, док је за добијање оптималне геометрије користио „садејство“ различитих модела. Поменути ћелијски математички модели су коришћени за одређивање геометрије рекуператора, док су CFD модели служили за обликовање конструктивних детаља. Коришћени приступ је у складу са савременим тенденцијама у области преноса топлоте. Развијени модели се могу прилагодити за анализу и оптимизацију свих савремених решења у предметној области.

Својим решењима кандидат отвара потенцијално нове правце истраживања, а резултате је употпунио конкретним смерницама којих треба да се држе инжењери при пројектовању предложених и сличних решења.

ОЦЕНУ ДА ЈЕ УРАЂЕНА ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА РЕЗУЛТАТ ОРИГИНАЛНОГ НАУЧНОГ РАДА КАНДИДАТА У ОДГОВАРАЈУЋОЈ НАУЧНОЈ ОБЛАСТИ

Имајући у виду да је:

1. са аспекта оригиналности, дисертација позитивно оцењена у Оцени ментора и извештају о провери оригиналности докторске дисертације од 08.04.2022. године,
2. кандидат из садржаја и теме дисертације до сада објавио 2 рада у часописима категорије М23 и 3 рада на међународним конференцијама категорије М33, као и да
3. сваки од потписника Извештаја сматра за плод оригиналног научног рада,

може се закључити да је дисертација „Рекуператори за коришћење отпадне топлоте са ротационих цилиндричних површина“ резултат оригиналног научног рада кандидата Ненада Стојића мастер инжењера машинства.

ПРЕГЛЕД ОСТВАРЕНИХ РЕЗУЛТАТА РАДА КАНДИДАТА У ОДРЕЂЕНОЈ НАУЧНОЈ ОБЛАСТИ

Из садржаја и области истраживања дисертације, кандидат је објавио:

▸ 2 рада категорије М23:

1. **Ненад П. Стојић**, Раде М. Карамарковић, Миодраг В. Карамарковић, Милош В. Николић, *Improving design and operating parameters of the recuperator for waste heat recovery from rotary kilns*, Thermal Science 2021, <https://doi.org/10.2298/TSCI210410239S>
2. Сузана Д. Кнежевић, Раде М. Карамарковић, Владан М. Карамарковић, **Ненад П. Стојић**, *Radiant recuperator: Modeling and Design*, Thermal Science 2016, doi:10.2298/TSCI160707232K

▸ 3 рада категорије М33:

1. Марашевић М, Карамарковић В, Карамарковић Р, **Стојић Н**, *Energetic and exergetic evaluation of 4 systems for a rotary kiln improvement*, The 8th International Triennial Conference Heavy Machinery-НМ'11, Јун 2014, Златибор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, G69-G75, ISBN 978-86-82631-74-3
2. Раде Карамарковић, Владан Карамарковић, Милош Николић, **Ненад Стојић**, Миљан Марашевић, *Optimization of flow schemes in radiant recuperators*, IX Triennial International Conference "Heavy Machinery-НМ 2017", Златибор, June 28 – July 2017, F.15 – F.21
3. Миљан Марашевић, Владан Карамарковић, **Ненад Стојић**, Милош Николић, Ђорђе Новчић, *Designing recuperator on a rotary kiln supplied with enriched air during the calcination of dolomite*, IX Triennial International Conference "Heavy Machinery-НМ 2017", Златибор, June 28 – July 2017, F.29 – F.36

ОЦЕНА О ИСПУЊЕНОСТИ ОБИМА И КВАЛИТЕТА У ОДНОСУ НА ПРИЈАВЉЕНУ ТЕМУ

По обиму дисертација одговара оквирном садржају датом у Извештају комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације и испуњености услова кандидата Ненада Стојића, маг. инж. маш. усвојеним Одлуком ННВ Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву број 1249/7 од 23.10.2018. године и потврђеним Одлуком већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу бр. IV-04-892/7 од 14.11.2018. год. Упоређивањем стварног и оквирног садржаја дисертације примећује се готово апсолутна подударност. Проблеми дефинисани у Пријави докторске дисертације решени су и детаљно обрађени у дисертацији.

НАУЧНИ РЕЗУЛТАТИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Полазећи од основне, једноставне и економичне конструкције рекуператора, на примеру ротационе пећи за калцинацију доломита кандидат је решавао проблеме:

- (1) повећања растојање између ротационе пећи и рекуператора уз задржавање или повећање његове ефективности. Иако економски и технички атрактивна, основна конструкција рекуператора је често непримењива због великих ротационих ексцентрицитета и/или присуства носећих прстена ротационе пећи.
- (2) адекватног функционисања рекуператора при нестационарном топлотном губитку пећи, најчешће узрокованом променама: квалитета унутрашње изолационе опеке, технолошких параметара процеса и медијума (обогаћен ваздух, кисеоник) за сагоревање.
- (3) ефикасног коришћења предгрејаног ваздуха.

Решавање (1) од набројаних проблема резултирало је техничким решењима:

- ▶ конвективно зрачних ребара,
- ▶ рекуператора са два пролаза,
- ▶ увођењем додатног ваздуха и
- ▶ комбинације набројаних варијанти унутар једне конструкције.

За дефинисање геометрије наведених решења и решавање (2) наведеног проблема, развијени су и експериментално верификовани математички модели, који представљају научни допринос дисертације:

- ▶ хелијски математички модел струјања ваздуха у прстенастом попречном пресеку са конвективно зрачним ребрима и
- ▶ комбинована примена хелијског модела за одређивање димензија и нумеричких модела струјања (CFD) за дефинисање конструктивних детаља рекуператора.

Решавајући (3) проблем на примеру испитиване пећи, кандидат је добио да примена рекуператора и адекватно коришћење предгрејаног ваздуха за сагоревање и/или сушење доломита смањује дневну потрошњу мазута за 2350 l/дан.

Наведено јасно указује да највећи научни допринос дисертације лежи у области математичког моделирања процеса размене топлоте у прстенастом међупролазу са конвективно зрачним ребрима и у конструкцијама које омогућавају повећавање растојања између ротационе пећи и рекуператора уз задржавање његове ефективности.

ПРИМЕЊИВОСТ РЕЗУЛТАТА У ТЕОРИЈИ И ПРАКСИ

Четири техничка решења представљена у дисертацији примењива су на свим ротационим пећима и сушарама. Нарочито су погодна за старије пећи које се одликују

већим ротационим ексцентрицитетима и вишим температурама плашта. Примењива су нарочито у енергетски интензивним индустријама, попут производње цемента и магнезијума, али се могу применити и на свим другим ротационим цилиндричним површинама које карактеришу температура плашта до 400 °C. Изведене анализе су показале да је свако од анализираних решења применљиво и при нестационарним топлотним губицима и доприноси повећању енергетске ефикасности ротационе пећи, повећању растојања између плашта пећи и рекуператора уз задржавање или повећање његове ефикасности. Примену развијених конструкција додатно фаворизују данашње високе цене енергената и енергије.

Поменути решења су непримењива без врло прецизне геометрије, за чије одређивање су развијени хелијски математички модели. Хелијски, зато што се састоје из међусобно зависних хелија. У случају рекуператора, хелије представљају сегменте исте геометрије. Развијене „хелије“ су примењиве свуда где постоје прстенасти попречни пресеци, који се одликују сложеним механизмима размене топлоте: конвекција, зрачење, увођење новог ваздуха и коришћење конвективно зрачних ребара. Научно и инжењерски значајна је за примену и методологија која се користи за одређивање геометрије рекуператора. Наиме, све димензије се дефинишу помоћу хелијских математичких модела а критични делови се „фино подешавају“ коришћењем CFD модела.

НАЧИН ПРЕЗЕНТОВАЊА РЕЗУЛТАТА НАУЧНОЈ ЈАВНОСТИ

Радовима у часописима (2 рада) и на међународним конференцијама (3 рада), дисертација је адекватно представљена научно стручној јавности. Сагледавајући њен допринос у сфери техничких решења постоји потенцијал за још већи број научних радова и презентовање резултата стручним и специјализованим удружењима и компанијама. Наиме, проблеме: (1) повећања растојања између рекуператора и плашта пећи уз задржавање или повећање његове ефикасности, (2) адекватног функционисања рекуператора при нестационарном топлотном губитку и (3) ефикасног коришћења предгрејаног ваздуха, кандидат је решавао анализом 4 оригинална техничка решења.

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Докторска дисертација кандидата Ненада Стојића, мастер инжењера машинства, по обиму, садржају и квалитету у потпуности одговара одобреној теми дисертације. Одобрене Одлуком бр. 1249/7 од 23.10.2018. године од стране Наставно-научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву и потврђену Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу бр. IV-04-892/7 од 14.11.2018. године.

Кандидат је у складу са универзитетским нормама, јасно, детаљно и коришћењем уобичајене стручне терминологије приказао резултате научноистраживачког рада. По

садржају, обиму и приказаним резултатима, докторска дисертација у потпуности задовољава законске и универзитетске прописе.

Осим да је користио обимну литературу и да влада методологијом научноистраживачког рада, кандидат је показао темељитост, систематичност, мултидисциплинарност и креативност.


С обзиром на обрађену проблематику и остварене резултате, чланови Комисије сматрају да кандидат Ненад Стојић, мастер инжењер машинства, и поднета докторска дисертација испуњавају све услове, који се у поступку оцене писменог дела докторске дисертације захтевају Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву.

На основу наведеног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу и Већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да докторску дисертацију


**„РЕКУПЕРАТОРИ ЗА КОРИШЋЕЊЕ ОТПАДНЕ ТОПЛОТЕ СА РОТАЦИОНИХ
ЦИЛИНДРИЧНИХ ПОВРШИНА“**

прихвате као успешно урађену и да њеног аутора, кандидата Ненада Стојића, мастер инжењера машинства позову на јавну усмену одбрану.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:



1. др Душан Тодоровић, ванредни професор – председник комисије
Машински факултет Универзитета у Београду
Ужа научна област: Процесна техника



2. др Небојша Богојевић, ванредни професор - члан
Факултет за машинство и грађевинарство Универзитета у Крагујевцу
Ужа научна област: Конструкционо машинство



3. др Миљан Марашевић, доцент – члан
Факултет за машинство и грађевинарство Универзитета у Крагујевцу
Ужа научна област: Процесна техника

У Београду и Краљеву,
16.06.2022. године.