

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ КРАЉЕВО  
април 2011. год.  
КРАЉЕВО

Универзитет у Крагујевцу Машински факултет Краљево			
ПРИМЉЕНО 26.04.2011.			
Орг. јед.	Б р о ј	Прилог	Вредност
	382/1		

## НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: **Извештај Комисије о прегледу и оцени докторске дисертације кандидата мр Рада Карамарковића, дипл. инж. маш.**

Одлуком Наставно научног већа Машинског факултета у Краљеву, бр. 137/4 од 16. 02. 2011. год. именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцenu докторске дисертације кандидата **мр Рада Карамарковића, дипл. инж. маш.**, под називом **«Ексергијска анализа аутотермалних система за гасификацију биомасе»**.

На основу прегледа докторске дисертације Наставно-научном већу подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у области гасификације биомасе

У жељи да постигне економски развој, обезбеди снабдевање храном и енергијом уз истовремено чување животне средине човечанство се још крајем XX века у енергетици окренуло коришћењу обновљивих извора и развоју енергетски ефикаснијих технологија за трансформацију обновљивих и фосилних горива. Данас у научно истраживачком раду у енергетици, изузетно су актуелне теме коришћења биомасе, повећања енергетске ефикасности и заштите животне средине. Примера ради, тренутна Европска одржива енергетска политика има циљ да се 20% примарне енергије у оквиру Европске уније до 2020. године добије из обновљивих извора енергије. Узимајући своје географске, економске и социјалне специфичности неке земље су дефинисале да учешће биомасе и отпада буде и преко 40% у примарној енергији произведеној из обновљивих извора енергије. Међународна агенција за енергетику предвиђа у својим извештајима бимаси будућност у производњи електричне енергије у интегрисаном систему гасификације и гасно-парног циклуса, или у комбинацији са другим горивима (ко-сагоревање).

Имајући са једне стране претходно изнето у виду, а са друге да је циљ дисертације да се истражи како се енергија, или тачније ексергија (техничка радна моћ) биогорива може сачувати у што је могуће већој мери у гасу добијеном његовом гасификацијом јасно се закључује о актуелности разматране теме. Резултати у којима се дају смернице за оптимално коришћење физичке енергије и ексергије горивог гаса доприносе унапређењу енергетска ефикасност процеса гасификације. Резултат рада су и оригинални двостепени равнотежни и квазиравнотежни модели који адекватно и поуздано описују аутотермну и алотермну гасификацију са свим могућим медијумима у целом температурском опсегу њеног дешавања.

## **2. Оцена оригиналности научног рада кандидата**

Током поступка моделирања кандидат је предложио оригиналне моделе који су верификовани на теоријским и експерименталним резултатима других истраживача из релевантне литературе. Модели су написани у „Моделици“, објектно орјентисаном језику за моделирање физичких система, и заједно са резултатима моделирања објављени у научном раду категорије M21.

У дискусији кандидат је добијене резултате, где год је било могуће поредио са резултатима из релевантне литературе и у одређеним сегментима проширио постојећа теоријска знања из области гасификације што је верификовано објављивањем у већ поменутом M21 раду. Такође је у уводном делу рада представио савремена дешавања и трендове једним обимним прегледом тренутних дешавања у технологији гасификације и коришћења добијеног горивог гаса за комбиновану производњу топлотне и електричне енергије и биогорива.

На основу напред реченог Комисија констатује да дисертација представља оригиналан научни рад кандидата.

## **3. Преглед остварених резултата рада кандидата у оквиру докторске дисертације**

Докторска дисертација кандидата **мр Рада Карамарковића, дипл. инж. маш.,** под називом **«Ексергијска анализа аутотермалних система за гасификацију биомасе»** написана је на 166 страна.

Цитирана литература, укључујући и три пређашња рада аутора, наведена је у 105 библиографских јединица.

Резултати објављених истраживања, везаних за циљ рада који је био да се открије како се енергија, или тачније ексергија (техничка радна моћ) биогорива може сачувати у што је могуће већој мери у гасу добијеном његовом гасификацијом, приказани су у шест поглавља:

Уводне напомене: циљ и делокруг рада

1. Биомаса као гориво
  2. Гасификација
  3. Двостепени модели гасификације
  4. Ексергијска анализа
  5. Енергијска и ексергијска анализа гасификације биомасе на различитим температурама
  6. Предгревање ваздуха за гасификацију: енергијска и ексергијска анализа
- Закључак  
Номенклатура  
Списак слика  
Списак табела  
Литература  
Додатак

У уводу рада, кроз постављена питања дефинисан је циљ рада. У првом поглављу кандидат је дао одговоре на следећа питања:

- ✓ Шта је биомаса и одакле толика потреба у садашњости за њеним и коришћењем других обновљивих извора енергије?
- ✓ Каква су предвиђања око будућег коришћења биомасе као енергента?
- ✓ Које су облици биомасе најчешће користе у енергетске сврхе, и имају ли они потенцијала за коришћење у Републици Србији?
- ✓ Које се технологије трансформације користе за производњу горива, топлотне и електричне енергије из биомасе на данашњем степену развоја науке?
- ✓ Има ли биомасе и каква јој је улога као гориву у технологијама којима се предвиђа да ће да задовоље човекове енергетске потребе у будућности?

Закључак овог поглавља је да биомаса и гасификација биомасе имају улогу у технологијама за које се предвиђа да ће задовољити човекове енергетске потребе до 2050. године.

У другом поглављу кандидат је дао: теоријске основе и основну хемију процеса гасификације, приказао је њену историју развоја, начине коришћења горивог гаса и сагледао је позитивне и негативне стране биомасе као горива за гасификацију и дао детаљан преглед савремених реактора из релевантне литературе. На основу датог закључио је да савремени трендови теже изради што ефикаснијих вишестепених реактора који имају за циљ да на што ефикаснији начин произведу што је могуће чистији гас, састава прилагођеног крајњој употреби. Такође је закључио да блиска будућност гасификације лежи у хемијски активним материјалима испуне реактора, комбинацији коришћења гасификације биомасе и соларне енергије, унапређењу у пречишћавању произведеног гаса и већем коришћењу гасификације у комбинованим процесима са когенерацијом.

У трећем поглављу рада кандидат је представио оригинални двостепени равнотежни и квазиравнотежни модел. Оба модела су новитет у моделирању и верификовани су на релевантним експерименталним и теоријским резултатима

других истраживача. Модели се заснивају на коришћењу једначина масеног и енергијског биланса и константи равнотеже независних хемијских реакција. Двостепени равнотежни модел развијен у овом поглављу је био основ за анализе које је у наставку рада кандидат дао. Модели представљени у раду нису познати у досадашњој релевантној литератури и њихово коришћење има низ предности јер омогућава: моделирање у комплетном опсегу температура гасификације свих горива, одређивање граничне температуре угљеника, коришћење различитих медијума ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ , ваздуха, обогаћеног ваздуха,  $H_2$ ) и њихових комбинација на различитим температурама предгревања, узимање у обзир топлотних губитака у реактору, појаву негасификованог угљеника и моделирање алотермних реактора. Тешкоће у мерењу температуре гасификације и појава „хемијске температуре влажног термометра“ биле су идеје кандидату да развије оригинални двостепени квазиравнотежни модел. Овај модел узима у обзир чињеницу да је температура чврсте фазе нижа од температуре за коју се обично сматра да је температура гасификације.

Анализе које је у последња два поглавља рада вршио кандидат је темељио на ексергијској анализи коју је представио и објаснио у четвртом поглављу рада, на чијем је крају дао и тенденције у даљем развоју ексергијске анализе.

У петом поглављу рада кандидат је показао:

- ✓ да у поређењу са ексергијским степеном корисности система у коме се гасификована биомаса суши физичком топлотом горивог гаса, степени корисности базирани на хемијској енергији и ексергији много брже расту са порастом температуре гасификације,
- ✓ да је за већи ексергијски степен корисности пређашње описаног система потребно сушити биомасу са гасом који је претходно ексергијски ефикасније утрошио део своје физичке ексергије,
- ✓ да оптимална влажност биомасе при аутотермној гасификацији само условно постоји и да је за добијање већих степена корисности процеса потребно гасификовати што је могуће сувљу биомасу,
- ✓ да оптимална температура гасификације није нека константа већ да зависи од састава и стања горива и медијума и топлоте која се током процеса доводи или одводи из реактора. Да пораст притиска и довођење топлоте у реактор повисују температуру на граничној тачки угљеника, као и то да довођење топлоте у реактор смањује потребну количину ваздуха (кисеоника) неопходну за потпуну гасификацију и производи гас са већим садржајем  $CO$  и  $H_2$ .

У шестом поглављу рада кандидат се бавио енергијском и ексергијском анализом предгревања ваздуха за гасификацију. При томе је показа да при предгревању ваздуха за гасификацију на граничној температури угљеника долази до:

- ✓ пораста температуре на граничној тачки угљеника,
- ✓ смањења потребне количине ваздуха за потпуну гасификацију,

- ✓ повећања садржаја пожељних CO и H<sub>2</sub> и смањења садржаја нежељених CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub> у горивом гасу што резултује већим хемијским енергијама и ексергијама горивог гаса, и
- ✓ већег позитивног ефекта код процеса који се одвија на притиску од 10 bar у поређењу са процесом на притиску од 1 bar зато што је температура на граничној тачки угљеника процеса на вишем притиску виша па ствара већи губитак ентропије услед потребе да се реактанти (биомаса и ваздух) загреју са температуре околине на вишу температуру гасификације.

У истом поглављу кандидат је показао да гасификација и на вишим температурама са предгрејаним ваздухом може да оствари веће степене корисности од гасификације на оптималној температури са непредгрејаним ваздухом.

Кандидат је проширио закључак Матиу и Дубисон<sup>1</sup> да постоји оптимална температура предгревања ваздуха за гасификацију закључком да оптимална температура предгревања ваздуха не постоји сама за себе, већ је то она температура тачно одређене количине ваздуха на датом притиску која чини да се гасификација одиграва на граничној тачки угљеника.

У овом поглављу такође је закључио да ако се користи физичка топлота горивог гаса ваздух треба предгревати у двостепеном процесу. У првом степену ваздух треба предгревати отпадном топлотом ниже температуре која настаје у неком другом делу система, а у другом степену физичком топлотом произведеног горивог гаса. Тиме би се смањиле неповратности у размењивачу топлоте у коме се ваздух предгрева топлотом горивог гаса.

#### **4. Оцена испуњености обима и квалитета докторске дисертације у односу на пријављену тему**

У раду су у потпуности остварени очекивани резултати дати у Извештају комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације број 554/1 од 30.06.2009. године и испоштован оквирни садржај рада дат у поменутом извештају. Ови резултати помињани су у претходном поглављу и делом се дају у наредном.

#### **5. Научни резултати докторске дисертације**

Оригинални двостепени равнотежни и квазиравнотежни модели, показали су слагање са експерименталним и теоријским резултатима других истраживача представљеним у релевантној литератури и имају низ предности у односу на постојеће моделе јер омогућавају: моделирање у комплетном опсегу температура гасификације свих горива, одређивање граничне температуре угљеника, коришћење свих познатих медијума (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, ваздуха, обогаћеног ваздуха, H<sub>2</sub>) и њихових комбинација на различитим температурама предгревања, узимање у обзир

---

<sup>1</sup> Mathieu P, Dubuisson R Performance analysis of a biomass gasifier . Energy Conversion and Management. Pergamon, 2002. 43. 1291-1299.

топлотних губитака у реактору, појаву негасификованог угљеника и моделирање алотермних реактора. Квазиравнотежни модел развијен у раду омогућава узимање у обзир непостојање хемијске равнотеже код реалних реактора и појаву „хемијске температуре влажног термометра“ тј. чињеницу да је температура чврсте фазе нижа од температуре за коју се обично сматра да је температура гасификације.

Основни закључци енергијско ексергијске анализе дате у два завршна поглаваља рада су:

- ✓ При гасификацију ваздухом биомасе на датом притиску и температури, оптимални садржај влаге у њој постоји једино у случају када се гасификација одиграва на граничној тачки угљеника за ту влажност. Само у том случају условно се може говорити о постојању оптималног садржаја влаге у биомасе. На реалним температурама гасификације, које су за биомасу више од температуре на граничној тачки угљеника са повећањем влаге у биомаси опадају сви енергијски и ексергијски степена корисности. Другим речима, при аутотермној гасификацији ваздухом потребно је гасификовати што је могуће сувљу биомасу.
- ✓ Сушење биомасе се позитивно одражава на ефикасности гасификације засноване на хемијској енергији и ексергији. Кад се биомаса суши физичком топлотом произведеног горивог гаса, температурска разлика између температуре сушења и температуре горивог гаса треба да буде што је могуће мања, јер у том случају расту ексергијске ефикасности оба процеса: сушења и гасификације.
- ✓ Пораст температуре гасификације готово линеарно смањује хемијску енергију и ексергију садржану у произведеном горивом гасу.
- ✓ Процес гасификације на датој температури се може унапредити коришћењем суве биомасе и приближењем температуре на граничној тачки угљеника датој температури гасификације. Ово последње се може остварити променом притиска, предгревањем медијума и додавањем топлоте у процес гасификације. Из овога се види да оптимална температура гасификације није нека константа већ да зависи од састава и стања горива и медијума и топлоте која се током процеса доводи или одводи из реактора. Пораст притиска, довођење топлоте и предгревање ваздуха повећава температуру на граничној тачки угљеника и приближава оптималну реалној температури гасификације. Довођење топлоте и предгревање ваздуха за гасификацију смањује потребну количину ваздуха (кисеоника) неопходну за потпуну гасификацију и производи гас са већим садржајем CO и H<sub>2</sub>.
- ✓ Предгревање ваздуха је корисно за енергијске и ексергијске степене корисности процеса гасификације. На граничној тачки угљеника са порастом температуре предгревања ваздуха долази до:
  - пораста температуре на граничној тачке угљеника,
  - смањења потребне количине ваздуха неопходне за потпуну гасификацију,
  - повећања садржаја CO и H<sub>2</sub> уз истовремено смањење N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O у горивом гасу,

- раста топлотне моћ, хемијске енергија и ексергије горивог гаса,
- већег раса хемијског степена корисности у поређењу са хемијским ексергијским степеном корисности,
- повећања хемијске енергије и ексергије горивог гаса на рачун смањења његове физичке енергије и ексергије у систему који користи предгревање ваздуха физичком топлотом горивог гаса,
- мањег повећања ексергијског степена корисности у поређењу са хемијским енергијским и ексергијским степенима корисности, због коришћења, на високој температури гасификације, доста вредне физичке ексергије горивог гаса,
- већег позитивног ефекта код процеса који се одвија на притиску од 10 bar у поређењу са процесом на притиску од 1 bar зато што је температура на граничној тачки угљеника процеса на вишем притиску виша па ствара већи губитак ентропије услед потребе да се реактанти (биомаса и ваздух) загреју са температуре околине на вишу температуру гасификације.
- ✓ Са порастом температуре гасификације расте значај предгревања ваздуха за гасификацију. У поређењу са гасификацијом на граничној тачки угљеника, гасификација на вишим температурама захтева већу количину ваздуха која ако се не предгрева узрокује већи пад ентропије. У уобичајеном температурском режиму гасификације биомасе, 1073K-1373K, предгревањем ваздуха на температуре блиске температури гасификације могу се добити ексергијски и енергијски степени корисности чак и већи него при гасификацији на оптималним условима непредгрејаним ваздухом.
- ✓ У систему гасификације код кога се ваздух предгрева физичком топлотом горивог гаса, треба размотрити могућност двостепеног предгревања ваздуха. У првом степену ваздух би се предгревао отпадном топлотом ниже температуре која настаје у неком другом делу система, а у другом степену физичком топлотом произведеног горивог гаса. Тиме би се смањиле неповратности у размењивачу топлоте у коме се ваздух предгрева топлотом горивог гаса.
- ✓ Оптимална температура предгревања ваздуха не постоји сама за себе, већ је то она температура тачно одређене количине ваздуха на датом притиску која чини да се гасификација одиграва на граничној тачки угљеника.

## 6. Примењивост и корисност резултата у теорији и пракси

Развијени модели с обзиром да су написани у објектно орјентисаном језику могу се применити за моделирање система у којима је гасификација биомасе само једна карика у ланцу као што су: системи за когенерацију и производњу других биогорива из горивог гаса (вештачког природног гаса, водоника, Фишер-Тропшове синтезе, биометанола).

Имајући у виду општост енергијско ексергијске анализе, као и чињенице да: органски део највећег броја различитих врста биомасе има веома сличан састав

органске масе која јој и даје топлотну моћ, као и то да садржај влаге доста варира у зависности од врсте и стања биомасе, резултати анализе се могу применити готово на све врсте отпадне шумске и пољопривредне биомасе. Ова биомаса у нашој земљи има велики енергетски потенцијал.

Резултати анализе су применљиви на практично пројектовање и синтезу система за гасификацију. Такође, они се могу применити и у савременим трендовима где се гасификација биомасе комбинује са коришћењем соларне енергије.

## **7. Начин презентирања резултата научној јавности**

Равнотежни и квазиравнотежни модели дати у трећем поглављу рада и комплетно пето поглавље рада које говори о енергијској и ексергијској гасификацији биомасе на различитим температурама су објављени у раду категорије M21:

**Карамарковић Раде, Карамарковић Владан.** Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures, Energy 35 (2) (2010) 537-549.

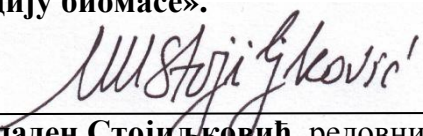
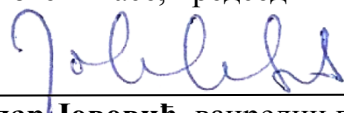
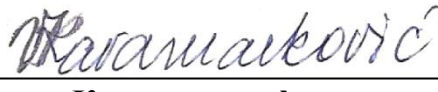




## 8. Закључак и предлог комисије

На основу извршене анализе докторске дисертације Комисија је утврдила да је она у потпуности реализована сагласно плану истраживања.

Резултати истраживања су методолошки јасно презентирани а њихова анализа дата је на научном нивоу. Оригинални двостепени равнотежни и квазиравнотежни модели као и ексергијска анализа гасификације влажне биомасе на различитим температурама су публиковани у једном М21 раду 2010. године.

На основу свега реченог Комисија позитивно оцењује урађену докторску дисертацију и предлаже Наставно научног већу Машинског факултета у Краљеву да прихвати Извештај о прегледу и оцени докторске дисертације кандидата **мр Рада Карамарковића, дипл. инж. маш.,** под називом **«Ексергијска анализа аутотермалних система за гасификацију биомасе».**

1.   
др **Младен Стојиљковић**, редовни професор,  
Машински факултет, Ниш  
Научна област: Теоријски и примењени процеси  
преноса топлоте и масе, председник
2.   
др **Александар Јововић**, ванредни професор  
Машински факултет, Београд  
уџа научна област: Процесна техника, ментор
3.   
др **Владан Карамарковић**, редовни професор  
Машински факултет, Краљево  
Научна област: Топлотна техника и заштита  
животне средине, члан
4.   
др **Новак Недић**, редовни професор,  
Машински факултет, Краљево  
Научна област: Системи аутоматског управљања  
и флуидне управљачке компоненте и системи,  
члан
5.   
др **Дејан Радић**, доцент  
Машински факултет, Београд  
Научна област: Процесна техника, члан

У Краљеву априла 2011.