

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

<b>I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ</b>
<p>1. Датум и орган који је именовео комисију:</p> <p><b>11.12.2020. године, Наставно-научно веће Технолошког факултета Нови Сад, Универзитет у Новом Саду</b></p>
<p>2. Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p><b>др Бојана Иконић</b>, ванредни професор, Хемијско инжењерство, 01.06.2017. године, Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду, председник</p> <p><b>др Јелена Павличевић</b>, ванредни професор, Хемијско инжењерство, 15.10.2017. године, Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду, ментор</p> <p><b>др Оскар Бера</b>, ванредни професор, Хемијско инжењерство, 01.02.2018. године, Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду, члан</p> <p><b>др Драган Говедарица</b>, ванредни професор, Хемијско инжењерство, 04.05.2016. године, Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду, члан</p> <p><b>др Дамир Ђаковић</b>, ванредни професор, Процесна техника, 01.04.2017. године, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, члан</p>
<b>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме:</p> <p><b>Вук, Ранко, Рајовић</b></p>
<p>2. Датум рођења, општина, држава:</p> <p><b>16.08.1989. године, Нови Сад, Република Србија</b></p>
<p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив</p> <p><b>Технолошки факултет Нови Сад, Хемијско инжењерство, Мастер инжењер технологије</b></p>

4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија

**2013. година, Хемијско инжењерство**

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:

-

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:

-

### **III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

**Еко-енергетска анализа и симулација когенеративних постројења на нафтним пољима**

### **IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Докторска дисертација садржи Кључну документацијску информацију са изводом на српском и енглеском језику. Након тога, проблематика дисертације је изложена на 109 страна А4 формата са 35 слика, 20 табела, систематизованих у 6 целина:

1. Увод (стр. 17-22)
2. Теоријски део (стр. 24-69)
3. Материјали и методе (стр. 70-82)
4. Резултати и дискусија (стр. 83-114)
5. Закључци (стр. 115-116)
6. Литература (стр. 117)

### **V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

У **Уводу** ове докторске дисертације постављене су хипотезе докторске дисертације. Објашњена је потреба за еко-енергетском анализом когенеративних постројења на сабирно-отпремним станицама. Истакнута су досадашња истраживања у области анализе когенеративних постројења на нафтним пољима, као и начини употребе алтернативних врста горива у овим погонима. Постављен је главни циљ ове докторске дисертације који обухвата испитивање еколошког утицаја искоришћења раствореног нафтног гаса приликом различитих употребних сценарија, успостављање рачунарске симулације и анализу когенеративних постројења у програмском пакету ASPEN.

У **Теоријском делу** су приказани публиковани резултати од значаја за област истраживања и размотрене су теоријске основе проблема истраживања у седам потпоглавља. У прва два потпоглавља приказано је стање потрошње енергената у Европи и Републици Србији са поделом по врстама примарног горива. У трећем потпоглављу описани су конвенционални и алтернативни поступци у производњи енергије, а у четвртном су анализирани економски аспекти производње енергије у којем се даје осврт на повлашћеног произвођача електричне енергије и концепт „*feed-in*“ тарифе у Републици Србији. У петом потпоглављу анализирани су аспекти глобалног загревања и индикатори одрживог развоја у производњи енергије. Шесто потпоглавље бави се индустријском екологијом и различитим начинима искоришћења отпадних токова и когенеративних постројењима на нафтним пољима. Последње, седмо потпоглавље бави се раствореним нафтним гасом (РНГ) добијеним из сирове нафте, његовим хемијским саставом, енергетском вредношћу и различитим начинима употребе РНГ-а.

У трећој целини под називом **Материјали и методе** у оквиру пет потпоглавља приказани су и прецизно објашњени коришћени материјали, експериментални поступци и јасно су дефинисане, како аналитичке, тако и рачунске методе коришћене за обраду експерименталних података. У првом потпоглављу су наведени сви материјали употребљени у току израде ове дисертације као и њихови

извори. У другом потпоглављу су приказане методе одређивања физичко-хемијских карактеристика раствореног нафтног гаса након сагоревања. Поступак за анализа животног циклуса РНГ-а дефинисан је у трећем потпоглављу, где су одређене границе система, функционална јединица анализе и методе процене утицаја животног циклуса. Четврто потпоглавље бави се проценом екстерних трошкова емисија сагоревањем РНГ-а помоћу Мајхове методе. Последње потпоглавље бави се припремом и реализацијом компјутерске симулације когенеративног постројења у програмском пакету ASPEN. У овом поглављу извршен је одабир термодинамичког модела за симулацију. Такође, дефинисан је и план експеримента као и статистичка метода обраде добијених резултата.

**Резултати и дискусија** су подељени у два дела и прате план истраживања наведен у Пријави теме. Резултате приказане прегледно у табелама и на сликама прати добро организована дискусија која је написана на разумљив начин.

Први део под називом „ЛЦА анализа искоришћења РНГ-а“ обухвата пет потпоглавља у којем се први бави хемијским саставом РНГ-а на нафтним пољима у Србији са релевантним карактеристикама (густина, доња топлотна моћ) за нафтна поља обухваћена овом докторском дисертацијом. У другом потпоглављу извршен је попис животног циклуса три сценарија коришћења РНГ-а. С обзиром на опсег истраживања у овој докторској дисертацији, наведени су само еколошки токови повезани са глобалним загревањем и исцрпљивањем фосилних ресурса. У трећем потпоглављу извршена је процена утицаја животног циклуса за опције коришћења раствореног гаса. Његовим сагоревањем доводи се до осиромашења енергетских ресурса, те се из резултата може уочити да спаљивањем РНГ-а на бакљама исцрпљује фосилне енергенте за  $35,4 \text{ MJ/Sm}^{-3}$ . Још два сценарија подразумевају комбинована постројења и котлове за загревање процесне воде. Потенцијал глобалног загревања који се односи на спаљивање на бакљи процењен је на  $2,98 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{Sm}^{-3}$ . Коришћењем РНГ-а у котловима за загревање и комбинованим постројењима могло би да резултира у еколошким бенефитима пошто потенцијал глобалног загревања код избегнутих процеса премашује еколошка оптерећења која проистичу из сагоревања РНГ-а. Потенцијали глобалног загревања у преостала два сценарија процењени су на  $-0,54$  и  $-4,94 \text{ CO}_{2\text{eq}}$ . У даљој дискусији показано је која је могућност искоришћења топлотне енергије и колико она представља важан фактор који треба узети у обзир приликом пројектовања уређаја и постројења и разматрања капацитета постројења. У току 2014. године у Србији је испуштено или спаљено преко 82 милиона  $\text{Sm}^3$  РНГ-а од чега је 13% искоришћено у комбинованим постројењима за когенерацију. У преостала два потпоглавља првог дела Резултата и дискусије приказана су ограничења и несигурности у вези искоришћења РНГ-а, као и екстерни трошкови који настају приликом емисије гасова који изазивају ефекат стаклене баште.

Други део Резултата и дискусије под називом „ASPEN симулација когенеративног постројења на нафтном пољу“ састоји се из три потпоглавља. Прво потпоглавље садржи податке експеримента извршеног на когенеративном постројењу. Друго потпоглавље бави се успостављањем ASPEN симулације помоћу одабира одговарајућег термодинамичког модела, као и сегментирањем целокупног процеса на мање блокове. Након тога извршена је анализа токова енергетског биланса (топлотне и електричне енергије) између експерименталног и симулираног дела. Анализа добијених вредности топлотне енергије указала је на могуће варијације и одступања генерисане топлотне енергије у зависности од губитака система.

**Закључци** приказани у истоименом поглављу су изведени анализом и дискусијом добијених експерименталних резултата. Главна запажања се односе на смањивање утицаја глобалног загревања за чак 265% приликом адекватног искоришћења РНГ-а у когенеративним постројењима.

**Литература** обухвата 117 литературни навод сложен по абecedном реду. Избор литературе је извршен на основу актуелности и значаја за област истраживања којом се бави ова докторска дисертација.

## ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

### M21 – рад у врхунском међународном часопису

**Vuk Rajović**, Ferenc Kiss, Nikola Maravić, Oskar Bera (2016). Environmental flows and life cycle assessment of associated petroleum gas utilization via combined heat and power plants and heat boilers at oil fields, *Energy conversion and management*, 118, 96-104

### M33 – саопштење са међународног скупа штампано у целини

Ferenc Kiss, **Vuk Rajović**, Nikola Maravić, Đerđi Petković (2016). Reducing the external cost caused by associated petroleum gas flaring in Serbia. In J. Nyers (Ed.), *Proceeding of the 9th IEEE International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources – EXPRES 2016*, Subotica, Serbia, March 31 – April 02(pp. 46-51)), ISBN 978-86-919769-0-3

### M63 – саопштење са скупа националног значаја штампано у целини

**Vuk Rajović**, Nikola Maravić, Ferenc Kiss. (2016). Smanjenje uticaja rastvorenog naftnog gasa na globalno zagrevanje alternativnim načinima njegove upotrebe. M. Ignjatović (Ed.), *Zaštita životne sredine i održivi razvoj „Rudarstvo i energetika“*, Beograd, Srbija: Privredna komora Srbije., Mećavnik Drvengrad, 1-3 mart (pp. 175-183) ISBN 978-86-80420-02-8

## VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Растворени нафтни гас (РНГ) представља отпадни ток приликом експлоатације сирове нафте на нафтним пољима. Дуго година РНГ се спаљивао на бакљама што је имало економску, али не и еколошку оправданост. Последњих година РНГ је почео да се користи као гориво у комбинованим погонима за производњу топлотне и електричне енергије – когенерације. На тај начин нежељени отпадни ток може се превести у корисне видове енергије. Анализом еколошких и енергетских параметара искоришћења РНГ-а у когенеративним постројењима, извршен је прорачун за три сценарија искоришћења РНГ-а коришћењем програмског пакета SimaPro и развијен је детаљни модел симулације когенеративног постројења у AspenPlus 8.0, након чега се дошло до следећих закључака:

- Гасови који изазивају ефекат стаклене баште и који се испуштају спаљивањем раствореног гаса на бакљи доприносе глобалном загревању са просечним утицајем од  $2,98 \text{ kg CO}_2\text{eq}\cdot\text{Sm}^{-3}$  ( $2,5\text{-}3,6 \text{ kg CO}_2\text{eq}\cdot\text{Sm}^{-3}$ ).

- Упоредјујући три потенцијалне могућности коришћења раствореног нафтног гаса кроз еколошке токове и резултате процене утицаја може се закључити да коришћење раствореног гаса у комбинованим постројењима за производњу топлотне и електричне енергије и котловима за загревање може да обезбеди значајно смањење емисије  $\text{CO}_2$  заменом маргиналне производње топлотне и електричне енергије. Потенцијал глобалног загревања се смањује за 265% приликом сагоревања РНГ-а у когенеративним постројењима и 118% коришћењем РНГ-а у котловима за загревање, у односу на потенцијал глобалног загревања приликом спаљивања раствореног нафтног гаса на бакљи.

- Потребне за кумулативном фосилном енергијом у сценаријима сагоревања РНГ-а у когенеративним постројењима и котловима за загревање износиле су  $-48,7$  и  $-2,1 \text{ MJ}\cdot\text{Sm}^{-3}$ , респективно. Негативне вредности указују да су избегнути утицаји замењених процеса (нпр. електричне и/или топлотне енергије) већи од утицаја који се повезују са сагоревањем раствореног нафтног гаса у комбинованим постројењима или котловима за загревање.

- Сценарио примене комбинованих постројења за производњу топлотне и електричне енергије има својих предности у односу на котлове за загревање, не само због повољних резултата LCA, већ и њихове мање осетљивости на капацитет топлотне реализације и непостојање ограничења за коришћење електричне енергије.

- Резултат анализе осетљивости је показао да избор маргиналног произвођача електричне енергије има значајан утицај на резултате сценарија са комбинованим постројењима, међутим, тај избор неће променити општи закључак да је коришћење РНГ-а у овим постројењима од веће користи него

спаљивање. Али и поред тога, постоје разна техничка, економска и хемијска ограничења у вези са применом РНГ-а.

- На основу извршене анализе ASPEN симулације когенеративног постројења на нафтном пољу израчунато је да утицај хемијског састава РНГ-а на генерисану топлотну енергију износи од 0,87% до 1,41%, док је укупни утицај хемијског састава РНГ-а на укупно генерисану топлотну енергију у распону од 10,77% до 14,61%.

- Постављањем сабирног резервоара за РНГ на нафтном пољу може се позитивно утицати на промену хемијског састава тако што би се пре увођења у мотор РНГ уједначио по саставу и као такав усмеравао на сагоревање. То би допринело поузданости прорачуна сагоревања и лакшој манипулацији читавог постројења, без непредвиђених нежељених последица.

- Наношењем слоја изолационе пресвлаке од 0,5 mm дебљине на клипове, главе цилиндра и вентиле, губици топлоте у преносу на расхладни медијум могу се смањити за 23, 34 и 46% за висока, средња и ниска оптерећења, редом. У случају без изолационог слоја губици топлоте у преносу топлоте на расхладни медијум износе 27,36 и 49%.

#### **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА**

Експериментални рад и резултати истраживања приказани у овој докторској дисертацији у потпуности одговарају циљевима постављеним у Пријави теме. Кандидат Вук Рајовић је успешно спровео истраживање у овој докторској дисертацији. Експерименталне резултате приказане систематично, табеларно и графички, прати јасна интерпретација и одговарајућа дискусија. Сви изнети закључци везани за еко-енергетску анализу и симулацију когенеративних постројења на нафтним пољима су изведени правилним и доследним тумачењем резултата. На основу тога, начин приказа и тумачења резултата истраживања ове дисертације се оцењује позитивно.

#### **IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

Да, докторска дисертација је у потпуности написана у складу са планом и образложењем наведеним у Пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Да, докторска дисертација садржи све битне елементе који су неопходни за радове ове врсте.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Главни допринос науци ове докторске дисертације је у свеобухватности еко-енергетске анализе когенеративних постројења на нафтним пољима. Савремени трендови у експлоатацији отпадних токова производних процеса захтевају свеобухватну анализу технолошких поступака. За оптималан рад процеса потребно је праћење што више променљивих процесних услова. Овде спадају и мерења која се не могу добити конвенционалним мерилима услед немогућности инсталације (температура и притисак сагоревања раствореног нафтног гаса у мотору, температуре и притисци у цилиндрима мотора, параметри унутрашњости размењивача топлоте, итд.).

Искуство из индустрије показало је да се у сваком тренутку могу јавити непредвиђени проблеми у раду когенеративног постројења на растворени нафтни гас услед варијабилног састава гаса. Један од разлога томе јесте недостатак симулационог модела помоћу којег је могуће предвидети и лоцирати слабе тачке система.

Високи трошкови тестирања предложених решења услед непредвиђених проблема у раду постројења захтевају прецизну компјутерску симулацију. Тиме се врши оптимизација у многим сегментима, као што је:

- анализа рада постројења с постојећим саставом гаса на нафтном пољу,
- димензионисање система на основу резерве раствореног нафтног гаса и његовог састава,
- исплативост инвестиције анализом укупне ефикасности постројења,
- утицај на животну средину.

Симулациони модел производње електричне и топлотне енергије сагоревањем раствореног нафтног гаса помоћу когенерационих система, генерисан као крајњи исход ове докторске дисертације, даје

јасан увид у одрживост преведене енергије, као и еколошку оправданост изградње ових система на нафтним пољима у Републици Србији. Са технолошког аспекта добијени резултати и процесни услови биће поуздан извор информација који ће служити за предвиђање енергетских флукуација, што ће омогућити управљање и рационалније димензионисање когенеративних система на нафтним пољима.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Недостаци нису уочени у овој докторској дисертације.

#### **X ПРЕДЛОГ:**

Комисија позитивно оцењује докторску дисертацију **маст. инж. Вука Рајовића**, под насловом „Еко-енергетска анализа и симулација когенеративних постројења на нафтним пољима“ и предлаже да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана.

У Новом Саду,  
23.12.2020.

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

председник

**др Бојана Иконић**, ванредни професор

Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду

---

ментор

**др Оскар Бера**, ванредни професор

Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду

---

ментор

**др Драган Говедарица**, ванредни професор

Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду

---

члан

**др Јелена Павличевић**, ванредни професор

Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду

---

члан

**др Дамир Ђаковић**, ванредни професор

Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду