

35/101
(Број захтева)
25.05.2021.
(датум)

(назив већа научне области коме се захтев упућује)

Београд, Студентски трг бр. 1

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тачка 4. Статута Универзитета у Београду (“Гласник Универзитета у Београду” број 162/11, пречишћен текст, 167/12, 172/13 и 178/14), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

Стеван (Љубинко) Ступар, мастер инжењер

КАНДИДАТ: **Стеван Ступар** пријавио је докторску дисертацију под називом:
„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“
Из научне области: **ХЕМИЈСКО ИНЖЕЊЕРСТВО**

Универзитет је дана **28.09.2020.** године, својим актом **61206-2968/2-20.** дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

„ Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима “

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Стевана Ступара** образована је на седници Наставно-научног већа одржаној **08.04.2021.** године Одлуком Факултета под бр. **35/58.** у саставу:

Име и презиме	Звање	Научна област
1.Др Душан Мијин	Редовни професор	Органска хемија
2.Др Бранимир Гргур	Редовни професор	Електрохемија
3.Др Радмила Јанчић-Хајнеман	Редовни професор	Инжењерство материјала
4.Др Антоније Оџица	Ванредни професор	Аналитичка хемија
5. Др Анђелка Томашевић	Научни сарадник	Биотехничке науке

Студент је уписан на докторске студије школске 2015/2016. године.

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана **22.04.2021.** године.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 39. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 22.04.2021. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу др Душан Мијин, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Бранимир Гргур, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Радмила Јанчић-Хајнман, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Антоније Оњиа, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Анђелка Томашевић, виши научни сарадник Института за пестициде и заштиту животне средине, Београд-Земун, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“** коју је поднео **Стеван Ступар** мастер инжењер и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Стевана Ступара, под називом **„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“** Одлуком број: 61206-2968/2-20 од 28.09.2020. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M21:

1. **Stupar S. LJ.**, Grgur B. N., Radišić M. M., Onjia A. E., Ivanković N. D., Tomašević A. V., Mijin D. Ž.: *Oxidative degradation of Acid Blue 111 by electro-assisted Fenton process*, Journal of Water Process Engineering, Vol. 36, 2020, 101394, ISSN 2214-7144 (IF₂₀₁₈=3,173; Water Resources 17/91; Engineering, Chemical 42/138; Engineering, Environmental 23/52), DOI: [10.1016/j.jwpe.2020.101394](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101394).

Категорија M22:

1. **Stupar S. LJ.**, Vuksanović, M.M., Totovski Lj.M., Jančić-Heinemann, R.M., Mijin D.Ž.: *Adsorption of Anthraquinone Dye AB111 from Aqueous Solution using Synthesized Alumina-Iron Oxide Doped Particles*, Science of Sintering, vol. 53, No 1, pp. 91-117, 2021 (IF₂₀₁₉=1.157), (ISSN 0350-820X), DOI: 10.2298/SOS2101091S.

Категорија M23:

1. **Stupar S. LJ.**, Grgur B. N., Onjia A. E., Mijin D. Ž.: *Direct and Indirect Electrochemical Degradation of Acid Blue 111 Using IrOx Anode*, International Journal of Electrochemical Science, Vol 12, No 9, 2017, pp. 8564-8577, ISSN 1452-3981 (IF₂₀₁₈=1,284; Electrochemistry 22/26), DOI: 10.20964/2017.09.44.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, менторима, Служби за наставно-студентске послове, Библиотеци и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Стевана Ступара, маг. инж.**

Одлуком 35/58 бр. од 08.04.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Стевана Ступара, маг. инж.** под насловом:

„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“

После прегледа достављене Докторске дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи:

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Стеван Ступар, маг. инж. (број индекса 4041/2015) уписан је на докторске академске студије школске 2015/2016. године на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду, научна област технолошко инжењерство, ужа научна област хемијско инжењерство.

22.06.2020. – Кандидат Стеван Ступар пријавио је тему докторске дисертације, под називом *„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“*.

25.06.2020. – На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета бр. 35/191 од 25.06.2020. године, именовани су чланови Комисије за оцену подобности теме и кандидата Стевана Ступара, маг. инж. за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом: *„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“*.

03.09.2020. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је Одлука о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације. За менторе су одређени др Душан Мијин, редовни професор ТМФ-а и др Бранимир Гргур, редовни професор ТМФ-а (Одлука бр. 35/247).

28.09.2020. – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду донета је одлука о давању сагласности на предлог теме Докторске дисертације Стевана Ступара, под називом *„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“* (Одлука бр. 61206-2968/2-20 од 28.09.2020. године).

1.2. Научна област дисертације

Истраживања рађена у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области технолошко инжењерство, ужа научна област хемијско инжењерство за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ментори, др Душан Мијин, редовни професор ТМФ-а и др Бранимир Гргур, редовни професор ТМФ-а су на основу досадашњих објављених радова и искуства компетентни да руководе изработом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Стеван Ступар, маг. инж. рођен је 15. јула 1991. године у Петровцу на Млави. По завршетку средње школе, школске 2010/2011. године започиње основне академске студије на Војној академији на смеру војнохемијско инжењерство. Основне академске студије завршава у септембру 2014. године, са просечном оценом 9,05. По завршетку основних студија, кандидат је вршио дужности командира и инструктора у Центру за усавршавање кадрова АБХО и Центру АБХО где је изводио обуку на домаћим и међународним курсевима из области атомско-биолошко-хемијске одбране. Од октобра 2019. године, наређењем министра одбране ангажован је као истраживач у Сектору за материјале и заштиту Војнотехничког института у Београду. Почетком школске године 2014/2015. започиње школовање на мастер студијама (студијски програм Инжењерство заштите животне средине), а септембра 2015. године одбраном мастер рада под називом „Испитивање кинетике симултаног уклањања јона цинка, никла и бакра из водених раствора помоћу зеолитског туфа из рудника Златокоп“ (ментор: проф. др Невенка Рајић) успешно завршава своје мастер студије. Исте календарске године започиње школовање на докторским студијама, студијски програм Хемијско инжењерство.

Стеван Ступар, маг. инж. је током вршења дужности у јединици Војске Србије која се бави извођењем обуке активно одржавао предавања и практичне вежбе на међународним курсевима и током обуке лица из састава Организације за забрану хемијског оружја (Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons) из области атомско-биолошко-хемијске одбране. Одлуком Наставно-научног већа Војне академије, кандидат је 2018. године изабран у звање асистента за ужу научну област „Опасне материје“. Такође, кандидат је учествовао у реализацији научно-истраживачког пројекта Војне академије: ВА-ТТ/1-18-20: „Изоловање и карактеризација супстанци из различитих биљних извора за потребе симулације дејства високотоксичних супстанци“, 2018-2020. године. По постављању на позицију истраживача у Војнотехничком институту, Стеван Ступар је ангажован на реализацији задатака повећања маскарне заштите војника и средстава наоружања и војне опреме. Поред својих примарних задатака, члан је тимова који се баве реализацијом модернизације борбених возила у области повећања маскарне заштите возила.

Област научно-истраживачког рада током докторских студија Стевана Ступара обухвата третман отпадних вода богатих антрахинонским бојама методама адсорпције, електрохемијске оксидације и виших оксидационих процеса, синтезу и карактеризацију материјала који се могу употребити као адсорбенти и/или катализатори током третмана отпадних вода наведеним методама.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Стевана Ступара „Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“ написана је на 162 нумерисане стране и садржи седам поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак, Литература и Прилог.

Дисертација садржи 113 слика, 15 табела и 343 литературних навода. На почетку дисертације дат је Извод (на српском и енглеском језику), док је у оквиру *Прилога*, после слика, дата биографија аутора, изјава о ауторству, изјава о истоветности штампане и електронске верзије, изјава о коришћењу и изјава о оригиналности тезе. По форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У поглављу *Увод* приказана је актуелност и значај испитивања у оквиру предложене докторске дисертације, циљеви рада, као и предмет истраживања. У овом поглављу су описани економски параметри и тенденције развоја текстилне индустрије, као и штетност антрахинонских боја које заузимају око 30% од укупне производње текстилних боја. Укратко су представљени поступци коришћени за уклањање или разградњу антрахинонских боја С.I. кисело плаво 111 (AB111) и С.I. кисело љубичасто 109 (AV109) из водених раствора, аналитичке методе карактеризације адсорбената и производа разградње боје.

Поглавље *Теоријски део* обухвата преглед литературе која је релевантна за предложена истраживања као и преглед и анализу до сада објављених резултата из области испитивања ефикасности наведених метода. Теоријски део се састоји из следећих девет потпоглавља:

1. Утицај органских молекула на животну средину,
2. Боје, дефиниција и подела,
3. Антрахинонске боје,
4. Штетност текстилних боја,
5. Третман отпадних вода,
6. Карактеристике отпадних вода текстилне индустрије и њихов третман,
7. Уклањање боја методом адсорпције,
8. Разградња органских загађујућих материја методом електрохемијске оксидације,
9. Разградња органских загађујућих материја применом виших оксидационих процеса,
10. Разградња органских загађујућих материја применом Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон процеса, и
11. Материјали који се могу користити као адсорбенти и/или катализатори у хетерогеним вишим оксидационим процесима (AOPs).

У првом потпоглављу *Теоријског дела* дат је увид о утицају органских молекула на животну средину. У овом потпоглављу дат је детаљан литературни преглед утицаја отпадних вода пољопривредне, фармацеутске, прехранбене и текстилне индустрије на животну средину. У потпоглављу *Боје, дефиниција и подела* представљена је дефиниција боја и основна подела боја, подела према хемијској структури, степену растворљивости, сировини и начину добијања боја. У потпоглављу *Антрахинонске боје* дат је литературни преглед о комерцијалној примени антрахинонских боја, хемијској структури и утицају супституента на померање апсорпционог максимума у видљивом делу електромагнетног спектра. Такође представљена је подела антрахинонских боја, као и литературни преглед досадашњих испитивања ефикасности разградње или уклањања киселих антрахинонских боја из водених раствора. Четврто потпоглавље, *Штетност текстилних боја*, представља преглед испитивања утицаја текстилних боја на екосистем и људски род. Потпоглавље *Третман отпадних вода* приказује уопштени хемијски састав и основне параметре квалитета отпадних вода чије се вредности погодним физичко-хемијским поступцима морају свести на вредности ниже од законима дефинисаним максималних дозвољених концентрација. У потпоглављу *Карактеристике отпадних вода текстилне индустрије и њихов третман* дате су карактеристике отпадних вода из постројења текстилне индустрије уз приказ ефикасности конвенционалних линија за третман отпадних вода. У овом потпоглављу је дат акценат на ограничењима биолошког процеса отпадних вода богатих бионеразградивим честицама. У седмом потпоглављу *Уклањање боја методом адсорпције*, дефинисан је појам адсорпције и објашњена је њена подела у зависности од типа везе коју граде адсорбент и адсорбат, као и параметри који утичу на ефикасност уклањања боја методом адсорпције (pH вредност,

концентрација адсорбента и адсорбата, време контакта и температуре). Дат је теоријски основ за описивање система адсорбент-адсорбат термодинамичким изотермама (Ленгмирова (Langmuir) и Фројндлихова (Freundlich) изотерма). Ово потпоглавље је подељено на две целине:

1. Параметри који утичу на ефикасност уклањања боја методом адсорпције, и
2. Термодинамичке изотерме.

У осмом потпоглављу дисертације дат је литературни преглед о механизму и ефикасности директне и индиректне електрохемијске оксидације за третман отпадних вода богатих бионеразградивим органским загађујућим материјама. Дат је преглед материјала који могу бити употребљени као аноде у електрохемијским процесима и зависност ефикасности процеса од јачине струје, електролита, рН вредности и температуре. Ово потпоглавље је подељено на четири целине:

1. Директна електрохемијска оксидација,
2. Индиректна електрохемијска оксидација,
3. Материјали који могу бити употребљени као аноде у електрохемијским процесима, и
4. Параметри који утичу на ефикасност разградње електрохемијском оксидацијом.

У деветом потпоглављу, *Разградња органских загађујућих материја применом виших оксидационих процеса*, литературним прегледом су обухваћене дефиниција, примена, различите поделе, механизми и недостаци виших оксидационих процеса. У десетом потпоглављу дат је литературни преглед зависности ефикасности Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон процеса од почетне концентрације водоник-пероксида и Fe^{2+} јона, рН вредности, температуре и растворених катјона и анјона. Такође, дат је преглед Фентон процеса у којима су јони гвожђа замењени јонима других метала. Наведено потпоглавље је подељено на следеће целине:

1. Фентон процес-основни појмови и механизам,
2. Фото-Фентон процес-основни појмови и механизам,
3. Електро-Фентон процес-основни појмови и механизам,
4. Параметри који утичу на ефикасност разградње органских загађујућих материја применом Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон процеса, и
5. Фентон процеси у којима су јони гвожђа замењени јонима других метала.

У последњем потпоглављу, *Материјали који се могу користити као адсорбенти и/или катализатори у хетерогеним вишим оксидационим процесима (AOPs)*, дат је литературни преглед материјала који имају својство јонске измене или имају у својој кристалној решетку доступне јоне гвожђа који се могу користити у хетерогеним Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон реакцијама. Литературним прегледом су обрађени материјали на бази оксида метала, дендримери, алумосиликатни материјали и различите модификације отпада (остаци биљака, биомасе воћа и летећи пепео). У овом потпоглављу је у засебној целини под називом *Честице на бази алуминијум-оксида које се могу користити као адсорбенти и/или катализатори у хетерогеним вишим оксидационим процесима* дат преглед фаза честица на бази алуминијум-оксида и њихова досадашња примена и ефикасност у процесу адсорпције и каталитичким процесима.

Експериментални део се састоји из четири потпоглавља:

1. Материјали,
2. Апарати и уређаји,
3. Поступци, и
4. Аналитичке методе.

У прва два потпоглавља су наведене све коришћене хемикалије, апарати и уређаји. У трећем потпоглављу су детаљно описани поступци уклањања или разградње антрахинонских боја (AB111 и AV109) адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима. Треће потпоглавље се састоји из пет целина:

1. Синтеза материјала и испитивање ефикасности адсорпције синтетисаним материјалом,

2. Електрохемијска оксидација,
3. Фентон процес,
4. Фото-Фентон процес, и
5. Електро-Фентон процес.

Последња, четврта целина, обухвата детаљно објашњење употребљених аналитичких метода за праћење ефикасности обезбојавања водених раствора антрахинонских боја и њихове разградње, карактеризацију синтетисаног адсорбента и производа разградње као и одређивање фитотоксичности раствора боје и производа разградње.

Поглавље *Резултати и дискусија* садрже детаљан приказ свих добијених резултата. Добијени резултати испитивања су критички сагледани. Наведено поглавље конципирано је у три потпоглавља:

1. Испитивање ефикасности адсорпције антрахинонских боја АВ111 и АВ109 синтетисаним честицама алуминијум-оксида допираних гвожђе (III)-оксидом,
2. Разградња антрахинонских боја АВ111 и АВ109 електрохемијском оксидацијом, и
3. Разградња антрахинонских боја АВ111 и АВ109 вишим оксидационим процесима (Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон процеси).

У потпоглављу које обухвата резултате адсорпције, приказани су резултати добијени испитивањем уклањања молекула боје адсорбентима на бази алуминијум-оксида допираним различитим количинама гвожђа и синтерованим на температурама 700, 800 и 900 °C. Приказани су сви резултати карактеризације материјала коришћених као адсорбенти. У наставку су приказани и резултати испитивања утицаја почетне концентрације боје и адсорбента, рН вредности и температуре на адсорпциони капацитет употребљених честица на бази алуминијум-оксида. Добијени резултати су анализирани Ленгмировим и Фројндлиховим изотермским моделима ради одређивања уређености површине адсорбента и начина формирања слојева адсорбент-адсорбат.

У другом потпоглављу, приказани су резултати испитивања зависности ефикасности електрохемијске оксидације у којој је коришћена IrO_x анода од врсте и концентрације употребљеног електролита, концентрације боје и почетне рН вредности на ефикасност електрохемијске оксидације. Такође, у овом делу су приказани и резултати прорачуна потрошње електричне енергије током третмана раствора боје директном и индиректом оксидацијом. У овој целини је испитана ефикасност процеса одређивањем промене вредности укупног органског угљеника у реакционом систему. Извршено је поређење спектра добијених применом инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом узорка боје и узорака након директне и индиректне електрохемијске оксидације.

У последњем потпоглављу, приказани су резултати и дискусија испитивања утицаја почетних параметара на ефикасност уклањања антрахинонских боја из раствора помоћу Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон процеса. Као и током испитивања ефикасности електрохемијске оксидације, и током истраживања ефикасности виших оксидационих процеса, вредност укупног органског угљеника праћена је током третмана. Такође, одређен је могући ток разградње боја наведеним методама као и структура крајњих продуката разградње. У циљу одређивања штетности продуката разградње, приказани су резултати токсиколошке анализе добијене заливањем семена Мунг пасуља (*Vigna mungo*) раствором боје и растворима након третмана. У овом потпоглављу приказана је целокупна техноекономска анализа Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон процеса.

У поглављу *Закључак* сумирани су најважнији закључци о ефикасности уклањања или разградње антрахинонских боја АВ111 и АВ109 адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима уз осврт на њихову иновативност, важност и потенцијалну практичну примену испитиваних метода.

У делу *Литература* наведене су све референце цитиране у докторској дисертацији, које су релевантне за истраживање, као и радови проистекли током израде ове дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Пораст броја становника на планети Земљи и индустријски развој изазвали су смањење количине хигијенски исправне воде за пиће због чега је већем делу становништва она потпуно недоступна. У циљу одрживог коришћења воде, потребно је смањити загађење водних ресурса употребом адекватних третмана отпадних вода. Отпадне воде текстилне индустрије као и других индустрија које користе боје, богате су остацима боја које инхибирају конвенционалне биолошке третмане отпадних вода и чине сам третман мање ефикасним.

Последњих година, повећан је број радова у којима се испитује ефикасност уклањања и разградње бионеразградивих загађујућих материја адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима који су показали значајну ефикасност у третману отпадних вода богатих бионеразградивим загађујућим материјама. На основу прегледане литературе, утврђено је да до сада нису вршена свеобухватна испитивања уклањања и разградње антрахинонских боја АВ111 и АВ109 адсорпцијом, коришћењем синтетисаних честица на бази алуминијум-оксида допованих гвожђе(III)-оксидом, директном и индиректном електрохемијском оксидацијом као и вишим оксидационим процесима (Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон), а посебно коришћењем електроасистираног Фентон процеса.

Применом јонске хроматографије, течне хроматографије високих перформанси-масене спектрометрије и гасне хроматографије-масене спектрометрије утврђени су производи разградње антрахинонске боје АВ111 помоћу виших оксидационих процеса и први пут је предложен могући ток разградње ове боје. Такође је извршено испитивање фитотоксичности производа разградње антрахинонске боје АВ111 вишим оксидационим процесима коришћењем семена Мунг пасуља. У дисертацији је поред испитивања ефикасности метода, извршена и свеобухватна анализа трошкова разградње боје АВ111 Фентон и електро-Фентон процесима чиме је сагледана и економска оправданост примене ових метода код антрахинонских боја. Може се закључити да докторска дисертација представља оригинално истраживање које даје значајан допринос третману бионеразградивих загађујућих материја присутних у отпадним водама текстилне индустрије.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У току израде дисертације кандидат је прегледао литературу која се односи на утицај органских загађујућих материја на животну средину укључујући антрахинонске боје, затим литературу која се односи на карактеристике отпадних вода текстилне индустрије и њихов третман, уклањање или разградњу текстилних боја адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима. У литературном прегледу докторске дисертације се налазе 343 литературна навода, са тематиком значајном за израду ове дисертације. Наведене референце садрже експерименталне резултате истраживања, анализе, дискусију добијених резултата, као и теоријске основе примењених метода истраживања. У оквиру наведене литературе, налазе се и публикације кандидата проистекле из ове докторске дисертације. Прегледана обимна литература и приложени објављени радови кандидата указују на његово адекватно познавање предметне области истраживања.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Током испитивања ефикасности уклањања и разградње антрахинонских боја АВ111 и АВ109 адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима испитиван је утицај почетних услова на ефикасност процеса. У свим испитиваним процесима, ефикасност обезбојавања је праћена методом UV-vis спектрофотометрије.

Испитивање ефикасности уклањања боја из водених раствора адсорпцијом обухвата карактеризацију синтетисаних честица на бази алуминијум-оксида допованих различитим процентом гвожђе(III)-оксида (4 и 13 мас. %) обрађених на различитим температурама (700, 800 и 900 °C). Испитивање утицаја почетних параметара и описивања система адсорбент-адсорбат. Карактеризација честица адсорбената вршена је скенирајућом електронском микроскопијом са енергодисперзионом спектроскопијом (SEM-EDS) и рендгенском дифракцијом зрака (XRD). Употребом Фуријеове трансформисане инфрацрвене спектроскопије (FT-IR) анализиране су честице на бази алуминијум-оксида допованих гвожђе(III)-оксидом (4 мас. %) термички обрађене на 800 °C пре и на 900 °C. Такође, одређена је вредност pH нултог наелектрисања свих синтетисаних честица. Одређено је поклапање добијених резултата испитивања са кинетичким моделима псеудо-прво реда, псеудо-другог реда и унутарчестичне дифузије. У циљу карактерисања система адсорбент-адсорбат, резултати су обрађени Ленгмировим и Фројндлиховим изотермским моделима, а такође су одређени термодинамички параметри адсорпције. Испитивање ефикасности разградње антрахинонских боја електрохемијском оксидацијом употребом „активне“ IrO_x аноде обухвата испитивање ефикасности директне и индиректне електрохемијске оксидације. Ради потпуног сагледавања ефикасности разградње антрахинонских боја електрохемијском оксидацијом, испитивања обухватају одређивање зависности ефикасности директне и индиректне електрохемијске оксидације од почетне концентрације електролита, јачине струје и pH вредности раствора. Одређено је поклапање експерименталних резултата са кинетичким моделима првог и другог реда. Ефикасност разградње антрахинонских боја вршено је праћењем промене вредности укупног органског угљеника, а производи разградње испитивани су FT-IR спектроскопијом. Током испитивања ефикасности виших оксидационих процеса, испитан је утицај почетне концентрације водоник-пероксида и гвожђе(II)-јона, вредности pH, присуства хлорида, сулфата и 2-пропанола, а током испитивања ефикасности електроасистираног-Фентон процеса испитан је и утицај јачине струје. У испитивањима ефикасности електроасистираног-Фентон процеса употребљене су IrO_x и Pt аноде. Ефикасност разградње праћена је променом вредности укупног органског угљеника. Испитивање токсичности производа разградње Фентон и електроасистираног-Фентон процеса извршена су фитотоксиколошким испитивањем раствора боје и продуката коришћењем семена Мунг пасуља. У циљу карактеризације производа разградње коришћене су методе јонске хроматографије, FT-IR, HPLC-MS, GC-MS анализе. Ради одређивања економске исплативости процеса израчунати су трошкови разградње боје AB111 током Фентон и електроасистираног-Фентон процеса.

3.4. Применљивост остварених резултата

Експериментални подаци и истраживања спроведена у оквиру ове дисертације значајно доприносе бољем разумевању адсорпције, електрохемијске оксидације и виших оксидационих процеса као ефикасних метода за третман отпадних вода текстилне индустрије. Осим тога, дат је и допринос проширењу фундаменталних знања из области третмана отпадних вода наведеним методама. Сагледавањем кинетике процеса, поред феномена преноса, остварује се значајан допринос преносу процеса из лабораторијских услова у индустријске. Поред тога, приказани резултати доприносе потпунијем сагледавању механизма испитиваних метода. Такође, дефинисане су зависности ефикасности од почетних услова у циљу одређивања оптималних услова за третман отпадних вода текстилне индустрије које у свом саставу имају испитиване антрахинонске боје.

Проширена су знања о употреби честица на бази алуминијум-оксида и утицају масеног удела гвожђе(III)-оксида и температуре на којој су честице термички обрађене на могућност употребе синтетисаних материјала као адсорбента.

Испитивања ефикасности директне и индиректне електрохемијске оксидације доказују да представљају лако применљиве и ефикасне методе за третман отпадних вода текстилне индустрије употребом IrO_x електроде.

Резултати испитивања виших оксидационих процеса показују високу ефикасност разградње антрахинонских боја при атмосферским условима. Поређењем резултата испитивања доказан је повољан утицај присуства светлости и употребе струје на ефикасност обезбојавања раствора због редукције јона гвожђа и хомолитичког разлагања водоник-пероксида. Поред тога, утврђени су трошкови Фентон и електроасистираног-Фентон процеса и зависност ефикасности електроасистираног-Фентон процеса од употребљене аноде.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Стеван Ступар, маг. инж. је током израде докторске дисертације испољио стручност у припреми и реализацији експеримената, коришћењу различитих техника карактеризације материјала и производа разградње и анализе резултата, као и у писању научних радова који су објављени у међународним часописима и саопштени на конференцијама. Комисија сматра да кандидат поседује све квалитете који су неопходни за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације допринели су:

- Повећању знања о синтези и карактеризацији нових адсорбената на бази алуминијум-оксида. Поред тога, проширена су знања о њиховој употреби у третману отпадних вода текстилне индустрије методом адсорпције.
- Одређени су оптимални услови и кинетика адсорпције молекула боја.
- Применом Ленгмировог и Фројндлиховог модела описана је површина адсорбента и формација молекула боје (адсорбата) на површини адсорбента. Такође, из експериментално добијених података одређени су термодинамички параметри и на основу њих је утврђено да су везе адсорбат–адсорбент физичке.
- Испитана је ефикасност директне и индиректне електрохемијске оксидације употребом „активне“ IrO_x аноде за разградњу молекула антрахинонских боја из водених раствора.
- Одређени су оптимални услови и кинетика разградње молекула загађујуће материје директном и индиректном електрохемијском оксидацијом.
- Израчунат је специфични утрошак електричне енергије употребљене током разградње молекула боја директном и индиректном електрохемијском оксидацијом.
- Испитивана је ефикасност разградње молекула боја вишим оксидационим процесима (Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон), одређени су оптимални услови, и кинетика разградње молекула боја.
- Одређени су продукти деградације и деградациони путеви молекула боја.
- Извршено је поређење ефикасности електроасистираног-Фентон процеса употребом IrO_x и Pt анода.
- Испитана су токсиколошка својства раствора боја третираних вишим оксидационим процесима.
- Утврђени су оперативни трошкови Фентон и електроасистираног-Фентон процеса.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања у овој дисертацији су конципирана након детаљне анализе литературе из области третмана отпадних вода текстилне индустрије методама адсорпције, електрохемијске оксидације и вишим оксидационим процесима.

На основу добијених резултата, у овој докторској дисертацији је дат значајан допринос повећању знања о синтези, карактеризацији и употреби нових адсорбента на бази алуминијум-оксида. Коришћењем новосинтетисаних честица на бази алуминијум-оксида допованих гвожђе(III)-оксидом утврђена је висока ефикасност у уклањању текстилних антрахинонских боја АВ111 и АВ109 из водених раствора уз дефинисање система адсорбент-адсорбат и одређивање термодинамичких параметара који указују на одигравање физисорпције. Сви резултати показују добро поклапање са кинетичким моделом псеудо-другог реда са високом вредношћу корелационог фактора ($R^2 > 0,99$), а параметри унутарчестичне дифузије показују да се у првих 20 минута адсорпција одиграва на лакше доступним површинама честица, а након тога се врши адсорпција унутар пора адсорбента. Током испитивања, утврђена је зависност ефикасности адсорпције од почетне концентрације адсорбента, концентрације боје и рН вредности раствора. Поређењем резултата испитивања ефикасности адсорпције, доказано је да адсорбент $Al_2O_3-Fe_2O_3$ (4 мас. %) термички обрађен на 800 °C има већи афинитет према боји АВ111 у свим системима што се може објаснити мањом моларном масом молекула боје АВ111 и лако доступношћу адсорпционих места на површини честица адсорбента.

Испитивања разградње молекула испитиваних антрахинонских боја електрохемијском оксидацијом су показала већу ефикасност индиректне електрохемијске оксидације у случају обе боје. Током испитивања разградње коришћена је IrO_x анода која спада у групу „активних“ анода, а одређена је зависност ефикасности обезбојавања раствора од јачине струје, концентрације електролита и почетне вредности рН раствора. Резултати испитивања електрохемијске оксидације боје АВ111 показују добро поклапање са кинетичким моделом псеудо-првог реда, а боје АВ109 са кинетичким моделом псеудо-другог реда. Поређењем, резултата испитивања разградње молекула обе боје, већа ефикасност електрохемијске оксидације утврђена је при разградњи боје АВ109. У раду је одређен специфични утрошак електричне енергије у зависности од примењене јачине струје.

Виши оксидациони процеси (Фентон, фото-Фентон и електро-Фентон) показали су високу ефикасност обезбојавања раствора и разградње испитиваних антрахинонских боја. Испитивања су показала најнижу ефикасност обезбојавања употребом Фентон процеса, док су вредности фото-Фентон и електро-Фентон процеса приближне због хомолитичког разлагања водоник-пероксида и редукције јона гвожђа приликом излагања раствора светлости или струји. Током испитивања виших оксидационих процеса утврђен је утицај почетне концентрације водоник-пероксида, гвожђе(II)-јона и вредности рН раствора на ефикасност свих процеса, а током испитивања ефикасности електро-Фентон процеса, испитан је и утицај аноде (IrO_x и Pt) и јачине струје на ефикасност и кинетику обезбојавања раствора. Додавањем одређених количина 2-пропанола, натријум-хлорида и сулфата у растворе боја утврђен је њихов утицај на ефикасност Фентон и електро-Фентон процеса. Испитивањем кинетике обезбојавања раствора доказано је да сви резултати испитивања показују добро поклапање са кинетичким моделом другог реда. Коришћењем јонске хроматографије, течне хроматографије високих перформанси-масене спектрометрије и гасне хроматографије-масене спектрометрије утврђени су производи разградње виших оксидационих процеса. Јонском хроматографијом утврђено је присуство формијатних, оксалатних и нитратних анјона као и амонијум-јона. Резултати течне хроматографије високих перформанси-масене спектрометрије и гасне хроматографије-масене спектрометрије потврђују да се употребом виших оксидационих процеса врши разградња молекула боје. Одређивањем вредности укупног органског угљеника, утврђен је степен минерализације боје АВ111 након третмана вишим оксидационим процесима. Испитивањем фитотоксичности, утврђено је да се након Фентон и електроасистираниог Фентон процеса добијају производи који су мање токсични од почетног раствора боје. У циљу одређивања економске исплативости, одређени су оперативни трошкови Фентон и електроасистираниог-Фентон процеса и утврђено је да је Фентон процес мање исплатив него електроасистирани-Фентон процес.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Стеван Ступар, маг. инж. је резултате своје докторске дисертације потврдио објављивањем радова у међународним часописима и саопштењима на међународним и домаћим научним скуповима. Објављена су укупно три научна рада и то један рад у врхунском међународном часопису (M21), један рад у истакнутом међународном часопису (M22) и један рад у међународном часопису (M23). Објављена су и два саопштења на научним скуповима (једно саопштења на међународном научном скупу и једно саопштења на домаћем научном скупу).

Категорија M21:

1. **Stupar S. LJ.**, Grgur B. N., Radišić M. M., Onjia A. E., Ivanković N. D., Tomašević A. V., Mijin D. Ž.: *Oxidative degradation of Acid Blue 111 by electro-assisted Fenton process*, Journal of Water Process Engineering, Vol. 36, 2020, 101394, ISSN 2214-7144 (IF₂₀₁₈=3,173; Water Resources 17/91; Engineering, Chemical 42/138; Engineering, Environmental 23/52), DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101394.

Категорија M22:

1. **Stupar S. LJ.**, Vuksanović, M.M., Totovski Lj.M., Jančić-Heinemann, R.M., Mijin D.Ž.: *Adsorption of Anthraquinone Dye AB111 from Aqueous Solution using Synthesized Alumina-Iron Oxide Doped Particles*, Science of Sintering, vol. 53, No 1, pp. 91-117, 2021 (IF₂₀₁₉=1.157), (ISSN 0350-820X), DOI: 10.2298/SOS2101091S.

Категорија M23:

1. **Stupar S. LJ.**, Grgur B. N., Onjia A. E., Mijin D. Ž.: *Direct and Indirect Electrochemical Degradation of Acid Blue 111 Using IrOx Anode*, International Journal of Electrochemical Science, Vol 12, No 9, 2017, pp. 8564-8577, ISSN 1452-3981 (IF₂₀₁₈=1,284; Electrochemistry 22/26), DOI: 10.20964/2017.09.44.

Категорија M34:

1. **Stupar S.**, Tomašević A., Grgur B., Onjia A., Mijin D.: *Degradation of Anthraquinone dye using Fenton and Photo-Fenton Process*, The 6th European Conference on Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes (EAAOP-6), Portorož 2019. ISBN 978-961-93849-5-4.

Категорија M64:

1. Tomašević A., **Stupar S.**, Grgur B., Onjia A., Mijin D.: *Electrochemical Degradation of Acid Blue*, 13th Symposium with International Participation "Novel Technologies and Economic Development", Faculty of Technology, Leskovac 2019. ISBN 978-86-89429-35-0.

5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Оригиналност ове докторске дисертације је проверена 12.04.2021. године на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204/22.06.2018). Помоћу програма iThenticate, утврђено је да подударање текста износи 9 %. Овај степен подударности последица је општих места, односно употребе стручних термина и података који се тичу обрађене теме, као и навођења дефиниција различитих појмова и објашњења параметара који се налазе у релацијама наведеним у тези. Део подударности се односи на претходно публиковане резултате докторандових истраживања, који су проистекли из његове дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

Стога сматрамо да је докторска дисертација Стевана Ступара у потпуности оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега напред изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација Стевана Ступара под називом *„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“* представља значајан, оригинални научни допринос у области Технолошког инжењерства, што је потврђено, између осталог и објављивањем радова у релевантним часописима међународног значаја, као и презентовањем резултата истраживања на конференцијама.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом *„Уклањање антрахинонских боја из водених раствора адсорпцијом, електрохемијском оксидацијом и вишим оксидационим процесима“* кандидата Стевана Ступара, маг. инж. прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се након завршетка процедуре, кандидат позове на усмену одбрану докторске дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду, 16.04.2021.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Душан Мијин, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

др Бранимир Гргур, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

др Радмила Јанчић-Хајнеман, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Антоније Оџија, ванредни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Анђелка Томашевић, виши научни сарадник
Института за пестициде и заштиту животне средине, Београд-Земун