

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Мине Јовановић, дипл. инж. технологије

Одлуком бр. 35/81 од 03.03.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Мине Јовановић, дипл. инж. технологије под насловом:

„УКЛАЊАЊЕ ЈОНА МЕТАЛА ИЗ ВОДЕНИХ РАСТВОРА КОРИШЋЕЊЕМ ЗЕОЛИТА: МЕХАНИЗАМ, КИНЕТИКА И ПРИМЕНА У ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ“

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија подноси Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 13.12.2013. - Кандидат Мина Јовановић, дипл. инж. технологије пријавила је тему за докторску дисертацију под насловом: „УКЛАЊАЊЕ ЈОНА МЕТАЛА ИЗ ВОДЕНИХ РАСТВОРА КОРИШЋЕЊЕМ ЗЕОЛИТА: МЕХАНИЗАМ, КИНЕТИКА И ПРИМЕНА У ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ“, а Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донело је одлуку о именовању Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације Мине Јовановић, дипл. инж. технологије под називом: „УКЛАЊАЊЕ ЈОНА МЕТАЛА ИЗ ВОДЕНИХ РАСТВОРА КОРИШЋЕЊЕМ ЗЕОЛИТА: МЕХАНИЗАМ, КИНЕТИКА И ПРИМЕНА У ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ“ (број одлуке 35/437 од 26.12.2013. године).
- 27.02.2014. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета усвојен је извештај Комисије за оцену научне заснованости предложене теме докторске дисертације под називом: „УКЛАЊАЊЕ ЈОНА МЕТАЛА ИЗ ВОДЕНИХ РАСТВОРА КОРИШЋЕЊЕМ ЗЕОЛИТА: МЕХАНИЗАМ, КИНЕТИКА И ПРИМЕНА У ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ“, а за менторе ове докторске дисертације именоване су др

Бојана Обрадовић, редовни професор ТМФ и др Невенка Рајић, редовни професор ТМФ (број одлуке 35/29 од 03.03.2014. године).

- 31.03.2014. - На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације Мине Јовановић, дипл. инж. технологије под називом: „УКЛАЊАЊЕ ЈОНА МЕТАЛА ИЗ ВОДЕНИХ РАСТВОРА КОРИШЋЕЊЕМ ЗЕОЛИТА: МЕХАНИЗАМ, КИНЕТИКА И ПРИМЕНА У ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ“ (број одлуке 61206-1367/2-14 од 31.03.2014. године).

- 02.10.2014. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је одлука о продужењу рока за завршетак студија Мине Јовановић, дипл. инж. технологије за два семестра шк. 2014/2015. године (број одлуке 35/266 од 02.10.2014. године).

- 09.07.2015. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је одлука о продужењу рока за завршетак студија Мине Јовановић, дипл. инж. технологије за два семестра шк. 2015/2016. године (број одлуке 35/268 од 20.07.2015. године).

- 03.03.2016. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је одлука о именовању чланова Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Мине Јовановић, дипл. инж. технологије под називом: „УКЛАЊАЊЕ ЈОНА МЕТАЛА ИЗ ВОДЕНИХ РАСТВОРА КОРИШЋЕЊЕМ ЗЕОЛИТА: МЕХАНИЗАМ, КИНЕТИКА И ПРИМЕНА У ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ“ (број одлуке 35/81 од 03.03.2016. године).

Кандидат Мина Јовановић, дипл. инж. технологије је уписала докторске студије на студијском програму Хемијско инжењерство на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду школске 2008/09. године.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Хемијско инжењерство, али једним делом и научној области Хемијске науке, ужа научна област Неорганска хемија, за које је Технолошко-металуршки факултет, Универзитета у Београду, матична установа. Ментори су др Бојана Обрадовић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду (ужа научна област Хемијско инжењерство) и др Невенка Рајић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду (ужа научна област Неорганска хемија). Оба ментора су на основу досадашњих објављених публикација и искуства компетентна да руководе израдом ове дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Мина Јовановић, дипл. инж. технологије, рођена је 18.11.1983. године у Београду где је стекла основно и средње образовање. Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду уписала је 2002. године. Основне студије је завршила 2008. године на Одсеку за хемијско инжењерство са средњом оценом у току студија 8,25 и оценом 10 на дипломском раду. Школске 2008/09. године уписала је докторске студије на истом факултету, студијски програм Хемијско инжењерство. Успешно је положила све испите предвиђене планом и програмом са средњом оценом 10 и оценом 10 на Завршном испиту са темом

„Уклањање јона тешких метала из водених раствора помоћу природног зеолита“. Школске 2014/2015. и 2015/2016. Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета продужило је рок за завршетак докторских студија.

Мина Јовановић је савладала програм сталног усавршавања под називом “Fundamental and Applications of Controlled Release and Drug Delevary” (Контролисано ослобађање – основни принципи и примена у развоју терапијских система) одржаног 23. маја 2013. године у трајању од 8 часова под руководством др Николаса Пепаса (Nicholas A. Peppas), професора на Универзитету Тексас у Остину, САД, признатог од стране Сената Универзитета у Београду. Такође, похађала је Међународну летњу школу трансфера технологије и знања коју су организовали Центар за трансфер технологије Универзитета у Београду у сарадњи са Истраживачким центром Европске Комисије (European Commission Joint Research Center) и Заводом за интелектуалну својину Републике Србије, у Београду, 17.-24.09.2014.

Од 2009. године Мина Јовановић се бави експерименталним истраживањима у области примене зеолита за уклањање јона тешких метала из водених раствора. У звање истраживач-приправник изабрана је септембра 2009. године, а у звање истраживач-сарадник 31. маја 2011. године. Од маја 2009. године запослена је на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, а од 1. октобра 2009. године у Иновационом центру Технолошко-металуршког факултета. Мина Јовановић је до сада учествовала у реализацији 1 међународног научно-истраживачког пројекта и 3 научно-истраживачка пројекта финансираних од надлежног Министарства Републике Србије:

1. „Drinking water and wastewater treatment using zeolites – PUREWATER“, Еурека Е!4208, ангажована од 2009. до 2011. године.
2. „Структурне модификације и реакције микропорозних и мезопорозних материјала“ пројекат бр. 142055 у оквиру основних истраживања Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, ангажована од 2009. до 2011. године.
3. „Порозни материјали на бази оксида у заштити животне средине од генотоксичних супстанци“, пројекат бр. 172018 у оквиру основних истраживања Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, ангажована од 2011. до 2012. године.
4. „Синтеза, развој технологија добијања и примена наноструктурних мултифункционалних материјала дефинисаних својстава“, пројекат бр. ИИИ45019, Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, (2011-2016), ангажована од 2012.

Као студент докторских студија Мина Јовановић је била ангажована на извођењу експерименталних вежби из предмета Општа хемија I и Општа хемија II у току школске 2009/2010, 2010/2011 и 2011/2012. године на Катедри за општу и неорганску хемију ТМФ.

Мина Јовановић је аутор 5 радова објављених у врхунским међународним научним часописима (2 рада M21a, 3 рада M21), 3 рада саопштена на скуповима међународног значаја штампана у целини, 4 рада саопштена на скуповима међународног значаја штампана у изводу, и 4 рада саопштена на скуповима националног значаја штампана у изводу. Члан је Зеолитског друштва Србије од оснивања 2011. године. Користи програмске пакете “MatLab” и “COMSOL Multiphysics”. Говори енглески језик.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата, написана је на 211 страна, у оквиру којих се налазе 62 слике, 23 табеле, и 150 литературних навода, и организована је у девет целина: Увод, Теоријски део, Циљеви истраживања, Материјали и методе, Резултати, Дискусија, Закључак, Прилог и Литература. На почетку дисертације дат је кратак Резиме на српском и енглеском језику, а Биографија кандидата дата је на крају. По својој форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводном делу дате су полазне основе истраживања и описан је проблем загађења отпадних вода јонима тешких метала као и методе које се користе за њихово уклањање. Посебно је наглашен значај адсорпције која је једна од најзаступљенијих метода. При томе, истакнут је значај и актуелност примене зеолита с обзиром на велики адсорпциони капацитет и добру селективност у погледу великог броја јона тешких метала.

Теоријски део се састоји из четири потпоглавља: Зеолити, Поступци уклањања јона тешких метала из отпадних вода, Механизам адсорпције и јонске измене, и Зеолити као адсорбенти у континуалним системима. У потпоглављу „Зеолити“ описани су структура и својства природног зеолита клиноптилолита и синтетичког зеолита А, процес јонске измене и преглед најважнијих примена зеолита. У потпоглављу „Поступци уклањања јона тешких метала из отпадних вода“ приказане су најважније методе и технологије третмана отпадних вода за уклањање јона тешких метала и примена зеолита као адсорбената у овим процесима. У потпоглављу „Механизам адсорпције и јонске измене“ описани су механизми хемијске и физичке адсорпције, као и механизам и кинетички модели јонске измене која се одвија у зеолитима приликом уклањања јона тешких метала из водених раствора. У потпоглављу „Зеолити као адсорбенти у континуалним системима“ описани су системи са пакованим и флуидизованим слојем честица зеолита у третману отпадних вода, са посебним освртом на хидродинамичке карактеристике и оперативне параметре флуидизованих система.

У поглављу „Циљеви истраживања“ наведен је основни циљ, а затим и посебни циљеви ове докторске дисертације који се односе на утврђивање могућности примене зеолитског туфа богатог клиноптилолитом из лежишта Златокоп (Врањска Бања) и комерцијалног зеолита А у пречишћавању отпадних вода, испитивањем уклањања одабраних катјона двовалентних метала из водених раствора.

У поглављу „Материјали и методе“ наведени су коришћени материјали и реагенси, а затим и поступци који су примењени у експерименталном раду и то: обрада зеолитског туфа, испитивање кинетике адсорпције различитих катјона тешких метала (Cu(II), Mn(II), Zn(II), Ni(II) и Pb(II)) у суду са мешањем и испитивање хидродинамичких параметара и кинетике адсорпције Cu(II) и Mn(II) у колони са флуидизованим слојем куглица зеолита А. Такође, описан је и поступак десорпције Cu(II) и Mn(II) са куглица зеолита А, као и употреба куглица зеолита А у више циклуса адсорпције и десорпције Mn(II) у колони са флуидизацијом. Најзад, описане су и коришћене инструменталне методе: атомска

адсорпциона спектроскопија (ААС) којом је одређена концентрација испитиваних катјона у раствору и скенирајућа електронска микроскопија (СЕМ) којом је испитана морфологија узорака зеолита А.

У поглављу „Резултати“ приказани су резултати добијени током експерименталних испитивања као и резултати кинетичког моделовања у оквиру пет потпоглавља: Развој кинетичког модела адсорпције јона тешких метала на зеолиту заснованог на механизму јонске измене, Адсорпција М(II) на NaClI у суду са мешањем, Валидација кинетичког модела два равнотежна процеса, Испитивање адсорпције М(II) на зеолиту А у суду са мешањем, и Испитивање могућности примене куглица зеолита 4А у флуидизованом слоју за уклањање Cu(II) из водених раствора.

У потпоглављу „Развој кинетичког модела адсорпције јона тешких метала на зеолиту заснованог на механизму јонске измене“ приказано је извођење нових кинетичких модела који су укључили један и два равнотежна процеса уз различите почетне претпоставке.

У потпоглављу „Адсорпција М(II) на NaClI у суду са мешањем“ приказани су резултати експерименталних испитивања адсорпције Cu(II), Mn(II), Zn(II), Ni(II) и Pb(II) на природном зеолиту клиноптилолиту који је претходно обогаћен натријумом (NaClI), а затим и одређивање равнотежних параметара адсорпције, као и примена кинетичких модела на експерименталне податке. Примењени су Лагергренови модели кинетике псеудо-првог и псеудо-другог реда, и нови кинетички модели засновани на једном и два равнотежна процеса. Показало се да Лагергренов модел кинетике псеудо-првог реда, као и модели засновани на једном равнотежном процесу не могу да опишу експерименталне резултате. Са друге стране, Лагергренов модел кинетике псеудо-другог реда успешно је описао кинетику адсорпције Pb(II), док је у случају осталих катјона добијено добро слагање модела са експерименталним подацима у каснијем току адсорпције када је постигнуто више од 50 % равнотежног капацитета. Нов кинетички модел два равнотежна процеса успешно је описао кинетику адсорпције свих испитиваних катјона у току читавог времена адсорпције. При томе су одређене три кинетичке константе за сваку експерименталну серију.

У оквиру потпоглавља „Валидација кинетичког модела два равнотежна процеса“ анализиране су добијене кинетичке константе модела заснованог на два равнотежна процеса што је омогућило квантитативно поређење параметара адсорпције различитих врста катјона. У следећем кораку су испитане предиктивне могућности модела предвиђањем брзина адсорпције Zn(II) и Ni(II) са унапред дефинисаним кинетичким константама на основу претходних резултата моделовања. Поређење резултата предвиђања модела и експерименталних података показало је одлично слагање.

У потпоглављу „Испитивање адсорпције М(II) на зеолиту А у суду са мешањем“ приказани су резултати експерименталних испитивања адсорпције Cu(II) и Mn(II) на куглицама зеолита А, а затим и одређивање равнотежних параметара адсорпције, као и резултати примене кинетичких модела на експерименталне податке. Поред тога, приказани су и резултати испитивања десорпције катјона са куглица зеолита А. Показало се да је на температурама до 45 °C процес ограничен брзином преноса масе тако да су експериментални подаци успешно описани моделом унутрашње дифузије. На 55 °C брзина јонске измене постаје лимитирајући корак тако да је нов кинетички модел са великом тачношћу описао експерименталне резултате током читавог процеса адсорпције.

Десорпција испитиваних катјона успешно је изведена помоћу раствора динатријум-етилендиаминтетраацетата (Na_2EDTA) у току 1–2 h.

У потпоглављу „Испитивање могућности примене куглица зеолита 4А у флуидизованом слоју за уклањање Cu(II) из водених раствора“ приказано је одређивање хидродинамичких карактеристика и оперативних режима флуидизованих слојева за две величине куглица зеолита А, а затим и испитивање и моделовање кинетике уклањања Cu(II) из водених раствора у флуидизованим системима са рецикулацијом. Одређене су зависности висине слоја од површинске брзине воде, а затим и минималне брзине флуидизације и брзине одношења испитиваних куглица и упоређене са вредностима израчунатим на основу више модела предложених у литератури. Кинетика адсорпције Cu(II) успешно је описана помоћу модела унутрашње дифузије са привидним коефицијентима дифузије нешто већим у односу на резултате одређене у суду са мешањем, што је објашњено бољим мешањем у флуидизованом систему.

У поглављу „Дискусија“, детаљно су анализирани и дискутовани резултати експерименталних испитивања и кинетичког моделовања добијени у овој докторској дисертацији у односу на резултате објављене у литератури. Природни зеолит клиноптилолит је показао добар адсорпциони капацитет у односу на испитиване катјоне што је упоредиво са подацима објављеним у литератури за природне зеолите из других регија, при чему је за постизање равнотеже било потребно 24 – 48 h. Афинитет природног зеолита пратио је тренд: $\text{Pb(II)} > \text{Cu(II)} > \text{Zn(II)} > \text{Mn(II)} > \text{Ni(II)}$ што одговара подацима из литературе. Кинетика адсорпције Pb(II) успешно је описана Лагергреновим моделом псеудо-другог реда што је такође у складу са објављеним резултатима за клиноптилолите из других регија. Међутим, резултати приказани у овом раду, као и у литератури, за кинетичке константе дали су вредности које нису показале логично објашњиву зависност од температуре. Ово је објашњено чињеницом да током адсорпције за зеолит није задовољена претпоставка Лагергреновог модела да је почетна концентрација катјона метала у раствору у константна. У овом раду зато је развијен нов кинетички модел два равнотежна процеса заснован на механизму јонске измене и успешно примењен на адсорпцију катјона тешких метала на природном зеолиту, као и на адсорпцију Mn(II) на куглицама зеолита А. Значајно је да се овај модел може свести на Лагергренов модел псеудо-другог реда уз претпоставку да се реакција отпуштања Na^+ -јона из зеолитне решетке одиграва до краја што је у случају адсорпције Pb(II) и задовољено. Нов кинетички модел је омогућио и квантитативно поређење параметара процеса адсорпције различитих катјона метала при чему су вредности кинетичке константе модела указале на сличан тренд као при одређивању афинитета природног зеолита и то по редоследу: $\text{Pb(II)} > \text{Cu(II)} > \text{Zn(II)} \approx \text{Mn(II)} > \text{Ni(II)}$. Са друге стране, брзина адсорпције Cu(II) и Mn(II) на куглицама зеолита А ограничена је брзином преноса масе тако да се на температурама до 45 °C успешно описује моделом унутрашње дифузије. Привидни коефицијенти дифузије су реда величине $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ што одговара подацима из литературе ($10^{-12} - 10^{-17} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) који су одређени за различите врсте катјона метала када је лимитирајући корак процеса дифузија кроз зеолитну решетку. Куглице зеолита А успешно су примењене за адсорпцију Cu(II) у флуидизованом слоју, док је при адсорпцији Mn(II) у поновљеним циклусима адсорпције и десорпције показано да се ефикасност уклањања овог катјона одржава на вредности ~70 % током 4 циклуса, а након тога опада. Узевши у обзир да се на основу прегледа литературе може закључити да се примена флуидизације зеолита за уклањање катјона метала из отпадних вода тек однедавно истражује, резултати добијени у овој дисертацији

показују значајан потенцијал примене зеолита А у флуидизованом систему у индустријским условима.

У поглављу „Закључак“ концизно су изнети постигнути резултати који у потпуности одговарају постављеним циљевима дисертације.

У поглављу „Прилог“ дат је списак слика и табела, као и симбола коришћених у тексту, а поглавље „Литература“ садржи списак коришћене литературе. На крају дисертације је дата кратка биографија кандидата и изјаве о ауторству, истоветности штампане и електронске верзије рада и о коришћењу.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Загађење воде јонима тешких метала је проблем широких размера који све више привлачи пажњу научне јавности ради осмишљавања нових метода за њихово уклањање. У оквиру различитих физичких, хемијских, микробиолошких и електрохемијских метода, адсорпција је једна од најпогоднијих и често коришћених техника. Предности ове методе су једноставна примена и ефикасност поступка која је у највећој мери одређена карактеристикама адсорбента. Поред тога, засићен адсорбент се једноставно уклања из течне фазе, може да се регенерише и поновно употреби. Данас се значајна пажња посвећује изналажењу и испитивању нових адсорбената који поред добрих адсорпционих карактеристика, треба да имају и ниску цену, да су лако доступни и еколошки погодни. Зеолити испуњавају ове захтеве због чега су нашли разноврсне примене као адсорбенти, јоно-измењивачи, молекулска сита и катализатори, а у фокусу многих истраживања је примена зеолита у третману отпадних вода за уклањање јона тешких метала. Ови алумосиликати лако измењују јоне натријума, калијума, калцијума и магнезијума који се налазе у зеолитској решетки са другим катјонима присутним у раствору, испољавајући велики адсорпциони капацитет и добру селективност. Зеолити могу бити природни и синтетички при чему Р. Србија располаже великим налазиштима природног зеолита – клиноптилолита. У овом раду, изабрани су природни зеолит-клиноптилолит из лежишта Златокоп у околини Врањске Бање, и зеолит А који је комерцијално најдоступнији синтетички зеолит. При томе, истраживање је обухватило одређивање адсорпционог капацитета зеолита, равнотежних параметара, механизма и кинетике процеса, потребног времена контакта зеолита и раствора за постизање равнотеже, као и афинитета клиноптилолита у погледу уклањања пет врста катјона (Cu(II) , Mn(II) , Zn(II) , Ni(II) и Pb(II)). Наведени параметри су од великог значаја за пројектовање процеса већих размера, нпр. процеса у пилот-постројењу, као и за примену у индустрији. У литератури се може наћи више кинетичких модела за описивање брзине адсорпције катјона метала на различитим врстама зеолита, при чему је један од најчешће примењиваних Лагергренов модел кинетике псеудо-другог реда. У овом раду посебна пажња је посвећена управо разматрању кинетике процеса адсорпције са фокусом на механизам самог процеса. Објашњени су разлози за одређена одступања Лагергреновог модела од експерименталних података који су запажени како у самом раду, тако и у литератури, а затим је развијен нов кинетички модел који се заснова на механизму јонске измене и приказан је кроз два равнотежна процеса. Показано је да нов модел успешно описује адсорпцију испитиваних

катјона на природном зеолиту, као и адсорпцију Mn(II) на зеолиту A што га чини применљивим не само за већи број катјона већ и различите зеолиите као адсорбенте.

Поред тога, за практичну примену у процесима индустријских размера потребна су претходна истраживања у лабораторијским системима. Конкретно, зеолиите се широко испитују и примењују као адсорбенти у системима са пакованим слојем честица који имају предности због једноставне конструкције и руковања. Међутим, недостаци ових система се огледају у појави канала и мртвих зона, а тиме и концентрационих и температурних градијената, па се однедавно испитује примена зеолиита у флуидизованим системима. Флуидизацијом честица обезбеђују се добро мешање течне и чврсте фазе чиме се превазилазе недостаци система са пакованим слојем. У овом раду је испитана примена куглица зеолиита A за уклањање Cu(II) и Mn(II) из водених раствора у лабораторијској колони са флуидизованим слојем при чему су одређене хидродинамичке карактеристике и оперативни режими система. На тај начин, област и резултати истраживања у овој докторској дисертацији прате савремене научне токове, а по оригиналности се истичу, како разматрањем механизма процеса адсорпције и развојем новог кинетичког модела, тако и испитивањем флуидизованог система за потенцијалну практичну примену. При томе, важно је истаћи мултидисциплинарни приступ у овој тези у којој су повезани хемијски аспекти процеса адсорпције и инжењерски принципи пројектовања, карактеризације и примене лабораторијских експерименталних система.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији цитирано је 150 литературних навода, од којих највећи број чине најновији радови из међународних часописа са тематиком значајном за израду докторске дисертације. У току израде докторске дисертације кандидат је прегледао доступну литературу везану за: структуру, својства и примену природних и синтетичких зеолиита, методе уклањања јона тешких метала из отпадних вода, механизам и кинетичко моделовање процеса адсорпције јона тешких метала на зеолитима, и пројектовање, карактеризацију и примену флуидизованих система. Наведене референце укључују велики број аутора и садрже експерименталне резултате истраживања, кинетичко моделовање, анализе и дискусију добијених резултата, као и теоријске основе примењених метода истраживања. Из пописа литературе која је коришћена у истраживању и радова који су проистекли из саме дисертације, уочава се адекватно познавање предметне области истраживања и актуелног стања истраживања у овој области у свету од стране кандидата.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Процес адсорпције различитих катјона метала (Cu(II), Mn(II), Zn(II), Ni(II), Pb(II)) на природном зеолиту у прашкастом облику и синтетичком зеолиту A у облику куглица испитан је у затвореним термостатираним судовима са мешањем што представља стандардну методу за одређивање кинетике процеса. При томе су узорци раствора након одређених временских интервала анализирани применом атомске апсорпционе спектроскопије (AAS) ради одређивања концентрације заосталих катјона у воденим растворима са тачношћу мерења од $\pm 2\%$. Нов кинетички модел је нумерички решен и примењен на експерименталне податке у програмском пакету *MatLab*. За испитивање флуидизације куглица зеолиита A пројектована је и конструисана колона са

расподељивачем течности на дну и два прикључка за пиезометре ради мерења пада притиска у слоју. Морфологија узорака зеолита А пре и након експеримената адсорпције анализирана је применом скенирајуће електронске микроскопије (СЕМ).

3.4. Применљивост остварених резултата

У овој докторској дисертацији испитана је адсорпција пет врста катјона тешких метала (Cu(II), Mn(II), Zn(II), Ni(II), Pb(II)) на прашкастом клиноптилолиту. Развијен је нов кинетички модел заснован на механизму јонске измене који се може применити и на процесе адсорпције других катјона метала као и на другим врстама зеолита који нису испитивани у овој дисертацији. У практичном погледу, резултати су показали добар капацитет природног зеолита за адсорпцију испитиваних катјона уз постизање равнотеже у периоду од 24 – 48 h. Имајући у виду да Р. Србија располаже великим количинама овог зеолита са лежиштем Златокоп у Врањској Бањи које се сматра највећим лежиштем у Европи, добијени резултати директно указују на применљивост клиноптилолита у третману отпадних вода. Поред тога, у овој докторској дисертацији испитана је и примена гранулисаног зеолита А у флуидизованом слоју за уклањање катјона тешких метала из водених раствора. Процес адсорпције је био лимитиран унутрашњом дифузијом, али и поред ове чињенице, гранулисан зеолит А показује добар капацитет везивања Cu(II) и Mn(II), указујући на потенцијал за оптимизацију ради повећања ефикасности процеса. Узевши све добијене резултате у обзир, ова докторска дисертација упућује и на даљи правац истраживања у погледу гранулације природног зеолита и примене гранулисаног природног зеолита у флуидизованом слоју који би био укључен у поступке прераде отпадних вода.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

У свом досадашњем истраживачком раду, кандидат Мина Јовановић, дипл. инж. технологије, показала је самосталност и стручност у критичком разматрању литературних података, припреми и реализацији експеримената, и анализи и обради резултата. Посебно треба истаћи развој новог кинетичког модела применом програмског пакета *MatLab* и самостално постављање премиса модела. На основу досадашњег залагања и постигнутих резултата Комисија је мишљења да кандидат поседује све квалитете неопходне за самосталан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру ове докторске дисертације остварен је значајан научни допринос у развоју система за пречишћавање воде и уклањање јона тешких метала применом природних и синтетичких зеолита као адсорбената. Посебно се могу издвојити следећи кључни научни доприноси:

- одређени су параметри адсорпције Cu(II), Mn(II), Zn(II), Ni(II) и Pb(II), на природном зеолиту клиноптилолиту и то: капацитет адсорпције, равнотежни

параметри, механизам и кинетика процеса, потребно време контакта за постизање равнотеже, као и афинитет зеолита у односу на испитиване катјоне;

- развијен је и успешно примењен нов кинетички модел два равнотежна процеса за описивање кинетике адсорпције катјона тешких метала на зеолиту заснован на механизму јонске измене;
- одређени су параметри адсорпције Cu(II) и Mn(II) на гранулисаном зеолиту А и то: капацитет адсорпције, равнотежни параметри, кинетика процеса и потребно време контакта за постизање равнотеже;
- дефинисани су хидродинамички параметри и оперативни режими флуидизованих слојева гранулизованог зеолита А;
- одређена је кинетика уклањања Cu(II) у флуидизованом слоју гранулизованог зеолита А;
- одређен је поступак за регенерацију зеолита А и десорпцију Cu(II) и Mn(II) ;
- показана је применљивост флуидизованог слоја гранулизованог зеолита А у поновљеним циклусима адсорпције и десорпције Mn(II) .

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања у оквиру ове дисертације су конципирана на основу дефинисаних циљева и детаљне анализе литературних података из области примене зеолита као адсорбената за уклањање јона тешких метала из водених раствора за примену у пречишћавању отпадних вода. Примењена је методологија испитивања процеса адсорпције у складу са савременом литературом, али је и критички испитана кинетика процеса и применљивост кинетичких модела предложених у литератури, тако да је развијен нов кинетички модел два равнотежна процеса која су заснована на механизму јонске измене. Овај модел успешно је примењен на експерименталне податке адсорпције катјона Cu(II) , Mn(II) , Zn(II) , Ni(II) и Pb(II) на природном зеолиту и Mn(II) на зеолиту А. Добијене кинетичке константе су омогућиле квантитативно поређење параметара процеса адсорпције тако да су вредности ових константи указале на сличан тренд као при одређивању афинитета природног зеолита и то по редоследу: $\text{Pb(II)} > \text{Cu(II)} > \text{Zn(II)} \approx \text{Mn(II)} > \text{Ni(II)}$. Модел је такође показао одлично предвиђања кинетике адсорпције Zn(II) и Ni(II) на природном зеолиту. Узевши у обзир све наведене резултате описивања адсорпције различитих катјона метала на две врсте зеолита, може се закључити да нов кинетички модел успешно квантитативно изражава основне карактеристике процеса тако да је применљив за ширу употребу у описивању и анализи кинетике адсорпције различитих катјона метала на различитим врстама зеолита.

Поред тога, у овој докторској дисертацији успешно је развијен и примењен систем са флуидизацијом гранулизованог зеолита А за уклањање катјона тешких метала из водених раствора на лабораторијском нивоу. Ова истраживања су у сагласности са најновијим трендовима испитивања примене зеолита као адсорбената у флуидизованим системима за обраду отпадних вода тако да дају недвосмислен допринос овој области. Добијени резултати су указали на значајан потенцијал флуидизованих система са гранулисаним зеолитом за индустријску примену уз могућности регенерације и употребе у поновљеним циклусима.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Мина Јовановић, дипл. инж. технологије је потврдила резултате истраживања у својој докторској дисертацији објављивањем радова у врхунским међународним часописима, као и саопштењима на међународним и националним конференцијама. Из дисертације су проистекла 2 рада у међународним часописима изузетних вредности, 2 рада у врхунским међународним часописима, 2 рада саопштена на скуповима међународног значаја штампана у целини, 3 рада саопштена на скуповима међународног значаја штампана у изводу, и 3 рада саопштена на скуповима националног значаја штампана у изводу.

1. Рад у међународном часопису изузетних вредности – M21a

1. **Mina Jovanovic**, Iztok Arcon, Janez Kovac, Natasa Novak Tusar, Bojana Obradovic, Nevenka Rajic, *Removal of manganese in batch and fluidized bed systems using beads of zeolite A as adsorbent*, Micropor. Mesopor. Mater., **226**, 378-385, **2016**, ISSN: 1387-1811, IF 2014: 3.453 (Chemistry, Applied 7/72)
2. **Mina Jovanovic**, Nevenka Rajic, Bojana Obradovic, *Novel kinetic model of the removal of divalent heavy metal ions from aqueous solutions by natural clinoptilolite*, J. Hazard. Mater., **233-234**, 57-64, **2012**, ISSN: 0304-3894, IF 2012: 3.925 (Engineering, Civil 2/122)

2. Рад у врхунском међународном часопису – M21

1. **Mina Jovanovic**, Zeljko Grbavcic, Nevenka Rajic, Bojana Obradovic, *Removal of Cu(II) from aqueous solutions by using fluidized zeolite A beads: Hydrodynamic and sorption studies*, Chem. Eng. Sci., **117**, 85-92, **2014**, ISSN: 0009-2509, IF 2013: 2.613, (Engineering, Chemical 24/133)
2. Nevenka Rajic, Djordje Stojakovic, **Mina Jovanovic**, Natasa Zabukovec, Matjaz Mazaj, Venceslav Kaucic, *Removal of nickel(II) ions from aqueous solutions using the natural clinoptilolite and preparation of nano-NiO on the exhausted clinoptilolite*, Appl. Surf. Sci., **257**(5), 1524-1532, **2010**, ISSN: 0169-4332, IF 2011: 2.103 (Materials Science, Coatings and Films 2/18)

3. Саопштење са скупа међународног значаја штампано у целини – M33

1. **Mina Jovanovic**, Nevenka Rajic, Zeljko Grbavcic, Bojana Obradovic, *Zeolite A in a fluidized bed reactor: Hydrodynamic and Cu(II) sorption studies*, Proceedings of the 5th Serbian-Croatian-Slovenian Symposium on Zeolites, Zlatibor, Serbia, **2013.**, pp. 128-131
2. **Mina Jovanovic**, Nevenka Rajic, Bojana Obradovic, *Kinetic modelling of copper removal from aqueous solutions using natural zeolite*, Proceedings of the 4th Slovenian-Croatian Symposium on Zeolites, Ljubljana, Slovenia **2011.**, pp. 81- 84

4. Саопштење са скупа међународног значаја штампано у изводу – M34

1. **Mina Jovanovic**, Darja Maucec, Janez Kovac, Bojana Obradovic, Natasa Novak Tusar, Nevenka Rajic, *Removal of Mn(II) from aqueous solution using zeolite A: Mechanism and kinetics*, Slonano 2012, Ljubljana, Slovenija, October 24 – 26, **2012.**, Book of Abstracts, pp. 97
2. **Mina Jovanovic**, Nevenka Rajic, Bojana Obradovic, *Cu(II) sorption on natural clinoptilolite: experiments and kinetics modeling*, 5th International FEZA Conference, Valencia, Spain, **2011.**, Book of Abstracts, pp. 621-622
3. **Mina Jovanovic**, Ivana Culibrk, Nevenka Rajic, Bojana Obradovic, *Removal of copper ions from aqueous solutions by zeolite A in a fluidized bed reactor*, 2nd International Workshop on Characterization, Properties and Applications of Nanostructured Ceramics, Polymers and Composites, TMF, Belgrade, Serbia, **2011.**, Book of Abstracts, P21, pp. 45

5. Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу – M64

1. **Mina Jovanović**, Iztok Arcon, Natasa Novak Tusar, Bojana Obradović, Nevenka Rajić, *Mn(II) adsorption onto commercial zeolite A: process kinetics and mechanism*, 13th Young Researchers Conference – Materials Science and Engineering, SASA, December 10 – 12, **2014.**, Belgrade, Serbia, Programme and the Book of Abstracts, XII/4, pp. 39
2. **Mina Jovanović**, Srdjan Vidović, Nevenka Rajić, Bojana Obradović, *Removal of copper from aqueous solutions using a fluidized bed reactor*, Tenth Young Researchers Conference – Materials Science and Engineering, SASA, Belgrade, Serbia, **2011.**, Book of Abstracts, II/8, pp. 31
3. **Mina Jovanovic**, Djordje Stojakovic, Nevenka Rajic, *Removal of Ni(II) ions from aqueous solutions by natural zeolite*, Osma konferencija mladih istraživača Nauka i inženjerstvo novih materijala, Beograd, Srbija, Decembar 21-23, **2009.**, Knjiga apstrakata, pp. 26

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

5.1.Кратак осврт на дисертацију у целини

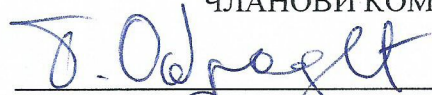
На основу изнетог, Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Мине Јовановић, дипл. инж. технологије, под називом „Уклањање јона метала из водених раствора коришћењем зеолита: механизам, кинетика и примена у флуидизованом слоју“ представља значајан и оригинални научни допринос у области Технолошког инжењерства и, посебно Хемијског инжењерства, као и једним делом и у области Хемијских наука, што је потврђено радовима објављеним у часописима међународног значаја највишег ранга. Предмет и циљеви истраживања су јасно наведени и остварени. Комисија сматра да докторска дисертација под називом „Уклањање јона метала из водених раствора коришћењем зеолита: механизам, кинетика и примена у флуидизованом слоју“ у потпуности испуњава све захтеване критеријуме. Кандидат је показао изузетну склоност и способност за бављење научно-истраживачким радом, као и самосталност у свим фазама израде ове дисертације.

5.2. Предлог комисије Наставно-научном већу

Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да прихвати овај Извештај и да га заједно са поднетом дисертацијом Мине Јовановић, дипл. инж. технологије, под називом „Уклањање јона метала из водених раствора коришћењем зеолита: механизам, кинетика и примена у флуидизованом слоју” изложи на увид јавности у законски предвиђеном року и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничко-технолошких наука Универзитета у Београду, као и да након завршетка процедуре, позове кандидата на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду, 18. мај 2016. године

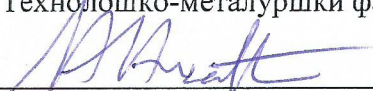
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



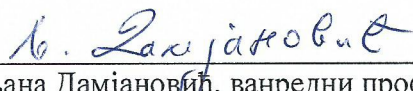
Др Бојана Обрадовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет



Др Невенка Рајић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет



Др Никола Никачевић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет



Др Љиљана Дамјановић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Факултет за физичку хемију