УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ФАКУЛТЕТ ЗА ФИЗИЧКУ ХЕМИЈУ

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

број: 1850

датум: 18.11.2025.

На I редовној седници Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију одржаној 13.11.2025. године именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидаткиње Данијеле З. Текић, мастер физикохемичара, под насловом:

„Примена водених двофазних система са јонским течностима за уклањање органских загађујућих супстанци и регенерацију угљеничних адсорбенаса“

Одлуком Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду, са IV редовне седнице од 16.01.2025. године одобрена је израда докторске дисертације под наведеним насловом. На основу те одлуке, Веће научних области природних наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 30.01.2025. године дало сагласност да се прихвати предложена тема докторске дисертације.

Након прегледа и анализе докторске дисертације кандидата, Наставно-научном већу подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

А. Приказ садржаја дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње Данијеле З. Текић написана је на српском језику, на 121 страна А4 формата куцаног текста, припремљена према упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду (фонт Cambria величине 12 pt и проред 1). Дисертација се састоји из следећих 8 поглавља: **Увод** (1 страна), **Теоријски увод** (14 страна), **Циљ рада** (1 страна), **Експериментални део** (11 страна), **Резултати и дискусија** (33 страна), **Закључак** (4 стране), **Литература** (192 навода, 14 страна) и **Прилози** (26 страна). Поред наведеног, дисертација садржи и насловне стране на српском и енглеском језику (2 стране), списак ментора и чланова комисије (1 страна), захвалницу (1 страна), сажетке на српском и енглеском језику (4 стране), Садржај (2 стране), **Биографија кандидаткиње** (1 страна) и **Библиографија** (2 стране), као и прилоге прописане правилима Универзитета о подношењу докторске дисертације на одобравање (4 стране).

У дисертацији је приказано 58 слика (7 у Уводном делу, 5 у Експерименталном делу, 20 у поглављу Резултати и дискусија и 26 у Прилозима) и 30 табела (3 у Експерименталном делу, 7 у Резултатима и дискусији и 20 у Прилозима) од којих 58 слика и 30 табела су приоистекле из истраживања кандидата.

У поглављу **Увод** дат је осврт на проблем загађења вода органским супстанцама и значај њиховог уклањања из животне средине, као и циљ ове докторске дисертације који обухвата испитивање примене јонских течности у третману вода загађених органским

загађујућим супстанцама, како кроз формирање водених двофазних система као алтернативне методе уклањања, тако и кроз развој стратегија регенерације активног угља коришћеног у процесима адсорпције.

У поглављу **Теоријски увод** дат је преглед основних појмова и релевантних истраживања која се односе на проблематику уклањања органских загађујућих супстанци из вода. Посебна пажња посвећена је органофосфатним пестицидима и синтетским бојама као припадницима ове групе једињења, као и анализи актуелних метода њиховог уклањања. У оквиру поглавља разматране су и структура и физичко-хемијска својства јонских течности, као и могућности њихове примене у формирању водених двофазних система са солима. Посебан део посвећен је прегледу актуелних истраживања која се односе на примену ових система за уклањање органских загађујућих супстанци. Такође, представљена је примена адсорпције са активним угљем као једна од најчешће коришћених метода у третману загађених вода, са посебним освртом на стратегије регенерације адсорбенса. На крају, обрађене су и методе оптимизације процеса које се примењују у истраживањима ради постизања најбољих услова за ефикасно уклањање загађујућих супстанци.

Поглавље **Циљ рада** обухвата јасно дефинисане циљеве истраживања реализоване у оквиру ове докторске дисертације. Главни циљ представља примену водених двофазних система са јонским течностима за уклањање загађујућих супстанци из воде кроз два приступа: директну екстракцију као ефикасну алтернативу традиционалним методама и интеграцију технологије са јонским течностима у процес адсорпције ради регенерације угљеничних адсорбенаса.

У поглављу **Експериментални део** приказани су материјали, коришћене хемикалије и методе примењене у оквиру истраживања. Посебна пажња посвећена је синтези јонских течности, методи одређивања фазних дијаграма, методи испитивања екстракционе способности система са јонским течностима за уклањање органофосфатних пестицида, методи оптимизације процеса и примене на реалним узорцима. Детаљно су описани поступци испитивања растворљивости, изолације и регенерације модел пестицида хлорпирифоса, као и процене цитотоксичности одабране јонске течности. У наставку су представљене методе регенерације активног угља засићеног органским загађујућим супстанцама у виду анјонских боја, које обухватају методе карактеризације адсорбенса, поступке испитивања адсорпције синтетских боја, избор и оптимизацију система са одабраном јонском течности за регенерацију, као и методе евалуације ефикасности и одрживости процеса.

У поглављу **Резултати и дискусија** представљени су и критички анализирани резултати добијени током испитивања формирања водених двофазних система са јонским течностима и њихове примене за уклањање органских загађујућих супстанци. Детаљно су размотрени утицаји различитих катјона и анјона јонских течности на фазне дијаграме, као и перформансе система са различитим јонским течностима у екстракцији органофосфатних пестицида. Након одабира погодног система, представљени су резултати оптимизације оперативних параметара као што су температура, pH, дужина везне линије и однос запремина фаза. Поред тога, приказана је примењивост оптимизованог система на реалним узорцима отпадних вода и дизајниран је интегрисани процес пречишћавања органских загађујућих супстанци, који обухвата истовремену екстракцију и могућност регенерације компоненти воденог двофазног система.

У наставку поглавља, резултати везани за регенерацију активног угља засићеног органским загађујућим супстанцама су обрађени кроз карактеризацију адсорбенса, испитивање адсорпције синтетских боја, анализу интеракција помоћу ФТИЦ спектроскопије и оптимизацију процеса регенерације применом метода површине одговора. Такође, приказана је процена поновне употребе регенерисаног активног угља

и одрживости целокупног процеса адсорпције и регенерације. На крају, резултати добијени применом технологије водених двофазних система са јонским течностима су упоређени са перформансама интегрисаних процеса адсорпције и регенерације активног угља.

У поглављу **Закључак** сумирани су кључни резултати остварени у оквиру ове докторске дисертације и издвојени закључци који из њих произилазе.

У поглављу **Литература** дат је преглед цитираних радова и књига, наведени по редоследу њиховог појављивања у тексту, при чему су публикације релевантне и већина је новијег датума.

У полгављу **Прилози** се налазе додатни резултати, укључујући табеле и слике, који допуњују и илуструју резултате приказане у главном тексту дисертације.

Б. Кратак преглед остварених резултата

У оквиру ове докторске дисертације успешно је испитана примена водених двофазних система са јонским течностима за уклањање органофосфатних пестицида из воде, као и примена система са јонским течностима за регенерацију активног угља засићеног синтетским бојама. Три одабрана органофосфатна пестицида била су малатион, азинфос-метил и хлорпирифос, док су као представници анјонских боја испитане брилијантно плава и тартразин. За адсорпцију боја коришћен је комерцијални активни угаљ.

За испитивање првог приступа синтетисана је серија јонских течности које су карактерисане ФТИЦ методом. Као друга компонента система примењен је цитратни пуфер. Добијени су фазни дијаграми за све испитане системе и анализиран је утицај катјона и анјона јонских течности на формирање водених двофазних система. Утврђено је да је хидрофобност главни фактор који одређује способност формирања двофазних система, те је редослед способности формирања наведених система био следећи: [TBP][Sal] > [bbim][DCN] > [TBA][Sal] > [bbim][Sal] > [bbim]Br. Након тога испитана је серија система истог састава из двофазног региона ради селекције најпогоднијег система за даља истраживања. Сви системи су показали високу ефикасност, постижући готово потпуну екстракцију свих органофосфатних пестицида, а као најисплативији и технички најповољнији изабран је систем са тетрабутилфосфонијум-салицилатом [TBP][Sal]. У оквиру оптимизације испитан је утицај дужине везне линије, односа запремина фаза, pH вредности и температуре. Оптимизован систем је успешно примењен на реалном узорку воде, где је постигнуто потпуно уклањање пестицида. Испитан је и капацитет система одређивањем растворљивости модел пестицида хлорпирифоса, као и могућност његове изолације, при чему је постигнуто 97% изолације. Јонска течност је регенерисана и поново коришћена у три узастопна циклуса, при чему је у сваком циклусу постигнута готово потпуна ефикасност. Цитотоксичност јонске течности испитана је због 0,5% заостатка у пречишћеној води, а резултати су показали да је у тим концентрационим опсезима ниско токсична.

У другом делу истраживања испитана је примена јонских течности за регенерацију активног угља засићеног синтетским бојама. Извршена је карактеризација комерцијалног активног угља, који је показао вредност тачке нултог наелектрисања од 7,33, приближно једнак број киселих и базних функционалних група и средњу порозност. Механизам адсорпције брилијантно плаве боје најбоље је описан Лангмир–Фројндлиховим моделом (R^2 = 0.99, red. χ^2 = 1.75). Код тартразина најпогоднијим се показао Фројндлихов модел (R^2 = 0.99, red. χ^2 = 1.75), који је указао на могућу иреверзибилност адсорпције. ФТИЦ анализа потврдила је да се адсорпција углавном

одвија путем π–π и хидрофобних интеракција уз допринос водоничних и електростатичких интеракција. Након испитивања адсорпционих механизама, испитана је серија водених раствора јонских течности за регенерацију активног угља засићеног наведеним бојама. Ефикасност регенерације активног угља зависила је од комбинације катјона и анјона јонских течности. Показано је да салицилатни анјони остварују π–π интеракције са ароматичним прстеновима боја, док хидрофобни катјони, као што су $[TBP]^+$ и $[bmim]^+$, поспешују десорпцију путем хидрофобних интеракција. Највећа ефикасност регенерације активног угља засићеног брилијантно плавом постигнута је са [TBP][Sal] и [bbim][Sal] (≈100%), док је за тартразин постигнута вредност од 70% са [TBP][Sal]. Утврђено је да pH раствора има мање значајан утицај у односу на специфичне интеракције између јонских течности и молекула боја. За даљу оптимизацију методом површине одговора одабран је систем са [TBP][Sal]. Варирани су масени проценат јонске течности, време контакта, температура и однос течне и чврсте фазе. Постигнуто је задовољавајуће слагање предвиђања модела и експериментално добијених вредности ефикасности регенерације при оптималним условима. При оптималним условима за активни угаљ засићен брилијантно плавом постигнута је 100% ефикасност ргенерације, док је за активни угаљ засићен тартразином постигнута 79,97% ефикасност регенерације. Активни угаљ је успешно поново коришћен у три узастопна циклуса адсорпције и регенерације, при чему је прилично очуван адсорпциони капацитет. За систем са брилијантно плавом адсорпција је опала са 99,0% на 55,8% током три циклуса, док је за систем са тартразином остала стабилна (80,1-86,3%), уз готово непромењену ефикасност регенерације за обе боје (99,9-99,8% за брилијантно плаву и 80,1-90,0% за тартразин). ФТИЦ анализом регенерисаног активног угља установљене су могуће интеракције јонских течности са површином угља, што је потврђено појавом нових апсорпционих трака у спектрима у односу на полазни материјал. Додатак цитрата у концентрацијама од 10 и 20 мас. % омогућило је формирање водених двофазних система, чиме је потврђено очување јонске течности и њено концентровање заједно са бојама. Максимална ефикасност екстракције износила је 80,52% за тартразин и 99,37% за брилијантно плаву за 20 мас.% цитрата.

Из оба дела дисертације произлазе предлози интегрисаних процеса који обухватају пречишћавање воде контаминиране пестицидима применом водених двофазних система са јонским течностима и процес адсорпције и регенерације активног угља коришћеног за уклањање анјонских боја као модел молекула. Тако конципирани процеси омогућавају истовремену елиминацију органских загађујућих супстанци и рециклирање употребљених компоненти, чиме се доприноси развоју одрживих и ефикасних технологија за третман отпадних вода.

В. Упоредна анализа резултата кандидата са резултатима из литературе

Загађење воде представља један од најозбиљнијих еколошких изазова савременог доба, што доводи до угрожавања водених екосистема и здравља људи [1]. У воденим срединама концентрације појединих органских загађујућих супстанци, као што су органофосфатни пестициди, често премашују безбедносне границе, док се синтетске боје све више препознају као нова класа загађујућих супстанци због своје постојаности и токсичности у воденом окружењу [2,3].

Водени двофазни системи са јонским течностима представљају новију област истраживања у контексту уклањања органских загађујућих супстанци из отпадних вода, што потврђује ограничен број доступних студија, које су се углавном фокусирале на примену ових система за уклањање пестицида и синтетских боја [4]. У литератури су за

ову сврху најчешће проучаване имидазолијумске и пиридинијумске јонске течности у комбинацији са неорганским солима, при чему су постигнуте високе ефикасности екстракције, које у појединим случајевима достижу и потпуну екстракцију (100%) [4]. У оквиру ове дисертације, међутим, фокус је био усмерен на синтезу и примену еколошки прихватљивијих јонских течности, чији катјони и анјони обезбеђују ниску токсичност и већу компатибилност са животном средином. То је постигнуто синтезом јонских течности симетричних катјона са краћим алкил ланцима, што смањује хидрофобност и самим тим и потенцијалну токсичност [5]. Поред тога, као исољавајући агенси одабрани су цитрати, због њихове биорасположивости и минималног утицаја на животну средину. Осмишљен оптимизовани интегрисани процес представљен у овој дисертацији омогућио је потпуну екстракцију органофосфатних пестицида (100%), у складу са принципима зелене хемије и без генерисања секундарног отпада.

Када је у питању регенерација угљеничних адсорбенаса, у литератури до сада нису истражене примене система са јонским течностима за ту сврху, иако бројни аутори наглашавају потребу за развојем ефикасних и еколошки прихватљивих стратегија које би омогућиле адекватно управљање ислуженог активног угља који се ствара у великим количинама [6,7]. У доступној литератури већина истраживања регенерације активног угља заснива се на термичким и хемијским методама [8,9]. Међутим, иако постижу високу ефикасност (>90%), ове методе стварају секундарни отпад, повећавају еколошки ризик и често укључују употребу агресивних реагенаса попут испарљивих органских растварача и јаких киселина и база. У оквиру ове дисертације наведени изазови су успешно превазиђени применом система који такође показују високу ефикасност (>80%), без генерисања секундарног отпада, будући да се све компоненте процеса могу поново употребити, док су, поред тога, коришћене јонске течности одабране тако да поседују већу компатибилност са животном средином. Високе ефикасности регенерације биле су узроковане специфичним интеракцијама између катјона и анјона јонских течности, при чему се посебно истиче доминантан утицај салицилатног анјона и π–π интеракција, за разлику од већине литературних података где се десорпција заснивала искључиво на манипулацији pH и одбојним електростатичким интеракцијама које су узроковале десорпцију [10]. На основу добијених резултата, у овом делу дисертације предложен је интегрисан процес који обједињује адсорпцију и регенерацију активног угља, чиме се обезбеђује висока ефикасност, минимизује утицај на животну средину и доприноси развоју одрживих технологија за третман отпадних вода.

Предложена два приступа дала су нови научни увид у примену јонских течности у области развоја интегрисаних, енергетски и еколошки ефикасних технологија за третман отпадних вода и регенерације угљеничних адсорбенаса.

Референце

[1] R.K. Mishra, S.S. Mentha, Y. Misra, N. Dwivedi, Emerging pollutants of severe environmental concern in water and wastewater: A comprehensive review on current developments and future research, Water-Energy Nexus, 6 (2023) 74.

[2] S. Khan, M. Naushad, M. Govarthanan, J. Iqbal, S.M. Alfadul, Emerging contaminants of high concern for the environment: Current trends and future research, Environ. Res., 207 (December 2021) (2022) 112609.

[3] M.S. Hossain, M.A.Z. Chowdhury, M.K. Pramanik, M.A. Rahman, A.N.M. Fakhruddin, M.K. Alam, Determination of selected pesticides in water samples adjacent to agricultural fields and removal of organophosphorus insecticide chlorpyrifos using soil bacterial isolates, Appl. Water Sci., 5 (2) (2015) 171.

[4] E.A. Oke, S.P. Ijardar, Insights into the separation of metals, dyes and pesticides using ionic liquid based aqueous biphasic systems, J. Mol. Liq., 334 (2021) 116027.
[5] A.R.P. Gonçalves, X. Paredes, A.F. Cristino, F.J.V. Santos, C.S.G.P. Queirós, Ionic Liquids—A Review of Their Toxicity to Living Organisms, Int. J. Mol. Sci., 22 (11) (2021) 5612.
[6] B.G. Fouda-Mbanga, O. Onotu, Z. Tywabi-Ngeva, Advantages of the reuse of spent adsorbents and potential applications in environmental remediation: A review, Green Anal. Chem., 11 (2024) 100156.
[7] S. Satyam, S. Patra, Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: A comprehensive review, Heliyon, 10 (9) (2024) e29573.
[8] A. Larasati, G.D. Fowler, N.J.D. Graham, Insights into chemical regeneration of activated carbon for water treatment, J. Environ. Chem. Eng., 9 (4) (2021) 105555.
[9] K. Rathinam, V. Mauer, C. Bläker, C. Pasel, L. Landwehrkamp, D. Bathen, S. Panglisch, Eliminating Luck and Chance in the Reactivation Process: A Systematic and Quantitative Study of the Thermal Reactivation of Activated Carbons, C-Journal Carbon Res., 9 (4) (2023) 1.
[10] M. Vakili, S. Deng, L. Shen, D. Shan, D. Liu, G. Yu, Regeneration of Chitosan-Based Adsorbents for Eliminating Dyes from Aqueous Solutions, Sep. Purif. Rev., 48 (1) (2019) 1.

Г. Научни радови и саопштења публиковани из резултата дисертације

Из тезе кандидаткиње проистекао је један рад објављен у водећем међународном часопису категорије М21а+, један рад објављен у водећем међународном часопису категорије М21, два саопштења са међународног скупа штампана у целини М33 и три саопштења са међународног скупа штампана у изводу М34.

Радови у водећем међународном часопису категорије М21а+

Jocić A., Marić S., Tekić D., Lazarević-Pašti T., Mušović J., Filipović Tričković J., Dimitrijević A., Complete removal of organophosphate pesticides from wastewaters with sustainable ionic liquid-based aqueous two-phase strategy, J. Water Process Eng., 64 (2024) 105621. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105621

Радови у водећем међународном часопису категорије М21

Tekić D., Mušović J., Milojević-Rakić M., Jocić A., Dimitrijević A., Innovative green strategy for the regeneration of spent activated carbon via ionic liquid-based systems. Appl. Sci. (2025), 15, 9880. https://doi.org/10.3390/app15189880

Саопштења са међународног скупа штампана у целини (М33)

Tekić D., Mušović J., Jocić A., Marić S., Dimitrijević A., Dual approach for sustainable food dye removal from water using ionic liquids: assessing aqueous biphasic systems and adsorbent regeneration, 8th Workshop: Food and Drug Safety and Quality, Beograd, 2024, Proceeding : 115, ISBN 978-86-7306-174-0

Tekić D., Marić S., Jocić A., Mušović J., Lazarević Pašti T., Tasić T., Milanković V.,

Dimitrijević A., Innovative approach to regenerate activated carbon adsorbing chlorpyrifos using salicylate ionic liquid aqueous solutions, PHYSICAL CHEMISTRY 2024, 17th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Belgrade, Serbia, ISBN 978-85-82475-46-0

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (М34)

Tekić D., Dimitrijević A., Jocić A., Marić S., Mušović J., Enhanced regeneration of adsorbent material through innovative application of ionic liquids, 3rd Difenew International Student Conference Disc 2023, Novi Sad, 2023, Proceeding : 66, ISBN 978-86-6022-632-9.

Tekić D., Dimitrijević A., Jocić A., Marić S., Mušović J., Maximising pesticide extraction efficiency with ionic liquid-based aqueous biphasic systems optimisation approach, 3rd Difenew International Student Conference Disc 2023, Novi Sad, 2023, Proceeding : 65, ISBN 978-86-6022-632-9.

Tekić D., Mušović J., Marić S., Dimitrijević A., Jocić A., Novel approach for pesticide adsorbent regeneration using ionic liquids and salt additives, 4th Difenew International Student Conference Disc 2024, Novi Sad, 2024, Proceeding : 83, ISBN 978-86-6022-715-9

Д. Провера оригиналности докторске дисертације

Провера оригиналности докторске дисертације извршена је на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду („Гласник Универзитета у Београду“ број 204 од 22.06.2018.). Помоћу програма iThenticate извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидата под називом „Примена водених двофазних система са јонским течностима за уклањање органских загађујућих супстанци и регенерацију угљеничних адсорбенаса“ и установљено је да количина подударања текста (similarity index) износи 5%. Наведени степен подударности последица је употребе цитата, личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, тзв. општих места и података, као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из дисертације што је у складу са чланом 9. поменутог Правилника. На основу свега изнетог, Комисија је утврдила да је докторска дисертација кандидаткиње Данијеле З. Текић оригинална као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

Ђ. Закључак комисије

На основу изложеног може се закључити да резултати кандидаткиње Данијеле З. Текић представљају оригиналан и значајан научни допринос у области физичке хемије, посебно у ужој научној области заштите животне средине и физичке хемије материјала. Део резултата докторске дисертације кандидаткиње публикован је у научним часописима и то један у водећем међународном часопису категорије М21а+ и један рад објављен у водећем међународном часопису категорије М21. У складу са наведеним, Комисија сматра да кандидаткиња испуњава све услове за прихватање завршене

докторске дисертације прописане од стране Универзитета у Београду и услове дефинисане Правилником о изради и оцени докторске дисертације на Факултету за физичку хемију Универзитета у Београду. На основу изложеног, Комисија позитивно оцењује дисертацију мастер физикохемичара Данијеле З. Текић под називом: **„Примена водених двофазних система са јонским течностима за уклањање органских загађујућих супстанци и регенерацију угљеничних адсорбенаса“** и предлаже Наставно – научном већу Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду да прихвати ову оцену Комисије, чиме би били испуњени сви услови за одобрење јавне одбране докторске дисертације и стицања звања кандидаткиње - доктор физичкохемијских наука.

У Београду, 18.11.2025.године

Чланови комисије:

_____

др Немања Гаврилов, ванредовни професор
Универзитет у Београду - Факултет за Физичку хемијудр

_____

др Бојана Недић Васиљевић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Факултет за Физичку хемију

_____

Даница Бајук – Богдановић, научни саветник
Универзитет у Београду - Факултет за Физичку хемију

_____

др Александра Димитријевић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке
„Винча“ – Институт од националног значаја за Р. Србију