

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Јелене М. Димитријевић, мастер хемичара

Одлуком бр. 35/111 од 9. априла 2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидаткиње Јелене М. Димитријевић, мастер хемичара под насловом „Припрема и карактеризација мембрана на бази модификованих зеолита и целулозе за уклањање токсичних катјона и органских полутаната из отпадних вода”.

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. УВОД**

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Школске 2018/2019. године кандидаткиња Јелена М. Димитријевић, мастер хемичар, уписала је докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Хемијско инжењерство.

26. маја 2022. године поднета је пријава теме за израду докторске дисертације под бројем 21/12 кандидаткиње Јелене М. Димитријевић под називом: „Припрема и карактеризација мембрана на бази модификованих зеолита и целулозе за уклањање токсичних катјона и органских полутаната из отпадних вода”, под руководством др Сање Јевтић, доцента Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Јелене Петровић, научног сарадника Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина.

2. јуна 2022. године - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/133 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације под насловом: „Припрема и карактеризација мембрана на бази модификованих зеолита и целулозе за уклањање токсичних катјона и органских полутаната из отпадних вода“.

30. јуна 2022. године - На седници Наставно-научног Технолошко-металуршког факултета већа донета је одлука бр. 35/168 о прихватању Реферата Комисије о подобности теме и кандидата и о одређивању ментора др Сање Јевтић, доцента Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Јелене Петровић, научног сарадника Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина.

4. јула 2022. године - На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност бр. 61206-2825/2-22 на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и именовању ментора.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду и члана 76. Статута Технолошко-металуршког факултета, кандидаткињи је одобрено 28. октобра 2024. године одлуком бр 20/222 продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију студијског програма.

9. априла 2026. године - На седници Наставно-научног већа донета је одлука бр. 35/111 о именовану Комисије за оцену докторске дисертације кандидаткиње Јелене М. Димитријевић.

## 1.2. Научна област дисертације

Истраживања 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. Докторска дисертација обухвата развој, модификацију и карактеризацију композитних материјала на бази зеолита и лигноцелулозне биомасе, као и испитивање њихове примене у процесима уклањања органских и неорганских полутаната из водених система, што је у потпуности у складу са научном облашћу хемијског инжењерства. Ментори ове докторске дисертације су др Сања Јевтић, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Јелена Петровић, виши научни сарадник Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина. На основу досадашњег научноистраживачког рада, објављених научних публикација и искуства ментори у потпуности испуњавају услове за вођење докторске дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Јелена М. Димитријевић, мастер хемичар, рођена је 13. новембра 1990. године у Београду. Основну школу и Пету београдску гимназију, природно-математичког смера, завршила је у Београду. Школске 2009/2010. године уписала је основне академске студије на Хемијском факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Дипломирани хемичар – професор хемије. Основне академске студије завршила је 2016. године. Исте године уписала је мастер академске студије на Хемијском факултету Универзитета у Београду, у области аналитичке хемије, које је завршила 2017. године одбраном завршног мастер рада под насловом „Оптимизација хроматографског система применом мицеларне танкослојне хроматографије” са просечном оценом током студија 9,00. Докторске академске студије уписала је школске 2018/2019. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду на студијском програму Хемијско инжењерство. Током докторских академских студија положила је све испите предвиђене студијским програмом, укључујући и завршни испит, са просечном оценом 10 чиме је показала изузетан академски успех и висок ниво теоријског знања. У периоду од јуна до септембра 2013. године била је на стручној пракси у лабораторији за отпадне воде ЈКП „Београдски водовод и канализација”. Од септембра 2016. до фебруара 2021. године радила је као наставник хемије у неколико средњих школа у Београду где је обавила приправнички стаж и стекла лиценцу за рад у настави. Од фебруара 2021. године запослена је у Институту за технологију нуклеарних и других минералних сировина у Београду у Централној лабораторији за хемијска испитивања. Одлуком Научног већа Института 2022. године изабрана је у звање истраживач сарадник. У оквиру свог рада учествује у анализи неорганских и органских материјала, као и у развоју и примени аналитичких метода.

Кандидаткиња је учествовала у реализацији научноистраживачких пројеката у области развоја и валоризације отпадне биомасе применом поступка хидротермалне карбонизације.

Научноистраживачки рад Јелене Димитријевић усмерен је на развој, модификацију и примену адсорпционих материјала за уклањање органских и неорганских полутаната из водених система. Кандидаткиња је аутор укупно 13 научних радова у категорији М20, и то два рада категорије М21а, четири рада категорије М21, шест радова категорије М22 и један рад категорије М24, као и око 45 саопштења на међународним и националним научним скуповима (категорије М33, М34 и М63), једног техничког решења, што указује на континуиран и значајан научноистраживачки ангажман.

Научноистраживачка активност Јелене Димитријевић евидентирана је у међународним базама података, укључујући ORCID идентификатор (0000-0002-3830-2392) и Scopus Author ID (59041458500), што омогућава увид у њен научни опус и резултате истраживања.

Течно говори енглески и немачки језик.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње Јелене Димитријевић под називом: „Припрема и карактеризација мембрана на бази модификованих зеолита и целулозе за уклањање токсичних катјона и органских полутаната из отпадних вода” написана је на 190 нумерисаних страна, у оквиру којих се налази 69 слика, 58 табела и 264 литературна навода. Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература.

Поред тога, дисертација садржи Резиме на српском и енглеском језику и Садржај. На крају дисертације дата је Биографија кандидаткиње, као и Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада, Изјава о коришћењу и Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације.

По својој форми и садржају, докторска дисертација испуњава све прописане стандарде Универзитета у Београду за израду докторских дисертација.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У поглављу Увод приказани су предмет и циљ докторске дисертације, уз јасно образложење значаја развоја нових адсорпционих материјала за уклањање токсичних катјона и органских полутаната из водених система. Полазећи од проблема присуства тешких метала, органских боја, пестицида и оксианјона у отпадним водама, указано је на ограничења појединачних неорганских и органских адсорбената, као и на потребу за развојем мултифункционалних хибридних система. У овом поглављу дефинисане су полазне хипотезе истраживања, засноване на претпоставци да комбинација (3-Аминопропил)триетоксисилан (APTES) - модификованих зеолита, хемијски модификоване лигноцелулозне биомасе и алгинатне матрице може довести до добијања структурно стабилних и адсорпционо ефикасних материјала, погодних за примену у једнокомпонентним и мултикомпонентним системима. Посебно је наглашено да се синергијским комбиновањем минералне, органске и полимерне компоненте могу унапредити доступност активних места, механичка стабилност и селективност према различитим класама загађујућих материја.

У Теоријском делу рада дат је систематизован и критички обрађен преглед литературних података који се односе на адсорпцију у воденим системима, природу и улогу порозних материјала, као и значај активних места у процесима везивања различитих врста полутаната. Разматрани су зеолити, како природни, тако и синтетички као микропорозни, алумосиликатни материјали, њихова структура, својство јонске измене и могућност хемијске функционализације. Детаљно је приказана лигноцелулозна биомаса овсене сламе, њен састав, улога целулозе, хемицелулозе и лигнина, као и разлози за њену контролисану модификацију. У оквиру овог поглавља разматран је и значај дубоких еутектичких растварача и епокси-силанизације као стратегија унапређења површинских својстава биомасе. Посебна пажња посвећена је алгинату као полимерној матрици за формирање сферних хидрогелних мембрана и концепту хибридних адсорбената који у једном систему обједињују јоноизмењивачку способност зеолита, реактивност органске фазе и механичку стабилност полимерне матрице. На крају теоријског дела приказани су физички и хемијски аспекти адсорпције, укључујући кинетичке, изотермске и термодинамичке моделе, као и механизми везивања јона метала, органских боја и пестицида.

У поглављу Експериментални део представљени су материјали и поступци коришћени у овом истраживању, који обухватају више међусобно повезаних нивоа припреме адсорбената. Најпре су описани природни и синтетички зеолити, поступци њихове припреме и АРТЕС-модификације, при чему су праћене промене у садржају амино група и површинским својствима. Затим је приказана припрема овсене сламе, добијање дубоког еутектичког растварача и постепена модификација биомасе DES-ом и епокси-силанима, чиме су формиран различити органски адсорбенти. У наставку је приказан поступак имобилизације припремљених компоненти на бази зеолита и биомасе у алгинатној матрици, чиме су добијене хибридне сферне мембране различитог састава. Посебан значај овог дела рада огледа се у томе што експериментални приступ није ограничен само на један материјал, већ обухвата читав низ испитиваних система: модификоване и немодификоване зеолите, модификовану и немодификовану биомасу, као и четири хибридне алгинатне мембране. Детаљно су приказане примењене методе карактеризације, укључујући FTIR, XRD, TG/DTG, SEM/EDS, BET, одређивање рН<sub>pzc</sub>, испитивање стабилности у води и под ултразвуком, као и одређивање садржаја амино и епоксидних група. Поред тога, наведени су услови адсорпционих експеримената, аналитичке методе за одређивање концентрације загађујућих материја (AAS, UV-Vis, HPLC-UV), испитивање механизма јонске измене, моделовање кинетике, изотерми и термодинамике, као и испитивање антибактеријске активности и статистичка анализа резултата.

Поглавље Резултати и дискусија представља централни део дисертације и конципирано је тако да прати постепену еволуцију система, од појединачних компоненти ка сложеним хибридним мембранама. Најпре је приказана детаљна карактеризација зеолита, помоћу XRD, FTIR, SEM/EDS, TG/DTG, BET анализа и одређивање тачке нултог наелектрисања (рН<sub>pzc</sub>), чиме су утврђене промене настале АРТЕС-модификацијом и потврђено увођење нових функционалних места. Након тога је анализирана биомаса, односно нативна и модификована овсена слама, при чему су SEM, FTIR, рН<sub>pzc</sub>, термичка анализа, стабилност и садржај епоксидних група показали да DES третман и епокси-силанизација значајно мењају површинску организацију, доступност активних центара и интеракције са полутантима.

У даљем току поглавља дата је карактеризација хибридних сферних мембрана, која је обухватила микроструктурну анализу, елементни састав, FTIR карактеризацију, одређивање тачке нултог наелектрисања, испитивање структурне и механичке стабилности, као и тест бубрења. Ови резултати су послужили као основа за структурну и функционалну класификацију испитиваних адсорбената, односно за повезивање састава и модификације материјала са њиховим површинским особинама и потенцијалним механизмима адсорпције. Посебно је показано да поједине мембране, као што су ANZ-*alg* и ANZ/IOS-*Ep-*alg**, испољавају базнији карактер и већи афинитет ка неутралним и слабо анјонским органским молекулима, док IOS-*Ep-*alg** и ANZ/OS-*Ep-*alg**, услед израженије киселе површине, показују већу склоност ка везивању катјонских боја.

Посебно су анализирани резултати адсорпције јона метала на АРТЕС-модификованим зеолитима, где је извршена упоредна анализа природних и модификованих зеолита, испитана кинетика, изотермско понашање, термодинамички параметри, механизам јонске измене, као и могућност регенерације и поновне употребе. Показано је да АРТЕС-функционализација не само да повећава адсорпциону ефикасност, већ доприноси и бољој регенерабилности при чему модификовани узорци након више циклуса задржавају више од 80 % почетне ефикасности. Поред тога, код Ag<sup>+</sup>-засићених адсорбената испитана је и антибактеријска активност, чиме је функција материјала проширена и ван домена класичне адсорпције.

У наставку су приказани резултати адсорпције на материјалима на бази биомасе, где је упоређено понашање нативне и модификоване овсене сламе, уз посебан осврт на адсорпцију јона метала у вишекомпонентном систему Pb<sup>2+</sup>/Cu<sup>2+</sup>/Zn<sup>2+</sup>. Анализирани су експериментални кинетички профили, модел унутрашње дифузије, изотермско понашање, термодинамички параметри, механизам јонске измене и могућност регенерације. Овим делом рада показано је како се постепеном модификацијом биомасе може контролисати селективност, капацитет и стабилност органске фазе, али и где су границе њене самосталне примене, што је представљало важан основ за прелазак ка хибридним системима.

Најобимнији и научно најзначајнији део поглавља односи се на адсорпцију у хибридним алгинатним сферним мембранама, где су испитиване четири мембране различитог састава: ANZ-*alg*, IOS-*Ep-*alg**, ANZ/IOS-*Ep-*alg** и ANZ/OS-*Ep-*alg**. За ове материјале праћен је утицај времена контакта, извршено

кинетичко моделовање, спроведена изотермска и термодинамичка анализа, испитан утицај рН, одређивање тачке нултог наелектрисања, ζ-потенцијала, јонске јачине и конкурентних јона, као и регенерација, стабилност и могућност поновне употребе. Истраживање је обухватило различите класе полутаната, укључујући Ag(I), Zn(II), Cu(II), Pb(II), Cr(VI), метил љубичасто и ацетамиприд, што омогућава ширу процену функционалности развијених материјала. Посебна вредност овог дела рада огледа се у томе што су различити резултати: морфолошки, хемијски, кинетички, изотермски, термодинамички и површински интегрисани у један механизам адсорпције који је омогућио избор оптималних мембрана у односу на класу полутанта. На тај начин није испитиван само капацитет везивања, већ и селективност, стабилност и практична примена сваког хибридног система.

У оквиру овог поглавља приказана је и антибактеријска активност сферних алгинатних мембрана засићених металним јонима, чиме је додатно проширена функционална вредност развијених материјала. На крају је дата статистичка анализа резултата којом је потврђена поузданост добијених експерименталних података и доследност уочених трендова.

У поглављу Закључак сумирани су најзначајнији резултати истраживања, при чему је јасно истакнуто да комбиновање АPTES-модификованих зеолита, DES/епокси-силаном модификоване биомасе и алгинатне матрице омогућава добијање хибридних мембрана чија су адсорпциона својства, стабилност и селективност виши у односу на појединачне компоненте. Закључци рада не представљају само резиме резултата већ и синтезу односа између структуре, модификације и понашања развијених материјала у различитим адсорпционим системима.

Поглавље Литература обухвата све цитиране и коришћене изворе релевантне за предмет истраживања, док дисертација садржи и све пратеће елементе у складу са прописаним стандардима Универзитета у Београду

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Загађење водених система јонима тешких метала и органским микрозагађујућим материјама представља један од најактуелнијих проблема савремене заштите животне средине. Посебан изазов данас више не представља само уклањање појединачних полутаната, већ развој материјала који могу ефикасно деловати у сложеним воденим системима, у присуству више врста загађујућих материја и под условима који су блиски реалним отпадним водама. У том контексту, истраживања усмерена ка развоју мултифункционалних, стабилних, регенерибилних и еколошки прихватљивих адсорбентата представљају један од најсавременијих праваца у области хемијског инжењерства и заштите животне средине.

Предмет ове докторске дисертације био је развој и испитивање хибридних адсорпционих материјала на бази модификованих зеолита и модификоване лигноцелулозне биомасе са циљем уклањања органских и неорганских полутаната из водених система. Савременост истраживања огледа се у томе што је рад усмерен на материјале који истовремено задовољавају више захтева: високу адсорпциону ефикасност, структурну и механичку стабилност, могућност поновне употребе, као и прилагодљивост различитим класама загађујућих материја. Посебан значај има чињеница да су у раду разматрани не само јони метала, већ и органски полутанти различитог порекла, укључујући боје и пестициде чиме је истраживање постављено шире и реалније у односу на велики број радова који се задржавају на једној класи полутаната.

Оригиналност дисертације огледа се, пре свега, у концептуалном и експерименталном приступу који не полази директно од финалног материјала, већ систематски прати развој адсорбента кроз више нивоа. У раду су најпре испитивани зеолити као неорганска компонента, затим њихова АPTES-модификација у циљу увођења амино група и промене површинских својстава. Паралелно са тим, испитивана је лигноцелулозна биомаса овсене сламе, најпре као полазни материјал, а затим након модификације дубоким еутектичким растварачем и епокси-силанима, чиме су циљано мењани доступност активних места, површинска реактивност и афинитет према различитим класама полутаната. Тек након

темељног разумевања понашања појединачних компоненти приступило се њиховом комбиновању и имобилизацији у алгинатној матрици, при чему су добијене четири хибридне сферне мембране различитог састава. Овако постављен истраживачки концепт представља посебну вредност рада, јер омогућава праћење односа између структуре, модификације и адсорпционог понашања материјала од најједноставнијег до најсложенијег система. Научна новина рада огледа се и у томе што нису испитивани само појединачни материјали, већ читав низ система: природни и модификовани зеолити, нативна и модификована биомаса, као и четири хибридне мембране, што је омогућило непосредно поређење доприноса сваке компоненте финалним својствима материјала. На тај начин је показано у којој мери АРТЕС-модификација зеолита утиче на јонску измену и површинску интеракцију, како DES третман и епокси-силанизација мењају структуру и реактивност биомасе и на који начин алгинатна матрица доприноси механичкој стабилности, порозности, регенерабилности и укупној променљивости хибридних мембрана. Управо овај прелаз од испитивања појединачних фаза ка разумевању њиховог синергијског деловања представља један од најоригиналнијих аспеката дисертације. Оригинално је додатно потврђена и чињеницом да рад обухвата не само детаљну карактеризацију материјала већ и њихову детаљну функционалну анализу. У дисертацији су примењене бројне савремене методе карактеризације, укључујући FTIR, XRD, SEM/EDS, TG/DTG, BET, одређивање рН<sub>pzc</sub>, испитивање стабилности и бубрења, као и одређивање садржаја аминокиселина и епоксидних група, чиме је обезбеђена поуздана основа за тумачење адсорпционог понашања добијених материјала. Поред тога, систематски су праћени утицаји рН вредности, времена контакта, почетне концентрације, температуре, конкурентних јона и јонске јачине, а добијени резултати су тумачени применом кинетичких, изотермских и термодинамичких модела. Оваква детаљна анализа омогућила је да се адсорпција не сагледа само кроз капацитет уклањања, већ и кроз механизам везивања, улогу појединачних активних места и стабилност система током рада и регенерације. Посебна савременост ове дисертације огледа се у оријентацији ка реалним условима примене. У раду су, поред једнокомпонентних, испитивани и мултикомпонентни системи, што је од кључног значаја јер се у стварним отпадним водама полутанти најчешће јављају истовремено. Испитивање стабилности, регенерације и поновне употребе адсорбента, као и праћење њихових својстава након више циклуса употребе додатно повећава научну и практичну вредност рада. Поред адсорпционих својстава, испитивана је и антибактеријска активност појединих система, чиме је функционални потенцијал развијених материјала проширен и изван класичног домена адсорпције. Ово указује да је дисертација конципирана не само као основно истраживање, већ и као основа за развој материјала са широм употребном вредношћу пре свега у третману вода.

Савременост и оригиналност истраживања огледају се и у томе што су резултати дисертације усмерени ка разумевању односа између структуре, површинских својстава и адсорпционог понашања хибридних материјала. Рад не даје само одговор на питање који материјал показује најбоље резултате, већ објашњава зашто поједини материјали испољавају већи афинитет према различитим класама полутаната и како модификације утичу на промену доминантних механизма везивања. Посебан допринос рада огледа се у детаљној анализи механизма интеракције изабраних полутаната, као и у сагледавању синергије неорганске, органске и полимерне фазе, која доводи до формирања материјала супериорних својстава у односу на појединачне компоненте.

На основу свега наведеног, Комисија оцењује да је тема докторске дисертације актуелна, научно савремена и оригинално постављена, а да спроведено истраживање представља значајан допринос развоју хибридних адсорпционих материјала за примену у третману отпадних вода.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији кандидаткиње Јелене Димитријевић коришћен је велики број тематски различитих литературних навода који у потпуности одговарају предмету и циљевима истраживања. Укупно је анализирано 264 литературна извора који обухватају научне радове из водећих међународних часописа, прегледне радове, монографије и публикације од значаја за развој области адсорпције и порозних материјала. Број литературних навода (264) последица је комплексности и интердисциплинарности теме истраживања, која обухвата развој композитних материјала заснованих на различитим сировинама (зеолити, лигноцелулозна биомаса и полимерне матрице), као и више класа полутаната и механизма адсорпције, што је условило укључивање ширег спектра релевантних научних извора. Кандидаткиња је у оквиру израде дисертације извршила систематичан и критички

преглед литературе који јој је омогућио повезивање различитих научних приступа у оквиру јединственог концепта развоја хибридних адсорбената. Посебно је значајно што већину коришћених извора чине радови новијег датума, објављени у реномираним међународним часописима, што указује на актуелност истраживања и праћење савремених научних токова. Истовремено, у раду су адекватно укључене и класичне публикације које представљају основу за разумевање адсорпционих процеса, кинетичких и изотермских модела, као и структурних карактеристика порозних материјала.

На основу литературних података дефинисани су правци модификације материјала, одабрани експериментални услови и методе карактеризације, док је у дискусији резултата извршено поређење добијених вредности са резултатима других аутора. Кандидаткиња је на тај начин показала способност критичке анализе литературе и њене примене у интерпретацији сопствених експерименталних резултата. Посебну вредност представља чињеница да су у дисертацији цитирани и научни радови који су директно проистекли из теме истраживања чиме је потврђена повезаност дисертације са објављеним научним резултатима и њена укљученост у међународни научни контекст. Ови радови додатно доприносе валидности и научној утемељености истраживања. На основу свега наведеног, може се закључити да је коришћена литература адекватна, савремена и релевантна, да је правилно и критички примењена, као и да представља поуздану основу за планирање, реализацију и тумачење резултата у овој докторској дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру ове докторске дисертације постављени задаци везани за развој и испитивање адсорпционих материјала на бази модификованих зеолита, лигноцелулозне биомасе и алгинатних хибридних мембрана реализовани су применом комбинације експерименталних метода и метода обраде података. Истраживање је обухватило више нивоа испитивања, од појединачних компоненти до сложених хибридних система, са циљем утврђивања утицаја структуре и модификације материјала на адсорпцију различитих класа полутаната, као и разумевања механизма адсорпције у једнокомпонентним и мултикомпонентним системима.

За остваривање постављених циљева коришћене су методе синтезе и хемијске модификације материјала, које обухватају АРТЕС-функционализацију зеолита, третман лигноцелулозне биомасе дубоким еутектичким растварачима и њену даљу модификацију епокси-силанским реактантима, као и имобилизацију добијених компоненти у алгинатној матрици ради формирања хибридних сферних мембрана различитог састава.

За карактеризацију материјала примењене су следеће методе: FTIR спектроскопија за идентификацију функционалних група, XRD анализа за одређивање кристалне структуре, SEM/EDS за анализу морфологије и елементног састава, TG/DTG за испитивање термичке стабилности, као и анализа за одређивање специфичне површине и порозности. Поред тога, одређиване су површинске карактеристике материјала (pH<sub>pzc</sub>), испитивана је стабилност у воденој средини и понашање при бубрењу, као и садржај функционалних група (амино и епоксидне групе), које имају кључну улогу у адсорпционим процесима.

Адсорпциона својства испитивана су кроз систематски осмишљене експерименте, који обухватају варијацију рН вредности, времена контакта, почетне концентрације полутаната и температуре, како у једнокомпонентним, тако и у мултикомпонентним системима. Концентрације испитиваних супстанци одређиване су применом одговарајућих аналитичких метода (AAS, UV-Vis и HPLC-UV) што је омогућило добијање поузданих резултата.

Обрада експерименталних података извршена је применом кинетичких модела (псеудо-првог и псеудо-другог реда), изотермских модела (Langmirov, Frojndlihov, Sipsov i Redlich–Peterson модел) као и термодинамичке анализе процеса адсорпције. Поред тога, примењени су модели унутрашње дифузије и анализа јонске измене, чиме је омогућено детаљно тумачење механизма транспорта и везивања полутаната унутар материјала.

Додатно, испитивана је регенерација и поновљива употреба адсорбената, као и њихова стабилност током више циклуса, док је код појединих система анализирана и антибактеријска активност. На овај начин, поред основних адсорпционих својстава, процењен је и потенцијал материјала за практичну примену.

Применом наведених метода омогућено је добијање поузданих резултата који омогућавају повезивање структуре, модификације и функционалности материјала, као и свеобухватно разумевање механизма адсорпције у испитиваним системима. На основу тога може се закључити да су примењене научне методе адекватно изабране, савремене и у потпуности прилагођене комплексности истраживања.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати добијени у оквиру ове докторске дисертације имају значајан научни и практични потенцијал, посебно у области третмана отпадних вода.

Развијени адсорпциони материјали, који обухватају модификоване зеолите, модификовану лигноцелулозну биомасу и хибридне алгинатне сферне мембране, показују високу ефикасност у уклањању различитих класа полутаната, укључујући јоне тешких метала, органске боје и пестициде. Посебна вредност рада огледа се у томе што су испитивани системи који ближе одражавају реалне услове, укључујући мултикомпонентне системе и присуство конкурентних јона, што резултате чини директно применљивим у пракси.

Комбиновањем неорганске, органске и полимерне компоненте омогућено је добијање материјала са унапређеним својствима при чему хибридне мембране показују повећану структурну стабилност, бољу контролу транспорта масе и могућност лакше примене у проточним и континуалним системима у односу на прашкасте адсорбенте. Ово је од посебног значаја за индустријску примену где је стабилност материјала и једноставност руковања од кључног значаја.

Поред високе адсорпционе ефикасности испитана је и могућност регенерације и поновне употребе адсорбената. Добијени резултати показали су да материјали задржавају значајан део својих својстава након више циклуса употребе што представља важан предуслов за економску и еколошку одрживост процеса.

Посебан допринос рада огледа се у утврђивању везе између структуре материјала, начина модификације и механизма адсорпције што омогућава рационалан избор и дизајн адсорбената у зависности од врсте полутанта. Овакав приступ има значајну примену у пројектовању нових материјала и оптимизацији постојећих технологија третмана вода. Добијени резултати представљају добру основу за даља истраживања и развој технологија заснованих на хибридним адсорпционим системима, као и за њихову потенцијалну примену у индустријским условима.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу резултата приказаних у докторској дисертацији, може се закључити да кандидаткиња Јелена Димитријевић поседује висок ниво теоријског знања и практичних компетенција неопходних за самосталан научноистраживачки рад у области хемијског инжењерства.

Током израде дисертације кандидаткиња је показала способност самосталног дефинисања научног проблема, постављања хипотеза и планирања комплексног експерименталног истраживања које обухвата више различитих материјала, метода и система. Посебно се истиче способност систематичног приступа, који обухвата развој материјала од појединачних компоненти до сложених хибридних система, као и њихово детаљно испитивање.

Јелена Димитријевић је успешно применила савремене експерименталне и аналитичке методе, као и одговарајуће математичке моделе за обраду и интерпретацију резултата. Показала је способност

критичке анализе добијених података, као и њиховог повезивања са литературним подацима и теоријским основама.

Посебан квалитет рада представља способност интеграције резултата добијених различитим методама у јединствену научну целину, као и формулисање јасних и аргументованих закључака.

Научна компетентност кандидаткиње потврђена је и објављивањем радова у међународним часописима категорије M20, као и учешћем на научним скуповима, што указује на способност представљања резултата научној јавности и активног укључивања у савремене истраживачке токове.

На основу свега наведеног, Комисија оцењује да кандидаткиња у потпуности поседује све неопходне способности за самосталан научноистраживачки рад.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру ове докторске дисертације остварени су следећи научни доприноси:

- Развијен је оригиналан и систематичан приступ дизајну хибридних адсорбената заснован на контролисаној интеграцији АРТЕС-модификованих зеолита, хемијски модификоване лигноцелулозне биомасе и алгинатне матрице, чиме је омогућено добијање материјала са унапред дефинисаним структурним и функционалним својствима.
- Успостављена је директна веза између структуре, начина модификације и адсорпционог понашања материјала, кроз систематско испитивање појединачних компоненти и њихових хибридних комбинација, што представља значајан допринос разумевању структурно-функционалних односа у адсорпционим системима.
- Показано је да АРТЕС-функционализација зеолита доводи до увођења нових активних места, промене површинске хемије и повећања афинитета према различитим класама полутаната, уз истовремено побољшање стабилности и могућности регенерације материјала.
- Утврђено је да третман лигноцелулозне биомасе дубоким еутектичким растварачима, праћен епокси-силанизацијом, доводи до значајних промена у морфологији, порозности и реактивности површине, што омогућава контролисано унапређење адсорпционих својстава органске фазе.
- Развијена су четири типа хибридних алгинатних сферних мембрана (ANZ-*alg*, IOS-*Ep-*alg**, ANZ/IOS-*Ep-*alg** и ANZ/OS-*Ep-*alg**), при чему је показано да варијација у саставу компоненти и начину модификације омогућава циљано подешавање селективности и ефикасности адсорпције.
- Утврђено је да имобилизација адсорбената у алгинатној матрици доводи до значајног побољшања механичке и структурне стабилности што им омогућава примену у динамичким системима, у односу на појединачне прашкасте материјале.
- Кроз свеобухватну примену FTIR, XRD, SEM/EDS, TG/DTG, BET, pH<sub>zpc</sub> и других метода, утврђене су промене у структури, површинским својствима и стабилности материјала, чиме је обезбеђена поуздана основа за интерпретацију адсорпционих процеса.
- Детаљно су анализирани кинетички, изотермски и термодинамички аспекти адсорпције, чиме је омогућено квантитативно описивање процеса и утврђивање доминантних механизма везивања полутаната.
- Показано је да адсорпција у хибридних системима представља резултат синергијског деловања више механизма (јонска измена, електростатичке интеракције, комплексирање и специфичне органске интеракције) при чему доминантан механизам зависи од природе полутанта и састава адсорбента.
- Испитана је адсорпција различитих врста загађивача (Pb(II), Cu(II), Zn(II), Ag(I) и Cr(VI), органске боје и пестициди), чиме је доказана мултифункционалност и широка могућност примене развијених адсорбената.
- Утврђено је да понашање адсорбената у мултикомпонентним системима значајно одступа од понашања у једнокомпонентним чиме је указано на важност испитивања реалнијих система и дат допринос разумевању конкурентних интеракција.

- Показано је да хибридне мембране задржавају висок адсорпциони капацитет и након више циклуса десорпције, чиме је потврђена њихова регенерабилност и потенцијал за дуготрајну примену.
- Испитана је стабилност материјала у воденој средини и при различитим условима рада, чиме је доказана њихова применљивост у реалним условима третмана отпадних вода.
- Показано је да метал-засићени адсорбенти испољавају антибактеријску активност чиме је проширена функционалност и указано на могућност њихове примене у напредним системима за пречишћавање воде.
- Интеграцијом резултата карактеризације, адсорпционих испитивања и моделовања развијен је свеобухватан модел који омогућава предвиђање понашања хибридних адсорбената у зависности од њиховог састава и услова примене.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати добијени у овој докторској дисертацији потврђују постављене хипотезе и указују на оправданост концепта развоја хибридних адсорпционих материјала заснованих на комбинацији модификованих зеолита и лигноцелулозне биомасе. Применом савремених експерименталних и аналитичких метода обезбеђена је поузданост и релевантност добијених резултата који су у складу са актуелним истраживачким трендовима у области адсорпције и третмана отпадних вода.

Главни допринос рада огледа се у систематском и интегралном приступу, који обухвата развој и испитивање више типова материјала, од појединачних компоненти до сложених хибридних мембрана, што представља значајно унапређење у односу на постојећа истраживања која се углавном заснивају на испитивању једне врсте адсорбената. На тај начин омогућено је јасно сагледавање улоге појединачних компоненти, као и њиховог синергијског деловања у хибридним системима.

У односу на постојеће стање у литератури, значајан искорак представља и чињеница да су испитиване различите класе полутаната, укључујући јоне тешких метала, органске боје и пестициде што омогућава свеобухватну процену функционалности развијених материјала. Поред тога, испитивање адсорпције у мултикомпонентним системима доприноси реалнијем сагледавању понашања адсорбената у условима блиским стварним отпадним водама чиме се превазилази ограничење бројних истраживања заснованих на испитивању у модел системима.

Посебан значај рада огледа се у утврђивању везе између структуре, површинских својстава и адсорпционог понашања материјала, као и у објашњењу механизма адсорпције кроз комбинацију јонске измене, електростатичких интеракција, комплексирања и специфичних органских интеракција. Овакво тумачење резултата представља унапређење у односу на постојећа истраживања у којима се механизми често анализирају поједностављено.

Значајан допринос представља и развој хибридних алгинатних мембрана, које у односу на класичне прашкасте адсорбенте показују већу структурну стабилност, лакшу примену и потенцијал за коришћење у динамичким системима. Додатно, испитивање регенерације и поновне употребе материјала омогућило је процену њихове практичне примене што је аспект који у бројним литературним радовима није довољно разматран.

На основу добијених резултата може се закључити да ова докторска дисертација представља значајно унапређење научних знања у области адсорпционих материјала, како у погледу развоја нових хибридних система, тако и у погледу разумевања механизма адсорпције и примене ових материјала у сложеним воденим системима.

### 4.3. Верификација научних доприноса

Из истраживања у оквиру ове докторске дисертације кандидаткиња Јелена Димитријевић је публиковала један научни рад у међународном часопису категорије M21, два научна рада у међународним часописима категорије M22 и један научни рад у међународном часопису категорије M24 који директно произилазе из теме докторске дисертације.

#### Категорија M21:

1. Dimitrijević, J., Jevtić, S., Simić, M., Koprivica, M., Tolić Stojadinović, Lj., Dikić, J., Petrović, J. Structural and Adsorptive Properties of Hybrid Alginate Beads Containing Aminosilane-Modified Clinoptilolite and Epoxy-Silane-Functionalized Oat Straw, *Arabian Journal for Science and Engineering* (2026). <https://doi.org/10.1007/s13369-026-11284-0> ISSN 2193-567X IF: 2.9

#### Категорија M22:

1. Dimitrijević, J., Jevtić, S., Marinković, A., Simić, M., Koprivica, M., Petrović, J. Ability of Deep Eutectic Solvent Modified Oat Straw for Cu(II), Zn(II), and Se(IV) Ions Removal, *Processes*, 2023, 11(5), 1308. <https://doi.org/10.3390/pr11051308> ISSN 2227-9717 IF: 3.1
2. Dimitrijević, J., Petrović, J., Marinković, A., Dikić, J., Koprivica, M., Simić, M., Jevtić, S. Preparation, Characterization, Adsorption, and Antibacterial Assessments of Silane-Functionalized Zeolites, *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 44(2), 331-347. <https://doi.org/10.20450/mjce.2025.3103> ISSN 1857-5552 IF : 1.1

#### Категорија M24:

1. Dimitrijević, J., Jevtić, S., Simić, M., Koprivica, M., Jovanović, A., Mišić, M., Petrović, J. Turning Agricultural Waste into a Powerful Solution: Enhanced Lead Removal via Chemically Modified Oat Straw, *Lekovite sirovine*, 2024. <https://doi.org/10.61652/leksir2444011D> ISSN 0455-6224

## **5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду („Гласник Универзитета у Београду“, бр. 204 од 22. јуна 2018. године), коришћењем програма iThenticate 22. априла 2026. године извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидаткиње Јелене Димитријевић под називом „Припрема и карактеризација мембрана на бази модификованих зеолита и целулозе за уклањање токсичних катјона и органских полутаната из отпадних вода” при чему је утврђено подударање текста од 10%. Уочени степен подударности последица је присуства цитата, личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, општих научних формулација, као и делова текста који се односе на претходно публиковане резултате истраживања кандидаткиње проистекле из ове дисертације, што је у складу са чланом 9. наведеног Правилника. На основу свега изложеног, а у складу са чланом 8. став 2. истог Правилника, Комисија сматра да извештај указује на оригиналност докторске дисертације кандидаткиње Јелене Димитријевић, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

## **6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

На основу свега наведеног, Комисија сматра да докторска дисертација кандидаткиње Јелене М. Димитријевић, мастер хемичара, под називом „Припрема и карактеризација мембрана на бази модификованих зеолита и целулозе за уклањање токсичних катјона и органских полутаната из отпадних вода” представља значајан и оригиналан научни допринос у области којој дисертација припада, што је потврђено и објављивањем научних радова у међународним часописима (један рад

категорије M21, два рада категорије M22 и један рад категорије M24). Постављени предмет и циљеви истраживања су у потпуности остварени.

Комисија је мишљења да ова докторска дисертација испуњава све прописане критеријуме, као и да је кандидаткиња током њене израде показала висок степен научноистраживачке способности, самосталности и систематичности у свим фазама истраживања. Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Припрема и карактеризација мембрана на бази модификованих зеолита и целулозе за уклањање токсичних катјона и органских полутаната из отпадних вода” кандидаткиње Јелене М. Димитријевић прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се, након завршетка законом прописане процедуре, кандидаткиња позове на усмену одбрану пред Комисијом за одбрану докторске дисертације.

У Београду, 27. април 2026. године

#### **ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**

---

Др Ђорђе Јанаћковић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

---

Др Александар Маринковић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

---

Др Јелена Дикић, виши научни сарадник  
Иновациони центар Технолошко-металуршког факултета, Београд

---

Др Марија Симић, виши научни сарадник  
Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд