

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКОГ ФАКУЛТЕТА  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Предрага Милановића, дипломираног инжењера хемијске технологије.

Одлуком бр. 35/159 од 26.04.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Предрага Милановића, дипл. инжењера хемијске технологије, под насловом, „**Добијање нано-алуминијум-оксидних влакана за уклањање азо боја из водених раствора**“.

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- Школске 2010/11 кандидат Предраг Милановић, дипл. инжењер хемијског инжењерства, уписао је докторске академске студије на Универзитету у Београду, Технолошко – металуршки факултет, студијски програм Инжењерство материјала.
- 29.12.2016. на седници Наставно-научног већа Технолошко – металуршког факултета, Универзитета у Београду донета је одлука (бр. 35/654 од 29.12.2016.) о именовању чланова Комисије за оцену подобности теме и кандидата Предрага Милановића, дипл. хемијског инжењерства, под насловом, „Добијање нано-алуминијум-оксидних влакана за уклањање азо боја из водених раствора“.
- Декан Технолошко-металуршког факултета 6.10.2016. доноси решење број 20/131 о продужетку рока за завршетак студија за 2 семестра школске 2016/2017 године.
- Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета 21.9.2017. доноси одлуку број 35/341 о продужењу рока за завршетак студија за годину дана до краја школске 2017/2018 године.
- 3.02.2017. на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду донета је одлука о прихватању теме докторске дисертације „Добијање нано-алуминијум-оксидних влакана за уклањање азо боја из водених раствора“, а за ментора именовани су проф. др Радмила Јанчић-Хајнеман, редован професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, и

др Александар Којовић ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, одлука бр. 35/29 од 23.02.2017.

- 26.04.2018. на седници Наставно-научног већа Технолошко – металуршког факултета, Универзитета у Београду, донета је одлука о именовању комисије за оцену докторске дисертације Предрага Милановића, дипл. хемијског инжењерства под насловом „Добијање нано-алуминијум-оксидних влакана за уклањање азо боја из водених раствора“ одлука број 35/159. Комисија за оцену докторске дисертације је за председника изабрала проф. др Радмила Јанчић-Хајнеман, редован професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду.

## **1.2. Научна област дисертације**

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство и ужој научној области Инжењерство материјала за коју је матичан Технолошко – металуршки факултет, Универзитета у Београду. Ментори су проф. др Радмила Јанчић-Хајнеман, редован професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду и др Александар Којовић ванредни професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, који су на основу досадашњих објављених радова и искустава компетентан тим да руководи израдом ове докторске дисертације.

## **1.3. Биографски подаци о кандидату**

Кандидат Предраг Милановић, дипл. инж. рођен је 7.8. 1978. године у Краљеву. Основну школу и гимназију завршио је у Краљеву. На Технолошко-металуршки факултет у Београду уписао се школске 1997/98 године. Са просечном оценом 8,0 на редовним студијама и оценом 10 на дипломском раду, из области инжењерства материјала, 2003. дипломирао је на Катедри за инжењерство материјала. У периоду од 2003.-2012. радио је као сервисни инжењер у компанијама са пословима у области производње и пласмана ватросталних материјала. Од 2012. је запослен у министарству надлежном за послове енергетике. Последипломске студије уписао је на Технолошко-металуршком факултету школске 2010./11. године на смеру Инжењерство материјала. Положио је све испите предвиђене програмом, као и завршни испит. Предраг Милановић говори енглески језик. Током професионалног рада, поред стандардног коришћења рачунара и рачунарских програма, активно користи LINUX и усвојио је знања и стекао искуство у програмирању у језицима: Java, Python, PHP, C++. Ожењен је и отац двоје деце.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Предрага Милановића, дипл. инжењер хемијског инжењерства написана је на српском језику и садржи 143 стране А4 формата, 52 слике, 4 табеле и 142 литературна навода.

Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Резиме (на српском и на енглеском језику), Увод, Теоријски део (Структура и својства алуминијум-оксида; Структура и својства гвожђе и алуминијум-оксида; Керамичка влакна; Добијање алуминијум-оксидних влакана; Текстилне боје; Неопходност уклањања азо боја; Методе карактеризације), Експериментални део (Материјал; Добијање нано-алуминијум-оксидних влакана; Уклањање азо боја из водених раствора; Карактеризација влакана и честица), Резултати и дискусија (Карактеризација влакана и честица; Уклањање *C.I.Reactive Orange 16*; Анализа доступне површине честица и влакана), Закључак, Прилог А, Литература, Биографија, Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном делу је приказан предмет, садржај и циљ докторске дисертације. Предмет ове докторске дисертације обухвата истраживања у области добијања алуминијум-оксидних влакана нано величине и њихове употребе у уклањању азо боја из водених раствора.

У првом поглављу **Теоријског дела** дат је преглед структура и својстава алуминијум-оксида са посебним освртом на кристалне облике фаза. У наставку (поглавља 2 и 3) су представљене сличности кристалне структуре гвожђе-оксида и алуминијум-оксида, као и могућности њиховог комбиновања, док је у Поглављу 4 дат кратак увод у керамичке материјале и представљени су основни процеси добијања керамичких влакана са посебним акцентом на добијање алуминијум-оксидних влакана електропоређењем и сол-гел техником. У другом делу Теоријског дела у Поглављу 5 и 6 дати су основни подаци о азо бојама, њиховој употреби и неопходности њиховог уклањања из воде. У наставку (Поглавље 7) су описане методе које су коришћене у карактеризацији влакана и процеса адсорпције.

Прва целина **Експерименталног дела** обухвата поступак припреме и процес електропоређења којим су добијена влакна, као и процес термичке обраде влакана у циљу добијања алуминијум-оксидних влакана. Затим су описани експерименти изведени у циљу добијања

алуминијум-оксидних влакна са додатком  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgCl}_2$ , као и добијање алуминијум оксидних честица сол-гел техником. Друга целина експерименталног дела дефинише експерименте који су извођени у циљу карактеризације уклањања азо боје *C.I. Reactive Orange 16*, као и испитивање добијених нано влакана методама скенирајуће електронске микроскопије, инфрацрвене спектроскопије са Фуријевом трансформацијом, рентгенске дифракције, термогравиметријске и диференцијалне термалне анализе, фотоспектрометрије и ласерске дифрактометрије.

Поглавље **Резултати и дискусија** обухвата три дела. У првом делу вршена је анализа прикупљених података карактеризацијом добијених алуминијум-оксидних влакана и честица, у другом су анализирани подаци прикупљени током експеримената обезбојавања воденог раствора боје *Reactive Orange 16*, и у трећем делу је вршена математичка анализа доступне површине честица и влакана. У првом делу анализа добијених материјала рентгенском дифракцијом је показала да на температури од  $900\text{ }^\circ\text{C}$  долази до започињања кристализације корунда, док се тај процес код влакана са додатком  $\text{FeCl}_3$  јавља на температури од  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Термогравиметријска анализа (ТГА) и диференцијална термална анализа (ДТА) показалесу врло сличне резултате, изузев разлике између понашању узорака у фазној трансформација између  $800\text{ }^\circ\text{C}$  и  $900\text{ }^\circ\text{C}$  која одговара формирању корунда. Анализом слика, добијених на скенирајућем електронском микроскопу са емисијом поља, утврђена је дистрибуција карактеристичних величина влакана алуминијум-оксида добијених електропедешем. Поменута анализа је показала да влакна добијена електропедешем имају пречнике у распону од  $0,1$  до  $0,9\text{ }\mu\text{m}$ , што их сврстава у групу нано влакана. Анализа инфрацрвеном спектроскопијом са Фуријевом трансформацијом је показала постојање структурних разлике у процесу добијања алуминијум оксидних честица. У другом делу поглавља Резултати и дискусија циљу праћења промена концентрације боје RO16 у раствору у зависности од процесних параметара анализирани су резултати експеримената који су испитивали обезбојавање воденог раствора *Reactive Orange 16* коришћењем апсорбционог спектрофотометра. Анализа добијених резултата адсорпције на алуминијум-оксидне честице је показала да је оптималан рН 3 за адсорпцију, да је у присуству довољне количине честица адсорпција брза (до 20 мин) и ефикасна (уклања се до 98 % боје), да је адсорпциони механизам боље описан Ленгмировом него Фројдлиховом изотермом док се кинетика реакције боље описује моделом псеудо првог реда него моделом псеудо другог реда. Такође, није забележено одвијање Фентонове реакције додатком водоник-пероксидани у мраку нитиприосветљавању. У трећем делу поглавља Резултати и дискусија описан је развијени математички модел анализа доступне површине честица и влакана на основу СЕМ фотографија. Резултат ове анализе показује да је  $\sim 15$  путавећаповршинаистемасеузорканановлаканоадмикрочестица према дистрибуцији величина добијених са СЕМ слике, односно око  $\sim 8$  пута за дистрибуцију добијену методом ласерске дифрактометрије.

На крају рада изведен је **Закључак** у коме су концизно изнети постигнути резултати у истраживању, а који одговарају постављеним циљевима дисертације. Дат је Прилог са извештајем *Jupyter Notebook* интерфејса са примером обраде СЕМ слике алуминијум-

оксидних честица и анализе. На крају су дати списак коришћене **Литературе**, биографија кандидата, изјаве о ауторству и истоветности штампане и електронске верзије рада.

## **ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **3.1. Савременост и оригиналност**

Проблем уклањања загађујућих материја из воде представља један од великих изазова савременог инжењерства у коме сарађују инжењери различитих специјалности. Вода је један од веома значајних ресурса за одржање живота на земљи. За инжењерство материјала, од посебног интереса је направити материјал који ефикасно служи за уклањање загађујућих материја било сорпцијом било катализом реакција при којима долази до њихове разградње.

Оксиди алуминијума већ дуги низ година представљају веома значајан материјал, који због природе алуминијум оксида да гради читав низ метастабилних оксида, приликом термичке обраде, даје могућност да се направи материјал циљаних својстава. Ови метастабилни оксиди су одлични сорбенси и дају могућност да се приликом њихове синтезе утиче на њихову кристалну структуру и хемијска својства допирањем различитим оксидима. Допирање оксидом гвожђа даје могућност да се контролише кристална структура материјала, да се мења површинска структура као и да се промени температура настајања стабилног оксида алуминијума- корунда. Ова могућност коришћена је у овом раду како би се испитало како оксиди алуминијума са или без допирања оксидом гвожђа могу да утичу на својста сорпције загађујућих материја.

Електропоређење представља начин да се утиче на релевантну морфологију оксида алуминијума. На овај начин добијају се керамичка влакна одговарајућег облика и утиче се на повећање активне површине влакана која је доступна за сорпцију загађујућих материја. У овом раду разматрана је могућност коришћења ове технике за припрему различитих влакана на бази алуминијум-оксида како би се омогућило повећање специфичне површине овог материјала креирањем влакана нано димензија.

### **3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу**

У дисертацији је цитирано 142 референце од којих је велики број референци које су настале у последњих 15 година. Уклањање загађујућих материја, контролisanje кристалне структуре и праћење процеса уклањања загађујућих материја из раствора представљају кључне процесе који су праћени у оквиру овог истраживања па је и преглед литературе морао бити опсежан. Преглед литературе пружио је основу за објашњавање феномена који

су уочени и који одређују понашање синтетисаног материјала приликом сорпције азо боја из воденог раствора. Литературни наводи коришћени су за поткрепљивање закључака и анализу резултата.

### **3.3. Опис и адекватност примењених научних метода**

Алуминијум-оксид могуће је синтетисати на велики број начина и углавном се стратегија избора начина синтезе одређује према могућностима постизања одговарајуће морфологије кристалне структуре производа. У оквиру овог рада изабран је начин синтезе алуминијум-оксида сол-гел техником како би се испитала својства материјала који је коришћен за уклањање азо боја из раствора. Коришћене су различите технике карактерисања материјала.

Морфологија синтетисаног оксида праћена је коришћењем оптичке и скенирајуће електронске микроскопије. На овај начин омогућено је сагледавање морфолошких карактеристика добијеног производа и корелисање ових својстава са могућим применама материјала. Применом техника визуелизације добијене су дигиталне слике које су обрађене методама анализе слике како би се добили што релевантнији подаци који омогућавају доношење закључака о понашању материјала у експерименталним условима.

За карактерисање кристалне структуре коришћена је Рентгенска анализа, а за карактерисање површине материјала коришћена је инфрацрвена спектроскопија са Фуријеовом трансформацијом. Анализом ових резултата омогућено је сагледавање утицаја допирајућих оксида на кристалну структуру као и на структуру површине материјала.

Уклањање азо боја из раствора изведено је техником сорпције. Мерен је интензитет обојења раствора током времена коришћењем спектрометријских техника. На овај начин добијају се подаци који омогућавају карактерисање механизма сорпције.

Коришћени су различити математички алати који су олакшавали интерпретацију добијених спектра, утврђивање морфолошких карактеристика материјала, корелисања морфолошких карактеристика са својствима сорпције, као и за интерпретацију података добијених праћењем сорпције азо боје на синтетисаном праху алуминијум-оксида који је коришћен као модел за процес сорпције. Ови резултати упоређени су са морфологијом алуминијум-оксидних влакана добијених електропредењем.

### **3.4. Применљивост остварених резултата**

Остварени резултати показују међузависност између начина избора хемијског састава сорбента, његове морфологије и ефикасности уклањања азо боје из воденог раствора. Овај

материјал показао се као погодан за коришћење због своје ефикасности и релативне једноставности припреме. Такође могуће је осмислити процес повећања размера овог процеса како би се материјал користио за индустријско уклањање загађивача.

Сагледана је могућност добијања керамичких влакана допираних оксидом гвожђа коришћењем технике електропредења. На овај начин добија се материјал велике специфичне површине који даје могућност да се направи материјал велике ефикасности уклањања загађивача. Сагледане су аналогije које омогућавају екстраполацију резултата добијених на материјалу једног типа морфологије на материјал другачије морфологије.

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

Кандидат Предраг Милановић је од почетка свог бављења истраживачким радом показивао склоност ка примени математичког апарата у планирању и интерпретацији експерименталних резултата. У оквиру своје дисертације ову своју способност искористио је на сваком кораку почев од интерпретације спектра, интерпретације резултата сорпције како би се утврдио адекватан механизам сорпције као и на поређење материјала различитих морфолошких карактеристика. Током израде дисертације кандидат Предраг Милановић показао је способност самосталног закључивања и интерпретације резултата, али и способност сарадње са колегама.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### **4.1. Приказ остварених научних доприноса**

Испитивање својстава сорпције алуминијум-оксида и алуминијум-оксида допираног оксидом гвожђа и повезивање ових својстава са кристалном структуром материјала и карактерисањем површине материјала осликава се посебно у смислу:

- Избор хемијског састава материјала погодног за сорпцију и повезивање овог својства са кристалном структуром материјала.
- Дефинисање оптималног начина испитивања сорпције на материјалу синтетисаном сол-гел техником.
- Дефинисање услова добијања нано влакана на бази алуминијум-оксида, и на бази алуминијум-оксида допираног оксидом гвожђа.
- Дефинисање морфолошких карактеристика материјала коришћењем оптичке и електронске микроскопије.
- Интерпретација резултата добијених електронском микроскопијом и повезивање са морфолошким параметрима овог материјала.

- Поређење морфолошких параметара материјала који су синтетисани на различите начине и предлагање оптималног поступка за добијање материјала погодног за уклањање азо боја из воденог раствора.

#### **4.2. Критичка анализа резултата истраживања**

Корелација структурних параметара са својствима материјала представља основни постулат науке и инжењерства материјала. Осмишљавање процеса са циљем добијања материјала са пожељним својствима потребним да се оствари уклањање азо боја из водених раствора остварено је кроз синтезу материјала са траженом кристалном структуром и одговарајућим модификацијама структуре које су последица начина добијања материјала и његове термичке обраде. Показало се да параметри који доприносе лакоћи стварања кристалне структуре корунда не доприносе својствима сорпције. Материјал који има већи удео метастабилних оксида алуминијума показао се као бољи материјал за уклањање азо боја из воденог раствора. Избором оптималних параметара процеса електропоређења влакана постигнуто је да се добију влакна одговарајуће морфологије и кристалне структуре како би се постигло боље уклањање полуента из воде. Све фазе истраживања праћене су одговарајућим математичким процедурама, за анализу спектра, утврђивање оптималног модела који показује механизам адсорпције као и за поређење материјала различитих морфолошких карактеристика.

#### **4.3. Верификација научних доприноса**

Током израде тезе кандидат Предраг Милановић објавила је више научних радова са резултатима свог истраживања. Из тезе су непосредно произашла два рада категорије M22 и један рад у часопису категорије M21

##### M21

1. **MilanovicPredrag D, Dimitrijevic Marija M, Jancic-Heinemann Radmila M, Rogan Jelena R, Stojanovic Dusica B, Kojovic Aleksandar M, Aleksic Radoslav R**, Preparation of low cost alumina nanofibers via electrospinning of aluminium chloride hydroxide/poly (vinyl alcohol) solution, CERAMICS INTERNATIONAL, (2013), vol. 39 br. 2, str. 2131-2134, ISSN 0272-8842, IF 2,086, (Materials Science, Ceramics 4/25) <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.07.062>

##### Категорија M22:

1. **Milanovic Predrag D, Vuksanovic Marija M, Mitric Miodrag N, Stojanovic Dusica B, Kojovic Aleksandar M, Rogan Jelena R, Jancic-Heinemann Radmila M**, Electrospun alumina fibers doped with ferric and magnesium oxides, SCIENCE OF SINTERING, (2018), vol. 50 br. 1, str. 77-83, ISSN 0350-820X, (IF=0,736) Materials Science, Ceramics 15/26 doi: <https://doi.org/10.2298/SOS1801077M>.
2. **MilanovicPredragD, Vuksanovic Marija M, Mitric Miodrag N, Kojovic Aleksandar M, MijinDušan, and Jancic-Heinemann Radmila M**, Alumina particles doped with ferric as efficient adsorbent for removal of Reactive orange 16 from aqueous solutions, SCIENCE OF



SINTERING, (2018), *In press*, ISSN 0350-820X, (IF=0,736) Materials Science, Ceramics 15/26.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација Предрага Милановића, дипломираног инжењера технологије, под називом „Добијање нано-алуминијум-оксидних влакана за уклањање азо боја из водених раствора“ сагледава процес уклањања азо боја из раствора коришћењем нановлакана алуминијум-оксида на начин како је осмишљена наука о материјалима повезујући својства сорбента са начином његове припреме и његовом структуром посебно обрађујући пажњу на морфолошка својства материјала. Сагледана је корелација између структурних параметара добијене кристалне структуре, структуре површине материјала и хемијског састава сорбента са начином његове припреме.

Наосновупрегледадисертације и сагледавања научних резултата остварених и презентованих у оквиру тезе Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да седокторска дисертација под називом „Добијање нано-алуминијум-оксидних влакана за уклањање азо боја из водених раствора“ кандидата Предрага Милановића, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних областитехничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 21.05.2018. године

### Чланови комисије

Др Радмила Јанчић Хајнеман, редовни професор, Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Александар Којовић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Весна Радојевић, редовни професор, Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Марија Вуксановић, научни сарадник, Универзитет у Београду, Иновациони центар Технолошко-металуршког факултета

---

Др Душан Мијин, редовни професор, Универзитет у Београду,  
Технолошко-металуршки факултет

---