

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ ФАКУЛТЕТ  
НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Бојане Симовић**, дипл. инж. технологије

Одлуком бр. 35/28 од 3. 2. 2022. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Бојане Симовић, дипл. инж. технологије под насловом: **„Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“**.

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

Бојана Симовић, дипл. инж. технологије је **16. 5. 2018.** Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета предложила тему за израду докторске дисертације под називом **„Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“**.

На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, од **31. 5. 2018.** одлуком бр. 35/184, именована је Комисија за оцену подобности теме **„Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“** и кандидата Бојане Симовић, дипл. инж. технологије за израду докторске дисертације.

На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета одржаној **6. 7. 2018.** одлуком бр. 35/241, усвојен је реферат Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације, а за ментора је именована др Александра Дапчевић, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

Одлуком бр. 61206-3475/2-18 од **27. 8. 2018.** Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Бојане Симовић, дипл. инж. технологије, под називом **„Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“**.

На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, од **3. 2. 2022.** одлуком бр. 35/28, именована је Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације Бојане Симовић, дипл. инж. технологије, под називом **„Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“**.

Студент Бојана Симовић уписана је на докторске студије шк. 2011/12. године. На захтев студента, услед мировања три школске године ради трудничких и породилских одсустава и одсустава ради неге два детета, по Решењу бр. 20/190 од 29. 9. 2020. године одобрено јој је продужење рока завршетка докторских студија закључно са школском 2023/24. годином.

## 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 матична установа Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду. Именовани ментор, др Александра Дапчевић, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, је на основу досадашњих објављених радова и искустава компетентна да руководи израдом ове докторске дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Бојана Симовић рођена је 18. 7. 1986. године у Пожеги. Основну школу и гимназију општег смера, завршила је у Ариљу са одличним успехом. Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду уписала је 2005. године, а дипломирала 2011. године на одсеку Инжењерство материјала, са просечном оценом 8,49 и оценом 10 на дипломском раду. Школске 2011/2012. године, уписала је докторске студије на Технолошко-металуршком факултету, смер Инжењерство материјала, под менторством др Дејана Полетија, редовног професора на Катедри за општу и неорганску хемију. Од школске 2017/18. године, након одласка др Дејана Полетија у пензију, Бојани Симовић је додељен нови ментор, др Александра Дапчевић, ванредни професор на Катедри за општу и неорганску хемију. Бојана Симовић је положила све испите предвиђене наставним планом и програмом са просечном оценом 9,83.

Од јануара 2012. године запослена је у Институту за мултидисциплинарна истраживања као истраживач-приправник. Била је ангажована на пројекту III 45007 „0–3D наноструктуре за примену у електроници и обновљивим изворима енергије: синтеза, карактеризација и процесирање”, руководиоца др Горана Бранковића, под покровитељством Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Бојана Симовић је 3. 11. 2014. године изабрана у звање истраживач-сарадник.

У оквиру истраживачких активности на пројекту III 45007 кандидат се бавио синтезом, карактеризацијом и применом наноструктурних материјала на бази ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub> са акцентом на примену у фотокатализи у циљу пречишћавања отпадних вода. Осим тога, одлично познаје рад на инструментима (XRD, TG/DSC, UV/Vis спектрофотометар) неопходним у карактеризацији материјала којима се бави.

Аутор је и коаутор осам научних радова објављених у међународним часописима, од којих су три рада из категорије M21, три рада из категорије M22 и два рада из категорије M23, а саопштила је десет радова на међународним научним скуповима, као и седам радова на националним научним скуповима. Према бази *Scopus* радови Бојане Симовић цитирани су 114 пута.

Бојана Симовић је члан Српског хемијског друштва, Српског кристалографског друштва и Друштва за керамичке материјале Србије. Ангажована је у Центру изузетних вредности за зелене технологије Института за мултидисциплинарна истраживања и у start-up компанији V-fresh Technologies за развој, производњу и промет активног паковања. Бојана Симовић се активно служи енглеским језиком.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Бојане Симовић, дипл. инж. техн. под називом „Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“ написана је на 146 страна, у оквиру којих се налази 6 поглавља, 114 слика, 23 табеле и 294 литературна навода. Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература. Поред тога, дисертација садржи Предговор, Извод на српском и енглеском језику, Садржај, Захвалницу и додатке прописане правилима Универзитета у Београду о подношењу докторских дисертација на одобравање. Написана дисертација по форми и садржају задовољава све стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Током израде докторске дисертације кандидат Бојана Симовић развијала је различите методе синтезе (хидротермална, солвотермална и преципитациона) за добијање појединачних ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub>, али и нанокмпозита базираних на њима, у циљу добијања наноматеријала са што бољим фотокаталитичким својствима. У случају ZnO, додатно је испитана и могућност модификације сребром ради померања апсорпције упадног зрачења ка видљивом делу спектра, али и побољшања антимикуробне активности. Кроз делимичну или потпуну фазну трансформацију наноанатаса до слојевитих титаната, испитана је фотокаталитичка активност различитих структурних модификација. Добијени титанат је по први пут употребљен као сензор за влагу. Испитан је и утицај различитих прекурсора на добијање CeO<sub>2</sub> и његова својства. Синтеза нанокмпозита имала је за циљ добијање материјала бољих функционалних својстава од својстава полазних ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub>, услед синергијског ефекта најбољих карактеристика појединачних оксида.

Увод докторске дисертације представља кратак сажетак о хетерогеној фотокаталитичкој разградњи загађујућих супстанци која спада у ефикасну и економичну методу за разградњу материја штетних за околину. У овом поглављу су наведени и наноструктурни оксидни полупроводници који се користе као фотокатализатори, адсорбенти, сензори и антимикуробни агенси. У Уводу је изложен и предмет и циљ истраживања.

У Теоријском делу докторске дисертације представљена су најзначајнија физичко-хемијска својства ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub> са описом њихових структурних и микроструктурних карактеристика, као и значај ових наноматеријала. Описане су уобичајене методе синтезе ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub>. Дат је литературни преглед наноструктура на бази наведених оксида добијених хидротермалном, солвотермалном и преципитационом методом. Детаљно је описан принцип, механизам и кинетика хетерогене фотокатализе у присуству ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub>. Представљене су могућности модификације фотокатализатора, као што су површинска модификација фотокатализатора племенитим металом и комбиновање са другим полупроводницима. Дат је осврт на бројне факторе који утичу на кинетику хетерогене фотокатализе. Описане су основне карактеристике токсичних боја реактивно наранџасте 16 (RO16, од енгл. *Reactive Orange 16*), кисело зелене 25 (AG25, од енгл. *Acid Green 25*), етил љубичасте (EV, од енгл. *Ethyl Violet*), мочилско плаве (MB9, од енгл. *Mordant Blue 9*), чије присуство у отпадним водама представља велику опасност за живи свет. С обзиром на растућу резистентност бактерија и гљивица, посебан литературни осврт дат је испитивању антимикуробних својстава ZnO, који се показао као обећавајући материјал у инхибицији микроорганизама. У овом делу дисертације описан је и механизам и значај сензора влаге на бази оксида метала.

Експериментални део се састоји из два одељка. У првом одељку је дат списак коришћених суспензија са називима произвођача и детаљно је описан поступак синтезе наноматеријала и нанокмпозита на бази ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub>. У другом одељку су приказане методе карактеризације и услови под којима су карактерисани производи, са детаљним описом апаратуре за испитивање фотокаталитичке активности, поступка испитивања антимикуробних својстава и апаратуре за тестирање сензорских карактеристика.

Поглавље Резултати и дискусија има четири потпоглавља. У првом потпоглављу приказани су резултати и анализа резултата испитивања структурних, микроструктурних, оптичких, текстуалних, антимикуробних и фотокаталитичких својстава нанопрахова на бази ZnO добијених хидротермалном, солвотермалном и преципитационом синтезом. Најпре су упоређене карактеристике немодификованих прахова ZnO који су добијени хидротермалном и солвотермалном синтезом и њима одговарајућих калцинираних прахова (добијени жарењем на 300 °C). У сва четири случаја настао је једнофазни вирцитни ZnO са морфологијом која варира од солвотермално насталих наночестица до хидротермално насталих микроштапића, међу којима нема значајне разлике у фотокаталитичкој активности. Сви добијени узорци имају већу фотокаталитичку ефикасност од комерцијалног ZnO у разградњи текстилне азо боје RO16, док некалцинирани узорци имају боља фотокаталитичка својства и од комерцијалног праха Degussa P-25 TiO<sub>2</sub>. Потом су међусобно упоређена структурна, микроструктурна и фотокаталитичка својства сребром модификованих нанопрахова ZnO добијених солвотермалном и преципитационом методом. Резултати су показали да се сви узорци састоје од сферних нанокристалита ZnO на чијој је површини распоређено Ag. Узорци настали солвотермалним путем имају већу фотокаталитичку ефикасност у разградњи боје RO16 у односу на комерцијални ZnO и немодификован ZnO, али и од узорака насталих преципитацијом. Солвотермално добијени ZnO са 0,75 mol.% Ag има бољу фотокаталитичку ефикасност у односу на комерцијални ZnO и у разградњи других боја: AG25, MB9 и EV, али има и јаче антимикуробно дејство.

Друго потпоглавље садржи резултате и анализу резултата испитивања структурних, микроструктурних, оптичких, текстуалних, сензорских и фотокаталитичких својстава наноматеријала на бази TiO<sub>2</sub>. Девет производа на бази TiO<sub>2</sub> је добијено при различитим условима хидротермалног третмана полазног наноанатаса у раствору NaOH концентрације 5 mol cm<sup>-3</sup>. Интензивирањем хидротермалног третмана (од 6 h на 110 °C до 18 h на 160 °C) значајно се повећава растворљивост наноанатаса проузрокујући фазни прелаз праћен променом морфологије од приближно сферних наночестица TiO<sub>2</sub> до издужених титанатних нанолистича. Иако неефикасан фотокатализатор, једнофазни титанат Na<sub>0,4</sub>H<sub>1,6</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·H<sub>2</sub>O добијен након најинтезивнијег третмана, показао се као одличан материјал за производњу сензора за детекцију влаге. Такође је дефинисана разлика између TiO<sub>2</sub> и титаната у погледу структурних и спектралних својстава. С друге стране, једнофазни TiO<sub>2</sub> синтетисан хидротермалном методом из титан(IV)-бутоксида ефикасно је разградио RO16, приближно исто као комерцијални наноанатас.

У трећем потпоглављу приказани су резултати испитивања утицаја различитих прекурсора (CeCl<sub>3</sub>·7H<sub>2</sub>O, Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>, Ce(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O), коришћених при хидротермалној синтези на добијање CeO<sub>2</sub> и његова својства. У свим случајевима кристалити CeO<sub>2</sub> су имали сличну морфологију налик на заобљене хексагоналне и ромбичне плочице величине 10–35 nm. Узорак CeO<sub>2</sub> добијен у синтези из CeCl<sub>3</sub>·7H<sub>2</sub>O показао се као одличан адсорбент, док ниједан добијени CeO<sub>2</sub> није показао значајну фотокаталитичку активност приликом разградње боје RO16.

У четвртм потпоглављу представљене су структурне, микроструктурне и фотокаталитичке карактеристике хидротермално синтетисаних нанокмпозита CeO<sub>2</sub>/ZnO и TiO<sub>2</sub>/ZnTiO<sub>3</sub>. Код ZnO прахова са различитим садржајем CeO<sub>2</sub> у опсегу 0 до 10 mol.%, одређиван је оптималан удео CeO<sub>2</sub> у циљу побољшања фотокаталитичке ефикасности ZnO и утврђено је да кмпозит који садржи 5 mol.% CeO<sub>2</sub> има најбоља својства. Честице CeO<sub>2</sub> са величином сферних кристалита око 5 nm распоређене су по површини ZnO. Морфологија

ZnO праха варира од издужених нанозрна до микроштапића градећи 3D морфологију у облику машини. Приликом синтезе композита на бази  $TiO_2$  и ZnO добијен је нанокристалинични композит који садржи 42 mas.% анатаса и 58 mas.% цинк-метатитаната. Овај наноккомпозит има већу ефикасност него немодификовани  $TiO_2$  приликом уклањања боје AG25.

У петом поглављу дати су Закључци проистекли из докторске дисертације. Истакнути су најважнији доприноси рада и указано је на предности и иновативност примењених истраживачких праваца, који су допринели постизању одличних фотокаталитичких, адсорпционих, антимикуробних и сензорских својстава добијених наноматеријала.

У поглављу Литература набројани су литературни наводи који су коришћени приликом израде ове дисертације.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Наноматеријали ZnO,  $TiO_2$  и  $SeO_2$ , али и наноккомпозити базирани на наведеним оксидима, поседују разноврсна термичка, механичка, оптичка и електрична својства и као такви представљају једне од интересантнијих материјала у инжењерству материјала последњих година. Ови материјали захваљујући својој нетоксичности, хемијској и биолошкој стабилности, антимикуробној и каталитичкој активности, биокompatibilности, економичности, налазе примену у електроници, оптици, медицини, фармацији, активном паковању, екологији, а једна од њихових најзначајнијих примена јесте у својству фотокатализатора. Хетерогена фотокатализа, уз могућност коришћења соларне енергије као извора зрачења, представља економичну и еколошки прихватљиву алтернативу постојећим конвенционалним методама за прераду отпадних вода, која привлачи велику пажњу истраживача широм света. Постигнути добри резултати у соларним технологијама које су нашле примену на тржишту, подстичу даља истраживања базирана на соларној енергији на пољу индустријских процеса.

Оригиналност докторске дисертације кандидата Бојане Симовић најпре се огледа у добијању фотокатализатора претежно нанометарских димензија са побољшаном активношћу у односу на досадашње. Ово је постигнуто кроз свеобухватну оптимизацију економичних метода синтезе, почев од врсте поступка па до варирања услова, али и детаљну карактеризацију те успостављање корелације синтеза–својства–примена. Систематична анализа структурних, микроструктурних, морфолошких, оптичких, адсорпционих и фотокаталитичких својстава материјала добијених различитим поступцима синтезе и под различитим условима показала је да је за фотокаталитичку активност нанопрахова битнија мала величина и добра расподела честица, као и велики пречник пора, него мала ширина забрањене зоне и велика специфична површина, како је до сада сматрано. Закључци су изведени тестирањем добијених фотокатализатора на разградњу четири токсичне и канцерогене боје (RO16, MB9, EG25, EV), којима су значајно оптерећене отпадне воде текстилне индустрије. За материјале који се нису показали као добри фотокатализатори, тестиране су и друге могуће примене и то као потенцијални адсорбенти, сензори влаге или антимикуробна средства. Поред главних циљева постављених при изради ове дисертације, који су успешно извршени, треба истаћи и један важан допринос од фундаменталног значаја, који се огледа у разрешењу дугогодишње дилеме једног структурног типа титаната, што је постигнуто утачавањем структуре добијеног натријум-титаната.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат Бојана Симовић спровела је опсежан преглед релевантне стручне и научне литературе. Већи део прегледане литературе објављен је у водећим међународним часописима, а обухвата радове који се тичу синтезе, структуре, својстава и примене оксидних наноматеријала, као и радове везане за хетерогену фотокатализу, адсорпцију, антимикуробну активност и сензоре за детекцију влаге. У склопу литературних навода налазе се и референце кандидата Бојане Симовић, које су проистекле из рада на овој дисертацији, објављене у међународним часописима. У дисертацији је наведено укупно 294 референце.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру ове докторске дисертације коришћене су следеће експерименталне методе:

- За синтезу простих наноструктурних материјала и нанокмпозита на бази ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub> коришћене су хидротермална, солвотермална или преципитациона метода, као ефикасне и економичне методе за добијање наноматеријала одличних карактеристика.
- Сензора влаге од добијеног натријум-титаната израђен је у виду филма техником наношења сечивом.
- Рендгенском дифракцијом праха (XRPD) идентификоване су кристалне фаза, одређен фазни састав узорака и израчунати параметри јединичних ћелија, величине кристалита и микронапрезања у материјалу.
- Трансмисионом електронском микроскопијом и електронском дифракцијом са одабране површине узорка (HRTEM/SAED), као и скенирајућом електронском микроскопијом (SEM/FESEM) анализирана су структурна и микроструктурна својства узорака.
- Енергетском дисперзивном спектроскопијом (EDS) урађена је елементарна анализа узорака.
- Термогравиметријском (TGA) и диференцијалном термичком анализом (DTA) испитана је термичка стабилност узорака у инертној и оксидационој атмосфери, утврђени процеси разлагања, одређени садржаји адсорбоване и кристалне воде у узорцима, као и температура калцинације и фазних прелаза.
- Раманском и инфрацрвеном спектроскопијом са Фуријеовом трансформацијом (FTIR) узорци су додатно структурно окарактерисани.
- BET и ВЈН методама су одређене специфичне површине добијених материјала, запремине пора и расподеле величине пора.
- UV-VIS-NIR спектроскопијом су испитана оптичка својства прахова, са циљем израчунавања ширине енергетског процепа.
- Фотокаталитичка активност и адсорпциона моћ добијених нанопрахова тестирани су на разградњи текстилне азо боје RO16, а одабрани катализатори су коришћени и за разградњу других текстилних боја (AG25, EV и MB9). Промена концентрације раствора боја у присуству фотокатализатора праћена је мерењем апсорбансе на UV-VIS спектрофотометру у одређеним временским интервалима до потпуне деградације боје.
- Одабрани немодификовани и сребром модификовани ZnO нанопрахови испитани су применом квантитативног *in vitro* теста у течном медијуму у односу на више врста патогених микроорганизама тј. на Грам-позитивну (*Staphylococcus aureus*) и Грам-негативну (*Echerichia coli*) бактерију, као и на гљивицу *Candida albicans*.

- Електрохемијском импедансном спектроскопијом (EIS) је испитана осетљивост добијеног једнофазног натријум-титаната на влажност мерењем отпорности узорака у зависности од садржаја воде.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати и одговарајућа дискусија која прати излагање резултата важни су са аспекта будућих истраживања и примене пре свега у области хетерогене фотокатализе у циљу уклањања штетних текстилних боја из отпадних вода. Наноматеријали добијени у овој дисертацији су економични и једноставно синтетисани. Због својих добрих структурних, микроструктурних, оптичких и текстуралних карактеристика показали су се као одлични фотокатализатори, адсорбенти, антимикуробни агенси и сензори воде што их чини функционалним материјалима са потенцијалом за даље унапређивање и дизајнирање за нове будуће примене.

С обзиром на то да су нанопрахови на бази ZnO показали изузетну фотокаталитичку активност и у видљивој области спектра, отвара се могућност за њихово коришћење и под сунчевим зрачењем. Модификовање ZnO сребром је довело до додатног померања апсорпције ка видљивом делу спектра и побољшања фотокаталитичке активности. Увођењем сребра побољшане су и иначе добре биолошке активности ZnO што такав материјал чини мултифункционалним и представља добру алтернативу за пречишћавање отпадних вода уместо конвенционалних физичко-хемијских и биолошких поступака. Изузетна антимикуробна активност ZnO модификованог сребром, отворила је и могућност за његову потенцијалну примену у паковању, козметици и медицини. Структурном модификацијом наноанатаса добијен је слојевити титанат, који се показао као одличан материјал за производњу сензора воде. Утврђено је да су добијени потпуно чисти нанопрахови CeO<sub>2</sub> одлични адсорбенти за уклањање боје RO16. Хидротермалном синтезом нанокомпозита у овој дисертацији побољшана су фотокаталитичка својства једнофазних наноматеријала. Научна верификација резултата потврђена је њиховим објављивањем у угледним међународним часописима.

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

Током израде докторске дисертације, кандидат Бојана Симовић показала је способност и самосталност за претраживање опсежне литературе, припрему, оптимизацију и реализацију експеримената, коришћење различитих техника карактеризације, као и обраду, дискусију и објављивање резултата. Кандидат је постигао значајне резултате и показао способност превазилажења конкретних проблема и прилагођавања за рад у различитим тимовима током различитих фаза израде докторске дисертације. На основу досадашњег рада и постигнутих резултата, Комисија сматра да је кандидат Бојана Симовић, дипл. инж. технологије, показала велико залагање, истрајност и остале квалитете неопходне за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У докторској дисертацији под називом „Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“ кандидата Бојане Симовић истичу се следећи научни доприноси:

- развој и оптимизација различитих метода синтезе за добијање наноструктурних оксидних материјала на бази ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub> са побољшаним карактеристикама у односу на постојеће;
- развој и оптимизација експерименталних услова у фотокатализи;
- успостављање корелације између синтезе, структуре и својстава једињења са њиховом потенцијалном применом: утицај различитих метода синтезе и различитих експерименталних услова на структурна, микроструктурна, оптичка, морфолошка и фотокаталитичка својства добијених наноматеријала;
- утврђивање утицаја различитих удела, величине и расподеле сребра на карактеристике ZnO и његову фотокаталитичку и биолошку активност;
- оптимизација услова хидротермалног третмана TiO<sub>2</sub>, са циљем снижења температуре и скраћења третмана, као и значајног смањења концентрације минерализатора, ради добијања слојевитих титаната контролисане стехиометрије, морфологије и величине честица погодних за производњу сензора влаге високе ефикасности;
- утврђивање утицаја различитих прекурсора за добијање наноструктурног CeO<sub>2</sub> ради унапређења његове адсорпционе моћи;
- добијање нових нанокompatитних материјала CeO<sub>2</sub>/ZnO и TiO<sub>2</sub>/ZnTiO<sub>3</sub> са побољшаним фотокаталитичким својствима у односу на појединачне оксиде;
- нова фундаментална сазнања у области одређивања структуре натријум-титаната;
- испуњење услова о једноставности и економичности процесирања, као важним параметром за индустријску производњу еколошки прихватљивих наноматеријала са високом фотокаталитичком, адсорпционом и биолошком активношћу, као и осетљивошћу на влагу;
- утврђивање ефикасности добијених фотокатализатора, адсорбената, антимикуробних агенаса и сензора влажности.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Спроведена истраживања у оквиру ове дисертације проистекла су на основу широког спектра активности који је укључивао најпре детаљну анализу литературе из области нанооксида, потом синтезу, карактеризацију и примену оксидних материјала на бази ZnO, TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub>. Добијени резултати повезани су са структуром и својствима материјала, што је документовано кроз дискусију резултата у оквиру ове дисертације. Нарочито треба нагласити једноставност и економичност коришћених метода синтеза, које задовољавају веома строге захтеве у погледу величине честица, специфичне површине, фотокаталитичке активности и адсорпционе моћи. Посебно су значајни поступци оптимизације састава двокомпонентних система и њихова корелација са фотокаталитичким својствима. Ова дисертација је управо пример како се оптимизацијом услова синтезе може постићи контрола структурних, микроструктурних, оптичких и текстуралних карактеристика нанопрахова, а самим тим се може дириговати адсорпциона, фотокаталитичка и антимикуробна активност ради њихове даље примене у пречишћавању отпадних вода.

Добијени нанопрахови ZnO, а нарочито прахови модификовани сребром, показују значајно бољу фотокаталитичку и биолошку активност у односу на комерцијално доступне прахове. Титан-диоксид добијен хидротермалном методом у форми анатаса је такође фотокаталитички активан за разградњу боје RO16, приближне ефикасности као комерцијални наноанатас. Иако одређени садржај различитих титанатних фаза (Na<sub>2-x</sub>H<sub>x</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·H<sub>2</sub>O или ZnTiO<sub>3</sub>) у узорку наноанатаса неповољно утиче на његова фотокаталитичка својства при разградњи боје RO16, присуство титанатне фазе ZnTiO<sub>3</sub> убрзава фотодеградацију боје AG25. Показано је да су титанатни нанолистиви Na<sub>0,4</sub>H<sub>1,6</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·H<sub>2</sub>O одлични сензори влаге. Захваљујући добрим адсорпционим



карактеристикама CeO<sub>2</sub>, хидротермално синтетисан композит CeO<sub>2</sub>/ZnO са 5 mol.% CeO<sub>2</sub> показао је боља фотокаталитичка својства од хидротермално добијеног ZnO.

Резултати проистекли из ове дисертације показали су да ZnO који се релативно једноставно синтетише на температурама нижим од температура синтезе TiO<sub>2</sub> и CeO<sub>2</sub>, може бити добра алтернатива титан-диоксиду који важи за најбољи комерцијално доступан фотокатализатор. Иако је модификовање ZnO сребром дало најбоље резултате чинећи га активним у видљивом делу спектра, свакако се и модификовање другим оксидима препоручује за даља истраживања, унапређивања и дизајнирања.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Бојана Симовић потврдила је научни допринос резултата добијених у току израде ове докторске дисертације њиховим објављивањем у часописима међународног значаја, као и њиховим саопштавањем на међународним и националним скуповима. Из дисертације су проистекли следећи радови:

##### Рад у врхунском међународном часопису (M21):

1. **Simović, B.**, Dapčević, A., Zdravković, J., Tasić, N., Kovač, S., Krstić, J., Branković, G.: From titania to titanates: Phase and morphological transition in less alkaline medium under mild conditions, - *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 781, pp. 810-819, 2019 (**IF=4.605**) (ISSN: 0925-8388).

##### Рад у истакнутом међународном часопису (M22):

1. **Simović, B.**, Poleti, D., Golubović, A., Matković, A., Šćepanović, M., Babić, B., Branković, G.: Enhanced photocatalytic degradation of RO16 dye using Ag modified ZnO nanopowders prepared by the solvothermal method, - *Processing and application of ceramics*, vol. 11, No. 1, pp. 27-38, 2017 (**IF=1.070**) (ISSN: 1820-6131).

##### Рад у часопису међународног значаја (M23):

1. **Simović, B.**, Golubović, A., Veljković, I., Poleti, D., Zdravković, J., Mijin, D., Bjelajac, A.: Hydro- and solvothermally-prepared ZnO and its catalytic effect on photodegradation of Reactive Orange 16 dye, - *Journal of the Serbian Chemical Society*, vol. 79, no. 11, pp. 1433-1443, 2014 (**IF=0.912**) (ISSN: 0352-5139).

#### Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34):

1. **Simović, B.**, Poleti, D., Kovač, S., Bjelajac, A., Dapčević, A., Branković, G.: „Photocatalytic degradation of textile dye with hydrothermally modified nanoanatase”, - *3<sup>rd</sup> Conference of the Serbian Society for Ceramic Materials*, Belgrade, Serbia, June 15-17, 2015., Programme and the Book of Abstracts, pp. 82.
2. **Simović, B.**, Dapčević, A., Zdravković, J., Krstić, J., Branković, G.: “From Titania to Titanates: Phase and Morphological Transition”, - *First International Conference of electron microscopy of nanostructures (ELMINA 2018)*, Belgrade, Serbia, August 27-29, 2018, Program & Book of Abstracts, pp. 148-150.
3. **Simović, B.**, Dapčević, A., Radovanović, Ž., Golubović, A., Matković, A., Branković, G.: “Comparative study of Ag/ZnO nanopowders Obtained by solvothermal and precipitation methods”, - *3<sup>rd</sup> International Meeting MATERIALS SCIENCE FOR ENERGY RELATED APPLICATIONS*, Belgrade, Serbia, September 25-26, 2018, University of Belgrade – Faculty of Physical Chemistry, Book of abstracts, pp. 83-85.

#### Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу (M64):

1. **Simović, B.**, Poleti, D., Dapčević, A., Branković, G., Matković, A., Golubović, A.: „Enhanced photocatalytic activity of Ag modified ZnO nanopowders prepared by solvothermal method”, - *22<sup>nd</sup> Conference of the Serbian Crystallographic Society*, Smederevo, Serbia, June 11-13, 2015., Abstracts, pp. 31-32.
2. **Simović, B.**, Dapčević, A., Zdravković, J., Branković, G.: „Phase transition from nanostructured titania to layered titanate”, *25<sup>nd</sup> Conference of the Serbian Crystallographic Society*, Bajina Bašta, Serbia, June 21-23, 2018., Book of Abstracts, pp. 92-93.
3. **Simović B.**, Branković G., Dapčević A., *Photocatalytic degradation of RO16 dye using hydrothermally synthesized CeO<sub>2</sub>/ZnO composites*, 27th Conference of Serbian Crystallographic Society, Kragujevac, Serbia, September 16-17, 2021., Book of Abstracts, pp. 72-73.

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

Оригиналност докторске дисертације „Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи”, аутора Бојане Симовић, дипломираног инжењера технологије проверена је на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204/22. 6. 2018.) помоћу програма iThenticate. Утврђено је да подударање текста износи 4 %. Овај степен подударности последица је дефиниција, устаљених фраза, стручних термина и израза, назива метода, хемикалија и њихових скраћеница, описа стандардних експерименталних процедура, цитата, личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, као и претходно публикованих резултата истраживања проистеклих из дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника. На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, сматрамо да је утврђено да је докторска дисертација кандидата Бојане Симовић у потпуности оригинална, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

## 6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега наведеног, Комисија је мишљења да докторска дисертација **„Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“** кандидата Бојане Симовић, дипл. инж. техн. представља оригиналан и значајан научни допринос у области истраживања Технолошко инжењерство, што је потврђено објављивањем резултата у врхунским и истакнутим међународним часописима и часописима међународног значаја. Комисија сматра да су предмет и циљеви докторске дисертације у потпуности испуњени и да дисертација под називом **„Синтеза и карактеризација наноструктурних материјала на бази цинк-оксида, титан-диоксида и церијум-диоксида за примену у фотокатализи“** задовољава све потребне критеријуме, као и да је Кандидат показао висок степен самосталности и оригиналности у свом раду.

Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос добијених резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да прихвати овај Реферат и поднету дисертацију кандидата Бојане Симовић, дипломираног инжењера технологије, и да их изложи на увид јавности у законски предвиђеном року, као и да Реферат упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, па да након завршетка процедуре позове Кандидата на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду, 28. 2. 2022.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

Др Александра Дапчевић, ванредни професор  
Универзитет у Београду,  
Технолошко-металуршки факултет

---

Др Јелена Роган, ванредни професор  
Универзитет у Београду,  
Технолошко-металуршки факултет

---

Др Милан Жунџић, виши научни сарадник  
Универзитета у Београду,  
Институт за мултидисциплинарна истраживања