УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ - ФАКУЛТЕТ ЗА ФИЗИЧКУ ХЕМИЈУ
НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

На V редовној седници Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију одржаној 13. 02. 2025. године именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидаткиње Срне Стојановић, мастер физикохемичара, под насловом:

„Синтеза и карактеризација нанокомпозитних материјала на бази титан(IV)-оксида и зеолита (HEU, MFI, FAU) за уклањање одабраних органских загађујућих супстанци из водених средина”.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Факултета за физичку хемију, са IV редовне седнице одржане 18. 01. 2021. године одобрена је израда докторске дисертације под горе наведеним насловом. На основу те одлуке, Веће научних области природних наука Универзитета у Београду на седници одржаној 28. 01. 2021. године, дало је сагласност да се прихвати предложена тема докторске дисертације. На основу прегледа и анализе докторске дисертације кандидаткиње, Наставно-научном већу подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

А. Приказ садржаја докторске дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње Срне Стојановић написана је на српском језику, на 134 страна А4 формата куцаног текста (фонт *Times New Roman* величина 12 типографских тачака и проред 1 ред). Дисертација је припремљена према Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду и садржи 7 поглавља: **Увод** (1 страна), **Теоријски део** (25 страна), **Предмет и циљ истраживања** (1 страна), **Експериментални део** (7 страна), **Резултати и дискусија** (62 страна), **Закључци** (3 стране) и **Литература** (20 страна). Поред наведеног, дисертација садржи и **Насловну страну на српском језику** (1 страна), **Насловну страну на енглеском језику** (1 страна), **Списак ментора и чланова комисије** (1 страна), **Захвалницу** (1 страна), **Сажетак на српском језику** (1 страна), **Сажетак на енглеском језику** (1 страна), **Садржај** (2 стране), **Прилог** (1 страна), **Биографију кандидаткиње** (1 страна), **Списак објављених радова** (1 страна) и **Изјаве прописане правилима Универзитета о подношењу докторске дисертације** (4 стране). Дисертација садржи укупно 60 слика (14 слика у поглављу Теоријски део и 46 слика у поглављу Резултати и дискусија) и 14 табела (у поглављу Резултати и дискусија), од којих 46 слика и 14 табела представљају оригиналне резултате кандидаткиње.

У **Уводу** дат је кратак осврт на област истраживања и циљ ове докторске дисертације који подразумева уклањање органских загађујућих супстанци из водених средина у присуству композитних материјала на бази наночестичног титан(IV)-оксида (TiO_2) и зеолита различите структуре и хемијског састава. Укратко су описана ограничења примене наночестичног TiO_2 и представљен начин решавања овог проблема коришћењем зеолита као носача за наночестични TiO_2.

Поглавље **Теоријски део** састоји се од пет целина. У првој целини описане су опште карактеристике зеолита и HEU, MFI и FAU структуре зеолита. Друга целина се бави полупроводничким материјалима, а посебна пажња је усмерена на TiO_2. Трећа целина је посвећена механизму хетерогене фотокатализе у присуству TiO_2, где су представљени основни принципи, кинетика као и параметри који утичу на ефикасност фотокаталитичког процеса. У четвртој целини дат је кратак осврт на органске загађујуће супстанце, законску регулативу и њихово присуство у животној средини, са фокусом на супстанце које су од интереса у овој дисертацији. Међу њима су ендокрини ометач бисфенол А (BPA), фармацеутски активне супстанце: атенолол (ATL), који припада групи β-блокатора и користи се у терапији хипертензије и ибупрофен (IBF), који припада групи нестероидних антиимфламаторних лекова, као и хербицид кломазон (CLO). Наведене су и физичко-хемијске особине ових органских загађујућих супстанци. Пета целина садржи преглед литературе о примени TiO_2/зеолит нанокомпозита за уклањање органских загађујућих супстанци из водених раствора.

У поглављу **Предмет и циљ истраживања** представљен је предмет истраживања ове дисертације који обухвата синтезу TiO_2/зеолит нанокомпозитних материјала и испитивање њихове ефикасности за уклањање различитих загађујућих супстанци. Такође у овом поглављу су дефинисани циљеви истраживања, који су били следећи: а) синтеза TiO_2/зеолит нанокомпозита коришћењем природног зеолита клиноптилолита (Cli), синтетичких зеолита (ZSM-5 и 13X) и TiO_2 (комерцијални TiO_2 P25 и наноцеви TiO_2) економски оправданим и једноставним поступком, б) карактеризација структурних, морфолошких, површинских и оптичких својстава припремљених TiO_2/зеолит нанокомпозита, в) евалуација ефикасности TiO_2/зеолит нанокомпозита за уклањање одабраних загађујућих супстанци: BPA, ATL-а, CLO-а, као и смеше пестицида из отпадне воде фабрике пестицида, где су испитивана адсорпциона својства и фотокаталитичка активност добијених материјала, г) оптимизација фотокаталитичког процеса кроз испитивање утицаја количине фотокатализатора, pH вредности воденог раствора загађујуће супстанце, додатка водоник-пероксида, као и могућност поновне употребе нанокомпозита и одређивање кинетичких параметара фотокаталитичког процеса и поређење са полазним TiO_2 и другим материјалима из литературе и д) анализа механизма разградње загађујућих супстанци (ATL-а и пестицида) у присуству TiO_2/ZSM-5 нанокомпозита.

У поглављу **Експериментални део** наведени су полазни зеолити који су коришћени за припрему TiO_2/зеолит нанокомпозита. Описан је поступак синтезе наноцеви TiO_2 и TiO_2/зеолит нанокомпозита. Наведене су методе карактеризације заједно са експерименталним условима и коришћеним инструментима, а које су биле следеће: дифракција рендгенских зрака на праху (XRPD), инфрацрвена спектроскопија са Фуријевом трансформацијом (FTIC), УВ-Вид дифузна рефлексиона (UV-Vis DR) спектроскопија, нискотемпературска адсорпција азота, скенирајућа електронска микроскопија са енергетски дисперзионом детекцијом X-зрачења (SEM-EDS), трансмисиона електронска микроскопија (TEM), микроскопија атомских сила (AFM), дифракција ласерске светлости и динамичко расејање светлости. Такође, за експерименте испитивања фотокаталитичке активности припремљених материјала наведени су услови извођења експеримената и методе које су коришћене за одређивање промене концентрације загађујућих супстанци и детектовање производа разградње: UV-Vis спектроскопија, течна хроматографија високих перформанси (HPLC) са UV детекцијом и гасна хроматографија у комбинацији са масеном спектрометријом (GH-MS).

У поглављу **Резултати и дискусија** приказани су добијени резултати организовани у три целине. У првој целини представљени су резултати физичкохемијске карактеризације TiO_2/зеолит нанокомпозита припремљених са природним зеолитом Cli и наночестичним TiO_2. У другој целини приказани су резултати физичкохемијске карактеризације нанокомпозита синтетисаних са синтетичким зеолитима ZSM-5 и 13X и TiO_2 (комерцијалне наночестице и синтетисане наноцеви). Трећа целина обухвата резултате уклањања органских загађујућих супстанци BPA, ATL-a, IBF-a, CLO-a и смеше пестицида из водених раствора у присуству синтетисаних TiO_2/зеолит нанокомпозита и ради поређења у присуству полазних зеолита и извора TiO_2. Трећа целина је подељена на неколико потпоглавља, где су у првом потпоглављу приказани резултати фотокаталитичке разградње BPA у присуству нанокомпозита са природним зеолитом Cli и комерцијалним TiO_2 P25 наночестицама. Затим, у другом потпоглављу представљени су резултати адсорпције и фотокаталитичке разградње ATL-a из воденог раствора у присуству TiO_2/зеолит нанокомпозита припремљених са Cli, ZSM-5 и 13X зеолитима и TiO_2 (комерцијалне наночестице и синтетисане наноцеви). У трећем потпоглављу изложени су резултати уклањања IBF-a у присуству нанокомпозита добијених од ZSM-5 зеолита са различитим односом Si/Al и TiO_2 P25 наночестица, као и нанокомпозитима са TiO_2 наноцевима и Cli, ZSM-5 и 13X зеолитима. У последњем потпоглављу представљени су резултати уклањања CLO-a из воденог раствора и смеше пестицида из отпадне воде фабрике пестицида у присуству TiO_2/ZSM-5 нанокомпозита (извор TiO_2 – комерцијалне наночестице P25 и синтетисане наноцеви) који су се претходно показали као најефикаснији материјали за уклањање ATL-a и IBF-a из водених раствора. Приказани су и резултати механизма разградње ATL-a и смеше пестицида.

У поглављу **Закључци** сумирани су најважнији резултати истраживања и закључци ове докторске дисертације.

У поглављу **Литература** дат је преглед научних радова, књига и других извора који су коришћени при изради докторске дисертације, наведених према реду појављивања у тексту.

Б. Кратак преглед остварених резултата

У овој докторској дисертацији успешно су синтетисани TiO_2/зеолит нанокомпозитни материјали на бази зеолита различитих структура и хемијског састава: природног зеолита Cli (HEU) и синтетичких зеолита 13X (FAU) и ZSM-5 (MFI), као и два извора TiO_2 (TiO_2 P25 наночестице и TiO_2 наноцеви). Наноцеви TiO_2 су синтетисане хидротермалном синтезом у базној средини и термално третиране (TNT). TiO_2/зеолит материјали су синтетисани једноставном и економски оправданом методом дисперговања у чврстој фази потпомогнутој ултразвуком. Добијени TiO_2/зеолит нанокомпозити су окарактерисани бројним методама и испитивана је њихова примена за уклањање органских загађујућих супстанци BPA, ATL-a, IBF-a и CLO-a из водених раствора, као и за уклањање смеше пестицида из отпадне воде фабрике пестицида Агросава д.о.о. из Београда.

Резултати карактеризације припремљених нанокомпозита методама XRPD, FTIC спектроскопије и SEM показали су успешну имобилизацију TiO_2 на испитиваним зеолитима, при чему није дошло до промене структуре зеолита, а оптичка својства TiO_2 наночестица у припремљеним нанокомпозитима остала су очувана, што је потврђено резултатима UV-Vis DR спектроскопије. Хемијски састав, одређен EDS анализом указао је

на разлике у количини TiO_2 у нанокомпозитима у зависности од врсте зеолита и извора TiO_2. Количина од 31,9 ± 3,0 мас. % TiO_2 детектована је код нанокомпозита са Cli који је синтетисан са 20 мас. % TiO_2 P25 наночестица у односу на масу Cli, док је код нанокомпозита са Cli и 20 мас. % TNT детектовано 24,7 ± 2,0 масених % TiO_2. Ови резултати указују на агломерацију TiO_2 наночестица на површини зеолита. Код нанокомпозита припремљених са ZSM-5 и 13X зеолитима и 20 мас. % TiO_2 детектована количина TiO_2 била је у очекиваном опсегу, са вредностима од 17,9 ± 0,6 до 22,9 ± 1,6 мас. % TiO_2. Анализом текстуралних својстава установљено је смањење специфичне површине свих нанокомпозита у поређењу са полазним зеолитима, услед депоновања TiO_2 на површину и делимичног блокирања пора. Методом динамичког расејања светлости измерен је зета потенцијал у функцији pH и резултати су показали да нанокомпозити и полазни зеолити имају сличне вредности изоелектричних тачака, што указује да површина нанокомпозита задржава својства слична полазним зеолитима због ниске концентрације TiO_2.

Резултати испитивања фотокаталитичке активности припремљених TiO_2/зеолит хибридних материјала су груписани према испитиваној загађујућој супстанци. Најпре је дат преглед резултата добијених у експериментима уклањања BPA. Показано је да се хибридни материјал са Cli и 20 мас. % TiO_2 P25 (ознака: TCli-20) добијен једноставном и економски исплативом методом синтезе може успешно користити за уклањање BPA из воденог раствора при излагању симулираном сунчевом зрачењу. Оптимални услови синтезе овог нанокомпозита постигнути су коришћењем методе дисперговања у чврстој фази са 15 мин излагања ултразвуку. Резултати су показали да се комплетна разградња BPA постиже након 180 мин осветљавања при следећим експерименталним условима: 2 g/L катализатора, природни pH = 6,4, а додатак мале количине H_2O_2 (10 μL) у реакциону суспензију је успешно скратио време осветљавања на 120 мин. У узорку флаширане воде за пиће са растворeним BPA, уклоњен је мањи проценат BPA (60%) након 180 мин осветљавања у присуству TCli-20, што се може објаснити присуством бикарбонатних јона у води који ометају фотокаталитички процес. TCli-20 је показао добру стабилност при поновној употреби, са 70% уклањања BPA након четвртог циклуса употребе. Дакле, резултати су показали да је TCli-20 ефикасан хибридни фотокатализатор, једноставан за одвајање из водене фазе и погодан за вишеструку употребу за уклањање BPA из воденог раствора.

Резултати испитивања уклањања ATL-а су показали да је у присуству нанокомпозита са ZSM-5 зеолитом са односом Si/Al = 40 и 20 мас. % TiO_2 P25 наночестица (ознака: TZSM5(40)-20) постигнут највећи проценат уклањања ATL (94%) након 70 мин излагања симулираном сунчевом зрачењу, комбинацијом адсорпције и фотокаталитичке разградње. У случају нанокомпозита са истим зеолитом и 20 мас. % TNT (ознака: nTZSM5(40)-20), уклоњено је 88% ATL-а из воденог раствора. Ефикасност нанокомпозита са Cli била је мања. У присуству TCli-20 нанокомпозита уклоњено је ~ 45% ATL-а из воденог раствора због агломерације TiO_2 P25 наночестица а сличан проценат уклањања ATL-а из воденог раствора (~ 57%) остварен је у присуству полазних TNT и нанокомозита са Cli и 20 мас. % TNT. У присуству нанокомпозита са 13X зеолитом уклоњен је најмањи проценат ATL-а (~ 50%). За најефикасније хибридне материјале (TZSM5(40)-20 и nTZSM5(40)-20) испитиван је утицај pH вредности и урађена је студија поновне употребе. Резултати су показали да се најбољи резултати уклањања ATL-а добијају на природној pH вредности суспензије (pH = 6,5). Тестови поновне употребе ових материјала показали су смањење ефикасности кроз узастопне циклусе, али и да процес калцинације може успешно

обновити првобитну адсорпцију и фотокаталитичку активност, потврђујући стабилност и могућност поновне употребе ових материјала за уклањање ATL-а из воденог раствора.

Испитивано је и уклањање IBF-а из водених раствора у присуству нанокомпозита са ZSM-5 зеолитом са различитим односом Si/Al (11,5, 15, 25, 40, 140) и 20 мас. % TiO_2 P25 наночестица при осветљавању UV светлошћу. Резултати адсорпције и фотокаталитичке разградње IBF-а у присуству полазних ZSM-5 зеолита и TiO_2/ZSM-5 нанокомпозита показали су да ZSM-5 зеолити са различитим односима Si/Al имају различит афинитет за адсорпцију IBF-а. Зеолит ZSM-5 са Si/Al = 11,5 није адсорбовао IBF. Са повећањем односа Si/Al расла је и адсорпција IBF-а: ZSM-5 са Si/Al = 15 адсорбовао је 11% IBF-а, ZSM-5 са Si/Al = 25 адсорбовао је 19% IBF-а, а ZSM-5 са Si/Al = 40 адсорбовао је 26% IBF-а, док је код ZSM-5 са Si/Al = 140 забележено смањење адсорпције (15%). Највећи проценат уклањања IBF-а из воденог раствора (85%) остварен је у присуству TZSM5(40)-20 нанокомпозита након 80 мин осветљавања захваљујући комбинованом процесу адсорпције и фотокаталитичке разградње, док су остали испитивани нанокомпозити били мање ефикасни. Резултати испитивања утицаја pH вредности у присуству TZSM5(40)-20 показали су да се на природној pH вредности суспензије (pH = 4,5) постиже максимално уклањање IBF-а (85%), док је на pH = 3,0; 7,0 и 10,0 ефикасност била нижа (70%, 29% и 27%). Такође, уклањање IBF-а из флаширане воде за пиће у присуству TZSM5(40)-20 нанокомпозита било је смањено (само 32%), што се може објаснити pH вредношћу реакционе суспензије pH = 7,0 што је довело до смањења ефикасности уклањања IBF-а.

Проучавана је ефикасност TiO_2/ZSM-5 нанокомпозита, као и извора TiO_2 (TiO_2 P25 и TNT) за фотокаталитичку разградњу хербицида CLO-а под дејством симулираног сунчевог зрачења. Резултати добијени применом GH-MS методе показали су да је након 60 мин осветљавања у присуству TiO_2 P25, TNT и TZSM5(40)-20 постигнуто потпуно уклањање CLO-а, а у случају nTZSM5(40)-20 уклоњено је 96% CLO-а. Производи разградње CLO-а нису детектовани, што може бити последица експерименталних услова. TiO_2/ZSM-5 хибридни материјали су додатно испитивани и за уклањање смеше пестицида из отпадне воде фабрике пестицида. У отпадној води идентификовани су следећи хербициди: тербутилазин, метамитрон, метрибузин, бентазон, металаксил, халоксифоп-метил, мефенпир-диетил и дитиокарбамати, а најзаступљенији је био CLO. Испитивани материјали су се показали успешни у уклањању CLO-а из сложене смеше као што је индустријска отпадна вода где је након 180 мин осветљавања, у присуству TZSM5(40)-20 уклоњено 87,5% CLO-а, nTZSM5(40)-20 ~ 53,0%, док је у присуству TiO_2 и TNT уклоњено 87,5% и 88,6% CLO-а, редом. Укупна ефикасност уклањања пестицида из узорка отпадне воде износила је 86,7% за TZSM5(40)-20, 68,6% за nTZSM5(40)-20, 88,6% за TiO_2 P25 и 86% за TNT. Потпуно уклањање пестицида из ове сложене смеше захтевало би дужи период осветљавања. Након фотокаталитичке разградње у присуству испитиваних материјала, идентификована су три производа разградње тербутилазина и два производа разградње метрибузина, што је пружило увид у механизам разградње ових хербицида. Резултати екотоксиколошких тестова су показали да нетретирана отпадна вода није изазвала инхибицију луминесценције бактерије *Aliivibrio fischeri*, док су узорци након фотокаталитичке разградње показали инхибицију у распону од 18% до 52%, што је приписано присуству TiO_2 честица, а не једињењима присутним у узорцима.

Резултати истраживања добијени у оквиру ове дисертације потврдили су да TiO_2/зеолит нанокомпозити, припремљени једноставном и економичном процедуром, представљају ефикасне хибридне материјале за уклањање различитих органских

загађујућих супстанци из водених раствора. Посебно су се као ефикасни показали TiO_2/ZSM-5 хибридни материјали у уклањању ATL-а, IBF-а, CLO-а, као и сложене смеше пестицида из индустријске отпадне воде. Поред тога, утврђено је да је природни зеолит Cli, пореклом из рудника Златокоп у Србији и коришћен без предтретмана, погодан за припрему економски исплативог TiO_2/Cli нанокомпозита, у чијем присуству се успешно могу уклонити две загађујуће супстанце BPA и ATL из воденог раствора. Резултати указују да је пажљив избор зеолита, узимајући у обзир његову структру и хемијски састав, од значаја за успешно комбиновање карактеристика зеолита и TiO_2 и да се могу употребити за дизајн одговарајућег хибридног фотокатализатора посебно за уклањање загађујућих супстанци које све више привлаче пажњу научне заједнице.

B. Упоредна анализа резултата кандидата са резултатима из литературе

Недавно објављени научни радови сведоче да је последњих година у истраживачкој заједници повећан интерес за проучавање TiO_2/зеолит материјала за уклањање различитих загађујућих супстанци из окружења [1,2]. На фотокаталитичку ефикасност TiO_2/зеолит материјала значајно утичу својства TiO_2 (величина честица, кристала фаза) као и избор и карактеристике зеолита (однос Si/Al, врста ванмрежних катјона, величине канала и пора, кристална структура и адсорпционе способности). Из тих разлога, испитују се различите врсте зеолита у циљу проналаска ефикасних композита за разградњу различитих загађујућих супстанци.

Истраживања спроведена у оквиру ове дисертације фокусирана су на синтезу, карактеризацију и примену TiO_2/зеолит нанокомпозитних материјала за уклањање органских загађујућих супстанци (BPA, ATL-а, IBF-а и CLO-а) из водених раствора. У циљу добијања ефикасних хибридих фотокатализатора анализиране су различите зеолитске структуре (HEU (природни зеолит Cli), MFI (ZSM-5 зеолит) и FAU (13X зеолит)) и различити извори TiO_2 (комерцијалне TiO_2 P25 наночестице и синтетисане TiO_2 наноцеви), као и различите количине TiO_2. Једна од новина овог истраживања је депоновање хидротермално синтетисаних TiO_2 наноцеви на различите зеолите применом једноставне методе дисперговања у чврстој фази потпомогнуте ултразвуком, као и испитивање њихове ефикасности у уклањању различитих загађујућих супстанци из водених средина, што до сада није проучавано.

Истраживања о примени TiO_2/зеолит материјала за разградњу ендокриног ометача BPA су ретка. Према доступним подацима, синтетички зеолит Y коришћен је за припрему TiO_2/зеолит слојева техником прављења папира [3], као и за припрему Cu_2O/TiO_2/зеолит материјала за уклањање BPA [4]. Међутим, у литератури нема података о уклањању BPA у присуству TiO_2/зеолит материјала на бази природног зеолита Cli. Такође, нису спроведена истраживања о имобилизацији тј. депоновању TiO_2 на природни зеолит Cli пореклом из рудника Златокоп у Србији, који је лако доступан и има ниску цену. Резултати ове дисертације показују да се применом методе дисперговања у чврстој фази потпомогнутој ултразвуком на једноставан и економичан начин може добити фотокатализатор са Cli и 20 мас. % P25 TiO_2 наночестица, у чијем присуству се постиже потпуно уклањање BPA након 180 мин осветљавања симулираним сунчевим зрачењем. Ово истраживање пружа резултате о ефикасности TiO_2/Cli нанокомпозита за уклањање BPA и указује на потенцијал овог нанокомпозита за ширу примену.

TiO_2/зеолит нанокомпозити су испитивани за уклањање различитих фармацеутски активних супстанци попут амоксицилина [5], међутим у само неколико студија је испитивано уклањање ATL-а и IBF-а [6, 8-9]. У једној студији, 55% ATL-а је уклоњено из воденог раствора у присуству TiO_2 имобилисаног на иранском природном Cli (композит је садржао 3,4 мас. % TiO_2) при експерименталним условима где је коришћено 3 g/L катализатора, почетна концентрација ATL-а је била 0,01 g/L, базна средина (pH = 9), након 60 мин при осветљавању UV лампом, док је ~ 35% уклоњено под дејством зрачења Xe лампе [6]. У фотокаталитичким експериментима разградње ATL-а урађеним у овој докторској дисертацији, pH вредност суспензије ATL-а са TiO_2/Cli и TiO_2/13X нанокомпозитима је такође била базна (pH = 9-10). У другој студији је испитивано уклањање метопролола, фармацеутски активне супстанце која припада групи β-блокатора. Показано је да након 360 мин излагања блиском UV зрачењу уз додатак H_2O_2, ~ 85% метопролола уклоњено у присуству композита на бази мексичког природног зеолита Cli и 30 масених % TiO_2 P25 (при експерименталним условима: 1 g/L катализатора, почетна концентрација 0,02 g/L, pH = 9) [7]. Резултати добијени у оквиру ове дисертације су показали да је највећа ефикасност уклањања ATL-а из воденог раствора постигнута у присуству нанокомпозита са 20 мас. % TiO_2 P25 и ZSM-5 зеолитом (уклоњено 94%) након 70 мин осветљавања симулираним сунчевим зрачењем (при експерименталним условима: концентрација ATL-а 0,05 g/L, 1 g/L катализатора, pH = 6,6) услед комбинованог ефекта адсорпције и фотокаталитичке разградње. У присуству нанокомпозита са TiO_2 наноцевима и ZSM-5 зеолитом уклоњено је 88% ATL, док су материјали са Cli и 13X зеолитом показали мању ефикасност уклањања ~45% и ~50%, редом. Значајан резултат представља и могућност поновне употребе нанокомпозита са ZSM-5 зеолитом јер је показано да задржава добру активност након неколико циклуса употребе, уз делимичан губитак ефикасности који се може обновити калцинацијом.

Уклањање IBF-а из воденог раствора у присуству хибридних фотокатализатора на бази зеолита, био је предмет истраживања малог броја студија [8,9]. У овој дисертацији испитивано је уклањање IBF-а из воденог раствора у присуству нанокомпозита припремљених са 20 мас. % TiO_2 P25 наночестица и ZSM-5 зеолитом са различитим односом Si/Al (11,5, 15, 25, 40, 140). Према литературним подацима, у једној студији у присуству Pd-TiO_2/ZSM-5 катализатора постигнуто је 80% уклањања IBF-а из воденог раствора почетне концентрације 0,01 g/L, уз 0,17 g/L катализатора након 300 мин осветљавања UV-C зрачењем (ниског интензитета) [8]. Насупрот томе, нанокомпозити испитивани у овој дисертацији постигли су већу ефикасност за знатно краћи временски период при већој почетној концентрацији IBF-а (C_0 = 0,03 g/L) и већој количини катализатора (1 g/L). У другој студији, 97,5% IBF-а је уклоњено из воденог раствора у присуству зеолит-титанат фотокатализатора при експерименталним условима: C_0 = 0,1 g/L, 6 W UV-C лампа, pH = 7, 0,7 mL H_2O_2, 1,67 g/L катализатора и 100 мин симултаног излагања зрачењу лампе и ултразвуку [9]. У овој дисертацији највеће уклањање IBF-а од 85 % након 80 мин осветљавања UV светлошћу добијено је у присуству нанокомпозита са ZSM-5 зеолитом (Si/Al = 40) и 20 мас. % TiO_2 P25 наночестица. Поред тога, за уклањање IBF-а из воденог раствора испитивани су и TiO_2/13X и TiO_2/Cli нанокомпозити и у њиховом присуству ефикасност уклањања IBF-а била је мања (~70% и ~50%, редом), што потврђује значај избора зеолитске структуре, као и Si/Al односа при припреми нанокомпозита са TiO_2 намењених за фотокаталитичку разградњу фармацеутски активних супстанци.

Према доступној литератури, до сада нису објављене студије које испитују уклањање хербицида CLO-а у присуству TiO_2/зеолит нанокомпозита. Ова дисертација представља прво истраживање уклањања овог хербицида из воденог раствора у присуству TiO_2/ZSM-5 нанокомпозита. Поред тога, новина коју ова дисертација доноси је и испитивање уклањања смеше пестицида из отпадне воде фабрике пестицида у присуству TiO_2/ZSM-5 нанокомпозита што је још један од значајних доприноса ове тезе.

Литература:

[1] S.J. Armaković, S. Armaković, Zeolite-Supported TiO_2 for Enhanced Photocatalytic Performance in Environmental Applications: A Review, Catalysts 15 (2025) 174. https://doi.org/10.3390/catal15020174.

[2] S. MiarAlipour, D. Friedmann, J. Scott, R. Amal, TiO_2/porous adsorbents: Recent advances and novel applications. J. Hazard. Mater. 341 (2018) 404–423. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.070.

[3] S. Fukahori, H. Ichiura, T. Kitaoka, H. Tanaka, Capturing of bisphenol A photodecomposition intermediates by composite TiO_2-zeolite sheets. Appl. Catal. B-Environ. 46 (2003) 453–462. https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00270-4.

[4] C.Y. Kuo, C.H. Wu, H.Y. Lin, Synergistic effects of TiO_2 and Cu_2O in UV/TiO_2/zeolite-based systems on photodegradation of bisphenol A, Environ. Technol. 35 (2014) 1851–1857. https://doi.org/10.1080/09593330.2014.884635.

[5] D. Kanakaraju, J. Kockler, C.A. Motti, B.D. Glass, M. Oelgemöller, Titanium dioxide/zeolite integrated photocatalytic adsorbents for the degradation of amoxicillin, Appl. Catal. B 166-167 (2015) 45-55. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.001.

[6] Z. Mehrabadi, H. Faghihian, Comparative photocatalytic performance of TiO_2 supported on clinoptilolite and TiO_2/Salicylaldehyde-NH_2-MIL-101(Cr) for degradation of pharmaceutical pollutant atenolol under UV and visible irradiations. J. Photochem. Photobiol. A Chem. 356 (2018) 102–111. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.12.042.

[7] J.G. Piedra López, O.H. González Pichardo, J.A. Pinedo Escobar, D.A. de Haro del Río, H. Inchaurregui Méndez, L.M. González Rodríguez, Photocatalytic degradation of metoprolol in aqueous medium using a TiO_2/natural zeolite composite. Fuel 284 (2021) 119030. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119030.

[8] T.F. Ferens, L.J. Visioli, A.T. Paulino, H. Enzweiler, Photodegradation of ibuprofen by Pd-TiO_2/ZSM-5 catalyst. Int. J. Environ. Sci. Technol. 22 (2025) 6759-6768. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06076-8.

[9] N. Farhadi, T. Tabatabaie, B. Ramavandi, F. Amiri, Optimization and characterization of zeolite-titanate for ibuprofen elimination by sonication/hydrogen peroxide/ultraviolet activity. Ultrason. Sonochem. 67 (2020) 105122. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105122.

Г. Научни радови и саопштења публиковани из резултата дисертације

Из резултата докторске дисертације Срне Стојановић проистекла су три рада на којима је кандидаткиња први аутор (М21, М22 и М23). Поред тога, резултати су приказани у три саопштења са међународних скупова штампана у целини (М33) и три саопштења са међународних скупова штампана у изводу (М34).

Рад у врхунском међународном часопису (М21):

1. **S. Stojanović,** V. Rac, K. Mojsilović, R. Vasilić, S. Marković, Lj. Damjanović-Vasilić, Photocatalytic degradation of bisphenol A in aqueous solution using TiO_2/clinoptilolite hybrid photocatalyst. Environ. Sci. Pollut. Res. 30 (2023) 84046–84060. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28397-w.

Рад у истакнутом међународном часопису (М22):

1. **S. Stojanović,** M. Vranješ, V. Rac, V. Rakić, Lj. Ignjatović, Lj. Damjanović-Vasilić, Photocatalytic performance of TiO_2/zeolites under simulated solar light for removal of atenolol from aqueous solution. Int. J. Environ. Sci. Technol. 20 (2023) 1-16. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04305-6.

Рад у међународном часопису (М23):

1. **S. Stojanović,** M. Ristić, D. Krajišnik, V. Rac, Lj. Damjanović-Vasilić, Removal of pharmaceutically active substance ibuprofen from aqueous solution using TiO_2/ZSM-5 zeolite hybrid photocatalysts. J. Serb. Chem. Soc. 89 (2024) 1587–1601. https://doi.org/10.2298/JSC241018098S.

Саопштења са међународних скупова штампана у целини (М33):

1. **S. Stojanović,** M. Damjanović, M. Lješević, V. Beškoski, V. Rac, Lj. Damjanović-Vasilić, The efficiency of TiO_2/zeolites for photocatalytic degradation of different pollutants from aqueous solution. 10th Slovenian-Serbian-Croatian Symposium on Zeolites, May 23-25, 2024, Ljubljana, Slovenia, Book of papers 10th Slovenian-Serbian-Croatian Symposium on Zeolites, p. 19, ISBN: 978-961-96672-0-0. (COBISS.SI-ID 196077827).
2. **S. Stojanović,** V. Rac, V. Rakić, Lj. Damjanović-Vasilić, Photocatalysis of bisphenol A in aqueous solution by zeolite/titania composites. 9th Croatian-Slovenia-Serbian Symposium on Zeolites, September 23-25, 2021, Split, Croatia, Proceedings of the 9th Croatian-Slovenian-Serbian Symposium on Zeolites, p. 35, ISBN: 2584-3176.
3. **S. Stojanović,** M. Vranješ, V. Rac, Z. Šaponjić, Lj. Damjanović-Vasilić, Photocatalytic activity of composite materials based on zeolites and TiO_2 nanoparticles, 8th Serbian-Croatian-Slovenian Symposium on Zeolites, October 3-5, 2019, Belgrade, Serbia, Proceedings of the 8th Serbian-Croatian-Slovenian Symposium on Zeolites, p. 58, ISBN: 978-86-916637-2-8.

Саопштења са међународних скупова штампана у изводу (М34):

1. **S. Stojanović,** M. Vranješ, V. Rac, Lj. Damjanović-Vasilić, Zeolite/titania nanocomposites for photocatalytic degradation of dyes. 22nd Annual Conference on Material Science, August 30-September 3, 2021, Herceg Novi, Montenegro, Program and Book of Abstracts, p. 138, ISBN: 978-86-919111-6-4.
2. **S. Stojanović,** M. Vranješ, V. Rac, D. Krajišnik, Z. Šaponjić, V. Rakić, Lj. Damjanović-Vasilić, Removal of ibuprofen, naproxen and atenolol from aqueous solution using TiO_2 nanotubes/zeolite composites under visible light irradiation, 8th Conference of the Federation of European Zeolite Associations (FEZA 2021), 5-9 July, 2021, Virtual, Book of abstracts.
3. **S. Stojanović,** V. Rac, M. Vranješ, Lj. Damjanović-Vasilić, Photodegradation of atenolol and salicylic acid using composites based on zeolite and TiO_2 nanoparticles, Eighteenth Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering, December 4-6, 2019, Belgrade, Serbia, Program and the Book of Abstracts, p. 37, ISBN: 978-86-80321-35-6.

Д. Провера оригиналности докторске дисертације

Провера оригиналности докторске дисертације извршена је на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду ("Гласник Универзитета у Београду" број 204 од 22. 06. 2018. године). Помоћу програма iThenticate извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидаткиње под називом "**Синтеза и карактеризација нанокомпозитних материјала на бази титан(IV)-оксида и зеолита (HEU, MFI, FAU) за уклањање одабраних органских загађујућих супстанци из водених средина**" и утврђено је да подударање текста (similarity index) износи 5%. Утврђени степен подударности произилази из употребе цитата, личних имена, библиографских података коришћене литературе, тзв. Општих места и података, као и претходно објављених резултата истраживања, који су произашли из њене дисертације, што је у складу са чланом 9. наведеног Правилника. На основу свега изнетог, Комисија је утврдила да је докторска дисертација кандидаткиње Срне Стојановић оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

Ђ. Закључак Комисије

На основу изложеног може се закључити да резултати кандидаткиње Срне Стојановић представљају оригиналан и значајан научни допринос у области физичке хемије, посебно у ужој научној области физичка хемија – хемијска термодинамика, материјали, физичка хемија – хемијска кинетика и физичка хемија – контрола и заштита животне средине. Резултати истраживања ове дисертације до сада су објављени у оквиру три научна рада (један рад у врхунском међународном часопису (М21), један рад у истакнутом међународном часопису (М22) и један рад у међународном часопису (М23)), као и шест саопштења са скупова од међународног значаја од којих су три штампана у целини (М33) и три штампана у изводу (М34). У складу са наведеним, Комисија сматра да кандидаткиња испуњава све услове за прихватање завршене докторске дисертације

прописане од стране Универзитета у Београду и услове дефинисане Правилником о изради и оцени докторске дисертације на Универзитету у Београду - Факултету за физичку хемију. На основу изложеног, Комисија позитивно оцењује дисертацију мастер физикохемичара Срне Стојановић под називом:

„Синтеза и карактеризација нанокомпозитних материјала на бази титан(IV)-оксида и зеолита (HEU, MFI, FAU) за уклањање одабраних органских загађујућих супстанци из водених средина”

и предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Факултета за физичку хемију да прихвати ову оцену Комисије, чиме би били испуњени сви услови за одобрење јавне одбране докторске дисертације и стицање звања кандидата доктор физичкохемијских наука.

У Београду, 26. 03. 2025. године

Комисија:

_____

др Љубиша Игњатовић, редовни професор
Универзитет у Београду - Факултет за физичку хемију

_____

др Никола Цвјетићанин, редовни професор
Универзитет у Београду - Факултет за физичку хемију

_____

др Владислав Рац, ванредни професор
Универзитет у Београду - Пољопривредни факултет