

Факултет ТЕХНОЛОШКО-
МЕТАЛУРШКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

2026 - 35/156

Веће научних области техничких наука

(Број захтева)

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

8. 5. 2026.

(Датум)

ЗАХТЕВ

**за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације
и о одређивању ментора**

Молимо да, сходно чл. 48 ст. 5 тач. 3) Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“ бр. 201/2018, 207/2019, 213/2020, 214/2020, 217/2020, 230/21, 232/22, 233/22 и 236/22), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

**Графитни угљеник(IV)-нитрид као фотокатализатор за редукцију шестовалентног
хрома: модификовање структуре ароматичним једињењима и имобилисање у полимерне
и неорганске матрице**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Технолошко инжењерство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:

Софија (Радослав) Петковић

2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):

Универзитет у Београду,

Технолошко-металуршки факултет, Инжењерство материјала, мастер инжењер технологије

3. Година завршетка
претходног нивоа студија: 2023.

4. Година уписа на докторске студије: 2023.

5. Назив студијског програма
докторских студија: Инжењерство материјала

6. Датум подношења пријаве
теме докторске дисертације: 9. 4. 2026.

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

за кандидата **Софија Петковић**

Име и презиме ментора: **др Рада Петровић**

Звање: редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. J. Petrović, S. Bulou, A. Bjelajac, T. Mudrinić, J. Guillot, **R. Petrović**, Tuning photocatalytic activity of g-C₃N₄ through Cu deposition via chemical reduction and a DBD plasma method for visible-light-driven Cr(VI) reduction, *RSC Advances*, 16 (2026) 16376; IF (2024) = 4,6; ISSN 2046-2069; doi: 10.1039/d5ra08483k
2. J. Petrović, Ž. Radovanović, K. M. Kamal, M. Medić, S. Kuzman, M. Gasik, M. Popović, Đ. Janačković, B. Likozar, **R. Petrović**, Can the treatment of urea-derived g-C₃N₄ with H₂SO₄ be optimized by varying the acid concentration to enhance the efficiency of photocatalytic Cr(VI) reduction?, *Applied Catalysis A, General* 707 (2025) 120506; IF (2024) = 4,8; ISSN 0926-860X; doi: 10.1016/j.apcata.2025.120506.
3. A. Bjelajac, **R. Petrović**, G. E. Stan, G. Socol, A. Mihailescu, I. N. Mihailescu, K. Veltruska, V. Matolin, Z. Siketić, G. Provatas, M. Jakšić, Dj. Janačković, C-doped TiO₂ nanotubes with pulsed laser deposited Bi₂O₃ films for photovoltaic application, *Ceramics International* 48 (2022) 4649–4657; IF(2022) = 5,2; ISSN 0272-8842; doi: 10.1016/j.ceramint.2021.10.251
4. A. Bjelajac, D. Kopač, A. Fecant, E. Tavernier, **R. Petrović**, B. Likozar, Dj. Janačković, Microkinetic modelling of photocatalytic CO₂ reduction over undoped and N-doped TiO₂, *Catalysis Science and Technology*, 10 (2020) 1688-1698; IF(2020) = 6,119; ISSN 2044-4753; doi:10.1039/C9CY02443C
5. A. Bjelajac, **R. Petrović**, J. Vujancević, K. Veltruska, V. Matolin, Z. Siketić, G. Provatas, M. Jakšić, G. Stan, G. Socol, I. Mihailescu, Dj. Janačković, Sn-doped TiO₂ nanotubular thin film for photocatalytic degradation of methyl orange dye, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 147 (2020) 109609; IF(2020) = 3,995; ISSN 0022-3697; doi: 10.1016/j.jpss.2020.109609

ДЕКАНКА ФАКУЛТЕТА

Проф. др Мирјана Кијевчанин

Обавештавамо вас да је Наставно-научно веће

(назив надлежног тела факултета)

на седници одржаној 7. 5. 2026. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

- Прилог
1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
 2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

ДП

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 33. Правилника о докторским студијама ТМФ-а на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 7. 5. 2026. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације и одређивању ментора

Прихвата се Извештај Комисије о научној заснованости теме за израду докторске дисертације кандидата **Софије Петковић**, број индекса 2023/4026, под називом: **„Графитни угљеник(IV)-нитрид као фотокатализатор за редуkcију шестовалентног хрома: модификовање структуре ароматичним једињењима и имобилисање у полимерне и неорганске матрице”**.

Одлуку о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације доноси Универзитет у Београду.

За ментора се одређује др Рада Петровић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору, Служби за наставно студентске послове и архиви Факултета.

Д Е К А Н К А

Проф. др Мирјана Кијевчанин

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о оцени научне заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње Софије Петковић, мастер инжењера технологије

Одлуком бр. 2026-35/109 од 9. априла 2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње Софије Петковић, мастер инжењера технологије, под насловом Графитни угљеник(IV)-нитрид као фотокатализатор за редукцију шестовалентног хрома: модификовање структуре ароматичним једињењима и имобилисање у полимерне и неорганске матрице.

На основу материјала приложеног уз пријаву теме кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Софија Петковић је рођена 7. септембра 1997. године у Њуприји, где је завршила основну и средњу школу као носилац Вукове дипломе. Године 2016. уписала је основне академске студије на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду, студијски програм Инжењерство материјала. Током основних академских студија добила је награду Технолошко-металуршког факултета „Панта С. Тутунџић“, а за изузетан успех у току студија добила је признање Српског хемијског друштва. Године 2021. завршила је основне академске студије одбраном завршног рада на тему „Електрохемијска синтеза наночестица сребра у хидрогеловима поливинил-алкохола и алгината“, под менторством проф. др Весне Мишковић-Станковића са просечном оценом 9,61.

Мастер академске студије завршила је 2023. године на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду, студијски програм Инжењерство материјала, са просечном оценом 10. Мастер рад под називом „Синтеза и примена композитних фотокатализатора на бази угљеник(IV)-нитрида и наночестица бакра за уклањање шетовалентног хрома из воде“, одбранила је под менторством проф. др Раде Петровић.

Докторске академске студије на студијском програму Инжењерство материјала на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду започела је 2023. године. Новембра исте године изабрана је у звање истраживач-приправник. Од јуна 2024. године запослена је у Иновационом центру Технолошко-металуршког факултета у Београду д.о.о (Иновациони центар), где се бави истраживањем у области полупроводничких материјала за фотокаталитичку редукцију шестовалентног хрома. Током докторских академских студија и рада у Иновационом центру, овладала је радом на различитим уређајима за карактеризацију, укључујући, скенирајућу електронску микроскопију са емисијом поља (FESEM), енергетску дисперзивну рендгенску спектроскопију (EDS), рендгенску дифракцију (XRD), Брунауер-Емет-Телер методу (BET), ултраљубичасто-видљиву спектроскопију (UV-Vis), дифузионо-рефлексиону спектроскопију (DRS), инфрацрвену спектроскопију са Фуријеовом трансформацијом (FTIR) и атомску апсорпциону спектроскопију (AAS). Софија Петковић је члан Српског хемијског друштва.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Докторске академске студије на студијском програму Инжењерство материјала на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду уписала је 2023. године. Положила је све испите предвиђене програмом са просечном оценом 9,90. Списак положених испита са оценама и ЕСП бодовима приказан је у следећој табели:

Назив предмета	Оцена	ЕСПБ
Одабрана поглавља нумеричке анализе	9	6
Наука о материјалима и инжењерство материјала	10	6
Докторска дисертација – уводни семинари и научноистраживачки рад 1	Не оцењује се	5
Хемија функционалних оксида	10	6
Термодинамика чврстог стања	10	6
Материјали за обновљиве изворе енергије	10	5
Структура стакла и стакластих материјала	10	5
Теоријски основи керамике и стакла	10	6
Методе карактеризације керамичких и стакластих материјала	10	5
Методологија научно-истраживачког рада	10	5
Докторска дисертација – уводни семинари и научноистраживачки рад 2	Не оцењује се	5
Завршни испит	10	30
Просек оцена/Збир ЕСПБ	9,90	90

Списак објављених радова и саопштења кандидаткиње

Категорија М34:

- Petković, S.**, Petrović, J., Radovanović, Ž., Janačković, Đ., Petrović, R. (2024). Investigating the possibility to anchor copper single atoms on graphitic carbon nitride via ion adsorption and subsequent chemical or thermal reduction. In *Proceedings/Conference on Electron Microscopy of Nanostructures ELMINA2024, Belgrade, Serbia, September 9-13* (p. 186). Belgrade: Serbian Academy of Sciences and Arts. (ISBN: 978-86-6184-056-2)
- Petković, S.**, Petrović, J., Janačković, Đ., Petrović, R. (2025). Graphitic carbon nitride modified with aromatic compounds for enhanced photocatalytic Cr(VI) reduction. In *Proceedings/Twenty-sixth Annual Conference YUCOMAT 2025, Herceg Novi, Montenegro, September 1-5* (p. 119). Belgrade: Materials Research Society of Serbia. (ISBN: 978-919111-8-8)
- Petković, S.**, Ugrinović, V., Petrović, R. (2025). Multiple synthesis approaches for terephthalic acid-modified g-C₃N₄ photocatalysts for efficient Cr(VI) reduction. In *Proceedings/5th International Meeting on Materials Science for Energy Related Applications, Belgrade, Serbia, September 25-26* (pp. 111–112). Belgrade: Faculty of Physical Chemistry, University of Belgrade. (ISBN: 978-86-82139-96-6)
- Petković, S.**, Matić, T., Petrović, J., Veljović, Đ., Petrović, R. (2025). g-C₃N₄/SiO₂ composites obtained by the microemulsion-assisted sol–gel method for the photocatalytic reduction of Cr(VI). In *Proceedings/16th ECerS Conference for Young Scientists in Ceramics, Novi Sad, Serbia, October 15-18* (p. 108). Novi Sad: Faculty of Technology, University of Novi Sad. (ISBN: 978-86-6253-199-5)

Категорија М64:

- Petković, S.**, Nešović, K., Janković, A., Perić-Grujić, A., Vukašinović-Sekulić, M., Kojić, V., Mišković-Stanković, V. (2021). Elektrohemijaska sinteza nanočestica srebra u hidrogelovima polivinil-alkohola i alginata. In *Proceedings/57. savetovanje Srpskog hemijskog društva, Kragujevac, Srbija, 18-19. jun* (p. 44). Beograd: Srpsko hemijsko društvo. (ISBN: 978-86-7132-077-1)

1.3. Оцена оспособљености кандидата за рад на предложеној теми

На основу увида у досадашњи научноистраживачки рад и постигнуте резултате током докторских академских студија, Комисија је утврдила да је Софија Петковић, мастер инжењер технологије, показала склоност ка бављењу научноистраживачким радом, што се огледа у способности да критички анализира литературу, самостално креира и реализује истраживања, сагледава и обрађује научне резултате, и презентује исте на међународним конференцијама. На основу свега наведеног, Комисија сматра да кандидаткиња испуњава све неопходне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Загађивање воде шестовалентним хромом (Cr(VI)) представља велики проблем за животну средину и људе, услед високе хемијске стабилности, способности биоаккумуляције, токсичности и канцерогености Cr(VI) [1], [2]. У природне воде Cr(VI) доспева најчешће путем испуштања отпадних вода из различитих грана индустрије, као што су процеси штављења коже, површинске заштите метала, производње пигмената, боја и керамике [3] [4], и др. Бројне технологије су развијане за уклањање Cr(VI) из воде, попут хемијске редукације и таложења, јонске измене, мембранске филтрације, електрохемијског третмана, биоремедијације и фотокатализе [5]. Фотокатализа се сматра потенцијално одрживим решењем, имајући у виду да је у питању процес који се заснива на фотоактивацији полупроводника (фотокатализатора) деловањем зрачења одговарајуће таласне дужине. Током овог процеса долази до прелаза електрона са валентине зоне на проводну зону полупроводника, који за собом оставља позитивну шупљину. Овако фотогенерисани електрони и шупљине учествују у оксидо-редукционим реакцијама.

Међу фотокатализаторима, графитни угљеник(IV)-нитрид ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) се истиче као полупроводник од значаја за редукацију Cr(VI) због великог редукационог потенцијала [6]. Структуру овог полупроводника чине слојеви три-*s*-триазин прстенова, који су у равни повезани преко -NH_2 група, а сами слојеви су међусобно повезани slabим ван дер Валсовим силама [7]. Овај полупроводник се одликује великом хемијском стабилношћу, малом токсичношћу и енергијом забрањене зоне $\sim 2,7$ eV, што омогућава активацију деловањем видљивог зрачења [8]. Ипак, чисти $g\text{-C}_3\text{N}_4$ има одређене недостатке попут брзе рекомбинације фотогенерисаних електрона и шупљина и мале специфичне површине [9]. Разне методе су примењиване за модификовање овог полупроводника да би се превазишли наведени недостаци. Често се примењује метода формирања хетероспојева, као и допирање хетероатомима, увођење дефеката итд. [10]. Међутим, слабе везе између компоненти доприносе малој стабилности хетероспоја, и још важније потенцијалном секундарном загађењу воде. С друге стране, допирањем и стварањем дефеката у структури уносе се нова потенцијална места за рекомбинацију, чиме се смањује фотокаталитичка активност полупроводника.

Недавна истраживања показују да се активност $g\text{-C}_3\text{N}_4$ може значајно побољшати оптимизацијом електронске структуре материјала, тј. делокализовањем π -електрона, такозваном донорско-акцепторском модификацијом. Три-*s*-триазин, градивна јединица структуре $g\text{-C}_3\text{N}_4$ садржи $\text{N}-(\text{C})_3$ групе са слободним паром електрона азота, који заправо омета делокализацију π -електрона у структури $g\text{-C}_3\text{N}_4$ [11]. Инкорпорисањем врсте са π -делокализованим прстеном (ароматичним прстеном), ствара се структура са јединицама већег и мањег афинитета према електрону (донорске и акцепторске јединице) [12] [13]. Присуство донорских и акцепторских јединица ствара унутрашње електрично поље, које снижава потребну енергију за раздвајање фотогенерисаних наелектрисања, али и олакшава пренос наелектрисања [14] [15]. Оваквом модификацијом структуре проширује се и опсег апсорпције видљивог зрачења, што омогућава коришћење ширег спектра видљиве светлости за фотокаталитичку редукацију Cr(VI) [16].

Заједничка кополимеризација прекурсора $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и ароматичног једињења омогућава увођење ароматичних прстенова у структуру, као што су бензен, тиазол, тиофуран, нафтален итд. Иако је до сада испитиван утицај инкорпорирања бензеновог прстена [17] коришћењем монокиселина [18] на структуру и својства $g\text{-C}_3\text{N}_4$, до сада није упоредно испитиван утицај увођења бензеновог прстена преко две односно три исте функционалне групе прстена, попут уноса терефталне (ТРА) и тримезинске

киселине (ТМА), које садрже две, тј. три карбоксилне групе. Поред бензеновог прстена, могуће је коришћење дицикличних једињења, која сама по себи имају веће поље делокализације електрона. Прстен нафталена је основни дициклични ароматични прстен, који се користио за донорско-акцепторску модификацију повезивањем преко једне функционалне групе [19]. Ипак, боља повезаност једињења модификатора и основне структуре $g-C_3N_4$ би требало да се постигне повезивањем преко две или више група, па је тако пожељно коришћење 1,5-дихидрокси нафталена (DHN). Испитиван је и утицај увођења хетероатомских ароматичних прстенова који садрже у својој структури азот или сумпор [20], али не и коришћењем 2-амино-5-нитротриазола (ANT), који у свом прстену, поред угљеника, садржи и азот и сумпор.

Фотокатализатори за пречишћавање воде се најчешће синтетишу и користе у виду финих прахова, што захтева додатни процес обраде, као што је таложњење и/или филтрација, да би се фотокатализатор одвојио од воде и поново користио. Такође, fine честице прахова су подложне агломерацији, што смањује активну површину за фотокаталитичке реакције. Адекватном имобилизацијом фотокатализатора у одговарајућу матрицу могуће је смањити агломерисање честица, повећати стабилност фотокатализатора, олакшати поновну употребу, што чини ове системе ефикаснијим у практичној примени [21]. Препоручљиво је да честице фотокатализатора које се уносе у матрицу буду што мање јер се тиме убрзава пренос наелектрисања, спречава рекомбинација фотогенерисаних електрона и шупљина, и побољшава адсорпција молекула загађујућих материја. Раслојавањем, односно екслојацијом $g-C_3N_4$ може се смањити дебљина честица, а једноставан начин да се постигне деламинација честица јесте хидротермални третман, захваљујући продирању молекула воде између слојева, чиме се добија већи број честица са мање слојева, а самим тим са већим бројем активних места за одвијање реакција [22].

Како би матрица била погодна за примену у имобилизацији фотокатализатора потребно је да буде: 1) инертна, односно отпорна на услове у којима се примењује (рН вредност, температура, зрачење), 2) транспарентна за зрачење које треба да активира фотокатализатор, и 3) оптимално порозна, како би загађујуће материје допрле до фотокатализатора. Најчешће коришћене матрице су полимерне матрице у виду хидрогелова, или керамичке у виду порозног стакла. У случају полимерних хидрогелова, имобилизација се изводи коришћењем прекурсора за матрицу и претходно синтетисаног $g-C_3N_4$, док се у случају керамичких носача користе претходно синтетисани носачи и прекурсор за $g-C_3N_4$. Одговарајућа порозност матрице се постиже избором методе синтезе или самом природом материјала. На пример, микроемулзиона сол-гел техника представља методу синтезе мезопорозног стакла (SiO_2) који се користи у биомедицини [23], али и за добијање композитних материјала за примену у фотокатализи [24] и адсорпцији [25] захваљујући мезопорозној структури која је погодна за импрегнацију различитих материјала. Током микроемулзионе сол-гел синтезе се прави микроемулзија уља у води стабилисана површински активном материјом, у коју се додаје једињење које је извор Si (тетраетил-ортосиликат, TEOS), и чија се рН вредност подешава тако да се обезбеди почетак хидролизе TEOS и формирање Si-O-Si веза. Испирањем и калцинацијом уклањају се површински активне материје, што обезбеђује настајање пора у облику канала и добијање сферних мезопорозних честица SiO_2 . Како синтетисани SiO_2 чине мезопорозне честице, импрегнацијом молекула урее у поре уз накнадни термички третман могуће је постићи добијање композита са добро диспергованим честицама $g-C_3N_4$.

С друге стране, хидрогелови су по природи порозни материјали, са тродимензионалном умреженом структуром, која се састоји од полимерних ланаца спојених у тачкама умрежења. Полимери се умрежавају хемијским или физичким путем на такав начин да могу да апсорбују и задрже велике количине воде у оквиру своје тродимензионалне мреже, без растварања. Физичко умрежавање представља формирање међумолекулских сила (водоничне везе, ван дер Валсове силе) између ланаца, док се током хемијског умрежавања формирају ковалентне везе између ланаца. Генерално, хемијски умрежени хидрогелови су стабилнији због јачих веза у структури, али је проблем што је за хемијско умрежавање потребно користити као умреживаче супстанце које су често токсичне, попут епихлорхидрина, глутаралдехида, N,N'-метилбисакриламида и натријум-тетрабората.

Целулоза представља погодан материјал за формирање хидрогелова имобилизацију фотокатализатора за пречишћавање воде, јер се јавља у изобиљу, добија се из обновљивих извора и одликује се хидрофилношћу, што обезбеђује интеракцију са молекулима воде и контакт загађујуће материје у води и имобилисаних честица фотокатализатора. Један од деривата целулозе је и хидрокси-етилцелулоза (HEC), чији се хидрогелови одликују хемијском стабилношћу и при нижим рН вредностима [26], што

је од изузетне важности јер се редукција Cr(VI) одвија углавном у киселој средини. Ланци овог полимера спречавају агрегацију честица фотокатализатора у хидрогелу и тиме обезбеђују већи број активних места за одигравање фотокаталитичке редукције Cr(VI). Како би се обезбедила стабилност хидрогела, може се синтетисати хемијским умрежавањем ланца полимера коришћењем лимунске киселине као нетоксичног једињења [27] [28].

Ипак, ови хидрогелови се одликују недовољно dobrим механичким својствима, малом хемијском стабилношћу и малом проводљивошћу. Комбиновањем НЕС са другим полимерима могуће је добити хибридне хидрогелове унапређених механичких и електричних својстава, хемијске стабилности и адсорпционог капацитета [29]. Додатком поливинил-алкохола (PVA) у дисперзију НЕС из које се добија хидрогел хемијским умрежавањем, побољшавају се механичка својства и хемијска отпорност резултујућих хидрогелова [30]. Имајући у виду да се ови хидрогелови користе за имобилизацију материјала који учествује у фотокаталитичким процесима, код којих је од пресудне важности пренос наелектрисања, додатком проводног полимера, овај процес се може олакшати. Полианилин (PANI) као проводни полимер је погодан за формирање тројног хидрогела за имобилизацију фотокатализатора за редукцију Cr(VI), јер се одликује добром проводношћу и у киселој средини [31].

Према свему наведеном, предмет истраживања ове докторске дисертације је испитивање утицаја донорско-акцепторске модификације коришћењем ANT, DHN, TPA и TMA термичком кополимеризацијом на физичко-хемијска својства g-C₃N₄ и ефикасност фотокаталитичке редукције Cr(VI). Како би се повећала специфична површина, биће оптимизован поступак хидротермалног третмана за ексфолијацију немодификованог g-C₃N₄ који ће бити синтетисан термичком полимеризацијом урее и модификованих узорака. Такође, честице g-C₃N₄ биће импрегниране у мезопорозно стакло, коришћењем добијеног праха или гела SiO₂, како би се обезбедила већа специфична површина фотокатализатора. Припремљени узорци биће имобилисани у НЕС хидрогелове добијене хемијским умрежавањем коришћењем лимунске киселине на повишеној температури како би се спречила агрегација честица праха и омогућила лакша сепарација из испитиваних раствора и виšekратна употреба. У даљем истраживању биће оптимизован поступак умрежавања самог хидрогела и имобилизације фотокатализатора. Затим ће бити формиран двојни и тројни хибридни хидрогелови додатком PVA или PVA и PANI, чији ће поступак синтезе бити оптимизован. Оптимизација ће обухватати варирање количине додатог PVA ради побољшања механичких својстава и хемијске отпорности НЕС, као и додатог PANI у циљу повећања електричне проводљивости добијеног хибридног фотокатализатора. Фотокаталитичка активност модификованих и фотокатализатора имобилисаних у хидрогелове и SiO₂ матрицу биће испитана током више циклуса фотокаталитичке редукције.

Списак литературе

- [1] R. Saha, R. Nandi, and B. Saha, "Sources and toxicity of hexavalent chromium," *J. Coord. Chem.*, vol. 64, no. 10, pp. 1782–1806, May 2011, doi: 10.1080/00958972.2011.583646.
- [2] D. Paustenbach, B. Finley, F. Mowat, and B. Kerger, "Human Health Risk and Exposure Assessment of Chromium (VI) in Tap Water," *J. Toxicol. Environ. Health A*, vol. 66, no. 14, pp. 1295–1339, Jan. 2003, doi: 10.1080/15287390306388.
- [3] R. Jobby, P. Jha, A. K. Yadav, and N. Desai, "Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr(VI)]: A comprehensive review," *Chemosphere*, vol. 207, pp. 255–266, 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.05.050.
- [4] M. Tumolo *et al.*, "Chromium Pollution in European Water, Sources, Health Risk, and Remediation Strategies: An Overview," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 15, Jul. 2020, doi: 10.3390/ijerph17155438.
- [5] S. Xie, "Water contamination due to hexavalent chromium and its health impacts: exploring green technology for Cr (VI) remediation," *Green Chem. Lett. Rev.*, vol. 17, no. 1, p. 2356614, Dec. 2024, doi: 10.1080/17518253.2024.2356614.
- [6] V. Hasija *et al.*, "Progress on the photocatalytic reduction of hexavalent Cr (VI) using engineered graphitic carbon nitride," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 152, pp. 663–678, 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.06.042.
- [7] T. Xiong, W. Cen, Y. Zhang, and F. Dong, "Bridging the g-C₃N₄ Interlayers for Enhanced Photocatalysis," *ACS Catal.*, vol. 6, no. 4, pp. 2462–2472, Apr. 2016, doi: 10.1021/acscatal.5b02922.

- [8] A. Thomas *et al.*, “Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts,” *J. Mater. Chem.*, vol. 18, no. 41, p. 4893, 2008, doi: 10.1039/b800274f.
- [9] M. Ismael and Y. Wu, “A mini-review on the synthesis and structural modification of g-C₃N₄-based materials, and their applications in solar energy conversion and environmental remediation,” *Sustain. Energy Fuels*, vol. 3, no. 11, pp. 2907–2925, 2019, doi: 10.1039/C9SE00422J.
- [10] J. Jiang, L. Yu, J. Peng, W. Gong, and W. Sun, “Advance in the modification of g-C₃N₄-based composite for photocatalytic H₂ production,” *Carbon Lett.*, vol. 35, no. 2, pp. 417–440, Apr. 2025, doi: 10.1007/s42823-024-00853-8.
- [11] H. Fattahimoghaddam and B.-K. Lee, “A concise review of recent advances in carbon nitride-based intramolecular donor–acceptor architectures for photocatalytic hydrogen production: Heteromolecular coupling of organic compounds,” *J. Alloys Compd.*, vol. 968, p. 172000, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.172000.
- [12] S. Gao, S. Wan, J. Yu, and S. Cao, “Donor–Acceptor Modification of Carbon Nitride for Enhanced Photocatalytic Hydrogen Evolution,” *Adv. Sustain. Syst.*, vol. 7, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.1002/adsu.202200130.
- [13] Z. Chen, B. Chong, N. Wells, G. Yang, and L. Wang, “Constructing a coplanar heterojunction through enhanced π - π conjugation in g-C₃N₄ for efficient solar-driven water splitting,” *Chin. Chem. Lett.*, vol. 33, no. 5, pp. 2579–2584, May 2022, doi: 10.1016/j.ccllet.2021.08.118.
- [14] X. Ma, Y. Lv, J. Xu, Y. Liu, R. Zhang, and Y. Zhu, “A Strategy of Enhancing the Photoactivity of g-C₃N₄ via Doping of Nonmetal Elements: A First-Principles Study,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 116, no. 44, pp. 23485–23493, Nov. 2012, doi: 10.1021/jp308334x.
- [15] G. Dong, K. Zhao, and L. Zhang, “Carbon self-doping induced high electronic conductivity and photoreactivity of g-C₃N₄,” *Chem. Commun.*, vol. 48, no. 49, pp. 6178–6180, May 2012, doi: 10.1039/c2cc32181e.
- [16] C. Xu *et al.*, “Coordination of π -Delocalization in g-C₃N₄ for Efficient Photocatalytic Hydrogen Evolution under Visible Light,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 17, pp. 20114–20124, May 2021, doi: 10.1021/acsami.1c02722.
- [17] M. Sato, M. Furukawa, I. Tateishi, H. Katsumata, and S. Kaneco, “Development of Photocatalytic Reduction Method of Cr(VI) with Modified g-C₃N₄,” *Chem. Proc.*, vol. 17, no. 1, Jul. 2025, doi: 10.3390/chemproc2025017003.
- [18] K. Li, M. Sun, and W.-D. Zhang, “Polycyclic aromatic compounds-modified graphitic carbon nitride for efficient visible-light-driven hydrogen evolution,” *Carbon*, vol. 134, pp. 134–144, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.carbon.2018.03.089.
- [19] Z.-J. Liu, W.-D. Zhang, and Y.-X. Yu, “Edge-grafting carbon nitride with aromatic rings for highly-efficient charge separation and enhanced photocatalytic hydrogen evolution,” *Catal Sci Technol*, vol. 13, no. 2, pp. 528–535, 2023, doi: 10.1039/D2CY01598F.
- [20] H. Niu, W. Zhao, H. Lv, Y. Yang, and Y. Cai, “Accurate design of hollow/tubular porous g-C₃N₄ from melamine-cyanuric acid supramolecular prepared with mechanochemical method,” *Chem. Eng. J.*, vol. 411, p. 128400, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.128400.
- [21] H. M. Ali, F. A. Roghabadi, and V. Ahmadi, “Solid-supported photocatalysts for wastewater treatment: Supports contribution in the photocatalysis process,” *Sol. Energy*, vol. 255, pp. 99–125, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.03.032.
- [22] T. Ma, J. Bai, H. Liang, J. Wang, and C. Li, “An efficient method for assembling layered g-C₃N₄ nanosheets grow on 1D pore channels carbon fibers as a composite photocatalyst by ultrasound-assisted exfoliation and hydrothermal method,” *Vacuum*, vol. 134, pp. 130–135, 2016, doi: 10.1016/j.vacuum.2016.10.013.
- [23] Y. Cui *et al.*, “Engineering mesoporous bioactive glasses for emerging stimuli-responsive drug delivery and theranostic applications,” *Bioact. Mater.*, vol. 34, pp. 436–462, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.bioactmat.2024.01.001.
- [24] M. Mihaly, A. F. Comanescu, A. E. Rogozea, E. Vasile, and A. Meghea, “NiO–silica based nanostructured materials obtained by microemulsion assisted sol–gel procedure,” *Mater. Res. Bull.*, vol. 46, no. 10, pp. 1746–1753, 2011, doi: 10.1016/j.materresbull.2011.05.031.
- [25] N. N. Nam and H. D. K. Do, “Ultrasonic sonication assisted in sol–gel stöber and reverse microemulsion method for fabrication of silica nanoparticles and the potential application in agriculture,” *Chem. Pap.*, vol. 78, no. 12, pp. 7089–7096, Aug. 2024, doi: 10.1007/s11696-024-03588-y.

- [26] Y. Li, C. Chen, G. Cui, L. Liu, C. Zhou, and G. Wu, "Hydroxyethyl cellulose-based stretchable, antifreeze, ion-conductive hydrogel sensor," *Eur. Polym. J.*, vol. 202, p. 112603, 2024, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112603.
- [27] Y. Balçık Tamer, "Development of citric acid crosslinked biodegradable chitosan/hydroxyethyl cellulose/organo-modified nanoclay composite films as sustainable food packaging materials," *Polym.-Plast. Technol. Mater.*, vol. 62, no. 9, pp. 1138–1156, Jun. 2023, doi: 10.1080/25740881.2023.2195908.
- [28] I. Ayouch *et al.*, "Crosslinked carboxymethyl cellulose-hydroxyethyl cellulose hydrogel films for adsorption of cadmium and methylene blue from aqueous solutions," *Surf. Interfaces*, vol. 24, p. 101124, 2021, doi: 10.1016/j.surf.2021.101124.
- [29] A. Balakrishnan *et al.*, "Engineered cellulose-supported photocatalysts for clean energy and environmental remediation: progress and prospects," *J Mater Chem A*, vol. 14, no. 10, pp. 5473–5519, 2026, doi: 10.1039/D5TA07511D.
- [30] W. Liao *et al.*, "Photocatalyst immobilized by hydrogel, efficient degradation and self regeneration: A review," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 150, p. 106929, 2022, doi: 10.1016/j.mssp.2022.106929.
- [31] J. Kumari, A. Singh, A. Rawat, S. K. Srivastava, and A. K. Gupta, "Polyaniline-based ternary composites for the photocatalytic degradation of organic pollutants in wastewater: multifunctional properties, synthetic routes, and mechanistic insights," *RSC Sustain.*, vol. 4, no. 3, pp. 1252–1284, 2026, doi: 10.1039/D5SU00570A.

3. Полазне хипотезе

На основу прегледа литературе и до сада постигнутих резултата, полази се од следећих претпоставки:

- Термичка кополимеризација урее са ароматичним једињењима преко већег броја функционалних група омогућава боље повезивање хемијских врста за добијање модификоване структуре $g-C_3N_4$ са повећаном делокализацијом електрона; увођење дицикличних једињења у структуру $g-C_3N_4$ омогућава проширење поља делокализације електрона; коришћењем ароматичних једињења са N и S у прстену за модификацију добија се структура са израженијим унутрашњим електричним пољем због различитих електронегативности елемената у прстену.
- Оптимизација температуре и времена хидротермалног третмана $g-C_3N_4$, како чистог, тако и модификованих, омогућава повећање специфичне површине $g-C_3N_4$ захваљујући ексфолијацији $g-C_3N_4$.
- Импрегнација SiO_2 гела добијеног микроемулзионом сол-гел методом коришћењем раствора урее уз накнадну калцинацију постиже се боља имобилизација честица $g-C_3N_4$ у односу на импрегнацију калцинираних честица.
- Оптимизацијом количине лимунске киселине као умреживача за добијање НЕС хидрогелова за имобилизацију $g-C_3N_4$ могу се добити фотокатализатори стабилни у поновљеним циклусима фотокаталитичке редукције Cr(VI).
- Оптимизација количине додатог PVA у НЕС омогућава добијање фотокатализатора веће стабилности и бољих механичких карактеристика у односу на чист хидрогел, одговарајуће порозности, са добро диспергованим фотокатализатором за ефикасну фоторедукцију Cr(VI).
- Оптимизацијом количине додатог PANI, као електропроводног полимера, у хидрогел НЕС и PVA за имобилизацију синтетисаних фотокатализатора повећава се ефикасност раздвајања наелектрисања и брзина преноса наелектрисања.

4. Научне методе истраживања

Реализација наведених истраживања биће започета синтезом $g-C_3N_4$ термичком полимеризацијом урее, и ексфолијацијом хидротермалним третманом при различитим температурама и временима третмана, при чему ће бити одабран третман који се покаже као најефикаснији (односно при којем се добија узорак са најбољом фотокаталитичком активношћу). Даље ће бити синтетисани модификовани $g-C_3N_4$ термичком кополимеризацијом коришћењем ANT, DHN, TPA и TMA при различитим масеним

односима. Узорци који буду показали најбољу ефикасност биће даље третирани хидротермално ради ексфолијације, при условима који ће претходно бити утврђени као најефикаснији.

Синтеза мезопорозног SiO_2 биће изведена микроемулзионом сол-гел методом, коришћењем хексадецил-триметил-амонијум-бромида (СТАВ) као површински активне материје, и TEOS као извора Si. За добијање композита $\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ биће коришћен калцинисани прах SiO_2 или гел SiO_2 . Како би се испитао утицај састава композита на фотокаталитичку активност, биће синтетисани композити $\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ при различитим односима SiO_2 и $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

Одабрани узорци $\text{g-C}_3\text{N}_4$ биће имобилисани у хидрогеловима HEC добијеним хемијским умрежавањем коришћењем лимунске киселине на повишеној температури. Биће синтетисани композитни хидрогелови HEC и PVA, изливањем дисперзија и њиховим накнадним умрежавањем коришћењем лимунске киселине на повишеној температури, при различитим односима полимера. Такође, биће синтетисани и тројни хидрогелови, при различитим односима полимера. Фотокаталитичка активност и ефикасност синтетисаних узорака биће испитана у шаржном реактору, у раствору $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ под дејством симулираног сунчевог зрачења, у присуству раствора лимунске киселине као „хватача“ шупљина. Концентрација Cr(VI) биће одређена UV-Vis спектрометријом.

Фотокатализатори и хидрогелови биће испитивани различитим методама карактеризације како би им се утврдио састав, структура, морфологија и физичко-хемијска својства од значаја за фотокаталитичку ефикасност. Хемијски састав фотокатализатора биће одређен енергетском дисперзионом спектроскопијом (EDS). За одређивање структуре биће коришћена рендгенска дифракциона анализа (XRD) (фазни састав), инфрацрвена спектроскопска анализа са Фуријеовом трансформацијом (FTIR) (формиране хемијске везе, тј. групе), фотоелектронска спектрометрија побуђена X-зрачењем (XPS) (хемијска стања елемената). За испитивање оптичких карактеристика узорака биће коришћена дифузионо-рефлексна спектроскопија (DRS) и фотолуминесцентна спектроскопија (PL). DRS ће се применити за одређивање границе апсорпције и енергија забрањене зоне, а PL за одређивање степена рекомбинације. Морфологија честица узорака фотокатализатора и хидрогелова биће одређене скенирајућом електронском микроскопијом (SEM). Специфична површина, порозност и расподела величина пора фотокатализатора биће одређене адсорпцијом азота на температури течног азота, применом BET методе. Механичка својства, и то затезна чврстоћа и живавост добијених хидрогелова са фотокатализаторима биће испитана деловањем затезне силе. Фотоелектрохемијска мерења ће бити коришћена како би се испитала динамика носилаца наелектрисања током озрачивања фотокатализатора. Ефикасност фотокатализатора биће испитана у поновљеним циклусима фотокаталитичке редукције Cr(VI).

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да се на основу наведених истраживања остваре следећи научни доприноси:

- Објашњење утицаја модификовања $\text{g-C}_3\text{N}_4$ органским једињењима ANT, DHN, TPA или TMA на структуру и физичко-хемијска својства, као и ефикасност фотокаталитичке редукције Cr(VI).
- Утврђивање утицаја хидротермалног третмана при различитим условима на структуру и физичко-хемијска својства $\text{g-C}_3\text{N}_4$ и $\text{g-C}_3\text{N}_4$ модификованог органским једињењима, као и ефикасност фотокаталитичке редукције Cr(VI).
- Утврђивање утицаја поступка импрегнације $\text{g-C}_3\text{N}_4$ у мезопоре SiO_2 добијеног микроемулзионом сол-гел методом (импрегнација калцинисаног праха или импрегнација гела уз накнадну калцинацију), на специфичну површину и ефикасност фотокаталитичке редукције Cr(VI).
- Оптимизација процеса умрежавања HEC лимунском киселином у циљу ефикасне имобилизације $\text{g-C}_3\text{N}_4$.
- Утврђивање утицаја додатка PVA, као и PVA и PANI на стабилност, адсорпциони капацитет, и ефикасност фотокаталитичке редукције Cr(VI) HEC хидрогелова умрежених лимунском киселином са имобилисаним $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

6. План истраживања и структура рада

Истраживања у овој докторској дисертацији су планирана по следећим фазама:

- Синтеза $g\text{-C}_3\text{N}_4$ термичком полимеризацијом урее при утврђеним условима термичког третмана, карактеризација и испитивање ефикасности синтетисаног $g\text{-C}_3\text{N}_4$ за фотокаталитичку редукцију Cr(VI) под дејством симулираног сунчевог зрачења у присуству лимунске киселине као хватача шупљина; испитивање ефикасности при поновној употреби.
- Модификовање $g\text{-C}_3\text{N}_4$ коришћењем ANT, DHN, TPA и TMA једињења термичком полимеризацијом мешавина урее и ANT, DHN, TPA и TMA добијених млевењем или упаравањем раствора ових компоненти; карактеризација и испитивање фотокаталитичке ефикасности; избор модификованих узорака за даља истраживања.
- Хидротермални третман чистог и модификованих $g\text{-C}_3\text{N}_4$, при различитим температурама и дужинама трајања третмана, карактеризација, фотокаталитичка редукција Cr(VI) и избор узорака за даља истраживања.
- Оптимизација припреме композита $\text{SiO}_2/g\text{-C}_3\text{N}_4$ импрегнацијом урее у мезопоре претходно добијеног праха стакла, и импрегнацијом гелова и накнадним термичким третманом како би се добио $g\text{-C}_3\text{N}_4$.
- Оптимизација припреме хидрогелова на бази HEC, хемијским умрежавањем лимунском киселином варирањем температуре и количине лимунске киселине, са фотокатализаторима; карактеризација и испитивање фотокаталитичке редукције у поновљеним циклусима.
- Оптимизација припреме композитних хидрогелова на бази HEC и PVA, хемијским умрежавањем лимунском киселином, са фотокатализаторима; карактеризација и испитивање фотокаталитичке редукције у поновљеним циклусима.
- Оптимизација синтезе композитног хидрогела HEC, PVA и PANI са фотокатализаторима, карактеризација и испитивање фотокаталитичке редукције у поновљеним циклусима.

Предложена докторска дисертација ће бити организована по следећим поглављима: *Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература.*

Поглавље *Увод* ће садржати кратак осврт на подручје испитивања, предмет и главне циљеве истраживања.

Поглавље *Теоријски део* обухватиће преглед релевантне литературе о штетности, загађењу вода и методама уклањања Cr(VI) ; о основним принципима фотокатализе, својствима $g\text{-C}_3\text{N}_4$, донорско-акцепторској модификацији $g\text{-C}_3\text{N}_4$ за примену у пречишћавању воде; својствима композита SiO_2 и $g\text{-C}_3\text{N}_4$ који се примењују као фотокатализатори; хидрогеловима који су до сада коришћени за имобилизацију фотокатализатора за редукцију Cr(VI) .

Поглавље *Експериментални део* садржаће опис поступка синтезе и модификовања $g\text{-C}_3\text{N}_4$, као и припрему хидрогелова и имобилизације фотокатализатора у хидрогелове. Такође, у овом поглављу ће бити наведене методе и услови карактеризације добијених неимобилизованих и имобилизованих фотокатализатора, као и услови испитивања ефикасности фотокаталитичке редукције Cr(VI) .

У поглављу *Резултати и дискусија* биће детаљно приказани, размотрени и дискутовани резултати добијени током израде докторске дисертације и успостављене корелације између физичко-хемијских својстава и фотокаталитичке ефикасности неимобилизованих и имобилизованих фотокатализатора.

Поглавље *Закључак* ће сумирати целокупно истраживање и истакнути најважније резултате и доприносе овог истраживања, док ће поглавље *Литература* садржати цитиране литературне наводе, као и објављене научне радове који су проистекли из истраживања.

7. Закључак и предлог

На основу изнетих података о досадашњем раду и постигнутим резултатима, Комисија сматра да кандидаткиња Софија Петковић, мастер инжењер технологије, испуњава све потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације. Такође, на основу изложеног, Комисија сматра да је тема предложене докторске дисертације Софије Петковић под насловом „Графитни угљеник(IV)-нитрид као фотокатализатор за редуkcију шестовалентног хрома: модификовање структуре ароматичним једињењима и имобилисање у полимерне и неорганске матрице“ научно заснована и предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да је прихвати. Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Инжењерство материјала, за коју је матичан Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду. За ментора се предлаже др Рада Петровић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 30. април 2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Рада Петовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

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

.....
Др Мирјана Костић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Тихана Мудринић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију

.....
Др Вукашин Угриновић, научни сарадник
Иновациони центар Технолошко-металуршког факултета у Београду д.о.о.