

**ВЕЋУ ДЕПАРТМАНА ЗА ПОСЛЕДИПЛОМСКЕ СТУДИЈЕ
УНИВЕРЗИТЕТА СИНГИДУНУМ**

Београд

Данијелова 32

Одлуком Већа Департмана за последипломске студије Универзитета Сингидунум, број 4 –184/2026, од 02. 07. 2026. године, одређени смо за чланове Комисије за преглед, оцену и усмену одбрану докторске дисертације кандидата Стефана Трујића под називом: „Примена оксидативних метода за лужење бакра и племенитих метала из сулфидних концентрата руда у циљу унапређења ефикасности процеса и заштите животне средине“. После прегледа достављене дисертације и пратећих материјала, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Стефан Трујић уписао је докторске академске студије 2023. године на студијском програму Заштита животне средине и одрживи развој (ЖСОР) Универзитета Сингидунум. Захтев за одобравање теме за израду докторске дисертације поднео је 22. 06. 2026. На основу позитивног извештаја Комисије за оцену теме и подобности кандидата, Веће Департмана за последипломске студије Универзитета Сингидунум је на седници од 02.07.2026. године одобрило рад на изради докторске дисертације под називом: „Примена оксидативних метода за лужење бакра и племенитих метала из сулфидних концентрата руда у циљу унапређења ефикасности процеса и заштите животне средине“, а за ментора је одређен проф. др Мирослав Поповић.

Одлуком Већа Департмана за последипломске студије Универзитета Сингидунум, број 4 –184/2026, од 02.07.2026. године, образована је Комисија за оцену и одбрану дисертације у следећем саставу:

1. Др Мирослав Поповић, редовни професор, Универзитет Сингидунум, Београд (ментор)
2. Др Ана Миленковић-Анђелковић, доцент, Универзитет Сингидунум, Београд (члан);
3. Др Весна Матовић, редовни професор, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет (члан).

1.2. Научна област дисертације

Тема дисертације кандидата је у домену научних области „науке о заштити животне средине“ и „одрживо управљање минералним ресурсима“, за које је студијски програм Заштита животне средине и одрживи развој (ЖСОР) Универзитета Сингидунум матичан. Дисертација је интердисциплинарног карактера и повезује хидрометалургију, минералологију, геологију техногених лежишта и заштиту животне средине.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Стефан Трујић рођен је 10.01.1989. године у Бору. Основне академске студије уписао је 2007. године на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Геологија, и дипломирао 2013. године, стекавши звање дипломираног геолога. Мастер академске студије на истом факултету, студијски програм Геологија, модул Економска геологија, уписао је школске 2019/2020. године и завршио 2022. године одбраном мастер рада под називом „Моделовање дистрибуције бакра и злата у техногеном лежишту Старо флотацијско јаловиште – Бор“. Докторске академске студије на студијском програму Животна средина и одрживи развој Универзитета Сингидунум уписао је 2023.

Радну каријеру започео је 2018. године у предузећу „BEM Tilva“ у Београду, као помоћник главног геолога на пословима проспекције и геолошких истраживања металичних и неметаличних минералних сировина. У периоду од 2021. до 2022. године радио је у предузећу „Project Кор“ д.о.о. Београд, као помоћник главног геолога на пословима геолошких истраживања, анализе лежишта и израде пројектне документације. Од октобра 2022. године запослен је у Институту за рударство и металургију Бор, најпре као пројектант-инжењер приправник, а од 2023. године као стручни сарадник на научно-истраживачким и стручним пројектима из области геологије и минералних ресурса.

Учествује као истраживач у међународном Horizon Europe Staff Exchange пројекту OPTIMALMINE, који се реализује у сарадњи са Универзитетом у Њукаслу (Newcastle University, Уједињено Краљевство) и партнерским универзитетима, научно-истраживачким институцијама и компанијама из више земаља, а усмерен је на оптимизацију експлоатације минералних ресурса и смањење негативног утицаја рударских активности на животну средину. Учествовао је у изради већег броја студија, пројеката и елабората геолошких, геотехничких и хидрогеолошких истраживања за потребе рударских и енергетских компанија (Serbia Zijin Copper, Електропривреда Србије, RiTE Gacko).

Аутор је или коаутор једног рада у међународном часопису, два рада у часописима националног значаја и три саопштења на међународним и националним научним скуповима. Научна интересовања кандидата обухватају геолошка истраживања лежишта минералних сировина, моделовање и оцену техногених лежишта и примену хидрометалуршких поступака за издвајање метала из минералних сировина и техногених материјала. Користи савремене софтверске алате за техничко цртање, пројектовање и геолошко моделирање.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Примена оксидативних метода за лужење бакра и племенитих метала из сулфидних концентрата руда у циљу унапређења ефикасности процеса и заштите животне средине“ има укупно 108 страна. Поред уводних делова (подаци о ментору и члановима комисије, захвалница, резиме на српском и енглеском

језику, списак скраћеница, садржај, списак слика и табела), дисертација садржи седам поглавља, списак литературе, додатак и биографију аутора. Поглавља су:

4. Увод, 7 страна;
5. Преглед стања технике и теоријске основе, 24 стране;
6. Материјали и методе, 8 страна;
7. Резултати – Део I: стара флотацијска јаловина, 17 страна;
8. Дискусија – Део I, 13 страна;
9. Део II: озонско лужење сулфидних концентрата бакра, 13 страна;
10. Закључак, 2 стране.

У дисертацији има укупно 24 слике и 25 табела, а у Додатку још две табеле. Литература садржи 138 библиографских јединица, побројаних на 7 страна.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље, „Увод“, садржи седам потпоглавља. У њима је приказан значај бакра и племенитих метала у савременој привреди и енергетској транзицији, проблем флотацијских јаловина и сулфидних концентрата, стање производње бакра у Србији и значај Борског региона, као и оксидативне методе као одговор на технолошке и еколошке изазове. Дефинисани су предмет и циљ истраживања, при чему циљ има две равноправне димензије, унапређење ефикасности процеса и заштиту животне средине, постављено је пет полазних хипотеза (X1–X5) и описани су очекивани научни допринос и структура дисертације.

Друго поглавље, „Преглед стања технике и теоријске основе“, садржи дванаест потпоглавља. Приказани су минерали бакра и типови сировина, пирометалуршка и хидрометалуршка прерада бакра, механизми лужења сулфида бакра и савремене технологије за прераду халкопиритних концентрата (оксидација под притиском, биолужење, хлоридни и други поступци). Посебно су обрађени оксидација пирита и настанак киселих рудничких вода, добијање злата и сребра и алтернативе цијаниду (нарочито тиосулфатно лужење), својства, производња и понашање озона у воденим системима и његова примена у хидрометалургији, као и флотацијске јаловине као еколошки проблем и секундарни ресурс, са посебним освртом на Рудник бакра Бор и старо флотацијско јаловиште. Поглавље се завршава критичком синтезом литературе и дефинисањем истраживачког јаза.

Треће поглавље, „Материјали и методе“, садржи седам потпоглавља. Описани су концепт експерименталног истраживања, узорковање и формирање два композитна узорка старе флотацијске јаловине од 455 појединачних узорака, физичка и хемијска карактеризација (густина, гранулометријски састав, AAS, ICP-AES, Leco, TGA), минералозна карактеризација (поларизациона микроскопија, XRD, SEM/EDS), експериментални протоколи озонског лужења бакра и озонотропно потпомогнутог тиосулфатног лужења злата и сребра, начин прорачуна степена излужења и додатна

статистичка и кинетичка обрада података. Последње потпоглавље описује испитивања на сулфидним концентратима бакра (Део II).

Четврто поглавље, „Резултати – Део I: стара флотацијска јаловина“, садржи осам потпоглавља. Приказане су физичке, хемијске и минералошке карактеристике композитних узорака, резултати два експериментална протокола лужења бакра озоном, концентрације метала у раствору и селективност бакра у односу на гвожђе, резултати корелационе и кинетичке анализе, карактеризација чврстих фаза после лужења бакра и резултати лужења злата и сребра из чврстог остатка тиосулфатом уз озон.

Пето поглавље, „Дискусија – Део I“, садржи једанаест потпоглавља. Дискутовани су механизам озонског лужења бакра, улога пирита, гипса и Eh–pH услова, селективност и избор времена лужења, кинетика и контролишући ступањ процеса, као и лужење злата и сребра тиосулфатом уз озон. Анализирани су еколошки и технолошки аспекти поступка, предложена је концептуална технолошка шема прераде старе јаловине и дате смернице за увећање размере процеса. Озонски поступак упоређен је са постојећим приступима, а резултати су синтетизовани кроз показатеље ефикасности процеса и заштите животне средине. Поглавље се завршава приказом ограничења истраживања.

Шесто поглавље, „Резултати и дискусија - Део II: озонско лужење сулфидних концентрата бакра“, садржи седам потпоглавља. Приказане су карактеристике халкопиритно-пиритних концентрата Тимочког магматског комплекса (Велики Кривељ и Мајданпек), теоријске основе озонског лужења концентрата, методолошки приступ и квалитативни резултати испитивања утицаја почетне киселости пулпе и оксидационих услова, понашања гвожђа и сумпора и поређења са резултатима Дела I. Дата је теоријска анализа потрошње озона и електричне енергије и размотрен технолошки и еколошки значај поступка. Конкретни процесни параметри овог дела истраживања предмет су пријаве патента и нису приказани у дисертацији.

Седмо поглавље, „Закључак“, садржи закључке изведене из резултата оба дела истраживања, оцену постављених хипотеза, главна ограничења истраживања и правце даљих истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Предмет истраживања ове дисертације је примена озона као оксиданса за лужење бакра и племенитих метала из сулфидних сировина, и то из старе флотацијске јаловине Рудника бакра Бор и из сулфидних концентрата бакра Тимочког магматског комплекса. Тема је изразито савремена: пад садржаја метала у рудама, раст потражње за бакром у енергетској транзицији и вишедеценијско нагомилавање флотацијских јаловина намећу потребу за поступцима прераде који су истовремено ефикасни и еколошки прихватљиви. Конвенционални поступци, топљење концентрата и цијанидно лужење злата, праћени су

емисијом SO₂, прашине и тешких метала, односно употребом високотоксичних реагенаса, док старе јаловине представљају трајан извор киселих рудничких вода и загађења тешким металима.

Оригиналност дисертације огледа се у неколико аспеката. Први пут је систематски испитано озонско лужење старе флотацијске јаловине Рудника бакра Бор и показано да се бакар може излужити на собној температури, без спољног додатка киселине, захваљујући киселини која се генерише *in situ* оксидацијом пирита. Показано је да кратко време лужења представља кључни параметар селективности бакра у односу на гвожђе, што до сада није било истакнуто у литератури о озонском лужењу. Комбиновањем озонског лужења бакра и озоном потпомогнутог тиосулфатног лужења злата из чврстог остатка предложен је двостепени поступак без цијанида. Испитивања на реалним индустријским халкопиритним концентратима проширила су ранија сазнања добијена на чистом халкопириту и указала на значај оксидационих услова и понашања гвожђа и сумпора за исход процеса, што је резултирало новим технолошким решењем које је предмет пријаве патента.

Кандидат је оригиналност свог истраживачког рада потврдио објављивањем научног рада у међународном научном часопису са SCI листе (Molecules, 2025, категорија M21), као и у часописима националног значаја и зборницима међународних и домаћих научних скупова. Степен подударности текста у дисертацији, утврђен провером на плагијаризам, износи 3%.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У изради дисертације коришћена је обимна и савремена литература из области хидрометалургије и пирометалургије бакра, минералогije сулфида, хемије озона, лужења злата и сребра, управљања флотацијским јаловинама и заштите животне средине, укључујући најновије радове из истакнутих међународних научних часописа, монографије, као и законску регулативу Републике Србије и Европске уније. Литература обухвата 138 библиографских јединица. На основу тих референци, оригинални научни резултати које је кандидат добио својим радом смештени су у одговарајући научни контекст и критички упоређени са резултатима других аутора.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научноистраживачки методи обухватили су теренске, лабораторијске и кабинетске радове. Теренски рад укључио је узорковање старог флотацијског јаловишта и формирање репрезентативних композитних узорака. Лабораторијски рад обухватио је физичку, хемијску и минералoшку карактеризацију полазних узорака и производа лужења савременим инструменталним методама (AAS, ICP-AES, Лесо анализа сумпора, TGA, поларизациона микроскопија, XRD, SEM/EDS), као и експерименте озонског лужења бакра и озоном потпомогнутог тиосулфатног лужења злата и сребра у лабораторијским реакторима, уз праћење рН вредности, редокс потенцијала и концентрација метала у раствору. Кабинетски рад обухватио је масене биланце, корелациону и кинетичку анализу

результата, стехиометријски прорачун потрошње озона и енергије и упоредну оцену поступка у односу на постојеће приступе.

Кандидат је у изради дисертације комбиновао различите методе научно-истраживачког рада како би се задовољили основни методолошки захтеви (објективност, поузданост, општеважност, систематичност). Главна хипотеза дисертације осмишљена је тако да се на основу ње докаже да озон, као оксиданс који се разлаже до кисеоника и не оставља штетне остатке, омогућава ефикасно лужење бакра и, у комбинацији са тиосулфатом, злата из сулфидних сировина у благим условима, чиме се истовремено унапређује ефикасност процеса и смањује утицај на животну средину. Посебне хипотезе (X1–X5) проверене су експериментално и потврђене резултатима истраживања.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати дисертације имају непосредан практичан значај за Србију, и посебно за Борски регион. Старо флотацијско јаловиште Рудника бакра Бор садржи, према процени изведеној у дисертацији, реда величине 55.000–70.000 t бакра и 10–13 t злата, а истовремено представља један од највећих извора загађења у региону. Предложени двостепени поступак, који ради на собној температури и атмосферском притиску, без спољног додатка киселине, без цијанида и без емисије SO_2 , смањује садржај бакра у остатку са 0,25% на око 0,03% и омогућава издвајање злата, чиме се јаловиште из извора загађења претвара у секундарну сировину. Предложени су концептуална технолошка шема и смернице за увећање размере процеса.

Резултати Дела II показују да се озном на собној температури може постићи висок степен растварања бакра из халкопиритних концентрата (око 93% у осмодневном огледу на концентрату Велики Кривељ, уз концентрацију бакра у раствору од 63,7 g/L) и концентрације бакра у раствору погодне за електролитичко добијање метала. Ови резултати представљају основу за развој хидрометалуршког поступка који је алтернатива топљењу концентрата, нарочито за концентрате са повишеним садржајем нечистоћа и у условима строгих ограничења емисије SO_2 , а поступак је предмет пријаве патента.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самосталан научни рад

Кандидат је у свом раду на изради докторске дисертације и пропратном објављивању научних радова показао квалитете неопходне за бављење истраживачким радом и саопштавање (писмено и усмено) научних резултата: способност уочавања и дефинисања проблема, постављања јасног и достижног циља истраживања, могућност схватања и проширивања теоријских концепата, оригиналност, методолошку доследност и ригорозност, способност да самостално осмисли, креира и спроведе истраживање, постави хипотезе и провери их, као и да критички анализира добијене резултате и њихова ограничења.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни доприноси дисертације су следећи:

- Потврђено је да озон уведен у водену суспензију старе флотацијске јаловине омогућава брзо и високо излужење бакра на собној температури, без спољног додатка киселине (88,80% из Композита I за 1 h), јер се киселина потребна за лужење генерише *in situ* оксидацијом пирита.
- Доказано је да ефикасност лужења бакра зависи од минералног састава сировине, пре свега од удела оксидног бакра, садржаја пирита и присуства гипса, што објашњава разлике у понашању два поља јаловишта (59,10% за 1 h и 77,44% за 56 h из Композита II).
- Утврђено је да бакар и гвожђе у озонском систему имају битно различиту кинетику растварања и да је кратко време лужења кључни параметар селективности бакра у односу на гвожђе, што смањује потрошњу озона и трошкове уклањања гвожђа.
- Показано је да се из чврстог остатка после лужења бакра тиосулфатом уз озон и Cu(II), на собној температури и $pH \approx 9$, може излужити 83,42% и 79,12% злата, као алтернатива цијанидацији, и објашњени су узроци ниског излужења сребра.
- Предложен је и еколошки вреднован двостепени поступак прераде старе флотацијске јаловине, са концептуалном технолошком шемом и смерницама за увећање размере процеса.
- Показано је да озон у сумпорнокиселој средини, на собној температури, раствара бакар из реалних индустријских халкопиритно-пиритних концентрата, уз висок степен излужења бакра и високе концентрације бакра у раствору, и утврђено је да исход процеса зависи од почетне киселости пулпе и оксидационих услова, који одређују пут оксидације сумпора и растварање гвожђа.
- Израчуната је теоријска потрошња озона и електричне енергије по јединици бакра из халкопирита и показано да су дубина оксидације сумпора и садржај пирита кључни за енергетску ефикасност озонског лужења.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У првој фази кандидат је, разматрајући расположиву литературу у области теме дисертације, извршио критичку анализу доступних информација, дефинисао истраживачки јаз и коректно поставио циљ и хипотезе истраживања. Током истраживачког рада критички је проверавао добијене резултате масеним билансима и независним методама карактеризације, упоређивао их са литературним вредностима и изводио научно аргументоване закључке. Кандидат је објективно указао и на ограничења истраживања (непознат степен искоришћења озона, растварање гвожђа, стабилност тиосулфата у присуству озона, ниско излужење сребра и број експеримената) и дао предлоге даљих праваца истраживања.

Кандидат нарочито анализира ефекте предложеног поступка на животну средину, по појединим медијумима (ваздух, вода, земљиште и отпад), и показује како се кроз валоризацију старог јаловишта и замену токсичних реагенса и пирометалуршких поступака истовремено постиже унапређење ефикасности процеса и заштита животне средине.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси ове дисертације верификовани су следећим радовима кандидата:

Објављени радови у часописима категорије [M21]:

- Trujić, S., Popović, M.P., Conić, V., Janošević, M., Alimpić, F., Bajić, D., Milenković-Andelković, A., Abramović, F., 2025: Ozone/Thiosulfate-Assisted Leaching of Cu and Au from Old Flotation Tailings. *Molecules*, 30(1), 69. <https://doi.org/10.3390/molecules30010069>

Објављени радови у часописима националног значаја [M52]:

- Trujić, S., Maksimović, M., Marinković, V., Milivojević, K., Đorđević, J., 2023: Primenjene metode i postupci savremenih geoloških istraživanja tehnogenog ležišta Staro flotacijsko jalovište – Bor. Bakar, Vol. 48.
- Trujić, S., Maksimović, M., Marinković, V., Bugarin, D., 2023: Faktori geološko-ekonomske ocene geoloških istraživanja čvrstih mineralnih sirovina tehnogenog ležišta Staro flotacijsko jalovište – Bor. Bakar, Vol. 48.

Радови саопштени на међународним научним скуповима [M33]:

- Trujić, S., Maksimović, M., Marinković, V., Avramović, Lj., Trifunović, V., Božić, D., 2023: Geological Exploration of the Technogenic Deposit – Old Flotation Tailings Bor with the Possibility of Leaching. The 54th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor Lake.

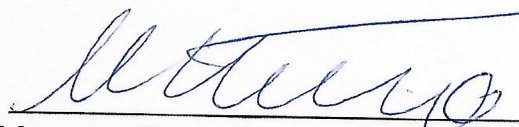
5. МИШЉЕЊЕ КОМИСИЈЕ И ПРЕДЛОГ

На основу изложеног, Комисија констатује да докторска дисертација кандидата Стефана Трујића под насловом „Примена оксидативних метода за лужење бабра и племенитих метала из сулфидних концентрата руда у циљу унапређења ефикасности процеса и заштите животне средине“ испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета Сингидунум у Београду. Докторска дисертација Стефана Трујића садржи научне доприносе који се састоје у доказивању ефикасности озонског лужења бабра из старе флотацијске јаловине на собној температури без спољног додатка киселине, у успостављању двостепеног поступка издвајања бабра и злата без цијанида и у проширењу сазнања о озонском лужењу реалних халкопиритних концентрата, чиме се истовремено унапређује ефикасност процеса и смањује негативан утицај рударства и металургије на животну средину.

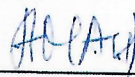
Током целокупне израде докторске дисертације кандидат је демонстрирао способност за самостални истраживачки рад. Стога чланови Комисије са задовољством предлажу Већу Департмана за последипломске студије да се докторска дисертација под насловом „Примена оксидативних метода за лужење бакра и племенитих метала из сулфидних концентрата руда у циљу унапређења ефикасности процеса и заштите животне средине“ кандидата Стефана Трујића прихвати, изложи увиду јавности и упуту на коначно усвајање Сенату Универзитета Сингидунум у Београду.

Београд, 20.октобар 2026. године

Чланови комисије:



Др Мирослав Поповић, редовни професор,
Универзитет Сингидунум, Београд (ментор)



Др Ана Миленковић-Анђелковић, доцент,
Универзитет Сингидунум, Београд



Др Весна Матовић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет