

Факултет Технолошко-металуршки

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/143
(Број захтева)
27. 6. 2025.
(Датум)

Веће научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану

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::

КАНДИДАТ **Милица (Драган) Делић**
(девојачко Стојковић)
(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму: **Инжењерство заштите животне средине**

пријавио је докторску дисертацију под називом:

Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела

из научне области: **Инжењерство заштите животне средине**
Универзитет је дана 23. 9. 2024. својим актом под бр. 61206-3210/2-24 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела

Име и презиме ментора: др Антоније Оњиа, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет.
Име и презиме ментора 2: др Маја Ђолић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној 24. 4. 2025. одлуком факултета под бр. 35/97, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Александра Перић-Грујић	редовни професор	Контрола квалитета	ТМФ
2.	Др Мирјана Ристић	редовни професор	Инжењерство заштите животне средине	ТМФ
3.	Др Мирјана Ђујић	виши научни сарадник	Физичка хемија	ИНН „Винча“

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 9. 5. 2025.

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 26. 6. 2025.

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној **26. 6. 2025.**

одлуком факултета под бр. 35/148, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Александра Перић-Грујић	редовни професор	Контрола квалитета	ТМФ
2.	Др Мирјана Ристић	редовни професор	Инжењерство заштите животне средине	ТМФ
3.	Др Мирјана Ћујић	виши научни сарадник	Физичка хемија	ИНН „Винча“

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Студент је уписан на докторске студије школске 2021/2022. године.

ДЕКАНКА ФАКУЛТЕТА

др Мирјана Кијевчанин, редовни професор

-
- Прилози:**
1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације
 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације
 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама

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

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. 41. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 26. 6. 2025. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Александра Перић-Грујић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Мирјана Ристић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Мирјана Ћујић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за Републику Србију, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: „**Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела**“ коју је поднела **Милица Делић**, мастер инжењер технологије и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Милице Делић, под називом „**Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела**“ Одлуком број: 61206-3210/2-24 од 23. 9. 2024. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M21:

1. **Delić, M.**; Ristić, M.; Đolić, M.; Perić-Grujić, A.; Onjia, A. Dispersive Liquid–Liquid Chelate Microextraction of Rare Earth Elements: Optimization and Greenness Evaluation. *Metals* 2025, 15, 52.
<https://doi.org/10.3390/met15010052> (IF2023=2,7) ISSN: 2075-4701
2. **Stojković, M.**; Ristić, M.; Đolić, M.; Perić Grujić, A.; Onjia, A. Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly and Bottom Ashes by Ultrasonic Roasting Followed by Microwave Leaching. *Metals* 2024, 14, 371.
<https://doi.org/10.3390/met14040371> (IF2023=2,7) ISSN: 2075-4701

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, менторима, Служби за наставно-студентске послове и Архиви факултета.

Д Е К А Н К А

Проф. др Мирјана Кијевчанин

ДV

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. 41. и 42. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 26. 6. 2025. године, донета је

О Д Л У К А

о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације

Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације **Милице Делић**, мастер инжењера технологије, са темом под називом **„Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“**, у саставу:

1. Др Александра Перић-Грујић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
2. Др Мирјана Ристић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
3. Др Мирјана Ћујић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за Републику Србију.

Одлуку доставити: Одлуку доставити: члановима Комисије, Универзитету у Београду, Служби за наставно-студентске послове и Архиви Факултета.

Д Е К А Н К А

Проф. др Мирјана Кијевчанин

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ ФАКУЛТЕТ

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Милице Делић**

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду бр. 35/97 од 24.04.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Милице Делић под насловом:

„Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“.

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

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Милица Делић, мастер инжењер технологије, уписала је школске 2021/2022. докторске академске студије на студијском програму Инжењерство заштите животне средине на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду.

30.05.2024. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, донета је одлука број 35/119 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата Милице Делић за израду докторске дисертације под називом „Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“.

03.07.2024. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, донета је одлука број 35/169 о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата Милице Делић за израду докторске дисертације под називом „Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“. За менторе ове докторске дисертације именовани су др Антоније Оџија, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Маја Ђолић, доцент Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

23.09.2024. – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду донета је одлука бр. 61206-3210/2-24 о давању сагласности на одлуку Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета о прихватању теме докторске дисертације Милице Делић под називом: „Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“ и одређивању др Антонија Оџије, редовног професора Универзитета у Београду, Технолошко-металуршког факултета и др

Маје Ђолић, доцента Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду за менторе.

24.04.2025. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, донета је одлука број 35/97 о именовању Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Милице Делић под називом „Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“.

1.2. Научна област дисертације

Ова докторска дисертација припада научној области Инжењерство заштите животне средине за коју је матичан Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду. За менторе су одређени др Антоније Оџија, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Маја Ђолић, доцент Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду. Ментори су на основу досадашњег научноистраживачког рада и броја објављених радова показали компетентност и испуњавају све неопходне услове да руководе израдом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милица Делић (рођена Стојковић), мастер инжењер технологије, рођена је 18.02.1997. у Београду, где је похађала Основну школу „Васа Пелагић“ и Гимназију „Свети Сава“. Основне академске студије је уписала 2016. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Инжењерство заштите животне средине, и завршила их у року са просечном оценом 9,82. Мастер академске студије је уписала школске 2020/21. на истом студијском програму и завршила их у року са просечном оценом 9,86. Школске 2021/22. уписала је докторске академске студије на студијском програму Инжењерство заштите животне средине и на првој години студија положила све испите и остварила просечну оцену 9,91. Завршни испит на докторским академским студијама под називом „Развој и примена метода за екстракцију ретких елемената земље из летећег пепела“ одбранила је са оценом 10.

У звање истраживач приправник на Конкурсу за младе истраживаче изабрана је у мају 2022. године. Од новембра 2022. године запослена је на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду у звању асистент на Катедри за инжењерство заштите животне средине. У зимском семестру школске 2022/2023. године била је ангажована на извођењу вежби из предмета Хемија животне средине. Тренутно је ангажована на извођењу вежби из предмета Управљање чврстим отпадом и Опасне и штетне материје. Током студија била је стипендиста различитих државних установа. На другој години била је стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја, током треће године студија примала је стипендију Града Београда, док је последње две године добитница стипендије „Доситеја“ Фонда за младе таленте Министарства омладине и спорта намењене најбољим студентима у Републици Србији. Током основних академских студија Милица Делић је добила пет пута награду „Панта С. Тутунџић“ коју додељује ТМФ за остварени успех на студијама (за школску 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020. и за коначан успех на студијама). За изузетан успех током студија кандидаткиња је добила и Специјално признање Српског хемијског друштва.

Од јануара 2023. до јануара 2025. године била је ангажована на пројекту у оквиру Програма ИДЕЈЕ, који финансира Фонд за науку Републике Србије, под називом „*Serbian Industrial Waste towards Sustainable Environment: Resource of Strategic Elements and Removal Agent for Pollutants*“ SIW4SE (7743343), у оквиру потпројекта WP1 под називом „*Characterization of fly ash originated from Serbian thermal power plants and its application for strategic elements recovery*“. Тема ове докторске дисертације управо је део истраживања рађеног у оквиру наведеног пројекта.

Такође, Милица Делић је била учесник акције за међународну сарадњу у науци и технологији (COST акције) и то COST CA18225 WaterTOP „*Taste and Odor in early diagnosis of source and drinking Water Problems*“, трајање акције: 2019 – 2023. Од децембра 2024. године ангажована је на још једном COST пројекту CA23104 Water4Reuse „*Mainstreaming water reuse into the circular economy paradigm*“. Поред научноистраживачких, Милица је била члан и међународног наставног пројекта под називом „*Adrion Master On Circular Economy And Bioeconomy*“ финансираног од стране Interreg ADRION групе. Активни је члан комисије за промоцију Технолошко-металуршког факултета у оквиру које је била координатор „Отворених врата ТМФ-а“ за 2024. годину.

Из досадашњих истраживања публиковала је два рада у врхунском међународном часопису (M21) где је кандидат први аутор. Поред тога објавила је, један рад у истакнутом међународном часопису (M22), један научни рад у међународном часопису (M23), као и један рад у часопису националног значаја (M52) и један рад у научном часопису (M53). Такође, објавила је девет саопштења са међународних скупова, од чега два саопштења из категорије M33 и седам саопштења из категорије M34. Имала је три саопштења са скупова од националног значаја која су штампана у целини (M63) и један рад са скупа националног значаја штампан у изводу (M64). Члан је Српског хемијског друштва и Удружења за технологију воде и санитарно инжењерство. Чита, пише и говори енглески језик.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Милице Делић под називом „Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“ написана је на српском језику на 104 нумерисане стране и садржи 53 слике, 26 табела и 220 литературних навода. Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература. Дисертација садржи и Сажетак на српском и енглеском језику, Садржај, Списак скраћеница, Списак слика и Списак табела. Такође, на крају дисертације дати су Биографија аутора, Изјава о ауторству, Изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада, Изјава о коришћењу и Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације. По својој структури и садржају, ова дисертација задовољава прописане стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **Уводном делу** дисертације дат је сажет преглед производње електричне енергије у Републици Србији, са посебним освртом на доминантну улогу термоелектрана. Анализиран је утицај на животну средину који произилази из процеса сагоревања угља, укључујући емисије штетних гасова и настанак великих количина летећег пепела као нуспроизвода. Размотрене су могућности коришћења летећег пепела као секундарне сировине, са фокусом на издвајање стратешки важних елемената, пре свега лантаноида. Представљене су основне карактеристике и глобална дистрибуција лантаноида, као и њихов значај у савременој индустрији. Описани су и статистички модели примењени за дизајн експеримената у оквиру експерименталног рада. У овом делу рада јасно су дефинисани предмет и циљ докторске дисертације.

Теоријски део подељен је на девет тематских целина. У оквиру прве целина *Угљ као енергент* детаљно се анализирају удели производње електричне енергије из различитих извора на глобалном нивоу и у Републици Србији, са трендовима за наредни период. Након тога, у другој целини *Летећи (електрофилтерски) угљени пепео* детаљно су обрађене физичко-хемијске карактеристике пепела који се издваја након процеса сагоревања, као и најзаступљенија подела летећег пепела. Размотрени су главни утицаји рада термоелектрана и депоновања пепела на животну средину, са освртом на тренутну и потенцијалну примену летећег пепела. Трећа целина, *Лантаноиди* детаљно обрађује све елементе који спадају у ову групу и који су били предмет истраживања ове дисертације, њихове хемијске карактеристике и заступљеност, као и употребе у различитим индустријама у оквиру којих се и огледа њихов значај. У четвртој целини, *Излуживање лантаноида из чврсте матрице*, описане су најчешће коришћене методе за излуживање метала из чврсте матрице и то: физичка сепарација (просејавање, раздвајање по густини, магнетна сепарација и сл.), кисело и алкално излуживање применом различитих реагенса (HCl , HNO_3 , H_2SO_4 , NaOH , Na_2O_2 , NaCl , CaO) и пироксидометалуршки процес. У оквиру ове целине дат је и преглед литературе везан за методе екстракције лантаноида из летећег пепела на основу чега су даље изведени закључци о најважнијим параметрима за одабир методе излуживања на основу датих карактеристика система. Пета целина под називом *Микроекстракција лантаноида* детаљно обрађује главне предности и принцип рада методе микроекстракције у односу на класичну екстракцију. У оквиру овог сегмента приказан је и анализиран преглед литературе у области концентрисања лантаноида из различитих узорака применом различитих метода екстракције. Детаљно су објашњене и обрађене карактеристике процеса дисперзивне течно-течне микроекстракције. Принципи рада најзначајних аналитичких метода коришћених у оквиру ове дисертације обрађени су у шестом потпоглављу *Аналитичке методе за одређивање концентрације лантаноида*. У седмој целини *Експериментални дизајн* дат је детаљан увид у значај примене савремених аналитичких метода за планирање експеримената у циљу уштеде времена и количине коришћених реагенса. У осмом делу *Испитивање утицаја аналитичких метода на животну средину* детаљно су обрађене три методе које се користе за одређивање еколошке прихватљивости развијених процедура са њиховим принципима рада и сегментима процедуре које разматрају и то: аналитичка еко скала (*AES*), аналитичка зеленост (*AGREE*) и индекс зелене аналитичке процедуре (*GAPI*). У последњој, деветој целини *Поступак (ток) издвајања лантаноида из летећег пепела* сумирани су сви важни аспекти које је потребно размотрити при одабиру најоптималнијих процесних параметара за повраћај лантаноида из летећег пепела.

Експериментални део се састоји из четири целине. Прва целина тиче се коришћених хемикалија и инструмената за експериментални рад. У другој целини детаљно се описују коришћене методе анализе. У оквиру експерименталног дела рада коришћени су узорци летећег и котловског пепела који су прикупљени из свих пет термоелектрана (ТЕ) у Републици Србији, и то: ТЕ „Костолац“, ТЕ „Колубара“, ТЕ „Морава“, ТЕ „Никола Тесла А“ и ТЕ „Никола Тесла Б“. У оквиру карактеризације узорака пепела обрађене су анализа оптичким микроскопом и примена рендгенске флуоросцентне спектрометрије (*XRF*), као и алкална фузија путем које су одређене главне компоненте пепела и укупни садржај лантаноида. У трећој целини се детаљно описује оптимизација процеса алкалног предтретмана и киселог излуживања приказом примењеног експерименталног Плакет-Бурман дизајна, као и оптимизација микроталасног излуживања лантаноида из узорака пепела применом Бокс-Бенкен дизајна. Приказана је и евалуација утицаја на животну средину развијене методе рачунањем вредности: атом економије, Е-фактора и потрошње енергије. Описан је процес припреме узорка за инструментално мерење, као и услови мерења за коришћену инструменталну методу (*ICP-MS*). Након тога, у четвртој целини детаљно су описани услови прелиминарних експеримената за идентификацију значајних фактора и оптимизације дисперзивне течно-течне микроекстракције са припремом узорака и анализом параметара за оптимизацију. Описани су услови при којима је рађена валидација методе на стандардном референтном материјалу, као и оптимизована метода примењена на узорцима пепела из термоелектрана. Такође, у оквиру овог дела описани су коришћени модели за анализу еколошке прихватљивости развијене методе.

У делу **Резултати и дискусија** изложени су главни резултати истраживања ове докторске дисертације, који су подељени у три тематске целине. У првој целини *Карактеризација узорака пепела* приказани су резултати карактеризације 11 узорака пепела из термоелектрана и стандардног референтног материјала. Прво су анализирани расподела по величини и морфолошке карактеристике узорака пепела применом оптичког микроскопа, а затим и хемијски састав пепела, применом *XRF* методе и анализом на *ICP-OES* са приказом главних оксида који улазе у његов састав и садржајем органске материје у виду губитка жарењем. Приказани су и коментарисани укупни садржаји лантаноида у узорцима летећег и котловског пепела, као и садржај критичних елемената у сваком од узорака. У другој целини *Микроталасно излуживање лантаноида из летећег пепела* анализирани су резултати оптимизације прелиминарних експеримената применом Плакет-Бурман дизајна у оквиру којег су одабрани оптимални параметри за алкални предтретман. Детаљно су коментарисани резултати приказани на Парето дијаграму, као и на графицима главних ефеката где су као одговори праћени укупна концентрација повраћених лантаноида, коефицијент односа критичних и лантаноида у изобиљу, Е-фактор, атом економија и потрошња енергије. На основу анализе укупног одзива усвојени су оптимални параметри за овај део процеса. Након тога, применом методологије одзивне површине анализирани су добијени резултати за оптимизацију процеса киселог излуживања. Анализа добијених тродимензионалних површина, једначине регресије и графика пожељности указала је на оптималне вредности за овај део процеса. Даље су детаљно објашњени резултати анализе добијени након примене оптимизоване методе на узорцима пепела из термоелектрана. Приказане су ефикасности издвајања за све анализирани елементе по узорку, а дато је и њихово међусобно поређење, као и анализа повраћаја критичних и некритичних елемената, лаких, средњих и тешких. Анализирани су просечне концентрације повраћених

лантаноида са стандардним девијацијама за узорке пепела из термоелектрана, као и ефикасност издвајања по елементу. У овом делу дата је и анализа утицаја развијене методе на животну средину поређењем вредности Е-фактора, атом економије и потрошње енергије, пре и након оптимизације. Трећа целина *Дисперзивна микроекстракција лантаноида* обухватила је дискусију резултата везану за оптимизацију дисперзивне течно-течне микроекстракције. Детаљно је анализиран одабир параметара за прелиминарне експерименте, где су даље, на основу добијених резултата ових експеримената, усвојени реагенси за даљу оптимизацију. Применом методологије одзивне површине са графика функције пожељности одређени су параметри који у највећој мери утичу на процес екстракције, као и њихове оптималне вредности. Анализирана је и значајност испитиваних параметара и њихови међусобни односи у оквиру ANOVA табеле, а вршена је и упоредна анализа вредности функције пожељности предвиђене моделом при различитим условима са експериментално добијеним вредностима. Валидација развијене методе рађена је на стандардном референтном материјалу где се анализирала остварена ефикасност развијене методе, као и ефикасност развијене методе на узорцима пепела из термоелектрана (који елемент је издвојен у највећој мери, као и које су релативне стандардне девијације за сваки од узорака). Приказане су и коментарисане и границе детекције, линеарне једначине и коефицијенти корелације за одређивање сваког појединачног елемента. Коментарисани су и резултати анализе утицаја развијене методе на животну средину, детаљном обрадом добијених графика за аналитичку еко скалу, аналитичку зеленост и индекс зелене аналитичке процедуре.

Закључак садржи сумиране најважније аспекте значаја издвајања лантаноида из летећег пепела, резултате, резимиране коментаре, запажања и закључке који су проистекли из истраживања у оквиру ове докторске дисертације.

Литература садржи укупно 220 навода који су цитирани у докторској дисертацији. Наведене референце обухватају релевантне радове, књиге и друге изворе који су из области истраживања и радове проистекле из дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Тема ове докторске дисертације представља савремен и интердисциплинарни приступ проблему опоравка критичних сировина, са фокусом на лантаноиде, из индустријске отпадне сировине као што је летећи пепео. На глобалном нивоу, сагоревање угља и даље представља водећи извор у производњи електричне енергије, што као последицу има настанак великих количина летећег пепела. Депоновање овог отпадног материјала доводи до нарушавања квалитета животне средине, док низак степен његовог искоришћења указује на значајан потенцијал за његову поновну употребу, с обзиром на то да у свом саставу садржи елементе од стратешког значаја, попут лантаноида.

Неравномерна глобална расподела природних руда лантаноида, условљена геолошким карактеристикама, резултира доминантном позицијом Кине, која је тренутно водећи произвођач ових елемената, уједно и земља са највећим резервама. Истовремено, растућа потражња за лантаноидима, услед њихове примене у бројним индустријама, попут електронике, производње обновљивих извора енергије и напредних магнетних

материјала, чини атрактивним и значајним истраживање алтернативних и одрживих извора ових елемената. У том контексту, летећи пепео представља значајан ресурс у оквиру глобалне стратегије снабдевања критичним сировинама.

Применом микроталасне енергије у процесу излуживања постиже се значајна уштеда времена и енергије у поређењу са конвенционалним методама, уз повећану ефикасност процеса. Дисперзивна течно-течна микроекстракција омогућава селективно, брзо и еколошки прихватљиво концентрисање лантаноида из раствора добијеног разарањем комплексне матрице пепела. У оквиру докторске дисертације кандидата Милице Делић, под називом „Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“ по први пут је примењена комбинација ове две методе у оквиру једног истраживачког оквира при оптимизованим условима, тако да се користе мање штетни реагенси у што мањим количинама, и при што блажим условима извођења експеримента (температура блиска амбијенталној, употреба што мање концентрованих реагенаса), али са друге стране да се не наруши очекивана ефикасност процеса издвајања.

Резултати ове докторске дисертације су значајни и у домену циркуларне економије и одрживог управљања отпадом, омогућавајући искоришћење отпадног материјала као потенцијалног извора стратешки важних елемената. Истраживање је у складу и са европским и светским иницијативама за смањење зависности од увоза критичних сировина и развој „зелених“ технологија у преради минералних сировина. Примењене научне методе, заједно са резултатима ове докторске дисертације потврђују значај и оригиналност спроведених истраживања.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У овој докторској дисертацији коришћено је 220 навода из литературе који у потпуности одговарају теми. Највећи део цитираних научних радова је публикован у међународним часописима и новијег је датума, што указује на актуелност истраживања у свету. Изведен преглед литературе био је основа за планирање и извођење експеримената, обраду добијених резултата и дискусију истих у контексту актуелних савремених светских истраживања. Прегледом литературе која је коришћена може се закључити да кандидат познаје предметну област истраживања, као и актуелност истраживања у свету.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Карактеризација узорака пепела из термoeлектрана и стандардног референтног материјала вршена је применом рендгенско-флуоресцентне спектрометрије (енгл. *X-ray Fluorescence – XRF*) и електронске микроскопије. Детекција и квантификација метала који чине главне компоненте пепела, вршена је применом оптичке емисионе спектрометрије са индуковано спрегнутом плазмом (енгл. *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry – ICP-OES*), док је детекција и квантификација лантаноида, скандијума и итријума услед њихових знатно нижих концентрација вршена применом масене спектрометрије са индуковано спрегнутом плазмом (енгл. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICP-MS*). Код процеса излуживања лантаноида из летећег пепела у циљу разарања матрице пепела коришћени су ултразвучно купатило и микроталасна пећница. У циљу оптимизације ове методе испитани су утицаји:

различитих реагенса за алкални предtretман (NaOH/CaO) и кисело излуживање (HCl/HNO₃), температуре на којој се одвијају процеси, времена трајања реакција, концентрације коришћених база и киселина, запремине коришћених база и киселина, као и односа чврсто-течно (пепео-раствор базе или киселине). Микроекстракција је рађена применом тетрахлоретилена као растварача, који се показао као ефикаснији у односу на хексан. Као екстракционо средство за издвајање лантаноида коришћена је ди(2-етилхексил)фосфорна киселина (енгл. *di(2-ethylhexyl)phosphoric acid* – DEHPA). Испитана је и неопходност примене дисперзионих средстава и упоређена је ефикасност примене етанола и ацетона у ту сврху. Оптимизоване су pH вредност и температура раствора и запремина солвента (тетрахлоретилен+DEHPA). Процена прихватљивости методе са аспекта утицаја на животну средину и живи свет вршена је применом софтверских алата аналитичке еко скале (енгл. *Analytical Eco Scale* – AES), аналитичке зелености (енгл. *Analytical GREENness* – AGREE) и индекса зелене аналитичке процедуре (енгл. *Green Analytical Procedure Index* – GAPI). Статистичка анализа резултата експеримената рађена је применом експерименталног дизајна, што је омогућило истовремено испитивање утицаја различитих параметара, као и њихове међусобне зависности. У ту сврху коришћени су Плакет-Бурман дизајн и Бокс-Бенкен дизајн.

3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати имају значајан потенцијал примене у домену одрживог управљања индустријским отпадом и алтернативног рударења стратешких важних елемената – лантаноида. У Републици Србији годишње се генерише седам милиона тона летећег пепела који се, уместо тренутног доминантног деповања и тиме нарушавања квалитета животне средине, може третирати као секундарни извор вредних сировина. Развијена и оптимизована метода микроталасног излуживања показала је високу ефикасност у разарању силикатне структуре пепела и издвајања лантаноида из овог отпадног материјала, при чему је постигнута просечна ефикасност повраћаја за анализиране узорке од 80%. Додатно, примена дисперзивне течностно-течне микроекстракције даље доприноси селективности процеса, концентрисањем лантаноида из претходно добијеног раствора, што је кључно за примену у индустријским условима. Већа ефикасност екстракције забележена је за средње и тешке лантаноиде (Sm, Eu, Gd, Tb, Y, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu), који имају широку примену у напредним технологијама. Резултати еколошке прихватљивости развијене методе (AGREE, AES, GAPI) потврђују да развијена и оптимизована процедура задовољава еколошке критеријуме. Просечан укупни садржај лантаноида у узорцима летећег пепела из термоелектрана у Републици Србији износи 211 mg/kg. Ако узмемо у обзир да тренутне количине депонованог летећег пепела у Србији превазилазе 200 милиона тона, и да овако расположива отпадна сировина не захтева рударење, евидентан је потенцијал за добијање значајних количина ових критичних елемената. Применом даљих технолошких процеса за раздвајање елемената из раствора и скалирањем процеса, развијена методологија може бити примењена у пракси као технолошко решење за искоришћење индустријске отпадне сировине – летећег пепела и обезбеђивање алтернативног извора стратешки важних елемената – лантаноида.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Милица Делић је током израде докторске дисертације показала висок ниво самосталности, истрајности и посвећености у научном истраживању. Приликом претраге и анализе релевантне литературе кандидат је показао способност разумевања сложених научних концепата и праћења савремених трендова у области аналитичке хемије и заштите животне средине. Евидентне су њене способности и стручност у реализацији експеримената, коришћењу различитих статистичких метода за анализу и обраду резултата. Комисија сматра да на основу досадашњег научноистраживачког рада и остварених научних резултата током израде ове докторске дисертације, кандидат Милица Делић поседује све квалитете који су неопходни за самосталан научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру ове докторске дисертације остварени су следећи научни доприноси:

- Извршена је карактеризација узорака летећег и котловског пепела пореклом из термоелектрана Републике Србије (извршена је њихова морфолошка анализа, одређен је удео главних компонената које улазе у састав пепела, укупни садржај лантаноида, скандијума и итријума, извршена је и класификација узорака летећег пепела).
- Урађена је идентификација и квантификација лантаноида, скандијума и итријума у узорцима пепела. Приказана је заступљеност сваког појединачног елемента у односу на његову моларну масу и распрострањеност у природи, као и његов садржај у односу на структуру узорака пепела. Анализиран је однос заступљености лаких, средњих и тешких елемената, као и садржај критичних у односу на лантаноиде у изобиљу.
- Извршена је оптимизација експерименталних параметара применом Плакет-Бурман и Бокс-Бенкен дизајна. Одређене су оптималне вредности параметара процеса који имају највећи утицај на микроталасно излуживање лантаноида из летећег пепела и параметара који имају највећи утицај на дисперзивну течно-течну микроекстракцију ових елемената.
- Развијена је и оптимизована метода за микроталасно излуживање лантаноида из летећег пепела, која подразумева разарање силикатне матрице пепела и ослобађање елемената од интереса у кисели раствор. У обзир су узети сви значајни параметри процеса (врста, количине и концентрације хемијских реагенса за алкални предтретман и излуживање, температура, време трајања реакција и одабир методе загревања за алкални предтретман), притом поштујући принципе зелене хемије, уз повећање ефикасности искоришћења секундарне сировине.
- Развијена је метода за концентрисање лантаноида дисперзивном течно-течном микроекстракцијом, која подразумева даље концентрисање лантаноида након што су претходном методом преведени у раствор. У обзир су узети сви значајни параметри процеса (одабир растварача, одабир екстракционог средства и дисперзанта, запремина солвента, рН и температура раствора), притом поштујући принципе зелене хемије, уз максимизацију ефикасности процеса.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације показују да развијена метода микроталасног излуживања представља ефикасан приступ за издвајање лантаноида из летећег пепела, са просечном ефикасношћу од 80%. Важно је узети у обзир да тренд повраћаја прати и тренд заступљености елемената у узорцима, тако да и поред високог повраћаја за поједине елементе (Ce, La, Nd), постоје ограничења у погледу селективности екстракције за слабо заступљене елементе (Tm, Lu). Забележене значајне разлике у садржају лантаноида између узорака летећег и котловског пепела указују на потребу за детаљнијом анализом утицаја морфологије пепела на екстракционе процесе. Метода дисперзивне течно-течне микроекстракције показала је добре резултате за екстракцију средњих и тешких лантаноида, док је за лаке елементе (Sc, La, Ce, Pr и Nd) показала ограничења у погледу ефикасности, услед појаве контракције лантаноида, што ограничава њену универзалну примену. Потреба за центрифугирањем може отежати примену методе у реалним индустријским условима. Иако су резултати примене различитих метода за еколошку процену развијене методе (AGREE, AES, GAPI) указали на умерен до висок ниво еколошке прихватљивости, потребно је размотрити замену коришћених органских растварача еколошки прихватљивијим реагенасима. Упркос наведеним изазовима, истраживање у оквиру ове докторске дисертације пружа значајну основу за развој економски и еколошки прихватљивог и довољно ефикасног процеса екстракције критичних сировина из летећег пепела као индустријске отпадне сировине.

4.3. Верификација научних доприноса

Из истраживања у оквиру ове докторске дисертације Милица Делић (рођена Стојковић) је публиковала, као први аутор, два научна рада у врхунском међународном часопису (M21). Такође, објавила је два саопштења са међународних скупова која су штампана у целини (M33), једно саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34) и једно саопштење са скупа од националног значаја штампано у изводу (M64).

M21 Рад у врхунском међународном часопису

1. **Delić, M.**; Ristić, M.; Đolić, M.; Perić-Grujić, A.; Onjia, A. Dispersive Liquid–Liquid Chelate Microextraction of Rare Earth Elements: Optimization and Greenness Evaluation. *Metals* 2025, 15, 52. <https://doi.org/10.3390/met15010052> (IF₂₀₂₃=2,7) ISSN: 2075-4701
2. **Stojković, M.**; Ristić, M.; Đolić, M.; Perić Grujić, A.; Onjia, A. Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly and Bottom Ashes by Ultrasonic Roasting Followed by Microwave Leaching. *Metals* 2024, 14, 371. <https://doi.org/10.3390/met14040371> (IF₂₀₂₃=2,7) ISSN: 2075-4701

5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Оригиналност ове докторске дисертације проверена је дана 25.04.2025. године на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204/22. 6. 2018). Провера докторске дисертације Милице Делић под називом „Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“ извршена је коришћењем програма „iThenticate“ и утврђено је да

подударање текста износи 10%. Овај степен подударности последица је коришћења стручних термина типичних за област којој припада дисертација, назива метода, статистичких појмова, као и објашњења појмова који се налазе у тези. Највећи проценат подударности односи се на претходно публиковане резултате докторандових истраживања у овире ове докторске дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника. На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, изјављујемо да извештај указује на оригиналност докторске дисертације Милице Делић, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу изнетих података, Комисија сматра да су предмет, циљеви и методе докторске дисертације кандидата Милице Делић јасно дефинисани, а актуелност дисертације потврђена је објављивањем радова у међународним часописима. Такође, ова докторска дисертација ће дати значајан допринос научној области Инжењерства заштите животне средине за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ментори ове докторске дисертације су др Антоније Оџа, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Маја Ђолић, доцент Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да докторску дисертацију кандидата Милице Делић под називом: „Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“ прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 05.05.2025.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Александра Перић-Грујић, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
др Мирјана Ристић, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
др Мирјана Ћујић, виши научни сарадник
Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“
– Институт од националног значаја за Републику Србију