

Факултет ТЕХНОЛОШКО-
МЕТАЛУРШКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/169

Веће научних области техничких наука

(Број захтева)

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

2. 9. 2024.

(Датум)

ЗАХТЕВ

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

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег
пепела

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ ТЕХНОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

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

Милица (Драган) Стојковић

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

Универзитет у Београду,

Технолошко-металуршки факултет, Мастер студије, Мастер инжењер технологије

3. Година завршетка
претходног нивоа студија: 2020.

4. Година уписа на докторске студије: 2021.

5. Назив студијског програма
докторских студија:

Инжењерство заштите животне средине

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ 1:

Име и презиме ментора: др Антоније Оњиа

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

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Slavković-Beškoski, L.; Ignjatović, L.; Ćujić, M.; Vesković, J.; Trivunac, K.; Stojaković, J.; Perić-Grujić, A.; **Onjia, A.** Ecological and Health Risks Attributed to Rare Earth Elements in Coal Fly Ash. *Toxics* **2024**, *12*, 71, doi:10.3390/TOXICS12010071/S1. (IF₂₀₂₂=4,6) ISSN: 2305-6304
2. Vesković, J.; Lučić, M.; Ristić, M.; Perić-Grujić, A.; **Onjia, A.** Spatial Variability of Rare Earth Elements in Groundwater in the Vicinity of a Coal-Fired Power Plant and Associated Health Risk. *Toxics* **2024**, *12*, 62, doi:10.3390/TOXICS12010062/S1. (IF₂₀₂₂=4,6) ISSN: 2305-6304
3. Ražić, S.; Bakić, T.; Topić, A.; Lukić, J.; **Onjia, A.** Deep Eutectic Solvent Based Reversed-Phase Dispersive Liquid–Liquid Microextraction and High-Performance Liquid Chromatography for the Determination of Free Tryptophan in Cold-Pressed Oils. *Molecules* **2023**, *28*, 2395, doi:10.3390/molecules28052395. (IF₂₀₂₂=4,6) ISSN: 1420-3049
4. Slavković-Beškoski, L.; Ignjatović, L.; Bolognesi, G.; Maksin, D.; Savić, A.; Vladislavljević, G.; **Onjia, A.** Dispersive Solid–Liquid Microextraction Based on the Poly(HDDA)/Graphene Sorbent Followed by ICP-MS for the Determination of Rare Earth Elements in Coal Fly Ash Leachate. *Metals* **2022**, *12*, 791, doi:10.3390/met12050791. (IF₂₀₂₂=2,9) ISSN: 2075-4701
5. Lučić, M.; Sredović Ignjatović, I.; Lević, S.; Pećinar, I.; Antić, M.; Đurđić, S.; **Onjia, A.** Ultrasound-assisted Extraction of Essential and Toxic Elements from Pepper in Different Ripening Stages Using Box–Behnken Design. *J. Food Process. Preserv.* **2022**, *46*, doi:10.1111/jfpp.16493. (IF₂₀₂₂=2,5) ISSN: 0145-8892

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ 2.:

Име и презиме ментора: др Маја Ђолић

Звање: доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Jankovic, A.; Cujic, M.; Stojkovic, M.; **Djolic, M.**; Zivojinovic, D.; Onjia, A.; Ristic, M.; Peric-Grujic, A. Impact of Leaching Procedure on Heavy Metals Removal from Coal Fly Ash. *Hem. Ind.* **2024**, 1–1, doi:10.2298/HEMIND230901001J. (IF₂₀₂₂=0,9) ISSN: 0367-598X
2. **Đolić, M.**; Karanac, M.; Radovanović, D.; Umićević, A.; Kapidžić, A.; Veličković, Z.; Marinković, A.; Kamberović, Ž. Closing the Loop: As(V) Adsorption onto Goethite Impregnated Coal-Combustion Fly Ash as Integral Building Materials. *J. Clean. Prod.* **2021**, 303, 126924, doi:10.1016/j.jclepro.2021.126924. (IF₂₀₂₁=11,072) ISSN: 0959-6526
3. Rajakovic-Ognjanovic, V.N.; Karanac, M.; Smolar, J.; Petkovsek, A.; **Dolic, M.**; Despotovic, J. Use of up-flow percolation test to assess the environmental properties of raw and treated fly ash. *Environ. Eng. Manag. J.* **2019**, 18, 1781–1788, doi:10.30638/eemj.2019.169. (IF₂₀₁₈=1,186) ISSN: 1582-9596
4. Karanac, M.; **Đolić, M.**; Veličković, Z.; Kapidžić, A.; Ivanovski, V.; Mitrić, M.; Marinković, A. Efficient Multistep Arsenate Removal onto Magnetite Modified Fly Ash. *J. Environ. Manage.* **2018**, 224, 263–276, doi:10.1016/j.jenvman.2018.07.051. (IF₂₀₁₈=4,865) ISSN: 0301-4797
5. **Đolić, M.B.**; Rajaković-Ognjanović, V.N.; Marković, J.P.; Janković-Mandić, L.J.; Mitrić, M.N.; Onjia, A.E.; Rajaković, L.V. The Effect of Different Extractants on Lead Desorption from a Natural Mineral. *Appl. Surf. Sci.* **2015**, 324, 221–231, doi:10.1016/j.apsusc.2014.10.112. (IF₂₀₁₅=3,150) ISSN: 0169-4332

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

- 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. 43. Правилника о докторским студијама ТМФ-а на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 3. 7. 2024. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата
за израду докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије за оцену подобности теме и кандидата и одобрава израда докторске дисертације **Милица Стојковић**, број индекса 4008/21, под називом: **„Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“**.

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

За менторе се одређују др Антоније Оџија, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Маја Ђолић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

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

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Милице Стојковић, мастер инжењера технологије, за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду бр. 35/119 од 30.05.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Милице Стојковић за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела“**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Милица Д. 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 након тога на истом студијском програму и завршила их у року са просечном оценом 9,86. Школске 2021/2022. уписала је докторске академске студије на наведеном студијском програму 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 априлу 2022. године. Од новембра 2022. године запослена је на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду (ТМФ) 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. Добитница је пет пута награда „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). Добитница је Специјалног признања Српског хемијског друштва за изузетан успех током студија.

Фокус интересовања Милице Стојковић јесу технологије пречишћавања отпадних вода, што је била тема научноистраживачког рада на трећој години студија под називом „Примена лаказа у деградацији пестицида и текстилних боја“, завршног рада под називом „Уклањање азотних једињења из отпадних вода при производњи азот-субоксида процесом оксидације“ и завршног мастер рада под називом „Фотокаталитичко обезбојавање арилазо-пиридонских боја диполарне структуре са електрон донорским супституентима“, оба одбрањена са оценом десет.

Од јануара 2023. године ангажована је 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 подпројекта WP1 под називом „*Characterization of fly ash originated from Serbian thermal power plants and its application for strategic elements recovery*“. Тема докторске дисертације управо је део истраживања наведеног пројекта.

Поред наведеног, Милица Стојковић 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. Поред ангажовања у научно истраживачким пројектима, Милица Стојковић је била члан и међународног наставног пројекта под називом „*Adriatic Master On Circular Economy And Bioeconomy*“ финансираног од стране Interreg ADRIAC групе.

Током студија била је ангажована на различитим програмима у оквиру којих је развијала вештине попут јавног наступа, рада у групи, покретања сопственог бизниса, итд. Неки од тих програма су: „Паркап (ParkUp)“ камп у организацији Научнотехнолошког парка Београд (где је била члан „Фарм Фит“ тима који је освојио прво место), еко-ментор у оквиру пројекта који организује „Екохаб (EcoHub)“. Била је активна чланица Савеза студената ТМФ-а, где је руководила сектором за науку у оквиру којег је организован научноистраживачки рад за студенте треће и четврте године и студенте мастер студија. Тада је учествовала и у организацији научних студентских скупова као што су Мала смотре радова студената ТМФ-а у јуну 2021. године и годишњи Конгрес Центра за научноистраживачки рад студената ТМФ-а у новембру 2021. године. Милица Стојковић је била члан организационог одбора 53. конференције „Отпадне воде, комунални чврсти отпад и опасан отпад“ одржане у Крагујевцу 2024. године.

Активни је члан комисије за промоцију Технолошко-металуршког факултета у оквиру које је била координатор „Отворених врата ТМФ-а“ за 2024. годину, као и члан комисије за израду распореда.

Чита, пише и говори енглески језик.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

У звање истраживач приправник Милица Стојковић изабрана је 28.04.2022. године на Катедри за инжењерство заштите животне средине Технолошко-металуршког

факултета Универзитета у Београду. Од 03.11.2022. запослена је као асистент на Катедри за инжењерство заштите животне средине Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду. У оквиру докторских академских студија Милица Стојковић је положила све испите предвиђене планом и програмом са просечном оценом 9,91. Завршни испит (приступни рад за израду докторске дисертације) под називом „Развој и примена метода за екстракцију ретких елемената земље из летећег пепела“ одбранила је у септембру 2023. године, такође са оценом 10. У табели 1. приказан је списак положених испита, са оценама и оствареним ЕСПБ бодовима.

Табела 1. Списак положених испита, са оценама и оствареним ЕСПБ бодовима

Редни бр.	Назив предмета	Оцена	ЕСПБ
1.	Индустријска екологија	10	5
2.	Виши курс аналитичке хемије	10	5
3.	Економија животне средине и одрживи развој	10	4
4.	Хемијска кинетика	9	5
5.	Одабрана поглавља математичке анализе	10	5
6.	Технологија припреме воде	10	5
7.	Електрохемијски и алтернативни извори електричне енергије	10	5
8.	Одабрана поглавља инструменталне анализе	10	7
9.	Технологија пречишћавања отпадних вода	10	5
10.	Електродни материјали	10	5
11.	Енглески језик	10	/
12.	Завршни испит	10	30
Просечна оцена / Укупно бодова		9,91	81

Милица Стојковић, асистент Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, запослена на Катедри за инжењерство заштите животне средине, бави се технологијама пречишћавања отпадних вода, управљањем отпадом, искоришћењем отпадних сировина у циљу добијања корисног производа према принципима циркуларне економије. Из досадашњих истраживања Милица Стојковић је била коаутор на једном раду у истакнутом међународном часопису (M22), једном раду у међународном часопису (M23), као и једном раду у часопису националног значаја (M52) и једном раду у научном часопису (M53). Такође, била је коаутор на четири саопштења са међународних скупова, од чега два саопштења из категорије M33 и два саопштење из категорије M34. Има и два саопштења са скупа од националног значаја штампана у целини (M63), и једно саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу (M64).

Списак објављених научних и стручних радова

M22 Рад у истакнутом међународном часопису

1. **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> (IF₂₀₂₂=2,9) ISSN: 2075-4701

M23 Рад у међународном часопису

1. Janković, A.; Ćujić, M.; **Stojković, M.**; Đolić, M.; Živojinović, D.; Onjia, A.; Ristić, M.; Perić Grujić, A. Impact of leaching procedure on heavy metals removal from coal fly ash. *Chemical Industry*, 2024, 78(1), 51–62. <https://doi.org/10.2298/HEMIND230901001J> (IF₂₀₂₂=0,9) ISSN: 0367-598X

M33 Саопштење са међународног скупа штампано у целини

1. **Stojković, M.**; Dedić, S.; Đolić, M.; Ćujić, M.; Pavićević, V.; Ristić, M.; Perić-Grujić, M. The optimization of metals and metalloids extraction from fly ash, MME SEE - 5th Metallurgical and Material Engineering Congress of South-East Europe, Bosnia and Herzegovina, 7-10th June (2023), pp. 347-352. ISBN: 978-86-87183-32-2
2. Živković, F.; **Stojković, M.**; Đolić, M.; Ćujić, M. Elemental analysis of rare from thermal power plants in the Republic of Serbia, Conference Proceedings/International Scientific and Professional Conference Politehnika 2023, Belgrade, 15th December 2023, pp.173-176. ISBN: 978-86-7498-110-8

M34 Саопштење са међународног скупа штампано у изводу

1. **Stojković, M.**; Bezbradica D.; Stojanović M. Application of laccase in degradation of pesticide lindane and textile dyes. Program and the Book of Abstracts Eighteenth Young Researchers' Conference Materials Sciences and Engineering, Institute of Technical Sciences of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade, (2019), p. 89. ISBN: 978-86-80321-35-6
2. Lukić, V.; Ponjavić, M.; Ćujić, M.; **Stojković, M.**; Đolić, M.; Bigović, M.; Prlainović, N. Bacterial nanocellulose as a Potential Adsorbent for Strategic and Heavy Metals Removal. 23rd European Meeting on Environmental Chemistry, 3-6 December 2023, Budva, Montenegro, p. 36. ISBN: 978-9940-9059-2-7

M52 Рад у часопису националног значаја

1. Radosavljević, D.; **Stojković, M.**; Josipović, S.; Slavković, A.; Popović, A.; Đolić, M. Društveni, ekonomski i ekološki aspekti tranzicije linearne u cirkularnu ekonomiju na primeru prerade otpada od hrane, *ECOLOGICA*, 29, 106, str. 266-272 (2022) ISSN: 0354-3285

M53 Рад у научном часопису

1. **Stojković, M.**; Ogrizović, Đ.; Vučićević, J. Prečišćavanje otpadne vode iz procesa proizvodnje azot-suboksida. *Voda i sanitarna tehnika*, LIII(3-4), str. 27-36 (2023) ISSN: 0350-5049

M63 Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини

1. **Stojković, M.**; Radosavljević, D.; Josipović, S.; Popović, A.; Pavićević, V.; Đolić, M. Cirkularna ekonomija i održivo upravljanje bio-otpadom: društveni, ekonomski i ekološki aspekti, LI Konferencija „Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad“, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Subotica, (2022), str. 181-185. ISBN: 978-86-81618-13-4
2. Rajković, M.; Đolić, M.; **Stojković, M.**; Karanac, M.; Pavićević, V.; Šljivić-Ivanović, M. Potencijali primene crvenog mulja za uklanjanje teških metala iz otpadne vode, 53.

Konferencija „Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad“, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Kragujevac, (2024), str. 46-50. ISBN: 978-86-81618-17-2

M64 Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу

1. Ćujić, M.; Vitorović, M.; **Stojković, M.**; Đolić, M.; Perić-Grujić, A. Stabilizacija matrice letećeg pepela primenom kalcijum-oksida, hidroksida i karbonata, 36. Međunarodni kongres o procesnoj industriji - Procesing '23, Zbornik radova Proceedings, Šabac 1. i 2. jun (2023), str. 39. ISBN: 978-86-85535-15-4

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу досадашњег научноистраживачког рада и постигнутих резултата током докторских академских студија, Милица Стојковић је показала способност и самосталност за бављење научноистраживачким радом, што се огледа у реализацији истраживања, тј. извођењу експеримената, обради научних резултата и писању научних радова. Из научне области којој припада тема предложене докторске дисертације кандидат је коаутор на једном раду у истакнутом међународном часопису (M22), једном раду у међународном часопису (M23), два саопштења са међународних скупова штампана у целини (M33) и једног саопштења са скупа националног значаја штампаног у изводу (M64). На основу свега изложеног, Комисија сматра да кандидат Милица Стојковић испуњава све потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања ове докторске дисертације усмерен је на искоришћење отпадне сировине пореклом из термоелектрана у циљу добијања корисног, економски вредног производа – лантаноида као стратешких елемената који улазе у његов састав. Сагоревање угља и даље представља доминантан извор за добијање електричне енергије на глобалном нивоу са уделом од 36,7%, у Републици Србији овај удео је знатно већи, чак 70%. Процене су да се у Републици Србији на годишњем нивоу генерише око седам милиона тона ове отпадне сировине. Највећи део се без икаквог третмана одлаже на депоније пепела. Атмосферски услови и физичко хемијска својства земљишта и метала утичу на мобилност тешких метала који улазе у састав пепела, при чему могу прећи у околну земљиште или воде [1].

У састав летећег пепела највећим делом улазе оксиди силицијума, алуминијума, гвожђа, калцијума, магнезијума, итд. У знатно мањим концентрацијама заступљени су тешки метали, као и лантаноиди које чине: лантан (La), цер (Ce), празеодимијум (Pr), неодимијум (Nd), прометијум (Pm), самаријум (Sm), еуропијум (Eu), гадолонијум (Gd), тербијум (Tb), диспрозијум (Dy), холмијум (Ho), ербијум (Er), тулијум (Tm), итербијум (Yb), лутецијум (Lu), укључујући скандијум (Sc) и итријум (Y) [2]. Лантаноиди заједно са скандијумом и итријумом чине групу ретких земних елемената (енгл. *Rare Earth Elements*). Овај назив носе због ниских концентрација у којима се налазе у природним рудама и неравномерне глобалне заступљености ових руда. Кина тренутно доминира на тржишту када је реч о производњи ових елемената, са укупним уделом од 60,6%. Разлог томе јесте што се природне руде ових елемената налазе највећим делом на простору југоисточне Азије. Са друге стране, потражња за овим елементима из године у годину расте, како они улазе у састав магнета, катализатора, батерија, електричних и

електронских уређаја. Из наведених разлога, остале земље теже проналаску алтернативних извора ових елемената [3].

Летећи пепео је један од алтернативних извора ретких земних елемената са великим потенцијалом, како концентрације ових елемената у пепелу могу бити и више него оне у природним рудама. Тренутно постоји неколико комерцијално развијених метода за добијање ових елемената из пепела, међутим све методе подразумевају коришћење великих количина концентрованих киселина и хемикалија које имају изразито штетан утицај на животну средину [4,5].

Циљ истраживања ове докторске дисертације јесте развој иновативних метода за издвајање лантаноида из летећег пепела на економски и еколошки оправдан начин. Први сегмент истраживања биће усмерен на излуживање лантаноида из летећег пепела применом алкалног печења (енгл. *roasting*) и киселог излуживања. Третман алкалног печења има улогу да разори силикатну матрицу пепела у чијој структури су ови елементи заробљени, након чега се дејством киселина они преводе у раствор [6,7]. Применом Плакет-Бурман (енгл. *Plackett-Burman*) методе за оптимизацију, као и методе Централног композитног дизајна биће омогућено истовремено испитивање утицаја различитих параметара, као и њихове међусобне зависности. Испитаће се утицај: температуре, врсте базе/киселине, концентрације базе/киселине, запремине базе/киселине, однос чврсто-течно, времена реакције, примењене методе. Како би предложена метода била у складу са принципима зелене хемије и чистије производње, вршиће се прорачуни према моделима: Атом економија (енгл. *Atom economy*) и Е-фактор (енгл. *Environmental factor*), као и утрошак енергије. Оптимизацијом ове методе биће урађен први део истраживања који се односи на излуживање лантаноида из летећег пепела, тј. њихово превођење у раствор. Услед ниских концентрација лантаноида у раствору неопходно је њихово концентрисање [8]. Други део истраживања биће усмерен на екстракцију лантаноида из раствора, применом поступка дисперзионе микроекстракције [9,10]. У циљу потенцијалне инжењерске примене, екстракција из водених раствора вршиће се коришћењем зелених хемикалија при благим условима, а испитаће се и могућност поновне употребе коришћених хемикалија, што су све кораци на путу транзиције са линеарне на циркуларну економију.

Оптимизацијом параметара процеса излуживања лантаноида из матрице летећег пепела доприноси се очувању животне средине, као и искоришћењу отпадне сировине једне индустрије, добијајући значајан и економски вредан ресурс за примену у другим гранама индустрије.

Истраживања се заснивају на:

- Одређивању састава летећег пепела, физичких карактеристика и садржаја токсичних елемената, као и поређењу састава летећег пепела пореклом из термоелектрана у Републици Србији са узорцима летећег пепела из других земаља света, имајући у виду и генерисане количине.
- Утврђивању параметара који значајно утичу на излуживање лантаноида из матрице летећег пепела (температура, врста базе/киселине, концентрација базе/киселине, запремина базе/киселине, однос чврсто-течно, време реакције, примењена метода) и оптимизација њихових вредности. Прецизно тумачење резултата применом статистичких метода.
- Спровођење процене усаглашености оптимизоване методе са принципима зелене хемије и чистије производње, прорачуном према моделима: Атом екомонија

(енгл. *Atom economy*) и Е-фактор (енгл. *Environmental factor*), као и утрошак енергије.

- Утврђивању параметара који значајно утичу на дисперзивну микроекстракцију лантаноида након издвајања из матрице пепела (запремина екстрактанта, температура, рН вредност).
- Спровођење процене прихватљивости методе са аспекта утицаја на животну средину и живи свет применом софтверских алата Агрипреп (енгл. *Analytical greenness metric for sample preparation – AGREEprep*) и Гапи (енгл. *Green Analytical Procedure Index – GAPI*).

Ова истраживања би требало да допринесу развоју методе за добијање лантаноида из летећег пепела. Такође, резултати добијени у овој дисертацији би допринели могућности искоришћења отпадне сировине пореклом из термоелектрана у циљу добијања стратешки важних елемената.

Релевантна библиографија која представља основу за истраживања и експерименте за израду ове докторске дисертације:

1. Slavković-Beškoski, L.; Ignjatović, L.; Ćujić, M.; Vesković, J.; Trivunac, K.; Stojaković, J.; Perić-Grujić, A.; Onjia, A. Ecological and Health Risks Attributed to Rare Earth Elements in Coal Fly Ash. *Toxics* **2024**, *12*, 71, doi:10.3390/TOXICS12010071/S1. (IF₂₀₂₂=4,6) ISSN: 2305-6304
2. Fu, B.; Hower, J.C.; Zhang, W.; Luo, G.; Hu, H.; Yao, H. A Review of Rare Earth Elements and Yttrium in Coal Ash: Content, Modes of Occurrences, Combustion Behavior, and Extraction Methods. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2022**, *88*, 100954, doi:10.1016/J.PECS.2021.100954. (IF₂₀₂₂=29,5) ISSN: 0360-1285
3. Wu, G.; Wang, T.; Chen, G.; Shen, Z.; Pan, W.P. Coal Fly Ash Activated by NaOH Roasting: Rare Earth Elements Recovery and Harmful Trace Elements Migration. *Fuel* **2022**, 324, doi:10.1016/J.FUEL.2022.124515. (IF₂₀₂₂=7,4) ISSN: 0016-2361
4. Agrahari, G.K.; Vignesh, M.S.; Nigam, K.D.P. Novel Devices for the Extraction and Recovery of Rare-Earth Metals through Recycling of Waste. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2024**, *26*, 109–137, doi:10.1007/s10163-023-01862-x. (IF₂₀₂₂=3,1) ISSN: 1438-4957
5. Taggart, R.K.; Hower, J.C.; Hsu-Kim, H. Effects of Roasting Additives and Leaching Parameters on the Extraction of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash. *Int. J. Coal Geol.* **2018**, *196*, 106–114, doi:10.1016/j.coal.2018.06.021. (IF₂₀₁₈=5,330) ISSN: 0166-5162
6. 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> (IF₂₀₂₂=2,9) ISSN: 2075-4701
7. Slavković-Beškoski, L.; Ignjatović, L.; Bolognesi, G.; Maksin, D.; Savić, A.; Vladisavljević, G.; Onjia, A. Dispersive Solid–Liquid Microextraction Based on the

Poly(HDDA)/Graphene Sorbent Followed by ICP-MS for the Determination of Rare Earth Elements in Coal Fly Ash Leachate. *Metals* **2022**, *12*, 791, doi:10.3390/met12050791. (IF₂₀₂₂=2,9) ISSN: 2075-4701

8. Mortada, W.I.; El-Gamal, G.G.; Hassanien, M.M.; Ibrahim, A.A.; Abou El-Reash, Y.G. Eco-Friendly Dispersive Liquid–Liquid Microextraction Procedure Based on Solidification of Floated Organic Drop Coupled with Back-Extraction for Preconcentration of Rare Earth Elements. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* **2022**, *0*, 1–15, doi:10.1080/03067319.2022.2100259. (IF₂₀₂₂=2,6) ISSN: 0306-7319
9. Laosuwan, M.; Mukdasai, S.; Srijaranai, S. A Simple in Syringe Low Density Solvent-Dispersive Liquid Liquid Microextraction for Enrichment of Some Metal Ions Prior to Their Determination by High Performance Liquid Chromatography in Food Samples. *Molecules* **2020**, *25*, 552, doi:10.3390/molecules25030552. (IF₂₀₂₂=4,6) ISSN: 1420-3049
10. Sá, Í.P.; Almeida, O.N.; Lima, D.D.C.; da Silva, E.G.P.; Santos, L.N.; Luzardo, F.H.M.; Velasco, F.G.; Gonzalez, M.H.; Amorim, F.A.C. Determination of Lanthanide and Actinide Elements by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry Applying DLLME Preconcentration and Dried Spot. *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.* **2021**, *182*, 106253, doi:10.1016/j.sab.2021.106253. (IF₂₀₂₁=3,662) ISSN: 0584-8547

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе које се могу издвојити као основа за научноистраживачки рад и које су проистекле из тумачења и анализирања релевантне литературе у оквиру ове докторске дисертације су следеће:

- Летећи пепео представља отпадни материјал који се у великој количини генерише током сагоревања угља у термоелектранама. Економско-енергетске пројекције показују да ће количине летећег пепела у наредном периоду остати константне, а како се он највећим делом само депонује представља погодну секундарну сировину за искоришћење.
- Дигитална ера данас доводи до повећане употребе електричних и електронских уређаја за којима потражња из године у годину расте. У састав ових уређаја улазе и лантаноиди који су у природим рудама заступљени у веома ниским концентрацијама, а истовремено је њихова глобална расподела неравномерна, што условљава тежње за проналаском алтернативних извора за стратешке метале.
- Летећи пепео у себи садржи значајне количине лантаноида, а њихова концентрација зависи од врсте угља који се сагорева, као и од услова сагоревања.
- У Републици Србији сагоревање угља представља доминантан начин производње електричне енергије и предвиђања су да ће овај удео споро да опада. Од генерисаног пепела искористи се свега 2%, што оставља велики потенцијал за искоришћење овог отпадног материјала.
- Комерцијално доступне методе за добијање ових елемената заснивају се на употреби концентрованих киселина при повишеним температурама које имају

изразито негативан утицај на животну средину. Развој иновативне методе која ће бити у складу са техно-економским и еколошким принципима је неопходна, и у домену научних истраживања актуелна тема.

Детаљан преглед литературе потврђује да су приказане полазне хипотезе и планирано истраживање у складу са глобалним активностима и интересовањима у науци.

4. Научне методе истраживања

Карактеризација пепела биће вршена применом скенирајуће електронске микроскопије (енгл. *Scanning Electron Microscope – SEM*), рендгенском флуоросцентном спектрометријом (енгл. *X-ray Fluorescence – XRF*) и електронске микроскопије. Детекција и квантификација лантаноида вршиће се применом масене спектрометрије са индуковано спрегнутом плазмом (енгл. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICP-MS*). Детекција и квантификација метала који чине главне компоненте пепела, као и тешких метала, вршиће се применом оптичке емисионе спектрометрије са индуковано спрегнутом плазмом (енгл. *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry – ICP-OES*).

За излуживање лантаноида из летећег пепела биће испитана ефикасност методе у ултразвучном купатилу и микроталасној пећници. Такође, испитаће се утицај реагенса за печење (NaOH/CaO) и излуживање (HCl/HNO_3), температуре, брзине одигравања реакције, концентрације базе/киселине, запремине базе/киселине, односа чврсто-течно.

Микроекстракција ће бити рађена применом тетраклоретилена као екстракционог растварача. Као хелатни екстрактант за издвајање лантаноида биће коришћена ди(2-етилхексил)фосфорна киселина (енгл. *di(2-ethylhexyl)phosphoric acid – DEHPA*). Испитаће се неопходност примене различитих дисперзионих средстава (метанол, етанол, ацетон, ацетонитрил). Такође, испитаће се утицај рН вредности, температуре и запремине екстрактанта. Спровођење процене прихватљивости методе са аспекта утицаја на животну средину и живи свет пратиће се применом софтверских алата Агрипреп (енгл. *Analytical greenness metric for sample preparation – AGREEprep*) и Гапи (енгл. *Green Analytical Procedure Index – GAPI*).

Статистичка анализа ће се вршити се применом експерименталног дизајна, чиме ће бити омогућено истовремено испитивање утицаја различитих параметара, као и њихове међусобне зависности.

5. Очекивани научни допринос

Резултати проистекли из ове докторске дисертације допринеће развоју иновативне методе за добијање стратешки важних елемената, лантаноида, из летећег пепела. Развијена метода биће економски и еколошки оправдана за практичну употребу.

Очекивани научни допринос ове докторске дисертације биће:

- Карактеризација узорака летећег пепела пореклом из термоелектрана Републике Србије (одређивање удела главних компонената пепела, садржај тешких метала и лантаноида, класификација узорака летећег пепела).
- Идентификација и квантификација лантаноида у летећем пепелу. Након одређивања концентрација лантаноида у различитим узорцима пепела

анализираће се зависности заступљености појединачних елемената у односу на њихове особине (моларна маса) и распрострањеност у природи.

- Оптимизација експерименталних параметара који утичу на микроталасно излуживање лантаноида из летећег пепела и на дисперзивну микроекстракцију ових елемената.
- Развијена метода за микроталасно излуживање лантаноида из летећег пепела узимајући у обзир све значајне параметре процеса, поштујући принципе зелене хемије, уз повећање ефикасности искоришћења секундарне сировине.
- Развијена метода за концентрисање лантаноида дисперзивном микроекстракцијом, која је други корак у развоју методе за њихово добијање.

6. План истраживања и структура рада

Предмет истраживања у оквиру предложене докторске тезе јесте развој ефикасне методе за добијање лантаноида из летећег пепела из термоелектрана, узимајући у обзир принципе зелене хемије и циркуларне економије. Оптимизација методе обухватиће излуживање и микроекстракцију ових елемената применом статистичких алата.

Први део истраживања биће усмерен на карактеризацију узорака летећег пепела. За ту сврху вршиће се примена скенирајуће електронске микроскопије (енгл. *Scanning Electron Microscope – SEM*), рендгенске флуоросцентне спектрометрије (енгл. *X-ray Fluorescence – XRF*) и електронског микроскопа. Детекција и квантификација метала који чине главне компоненте пепела, као и тешких метала, вршиће се применом оптичке емисионе спектрометрије са индуковано спрегнутом плазмом (енгл. *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry – ICP-OES*). Детекција и квантификација лантаноида ће се вршити применом масене спектрометрије са индуковано спрегнутом плазмом (енгл. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICP-MS*).

Даљи ток истраживања усмерен је на развој методе за излуживање лантаноида из летећег пепела. Оптимизација ове методе вршиће се одређивањем параметара који у највећој мери утичу на одвијање процеса ослобађања лантаноида из матрице летећег пепела (температура, врсте базе/киселине, концентрације базе/киселине, запремине базе/киселине, однос чврсто-течно, време реакције, примењена метода), као и варирањем вредности ових параметара у циљу одређивања најповољније. Истовремено, испитивање утицаја различитих параметара, као и њихове међусобне зависности, биће омогућено применом Плакет-Бурманове (енгл. *Plackett-Burman*) методе оптимизације, као и методе Централног композитног дизајна. Испитаће се усаглашеност оптимизоване методе са принципима зелене хемије, прорачуном према моделима: Атом економија (енгл. *Atom economy*) и Е-фактор (енгл. *Environmental factor*), као и утрошак енергије.

Трећи део истраживања биће усмерен на дисперзивну микроекстракцију, односно концентрисање лантаноида из раствора након ослобађања из матрице пепела. Микроекстракција ће бити вршена употребом тетрахлоретилена као екстракционог растварача, док ће се ди(2-етилхексил)фосфорна киселина користити као хелатни агенс. Биће испитана неопходност употребе различитих дисперзионих средстава (метанол, етанол, ацетон, ацетонитрил). Оптимизација вредности параметара значајних за одвијање процеса (pH вредности, температуре и запремине екстрактанта) биће рађена применом Бокс Бенкеновог дизајна (енгл. *Box–Behnken design*). зеленост методе пратиће се применом софтверских алата Агрипреп (енгл. *Analytical greenness metric for sample preparation – AGREEprep*) и Гапи (енгл. *Green Analytical Procedure Index – GAPI*).

Одређивање концентрације лантаноида у узорцима биће вршено применом масене спектрометрије са индуковано спрегнутом плазмом (енгл. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICP-MS*).

Докторска дисертација ће обухватити следећа поглавља: *Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература*. Сваки наведени део докторске дисертације обрадиће следеће:

1. *Увод* - биће дефинисани циљеви дисертације, предмет истраживања, очекивани научни допринос дисертације. Укратко ће бити размотрена важност и заступљеност разматране теме у научним круговима као и значај добијања лантаноида и искоришћења летећег пепела.
2. *Теоријски део* – биће обухваћен преглед досадашње литературе која се бави истраживањима у области развоја и оптимизације метода за излуживање лантаноида из летећег пепела. У овом делу биће истакнута основна физичко-хемијска својства летећег пепела, процењена глобална количина и степен искоришћења. Са друге стране, биће истакнут стратешки значај лантаноида, њихова тржишна вредност и важности проналаска алтернативних извора. Биће дат табеларни преглед до сада објављених научно истраживачких радова на ову тему.
3. *Експериментални део* – биће приказани материјали и методе који су коришћени у процесу истраживања, почевши од карактеризације пепела, преко развоја и оптимизације методе излуживања лантаноида из матрице летећег пепела, до развоја методе дисперзивне микроекстракције.
4. *Резултати и дискусија* – биће детаљно приказани резултати свих експеримената и прорачуна графички, табеларно и у виду слика. Биће приказана и разматрана карактеризација летећег пепела из термоелектрана у Републици Србији и поређење са европским и светским налазиштима.
5. *Закључак* – биће сумирани резултати изведени у оквиру дисертације и истакнут њихов главни научни допринос, иновативност и потенцијал примене.
6. *Литература* – биће наведене све референце које су коришћене у изради дисертације, као и радови који су публиковани у току истраживања и рада на овој докторској дисертацији.

7. Закључак и предлог

На основу изложеног Комисија сматра да је тема докторске дисертације Милице Стојковић, мастер инжењера технологије, под насловом „**Микроталасно излуживање и дисперзивна микроекстракција лантаноида из летећег пепела**“ научно заснована и добро утемељена и да Милица Стојковић испуњава све услове за рад на предложеној теми докторске дисертације. Резултати предложене докторске дисертације могу бити од велике важности за област искоришћења отпадне сировине из термоелектрана у циљу добијања значајног производа – стратешки важних елемената лантаноида. Поред добијања корисног производа, искоришћењем пепела доприноси се очувању животне средине, како се смањује количина депонованог отпада и смањује мобилност тешких метала у друге медијуме животне средине. Комисија сматра да ће резултати истраживања дати значајан допринос научној области Инжењерства заштите животне средине за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да кандидату Милици Стојковић одобри израду докторске дисертације под наведеним насловом. За менторе докторске дисертације Комисија предлаже др Антонија Оњиу, редовног професора Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Мају Ђолић, доценткињу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 28.06.2024. године.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Антоније Оњиа, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Маја Ђолић, доцент
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

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

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

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