

Факултет ТЕХНОЛОШКО-
МЕТАЛУРШКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/160

Веће научних области техничких наука

(Број захтева)

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

3. 7. 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:

Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као
порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ ТЕХНОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

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

Јелена (Драгомир) Гојгић

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: 2021.

4. Година уписа на докторске студије: 2021.

5. Назив студијског програма
докторских студија:

Хемијско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ 1 :

Име и презиме ментора: др Мила Крстајић Пајић

Звање: доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Gojgić, J.D.; Petričević, A.M.; Rauscher, T.; Bernäcker, C.I.; Weißgärber, T.; Pavko, L.; Vasilić, R.; **Krstajić Pajić, M.N.**; Jović, V.D. *Hydrogen evolution at Ni foam electrodes and Ni-Sn coated Ni foam electrodes*. Applied. Catalysis A, General 663 (2023) 119312. IF(2021)=5,7; Environmental Sciences (77/279); ISSN: 0926-860X; DOI: 10.1016/j.apcata.2023.119312
2. D. Kutyla, **M.N. Krstajić Pajić**, U.Č. Lačnjevac, M.M. Marzec, N.R. Elezović, P. Žabiński, *Ru–Co alloy coatings electrodeposited on a MAX phase substrate as efficient catalysts for the hydrogen evolution reaction*. International Journal of Hydrogen Energy 56 (2024) 28–40. IF(2022) = 7.2; Electrochemistry (7/30); ISSN 0360-3199; DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.296
3. **M.N. Krstajić Pajić**, A.S. Dobrota, A. Mazare, S. Đurđić, I. Hwang, N.V. Skorodumova, D. Manojlović, R. Vasilić, I.A. Pašti, P. Schmuki, U. Lačnjevac, *Activation of Osmium by the Surface Effects of Hydrogenated TiO₂ Nanotube Arrays for Enhanced Hydrogen Evolution Reaction Performance*. ACS Applied Materials & Interfaces 15 (2023) 31459–31469. IF(2021) = 10.383; Materials Science, Multidisciplinary (49/345); ISSN 1944-8244; DOI: 10.1021/acsami.3c04498
4. A. Petričević, V. D. Jović, **M. N. Krstajić Pajić**, M. Marzec, M. Gajewska, P. Zabinski, N.R. Elezović, *Ultra-low Pt loading catalyst on (Nb–Ti)₂AlC support as advanced material for low-temperature fuel cell application*. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 102(2), (2024) 91–97. IF(2022)= 1,9; Metallurgy and Metallurgical Engineering (39/79); ISSN: 0020-2967; DOI: 10.1080/00202967.2023.2281806
5. N.R. Elezović, P. Zabinski, U.Č. Lačnjevac, **M.N. Krstajić Pajić**, V.D. Jović, *Electrochemical deposition and characterization of iridium oxide films on Ti₂AlC support for oxygen evolution reaction*, Journal of Solid State Electrochemistry, 25 (2021) 351–363. IF(2019)=2,65; Electrochemistry (14/27); ISSN: 1432-8488; DOI: 10.1007/s10008-020-04816-7

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ 2.:

Име и презиме ментора: др Урош Лачњевац

Звање: научни саветник Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. D. Kutyla, M.N. Krstajić Pajić, **U.Č. Lačnjevac**, M.M. Marzec, N.R. Elezović, P. Žabiński, *Ru–Co alloy coatings electrodeposited on a MAX phase substrate as efficient catalysts for the hydrogen evolution reaction*. *International Journal of Hydrogen Energy* 56 (2024) 28–40. IF(2022) = 7.2; Electrochemistry (7/30); ISSN 0360-3199; DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.296
2. M.N. Krstajić Pajić, A.S. Dobrota, A. Mazare, S. Đurđić, I. Hwang, N.V. Skorodumova, D. Manojlović, R. Vasilic, I.A. Pašti, P. Schmuki, **U. Lačnjevac**, *Activation of Osmium by the Surface Effects of Hydrogenated TiO₂ Nanotube Arrays for Enhanced Hydrogen Evolution Reaction Performance*. *ACS Applied Materials & Interfaces* 15 (2023) 31459–31469. IF(2021) = 10.383; Materials Science, Multidisciplinary (49/345); ISSN 1944-8244; DOI: 10.1021/acsami.3c04498
3. **U.C. Lacnjevac**, R. Vasilic, A. Dobrota, S. Djurdjic, O. Tomanec, R. Zboril, S. Mohajernia, N.T. Nguyen, N.V. Skorodumova, D. Manojlovic, N.R. Elezovic, I.A. Pasti, P. Schmuki, *High-Performance Hydrogen Evolution Electrocatalysis Using Proton-Intercalated TiO₂ Nanotube Arrays as Interactive Supports for Ir Nanoparticles*. *Journal of Materials Chemistry A* 8 (2020) 22773–22790. IF(2020) = 12.732; Energy & Fuels (8/114); ISSN 2050-7488; DOI: 10.1039/D0TA07492F
4. **U.Č. Lačnjevac**, R. Vasilic, T. Tokarski, G. Cios, P. Žabiński, N. Elezović, N. Krstajić, *Deposition of Pd nanoparticles on the walls of cathodically hydrogenated TiO₂ nanotube arrays via galvanic displacement: A novel route to produce exceptionally active and durable composite electrocatalysts for cost-effective hydrogen evolution*. *Nano Energy* 47 (2018) 527–538. IF(2018) = 15.548; Chemistry, Physical (6/148); ISSN 2211-2855; DOI: 10.1016/j.nanoen.2018.03.040
5. V.D. Jović, B.M. Jović, **U.Č. Lačnjevac**, N.V. Krstajić, P. Zabinski, N.R. Elezović, *Accelerated service life test of electrodeposited NiSn alloys as bifunctional catalysts for alkaline water electrolysis under industrial operating conditions*. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 819 (2018) 16–25. IF(2017) = 3.235; Chemistry, Analytical (17/81); ISSN 1572-6657; DOI: 10.1016/j.jelechem.2017.06.011

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 **Јелене Гојгић**, број индекса 4031/21, под називом: **„Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“.**

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

За менторе се одређују др Мила Крстајић Пајић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Урош Лачњевац, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања.

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 Јелене Гојгић, мастер инжењера технологије за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду бр. 35/118 од 30.05.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Јелене Гојгић, мастер инжењера технологије за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Јелена Гојгић, мастер инжењер технологије, рођена је 5. јуна 1997. године у Београду. Основну школу завршила је у Београду, где је наставила средње образовање у XIV београдској гимназији на природно-математичком смеру. По завршетку средње школе, 2016. године, уписала је основне студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Хемијско инжењерство – Електрохемијско инжењерство. Основне студије је завршила у септембру 2020. године са просечном оценом 8,54, наставивши своје даље усавршавање на истом факултету. Мастер академске студије завршила је у септембру 2021. године са просечном оценом 9,50, стекавши звање мастер инжењера технологије. Школске 2021/2022. године уписала је докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету на смеру Хемијско инжењерство. Положила је све испите предвиђене планом и програмом студијског програма са просечном оценом 9,91. Од новембра 2021. до априла 2024. године била је ангажована на Технолошко-металуршком факултету као истраживач приправник на пројекту међународне сарадње Савезне Републике Немачке са земљама Западног Балкана (WBC2019), „Innovative Coated Porous Electrodes for Large-Scale Hydrogen Production“ – NOVATRODES 01DS21010. У звање истраживач-приправник изабрана је одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета бр. 35/271 од 18.11.2021. Од 1. јуна 2024. године запослена је у Институту за мултидисциплинарна истраживања, Универзитета у Београду, као истраживач-приправник.

Њен научноистраживачки рад усмерен је ка електрохемијском таложењу двојних и тројних легура неплеменитих метала, превасходно легура никла, за потребе електрокатализе реакције издвајања водоника у алкалној средини. Током 2023. године, била је у тронедељној истраживачкој посети Националном хемијском институту у Љубљани (National Institute of Chemistry), кроз Erasmus+ KA 131 програм мобилности, као и на Институту Fraunhofer IFAM (Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials) у Дрездену у оквиру заједничког пројекта NOVATRODES. Од 2021. је ангажована на извођењу експерименталних вежби из предмета Физичка хемија 1 и 2, Електрохемијске технологије и Неметалне превлаке на Технолошко-металуршком факултету. Била је члан локалног организационог одбора међународне конференције „9th Regional Symposium on Electrochemistry - South-East Europe“ одржане од 3. до 7. јуна 2024. У Новом Саду у организацији Српског хемијског друштва и Технолошког факултета Универзитета у Новом Саду. Активна је у промоцији науке кроз програм интерактивних радионица „Завирите у електрохемијску ћелију“ које од 2019. године организује Катедра за физичку хемију и електрохемију ТМФ. Течно говори енглески и француски језик.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Јелена Д. Гојгић, мастер инжењер технологије је школске 2021/2022. уписала докторске академске студије на Технолошко–металуршком факултету Универзитета у Београду на студијском програму Хемијско инжењерство. Положила је све испите предвиђене планом и програмом докторских студија са просечном оценом 9,91 и одбранила завршни испит под насловом „Порозне електроде за производњу водоника алкалном електролизом воде: Електрохемијски таложене Ni-Sn легуре на никленим пенама“. Од уписа на докторске студије бави се истраживањима у оквиру пројекта „Innovative Coated Porous Electrodes for Large-Scale Hydrogen Production“ – NOVATRODES 01DS21010, из којих је и проистекла тема њене докторске дисертације. Списак положених испита са оценама и бодовима приказан је у следећој табели:

Назив предмета	Оцена	ЕСПБ
Одабрана поглавља математичке анализе	10	5
Хемијска кинетика	9	5
Електрохемијска заштита метала од корозије	10	5
Галванска техника	10	5
Електрохемијска кинетика и методе мерења	10	6
Виши курс електрохемијског инжењерства	10	6
Термодинамика чврстог стања	10	5
Електрокатализа	10	5
Електродни материјали	10	5
Аналогије феномена преноса	10	5
Завршни испит	10	30
Просечна оцена	9,91	
Збир ЕСПБ	82	

Списак објављених научних радова и саопштења:

Рад у међународном часопису од изузетних вредности (M21a):

1. Grgur B., **Gojgić J.**, Petrović M., *A novel method of preparing the silver chloride cathode for the magnesium seawater activated primary cell*, Journal of Power Sources, 490, 2021, pp. 229549–229549. IF(2021)=9,79; ISSN: 0378-7753; DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229549

Рад у врхунском међународном часопису (M21):

1. **Gojgić J.D.**, Petričević A.M., Rauscher T., Bernäcker C.I., Weißgärber T., Pavko L., Vasilčić R., Krstajić Pajić M.N., Jović, V.D., *Hydrogen evolution at Ni foam electrodes and Ni-Sn coated Ni foam electrodes*, Applied Catalysis A: General, 663, 2023 pp. 119312–119312. IF(2022)=5,5; ISSN: 0926-860X; DOI: 10.1016/j.apcata.2023.119312

2. **Gojgić J.**, Petrović M., Jugović B., Jokić B., Grgur B., Gvozdenović M., *Electrochemical and Electrical Performances of High Energy Storage Polyaniline Electrode with Supercapattery Behavior*, Polymers, 14(24), 2022, pp. 5365–5365. IF(2022)=5,0; ISSN: 2073-4360 DOI: 10.3390/polym14245365

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34):

1. **Gojgić J.D.**, Petričević A.M., Rauscher T., Bernäcker C.I., Pavko L., Bele M., Ruiz-Zepeda F., Smiljanić M., Hodnik N., Krstajić Pajić M.N., Jović V.D., *Ni-Sn coated Ni foams –suitable cathodes for large-scale alkaline water electrolysis?*, 9th Regional Symposium on Electrochemistry – South-East Europe, Novi Sad, Serbia, 2024, Book of Abstracts, pp. 39, ISBN: 978-86-7132-085-6

2. Petričević A., **Gojgić J.**, Elezović N., Lačnjevac U., Rauscher T., Bernaecker C.I., Krstajić Pajić M., Jović V., *Comparison of electrodeposited composite coatings composed of commercial and synthesized MoO₂ embedded in Ni for hydrogen evolution reaction*, 9th Regional Symposium on Electrochemistry – South-East Europe, Novi Sad, Serbia, 2024, Book of Abstracts, pp. 40, ISBN: 978-86-7132-085-6

3. Rauscher T., Naumann P., **Gojgić J.D.**, Petričević A.M., Krstajić Pajić M.N., Jović V.D., Weißgärber T., Bernäcker C.I., *Evaluation of 3D porous electrodes in a zero-gap cell for alkaline water electrolysis*, 9th Regional Symposium on Electrochemistry – South-East Europe, Novi Sad, Serbia, 2024, Book of Abstracts, pp. 85, ISBN: 978-86-7132-085-6

4. **Gojgić J.**, Petričević A., Krstajić Pajić M., Rauscher T., Bernaecker C., Jović V., *Perspective of Ni-Sn modified Ni foams in industrial scale alkaline water electrolysis*, Twenty-first Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering, Belgrade, Serbia, 2023, Book of Abstracts, pp. 72, ISBN: 978-86-80321-38-7

5. Petričević A., **Gojgić J.**, Krstajić Pajić M., Rauscher T., Bernaecker C.I., Jović V., *Ni-MoO₂ as electrocatalyst for hydrogen evolution reaction*, Twenty-first Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering, Belgrade, Serbia, 2023, Book of Abstracts, pp. 73, ISBN: 978-86-80321-38-7

6. **Gojgić J.**, Petričević A., Krstajić Pajić M., Rauscher T., Bernaecker C.I., Jović V., *Electrodeposition of Ni-Sn alloys on porous Ni substrates as Hydrogen evolution catalyst*, Twentieth Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering, Belgrade, Serbia, 2022, Book of Abstracts, pp. 57, ISBN: 978-86-80321-37-0

7. Petričević A., **Gojgić J.**, Krstajić Pajić M., Rauscher T., Bernaecker C.I., Jović V., *3D electrodes for industrial alkaline flow electrolyzers*, Twentieth Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering, Belgrade, Serbia, 2022, Book of Abstracts, pp. 66, ISBN: 978-86-80321-37-0

8. Krstajic Pajic M., **Gojgić J.**, Petricevic A., Rauscher T., Bernäcker C.I., Röntzsch L., Weißgärber T., Jović V., *Electrodeposited NiSn at Ni foams as electrodes for hydrogen production*, 8th

Regional Symposium on Electrochemistry of South-East Europe, Graz, Austria, 2022, Book of Abstracts, pp. 96, ISBN (e-book) 978-3-85125-907-0

9. Krstajić Pajić M.N., **Gojgić J.D.**, Pertičević A.M., Rauscher T., Bernäcker C.I., Röntzsch L., Weißgärber T., Jović V.D., *Highly efficient Ni-Sn/Ni foam 3D electrodes for hydrogen production by alkaline electrolysis*, Contemporary research in the field of hydrogen as the fuel of the future, Belgrade, Serbia, 2022, Book of Abstracts, pp. 51-52, ISBN: 978-86-82139-84-3

Рад у врхунском часопису националног значаја (M51):

1. **Gojgić, J. D.**, Petričević, A. M., Krstajić Pajić, M. N., & Jović, V. D. *Correct determination of the hydrogen evolution reaction parameters at Ni foam electrode modified by electrodeposited Ni-Sn alloy layer*. *Zaštita Materijala*, 65(1), 2024, 3-10. ISSN: 0351-9465 DOI: 10.62638/ZasMat1039

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу увида у досадашњи научноистраживачки рад и остварене резултате током докторских студија, Комисија је утврдила да је Јелена Гојгић, мастер инжењер технологије, показала изузетну склоност ка бављењу научноистраживачким радом, која се огледа у следећем: способности да критички анализира литературу; способности да самостално креира и спроводи експерименте; дискутује и анализира добијене резултате; презентује резултате на међународним конференцијама, као и да пише научне радове. У области истраживања предложене теме до сада има један објављен рад категорије M21, један рад категорије M51, и 9 саопштења на међународним конференцијама (M34). На основу наведеног, Комисија сматра да кандидат испуњава услове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Вишедеценијска експлоатација фосилних горива као основног извора енергије довела је до значајног смањења ограничених резерви енергената и веома допринела загађењу животне средине, при томе доприносећи глобалном загревању. Неопходност алтернативних извора енергије препозната је у циљевима одрживог развоја дефинисаних од стране Уједињених нација, при чему је као један од њих дефинисана доступна и обновљива енергија [1]. Периодичност обновљивих извора енергије, као што су сунчева енергија, енергија ветра или хидроенергија, значајна је препрека употреби ових извора у великим струјним мрежама. Такође, ограниченост њихове примене за транспортне системе упућује на коришћење електрохемијских система за конверзију и складиштење енергије као оптималног решења које покрива системе различитих капацитета и мобилности. Најперспективније решење енергетске кризе представља употреба водоника као горива и носиоца енергије. Водоник високе чистоће се може произвести електролизом воде као еколошки најприхватљивијом технологијом, уз употребу обновљивих извора енергије [2]. Електролитички добијен „зелени“ водоник би се затим користио у горивним галванским спреговима за конверзију хемијске у електричну енергију кроз истовремене реакције оксидације водоника на аноди и редукције кисеоника из ваздуха на катоди. Као једини нуспроизвод у овим уређајима јавља се чиста вода, која се може враћати у процес електролизе. Овај концепт водоничне енергије применљив је како на великим стационарним, тако и на преносним системима.

Тренутно се у индустрији за производњу водоника најчешће користи алкална електролиза воде, јер алкална средина омогућава употребу неплеменитих метала као катализатора, чиме се значајно смањује цена производње водоника. Реакција издвајања водоника се одвија на катоди, кроз механизам Фолмер-Тафел или Фолмер-Хејровски, зависно од састава и структуре катализатора [3]. Комерцијализација каталитичких материјала је условљена њиховом ценом и доступношћу. Зато се у алкалној средини најчешће користи никал, као јефтин, доступан, релативно стабилан и каталитички конкурентан племенитим металима

[4,5]. Како би били задовољени захтеви индустрије, потребно је додатно побољшати његову каталитичку активност, што се може постићи било повећањем његове специфичне површине [6-9], било легирањем са другим елементима [10-12]. Употреба порозних материјала је данас уобичајена у индустрији, због њихове развијене површине, а посебно су металне пене нашле примену као електроде или као носачи катализатора у алкалној електролизи воде [13]. Њихова геометрија је погодна за употребу у електролизерима са нултим размаком између електрода и сепаратора, код којих електролит пролази кроз унутрашњост електроде (тзв. „zero-gap“ електролизери) [14]. Управо овај тип електролизера има највећи потенцијал за масовну производњу због своје компактности, мањих омских отпора и могућности рада у великом распону снаге захваљујући модуларној конструкцији.

Циљ истраживања је добијање нових електрода за производњу водоника у алкалним проточним електролизерима са нултим растојањем, и то електрохемијским таложењем легуре никал-калај на никлене пене различите величине пора, у распону од 480 до 1200 μm . У литератури је показано да легура Ni-Sn има изванредну активност за издвајање водоника [15-18], па је циљ пронаћи услове при којима је могуће таложити ову легуру на никлену пену комплексне структуре, како би се добила електрода бољих каталитичких својстава од саме никлене пене. У сарадњи са Фраунхофер институтом у Дрездену, у оквиру заједничког пројекта „Innovative Coated Porous Electrodes for High-Scale Hydrogen Production (NOVATRODES)“, биће обезбеђене никлене пене отворених пора на које ће се електрохемијски таложити легуре Ni-Sn под различитим условима. Ови материјали се користе и самостално као електроде за алкалну електролизу воде, али се очекује да се наношењем превлака Ni-Sn развијене површине значајно допринесе катализи издвајања водоника.

Списак литературе:

- [1] Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, United Nations
- [2] Crabtree G.W., Dresselhaus M.S., Buchanan M.V., *Hydrogen economy*, Phys. Today 57, 2004, 39–44.
- [3] Ogden J.M., *Hydrogen: the fuel of the future?* Phys. Today 55, 2002, 69–75.
- [4] Gong M., Wang D.-Y., Chen C.-C., Hwang B.-J., Dai H., *A mini review on nickelbased electrocatalysts for alkaline hydrogen evolution reaction*, Nano Res. 9, 2016, 28–46.
- [5] Santos D.M.F., Sequeira C.A.C., Figueiredo J.L., *Hydrogen production by alkaline water electrolysis*, Quim. Nova 36, 2013, 1176–1193.
- [6] Birry L., *Studies of the hydrogen evolution reaction on Raney nickel-molybdenum electrodes*, J. Appl. Electrochem. 34, 2004, 735–749.
- [7] Trasatti S., *Electrocatalysis: understanding the success of DSA®*, Electrochim. Acta 45, 2000, 2377–2385.
- [8] Bernacker C.I., Rauscher T., Büttner T., Kieback B., Rontzsch L., *A powder metallurgy route to produce raney-nickel electrodes for alkaline water electrolysis*, J. Electrochem. Soc. 166, 2019, F357–F363.
- [9] T. Rauscher, C.I. Müller, A. Gabler, T. Gimpel, M. Kohring, B. Kieback, W. Schade, L. Rontzsch, *Femtosecond-laser structuring of Ni electrodes for highly active hydrogen evolution*, Electrochim. Acta 247, 2017, 1130–1139.
- [10] Lačnjevac U.C., Jović B.M., Jović V.D., Radmilović V.R., Krstajić N.V., *Kinetics of the hydrogen evolution reaction on Ni-(Ebonex-supported Ru) composite coatings in alkaline solution*, Int. J. Hydrog. Energy 38, 2013, 10178–10190.
- [11] J. Chang, W. Wang, L. Wang, D. Wu, F. Xu, K. Jiang, G. Wang, Z. Gao, *Nickel iron alloy embedded, nitrogen doped porous carbon catalyst for efficient water electrolysis*, Appl. Catal. A: Gen. 650, 2023, 118984–118995.
- [12] S.H. Park, D.T. To, N.V. Myung, *A review of nickel-molybdenum based hydrogen evolution electrocatalysts from theory to experiment*, Appl. Catal. A: Gen. 651, 2023, 119013–119031.

- [13] Ashby M.F, Evans A.G., Fleck, L.J. Gibson N.A., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G., *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann, 2000
- [14] Phillips R., Dunnill C.W., *Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas*, RSC Advances 6, 2016, 100643-100651
- [15] Jović V.D., Lačnjevac U., Jović B.M., Karanović Lj, Krstajić N.V., *Ni-Sn coatings as cathodes for hydrogen evolution in alkaline solution. Chemical composition, phase composition and morphology effects*, Int. J. Hydrog. Energy 37, 2012, 17882–17891.
- [16] Jović B.M., Lačnjevac U.C., Krstajić N.V., Jović V.D., *Ni-Sn coatings as cathodes for hydrogen evolution in alkaline solutions*, Electrochim. Acta 114, 2013, 813–818.
- [17] Jović V.D., Jović B.M., Lačnjevac U.C., Krstajić N.V., Zabinski P., Elezović N.R., *Accelerated service life test of electrodeposited Ni-Sn alloys as bifunctional catalysts for alkaline water electrolysis under industrial operating conditions*, J. Electroanal. Chem. 819 (2018) 16–25.
- [18] Jović V.D., Jović B.M., Elezović N.R., Gajić-Krstajić Lj, *Corrected accelerated service life test of electrodeposited Ni-Sn alloys and Ni as cathodes for industrial alkaline water electrolysis*, J. Serb. Chem. Soc. 84, 2019, 1271–1286.

3. Полазне хипотезе

Како би било могуће постићи техничке захтеве предвиђене у алкалној електролизи неопходно је додатно унапредити електродне материјале. Развој нових врста електролизера довео је и до потребе за новим електродама тродимензионалне структуре, међу којима су се издвојиле никлене пене. Међутим, потребно је повећати њихову активност за издвајање водоника. Како би каталитичка превлака била нанета на овакву подлогу потребно је наћи адекватну методу. Одабрано је електрохемијско таложење као метода којом је могуће контролом параметара таложења постићи потпуну покривеност комплексне површине. Када је састав катодне превлаке у питању, обично се користе легуре никла са другим прелазним металима, а легура мора показати бољу активност од самог никла, као и одговарајућу стабилност у условима рада алкалног електролизера. Легура никал-калај је у литератури истакнута као легура са изузетном активношћу за издвајање водоника, али нема литературних навода где је она примењена на носач од никлене пене, и претпоставља се да ће развијеност површине подлоге, саме легуре, као и сопствена активност легуре допринети добијању високо ефикасне електроде за издвајање водоника. Такође, никлене пене су доступне са различитом величином пора, како би одговарале различитим условима рада, пре свега протоку електролита. Претпоставља се да је могуће прилагодити параметре таложења легуре никал-калај на никлене пене различите величине пора како би се за сваку од доступних величина постигла оптимална активност катализатора и омогућила примена оваквих електрода у различитим системима.

4. Научне методе истраживања

Испитивање електрохемијског таложења превлака из пирофосфатно-глицинског купатила укључиће следеће методе:

- Снимање поларизационе криве таложења легуре Ni-Sn методом линеарне промене потенцијала у ширем опсегу потенцијала, ради разматрања механизма таложења;
- Потенциостатско таложење легуре на изабраним вредностима потенцијала до достизања изабране количине наелектрисања која се мери кулометријски;
- Галваностатско таложење на различитим густинама струје у опсегу 40-120 mA cm⁻², у једнаком временском интервалу ради одређивања оптималне густине струје таложења за сваку од коришћених никлених пена;

Физичко-хемијска карактеризација узорак биће извршена применом различитих метода:

- Морфологија материјала биће испитана методом скенирајуће електронске

микроскопије (*scanning electron microscopy* - SEM) и за одабране узорке методом трансмисионе електронске микроскопије високе резолуције (*high resolution transmission electron microscopy* - HRTEM); такође ће се разматрати морфологије и дебљине превлака у унутрашњости пене анализом попречних пресека узорака наведеним методама;

- Елементарни састав превлака биће испитан енергетски дисперзивном спектроскопијом X-зрака (*energy dispersive X-ray spectroscopy* – EDS); такође ће се разматрати састав превлаке у унутрашњости пене на попречном пресеку узорака;
- Фазни састав биће одређен применом рендгенске дифракционе анализе (*X-ray diffraction* – XRD);
- Додатно, елементарни и фазни састав биће испитан и фотоелектронском спектроскопијом X-зрака (*X-ray photoelectron spectroscopy* – XPS);
- Специфична површина материјала биће испитана BET методом (*Brunner-Emmett-Teller*);

Електрохемијска карактеризација узорака обухватиће снимање поларизационих кривих за реакцију издвајања водоника под лабораторијским и индустријским условима, одређивање Тафеловог нагиба, примену спектроскопије електрохемијске импедансе (СЕИ) у разматрању реакционог механизма, одређивање омског отпора и густине струје измене, као и галваностатске тестове стабилности. Треба нагласити да ће електрохемијска карактеризација бити вршена у широком опсегу густине струје издвајања водоника, све до 1 A cm^{-2} , што представља релевантну вредност за индустријску примену.

Електрохемијска мерења у проточном електролизеру са нултим растојањем биће урађена са анодом од никлене пене, при чему ће као катоде бити коришћене чисте никлене пене и никлене пене са превлаком Ni-Sn. Стабилност електрода ће бити испитана галваностатским тестовима у трајању од 100 сати на $0,5 \text{ A cm}^{-2}$. Ове експерименте пратиће и анализа раствора КОН пре и после експеримента, методом спектроскопије индуктивно спрегнуте плазме (*inductively coupled plasma spectroscopy* – ICP), ради одређивања присуства никла и калаја у раствору као показатеља нестабилности превлаке.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани резултати ове докторске дисертације и њен научни допринос развоју катода за производњу водоника у алкалној средини су следећи:

- Биће дефинисани оптимални услови за електрохемијско таложење превлака Ni-Sn на никлене пене отворених пора ($480\text{-}1200 \text{ }\mu\text{m}$);
- Биће дефинисан механизам таложења превлаке Ni-Sn на комплексну подлогу
- Постићи ће се увећање размера процеса електрохемијског таложења превлака Ni-Sn на никлене пене отворених пора ($480\text{-}1200 \text{ }\mu\text{m}$), као и потпуна покривеност никлене пене на узорцима геометријске површине од 10 cm^2 ;
- Добиће се електроде са пренапеташћу издвајања водоника испод 100 mV на густини струје од 1 A cm^{-2} (30 % КОН, $70 \text{ }^\circ\text{C}$, троелектродна ћелија, стационарни електролит);
- Добиће се ефикасне катоде за алкалну електролизу воде у проточном електролизеру са нултим растојањем, са смањењем напона ћелије испод 2 V на $0,5 \text{ A cm}^{-2}$, уз постизање њиховог стабилног рада током 100 сати рада на наведеној густини струје.

Постизањем наведених параметара, добиће се електроде које су потпуно функционалне у индустријским условима рада, и као такве могу имати примену у реалним индустријским системима.

6. План истраживања и структура рада

У раду су предвиђена следећа истраживања, по фазама:

- Електрохемијско таложење легура Ni-Sn из купатила на бази пирофосфата и глицина различитим методама, уз варирање параметара таложења;
- Карактеризација материјала физичко-хемијским методама (хемијски састав, фазни састав, морфологија превлаке, специфична површина материјала, покривеност порозног материјала превлаком, испитивање попречног пресека);
- Електрохемијска карактеризација каталитичких својстава узорака за издвајање водоника у 1 М КОН, у троелектродном систему, при различитим температурама електролита (30-70°C) – испитивање механизма реакције издвајања водоника одређивањем Тафелових нагиба, енергије активације и густине струје измене; испитивање активности катализатора праћењем пренапетости издвајања водоника на карактеристичним вредностима густине струје;
- Електрохемијска карактеризација каталитичких својстава узорака за издвајање водоника у 30% КОН на 70°C, у троелектродном систему (са Zirfon™ PERL сепаратором између одељака радне и помоћне електроде) – испитивање активности и стабилности катализатора у условима блиским индустријским, у стационарном електролиту;
- Увећање размера електрохемијски исталожених узорака од 1 до 10 cm²;
- Оптимизација процеса електрохемијског таложења за сваку од коришћених никлених пена;
- Испитивање одабраних узорака у проточном електролизеру са нултим растојањем, у 30% КОН на 70°C – испитивање активности и стабилности узорака у реалним индустријским условима;
- Испитивање чистих никлених пена као електрода за издвајање водоника, као стандардних материјала коришћених у индустрији за ову примену, као и никлених пена са нанетим катализатором од наночестица платине на носачу од угља развијене површине; поређење резултата добијених на референтним узорцима са оним добијеним на никленим пенама са исталоженим превлакама легура Ni-Sn.

Предвиђа се да ће докторска дисертација бити организована кроз следећа поглавља:

1. *Увод*; у коме би се дала поставка проблема.
2. *Теоријски део*; у коме ће се дати основни преглед доступних технологија за електролизу воде, за посебним освртом на алкалне проточне електролизере са нултим размаком између електрода; размотриће се коришћени катодни материјали и њихови недостаци и дати преглед могућих метода наношења превлака са освртом на електрохемијско таложење и његове предности.
3. *Експериментални део*; у коме ће бити описани коришћени реагенси и материјали, начини припреме површине, параметри електрохемијског таложења, коришћене апаратуре на којој су изведени експерименти и примењене експерименталне методе.
4. *Резултати и дискусија*; Резултати свих предвиђених експеримената биће приказани графички и табеларно, и адекватно анализирани, а биће дискутовани и резултати карактеризације добијених материјала.
5. *Закључак*; у коме ће се сумирати резултати изведени у оквиру дисертације и бити истакнут њихов главни научни допринос.
6. *Литература*; Сви литературни наводи цитирани у овој докторској дисертацији биће приказани у овом поглављу.

7. Закључак и предлог

На основу изложеног Комисија сматра да кандидат Јелена Д. Гојгић, мастер инж. технологије, испуњава све услове за израду предложене докторске дисертације са темом **„Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“**. Такође, на основу изнетих података, Комисија сматра да је израда докторске дисертације са предложеном темом научно утемељена, и да ће резултати истраживања у оквиру предложене теме дати значајан допринос научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Хемијско инжењерство, за коју је Технолошко–металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Комисија предлаже Наставно–научном већу Технолошко–металуршког факултета Универзитета у Београду да кандидату Јелени Д. Гојгић, мастер инж. технологије одобри израду докторске дисертације под насловом **“Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде”**, а за менторе докторске дисертације се предлажу др Мила Крстајић Пајић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко–металуршког факултета, и др Урош Лачњевац, научни саветник Универзитета у Београду, Института за мултидисциплинарна истраживања.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Др Мила Крстајић Пајић, доцент
Универзитета у Београду, Технолошко–металуршки факултет

Др Урош Лачњевац, научни саветник
Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања

Др Снежана Гојковић, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко–металуршки факултет

Др Бранимир Гргур, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко–металуршки факултет

Др Невенка Елезовић, научни саветник
Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања