

Факултет Технолошко-металуршки

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

2025-35/495
(Број захтева)
25. 12. 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 Јелена (Драгомир) Гојгић
(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму: **Хемијско инжењерство**

пријавио је докторску дисертацију под називом:

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

из научне области: **Технолошко инжењерство**
Универзитет је дана 8. 7. 2024. својим актом под бр. 61206-2573/2-24 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

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

Име и презиме ментора: др Мила Крстајић Пајић , доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет
Име и презиме ментора 2.: др Урош Лачњевац, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној 30. 9. 2025. одлуком факултета под бр. 2025-35/325 , у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Снежана Гојковић	редовни професор	Електрохемија	ТМФ
2.	Др Бранимир Гргур	редовни професор	Електрохемија	ТМФ
3.	Др Игор Пашти	редовни професор	Физичка хемија - Електрохемија	Факултет за физичку хемију

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 23. 10. 2025.

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 25. 12. 2025.

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној **25. 12. 2025.**

одлуком факултета под бр. 2025-35/498, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Снежана Гојковић	редовни професор	Електрохемија	ТМФ
2.	Др Бранимир Гргур	редовни професор	Електрохемија	ТМФ
3.	Др Игор Пашти	редовни професор	Физичка хемија - Електрохемија	Факултет за физичку хемију

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

ДІВ

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 25. 12. 2025. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Извештаја о оцени докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије у саставу: др Снежана Гојковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Бранимир Гргур, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Игор Пашти, редовни професор Универзитета у Београду, Факултет за физичку хемију, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“** коју је поднела **Јелена Гојгић**, 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 Јелене Гојгић, под називом **„Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“** Одлуком број: 61206-2573/2-24 од 8. 7. 2024. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M21:

1. **Gojgić, J.D.**, Petričević, A.M., Rauscher, T., Bernacker, C.I., Weißgarber, T., Pavko, L., Vasilic, R., Krstajić Pajić, M.N., Jović, V.D. (2023). Hydrogen evolution at Ni foam electrodes and Ni-Sn coated Ni foam electrodes. *Applied Catalysis A, General* 663 119312. (IF(2023)=4,7) (ISSN: 0926-860X) (<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2023.119312>)

2. **Gojgić, J.D.**, Petričević, A.M., Rauscher, T., Bernäcker, C.I., Weißgärber, T., Vasilic, R., Pavko L., Bele M., Ruiz-Zepeda, F., Smiljanić, M., Hodnik, N., Krstajić Pajić, M.N., Jović V.D. (2024). High-Performance Cathodes for Alkaline Water Electrolysis in a Zero-Gap Setting: Ni–Sn/Ni Foam Prepared by Galvanostatic Electrodeposition. *ACS Applied Energy Materials*, 8, 3570–3580. (IF(2024)=5,5) (ISSN: 2574-0962) (<https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03140>)

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

ДУ

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 25. 12. 2025. године, донета је

О Д Л У К А

о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације

Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације **Јелене Гојгић**, мастер инжењера технологије, са темом под називом **„Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“**, у саставу:

1. Др Снежана Гојковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
2. Др Бранимир Гргур, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
3. Др Игор Пашти, редовни професор Универзитета у Београду, Факултет за физичку хемију.

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

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Јелене Д. Гојгић

Одлуком бр. 2025-35/325 од 30. септембра 2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Јелене Д. Гојгић под насловом „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“.

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

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Школске 2021/22. године кандидаткиња Јелена Д. Гојгић, мастер инжењер технологије, уписала је докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Хемијско инжењерство.

23. маја 2024. године, Јелена Д. Гојгић је Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду пријавила тему за израду докторске дисертације под називом: „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“.

На седници Научно–наставног већа Технолошко-металуршког факултета 30. маја 2024. године донета је одлука бр. 35/118 о именовању чланова Комисије за оцену научне заснованости теме кандидаткиње Јелене Д. Гојгић, мастер инжењера технологије, за израду докторске дисертације „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“ у саставу:

1. др Мила Крстајић Пајић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
2. др Урош Лачњевац, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања,
3. др Снежана Гојковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,

4. др Бранимир Гргур, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и
5. др Невенка Елезовић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања.

На седници 3. јула 2024. године, Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета донело је Одлуку бр. 35/160 о прихватању извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катоде за производњу водоника алкалном електролизом воде“ кандидаткиње Јелене Д. Гојгић за израду докторске дисертације, а за менторе именовани су др Мила Крстајић Пајић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Урош Лачњевац, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања.

На редовној седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, 8. јула 2024. године донета је Одлука бр. 61206-2573/2-24 којом се даје сагласност на одлуку Наставно-научног већа ТМФ о прихватању теме докторске дисертације Јелене Д. Гојгић, под називом: „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катоде за производњу водоника алкалном електролизом воде“ и именовању доц. др Миле Крстајић Пајић и др Уроша Лачњеваца за менторе.

На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета 30. септембра 2025. донета је Одлука бр. 2025-35/325 о именовању Комисије за оцену докторске дисертације Јелене Д. Гојгић, под називом: „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катоде за производњу водоника алкалном електролизом воде“, у саставу:

1. др Снежана Гојковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
2. др Бранимир Гргур, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, и
3. др Игор Пашти, редовни професор Универзитета у Београду, Факултет за физичку хемију.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Хемијско инжењерство, за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ментори ове докторске дисертације су др Мила Крстајић Пајић доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Урош Лачњевац, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања, чија је компетенција потврђена на основу научно-истраживачког искуства и објављених научних радова у наведеној области дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Јелена Гојгић рођена је 5. јуна 1997. год. у Београду. Завршила је XIV београдску гимназију 2016. год., када се уписала на основне академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Хемијско инжењерство. Основне и мастер академске студије на истом студијском програму, изборно подручје Електрохемијско инжењерство, завршила је у року са просечном оценом 8,54, односно 9,50. Школске 2021/22 год. уписала је докторске академске студије на истом факултету, такође на студијском програму Хемијско инжењерство.

Од новембра 2021. до априла 2024. год. била је запослена 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. Од почетка докторских студија била је ангажована на извођењу експерименталних вежби из предмета Физичка хемија 1 и 2, Електрохемијске технологије и Неметалне превлаке.

Од јуна 2024. год. запослена је на Институту за мултидисциплинарна истраживања Универзитета у Београду најпре као истраживач приправник, а у звање истраживач сарадник изабрана је 30. септембра 2024. Током докторских студија боравила је у истраживачкој посети Кемијском институту у Љубљани, преко Ерасмус+ КА 131 програма мобилности (16.07–05.08.2023.) и Европске академије за површинске технологије (15.09–13.10.2024.), као и на Фраунхофер ИФАМ институту у Дрездену у оквиру заједничког пројекта (10.09–30.09.2024.) и као стипендиста Немачке фондације за животну средину (05.02–27.07.2025.). Реализовала је SAIGE пројекат под акронимом CoTinGSAWE у периоду од децембра 2024. до априла 2025. Била је члан организационих одбора међународних конференција RSE-SEE9 у јуну 2024. у Новом Саду и 5IMMSERA у септембру 2025. у Београду. Учествовала је у изради једног завршног рада на основним студијама.

Њен истраживачки рад усмерен је ка електрохемијском таложењу двојних и тројних легура неплемених метала, превасходно легура никла, за потребе катализе реакције издвајања водоника у алкалној средини. Течно говори енглески језик и служи се француским и немачким језиком.

Коаутор је шест научних радова, од чега једног категорије M21a, четири категорије M21, једног категорије M52 и десетак саопштења са међународних и националних конференција, од чега су из резултата докторске дисертације проистекла два рада категорије M21 и један рад категорије M52.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Јелене Д. Гојгић, мастер инжењера технологије, под називом „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“ написана је на српском језику, на 141 страни, од чега је 131 нумерисана, и садржи 79 слика, 20 табела и 122 литературна навода. Дисертација садржи 7 поглавља (Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултате и дискусију, Закључак, Литературу и Прилог), биографске податке о аутору као и Изјаве о ауторству, о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада, о коришћењу, као и Оцену извештаја о провери оригиналности докторске дисертације. Дисертација такође садржи и сажетак на српском и на енглеском језику. Наведена докторска дисертација по свом облику и садржају испуњава прописе и стандарде за докторске дисертације које се бране на Универзитету у Београду.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У *Уводу* је истакнута растућа потреба за електричном енергијом, као и смањењем утицаја производње енергије на животну средину, као један од основних проблема човечанства. Алкална електролиза воде уз употребу обновљивих извора енергије се предлаже као погодан начин производње водоника као носиоца енергије при чему су представљена решења за побољшање ефикасности ове технологије, чиме је дефинисан циљ ове дисертације.

Поглавље *Алкална електролиза воде* представља теоријски део Дисертације, и подељено је на пет потпоглавља којима је детаљно описано тренутно стање ове технологије, са освртом на сваки од делова електролизера, дат преглед катодних материјала са акцентом на материјале на бази никла и легура никла, уз детаљан преглед релевантне литературе. Поглавље је подељено на следеће области:

Електролит – у овом сегменту извршена је класификација електролизе у односу на тип електролита, при чему су истакнуте предности електролизе у алкалној средини. Упоређени су најчешће коришћени алкални електролити по својој специфичној проводљивости – NaOH и KOH, дате типичне концентрације које се користе при лабораторијским и индустријским процесима, и објашњен утицај присуства нечистоћа у електролиту на ефикасност електролизера у индустријској електролизи. Тиме је образложен избор KOH као електролита коришћеног у истраживањима обухваћених Дисертацијом, као и коришћених концентрација.

Сепаратори – овај сегмент посвећен је важном делу електролизера имајући у виду да сепаратори уводе додатни отпор у електролизер, при чему је истакнута неопходност добре проводљивости сепаратора за јоне, али не и межуриће гаса, висока механичка и хемијска стабилност. Наведени су типови сепаратора коришћени за алкалну електролизу уз поређење њихових основних својстава.

Електроде – овај сегмент посвећен је најважнијој компоненти електролизера која је истовремено била предмет ове Дисертације – електродним материјалима. Потпоглавље је посвећено првенствено катодним материјалима на којима се при електролизи одиграва реакција издвајања водоника. Наведено је да бројни показатељи издвајања водоника зависе од избора електродног материјала, као и да на његове каталитичке особине за издвајање водоника утичу хемијски састав и структура материјала, као и реална површина катализатора доступна за одигравање реакције. Наведене су предности и мане поређења каталитичке активности нормализоване у односу на различите типове површина. Део потпоглавља посвећен је *Кинетици електрохемијских реакција*, где су дефинисане основне величине и појмови који се користе у електрохемијској кинетици, а затим је размотрен *Механизам издвајања водоника и дијагностички параметри* који се примењују у електрокатализи, чиме је дата теоријска основа за анализу експериментално добијених података остварених током израде Дисертације.

Издавање водоника на електродама на бази никла – у сегменту је дат детаљан преглед литературе о доступним катодним материјалима за алкалну електролизу воде, узимајући у обзир и различите врсте никленог супстрата, као основног електродног материјала. Размотрени су и упоређени различити типови каталитичких превлака на никленим пенама, и изложени доступни подаци о легури никал-калај коришћеној за издвајање водоника.

Типови електролизера – на крају теоријског дела дат је и преглед типова електролизера уз осврт на њихов развој до савремених изведби проточних електролизера са нултим електродним растојањем, који су и примењени за тестирање електродних материјала развијених током израде Дисертације.

Експериментални део подељен је тематски на сегменте у којима су изложени сви релевантни експериментални услови, процедуре и коришћени материјали за сваку од фаза експерименталног рада. *Таложње легура Ni-Sn* вршено је на никлене пене различите просечне величине пора, па су најпре описани купатило за таложње, коришћени супстрати и начин припреме електрода, а затим и процедуре коришћене при потенциостатском и галваностатском таложњу. У сегменту *Испитивање реакције издвајања водоника*, дати су сви експериментални услови и коришћене процедуре за тестирање формираних електрода у троделној електрохемијској ћелији у различитим концентрацијама основног електролита, а затим и у проточном електролизеру са нултим електродним растојањем, као и са малим растојањем између електрода, уз описану методологију увећања размера припреме електрода. Затим су изложене *Методe физичко-хемијске карактеризације* коришћене за анализу добијених материјала, где су обухваћени примењени експериментални услови, и то скенирајућа електронска микроскопија са енергетски дисперзивном рендгенском спектроскопијом, скенирајућа трансмисиона електронска спектроскопија, дифракција X-зрака, фотоелектронска спектроскопија X-зрака, БЕТ адсорпциона изотерма и спектроскопија индуковано спрегнуте плазме.

Поглавље *Резултати и дискусија* подељено је на шест потпоглавља у којима су представљени и анализирани резултати добијени у оквиру овог истраживања.

Реакција издвајања водоника на чистој Ni пени – овај део резултата односи се на испитивање чисте никлене пене, коришћене као супстрата за наношење превлаке у даљем раду. Узорци пене од чистог никла, различите просечне величине пора од 450 до 1200 μm , испитани су како би било могуће поређење са пенама модификованим каталитичким слојем, при чему су пене од никла материјал који се стандардно користи као катодни материјал у индустријској електролизи. Табеларно су приказане вредности пренапетости издвајања водоника на карактеристичним вредностима густине струје, вредности густине струје измене, као и вредности Тафелових нагиба ради разматрања механизма реакције.

Потенциостатско таложње превлаке легуре никал-калај – у почетном разматрању могућности таложња ове легуре на порозне супстрате пене од никла, најпре су снимљене

поларизационе криве у купатилу за таложeње, чиме је дефинисан пожељан опсег потенцијала при којима долази до таложeња превлаке повољног састава уз истовремено издвајање водоника које доприноси формирању превлаке развијене површине. Након тога, потенциостатски су исталожене превлаке на две вредности потенцијала на сваку од четири коришћене никлене пене, означене по просечној величини пора (450, 580, 800 и 1200 μm). Приказана је детаљна карактеризација добијених узорака, уз анализу попречног пресека узорака пене са превлаком, чиме је показано да је цела доступна површина комплексне структуре покривена превлаком, како са спољне стране пене, тако и унутар пора у средишњем делу узорака. Тиме је показано да је електрохемијско таложeње погодна метода за формирање превлака на комплексним површинама, при чему је и дебљина превлаке пројектована тако да се унутрашњост пора не запуши како не би дошло до губитка активне површине за саму реакцију издвајања водоника. Док се дебљина превлаке разликује на површини пене и у унутрашњости где је она тања, што је последица расподеле густине струје приликом таложeња, показано је да је састав превлаке унутар и на површини пене практично истоветан и оквирно износи 70 at% никла наспрам 30 at% калаја. На основу рендгенских дифрактограма легура је означена као $\text{Ni}_{(1+x)}\text{Sn}$, $0 < x < 0,5$.

Реакција издвајања водоника на Ni пенама модификованим потенциостатски исталоженом превлаком легуре Ni-Sn - на потенциостатски исталоженим узорцима испитана је реакција издвајања водоника у лабораторијским условима (1 М КОН, собна температура, троделна електрохемијска ћелија), при чему је постигнуто смањење пренапетости реакције од око 300 mV на густини струје од -10 mA cm^{-2} у поређењу са чистим пенама никла, уз двоструко нижу вредност Тафеловог нагиба ($\sim -60 \text{ mV dek}^{-1}$ у поређењу са $\sim -120 \text{ mV dek}^{-1}$).

Галваностатско таложeње превлака легуре никал-калај – ради једноставније примене у индустрији захваљујући лакшој процедури увећања размера процеса таложeња у раду је испитано и галваностатско таложeње легура. На основу струја добијених приликом потенциостатског таложeња одабран је опсег густине струје ($40\text{--}120 \text{ mA cm}^{-2}$), у оквиру ког је вршена оптимизација параметара таложeња за сваку од коришћених пена, како би била могућа реална примена сваке од њих. ТЕМ анализом са ЕДС мапирањем показано је да је превлака оптималне каталитичке активности састава Ni_3Sn_2 који представља метастабилну фазу $\text{Ni}_{(1+x)}\text{Sn}$.

Реакција издвајања водоника на Ni пенама модификованим галваностатски исталоженом превлаком легуре Ni-Sn – електрокатализа је најпре разматрана у лабораторијским условима (1 М КОН, 30°C , троделна електрохемијска ћелија), где је показана веома добра репродуктивност резултата. На основу поларизационих кривих снимљених за сваку пену при различитим густинама струје таложeња превлака, процењена је оптимална густина струје таложeња за сваку од пена коришћених као супстрат. Пренапетост на -10 mA cm^{-2} је смањена за додатних око 40 mV у односу на потенциостатски таложене легуре, уз Тафелов нагиб од приближно -50 mV dek^{-1} . Анализом Најквистових дијаграма добијених спектроскопијом електрохемијске импеданције, показано је потпуно слагање са Тафеловом анализом у погледу одређивања оптималне густине струје таложeња превлаке за сваку од никлених пена. Узорци исталожени оптималном густином струје таложeња тестирани су и у условима ближим индустријским (30 mas% КОН, 70°C), ради добијања веродостојних података о каталитичким својствима оптимизованих превлака, при чему су за сваку пену са оптимизованом превлаком добијене вредности пренапетости ниже од 90 mV на високој густини струје од -1000 mA cm^{-2} која одговара индустријским условима. Испитивањем утицаја температуре на реакцију издвајања водоника, показано је да повећање температуре електролита више доприноси смањењу пренапетости реакције од повећања концентрације електролита.

Електролиза воде у проточном електролизеру – напоследку, узорци већих димензија исталожени оптималном густином струје тестирани су у проточном електролизеру са малим и нултим електродним растојањем, као катода, али и као анода у симетричном систему електролизе. Примењени су услови истоветни онима примењеним у троелектродном систему за оптимизоване узорке (30 mas% КОН, 70°C), уз варирање протока електролита. Показано је да реактор са нултим растојањем показује боље параметре електролизе од реактора са електродним растојањем од 0,2 mm код кога долази до повећања напона на реактору након 5 часова. Уколико се узорци никлене пене са оптимизованом никал-калај превлаком користе као катоде, наспрам аноде од чисте никлене пене, напон на реактору је

за око 0,5 V нижи у поређењу са истоветним системом који као катоду има чисту никлену пену, на струји од 500 mA cm⁻², што представља значајну уштеду при електролизи. Напошетку, уколико се катализована никлена пена користи и као катода и као анода, упркос релативно ниској почетној вредности напона електролизе, приметан је пад активности током рада услед лошије стабилности аноде у радним условима електролизе. Дуготрајни тестови стабилности показали су веома добре резултате за систем са пеном модификованом каталитичком превлаком као катодом и чистом никленом пеном као анодом.

У *Закључку* је представљен кратак, али свеобухватни преглед добијених резултата, тематски распоређених у параграфе, истакнута су основна сазнања до којих се дошло током израде дисертације и наведени главни закључци, при чему је истакнута могућност примене добијених материјала у индустријским системима.

У поглављу *Литература*, наведен је списак свих литературних навода који су цитирани у тексту докторске дисертације.

У *Прилогу* су табеларно изложене вредности коришћене при анализи резултата добијених спектроскопијом електрохемијске импеданције.

На крају дисертације приложена је кратка биографија аутора, Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу, као и Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације, потписана од стране ментора.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Питање обновљиве и еколошки чисте производње енергије је једно од најважнијих питања данашњице. Водонична енергија представља обећавајућу алтернативу фосилним горивима, при чему се производња водоника може обављати електролизом воде као еколошки чистим процесом уз употребу обновљивих извора енергије. Тиме водоник постаје носилац енергије који би се у горивним спреговима користио за чисту производњу енергије, а овај вид складиштења енергије добијене из обновљивих извора решио би питање њихове периодичности. Највећа предност водоничне енергије лежи у могућности примене у широком опсегу система различитих капацитета. Алкална електролиза је погодна за индустријску примену у производњи водоника захваљујући зрелости технологије и могућности примене неплемених метала и легура као катализатора. Индустријски стандард катодних материјала су електроде на бази никла и Рени-никла. Међутим, легирањем никла другим елементима могуће је побољшање његових каталитичких карактеристика, што је и показано у овој Дисертацији.

У Дисертацији је примењено електрохемијско таложeње легуре никал-калај на савремене електродне материјале – никлене пене, чиме су добијене превлаке високе инхерентне активности, али и још развијеније површине, што су два доприноса катализи. Такође, предложена је методологија којом су успешно формиране превлаке на комплексним супстратима задржавајући њихове функционалне карактеристике (отворене поре), чиме су добијене електроде применљиве у индустријским условима.

На основу детаљне анализе доступне литературе, може се закључити да истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације представљају оригиналан допринос науци, применљива су индустрији, у потпуности прате савремене светске токове у релевантној научној области и доприносе унапређењу катодних материјала у алкалној електролизи.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији Јелене Д. Гојгић, мастер инжењера технологије, цитиране су 122 библиографске јединице, релевантне за област истраживања која је обухваћена овом докторском дисертацијом. На основу анализе резултата приказаних у стручној и научној литератури, изложене су

полазне хипотезе и основне смернице за истраживања која су извршена у овој докторској дисертацији, а детаљан преглед литературе послужио је као основа за планирање експеримената, као и за обраду и дискусију добијених резултата у контексту актуелних светских трендова и релевантних истраживања у последњих неколико година. Литература покрива области електрохемијског таложења легура, катализаторе за издвајање водоника, протоколе који се користе у алкалној електролизи, као и објављене резултате добијене у савременим проточним електролизерима. У оквиру коришћених литературних навода налазе се и објављени радови кандидата, проистекли из резултата истраживања ове докторске дисертације.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Превлаке легура никал-калај формиране су на порозним супстратима комплексне структуре, никленим пенама, као индустријском стандарду за катодни материјал у алкалној електролизи, применом електрохемијског таложења. Потенциостатским таложењем дефинисана је област потенцијала од интереса за формирање превлака жељеног састава и морфологије, а увећање размера процеса таложења примењено је галваностатским таложењем погоднијим за индустријску примену. Показано је да се електрохемијским таложењем могу добити превлаке које потпуно покривају комплексну доступну површину супстрата задржавањем његових функционалних карактеристика при чему су добијене превлаке стабилне у радним условима електролизе на високим струјама, што је од великог значаја за индустријску примену.

Добијени материјали карактерисани су релевантним методама којима је одређен њихов састав, морфологија, испитан попречни пресек, као што су скенирајућа електронска микроскопија са енергетски дисперзивном рендгенском спектроскопијом, скенирајућа трансмисиона електронска спектроскопија, дифракција X-зрака и фотоелектронска спектроскопија X-зрака. БЕТ адсорпциона изотерма коришћена је за процену реалне површине електроде, док је спектроскопија индуковано спрегнуте плазме коришћена у анализи електролита током и након експеримената изведених у електролизеру ради процене стабилности електродних материјала.

За испитивање реакције издвајања водоника коришћена је адекватна методологија, која укључује поларизационе криве снимање у лабораторијским, али и индустријским условима, Тафелову анализу, као и детаљну карактеризацију спектроскопијом електрохемијске импеданције, којом су разматрани показатељи катализе, као и сам механизам реакције.

Експерименти изведени у електролизеру прате хармонизоване тестове предложене од стране Европске уније за алкалну електролизу.

3.4. Применљивост остварених резултата

На основу увида у до сада објављене резултате истраживања као и резултате приказане у оквиру предметне докторске дисертације, може се закључити да ова истраживања пружају значајан научни допринос у области електродних материјала за производњу водоника алкалном електролизом воде. Дисертацијом је предложена процедура припреме електрода и електрохемијског таложења никал-калај легуре на порозне никлене пене комплексне геометрије, чиме се могу формирати индустријски функционалне самостојеће електроде. Такође су истакнути недостаци стандардизованих тестова за процену каталитичких својстава електродних материјала, а материјали развијени у оквиру ове дисертације су тестирани у широком опсегу густина струје који обухватају захтевне индустријске услове, што је врло ретко у научној литератури.

За никлене пене са опсегом просечног пречника пора од 450 до 1200 μm које су применљиве у проточним електролизерима извршена је оптимизација процеса електрохемијског таложења легура никал-калај, како би на сваку од пена било могуће исталожити превлаку оптималног састава и каталитичких својстава. Ово је врло значајно, јер зависно од типа електролизера и ширине електродних одељака свака од ових пена може наћи примену у проточном електролизеру са нултим електродним растојањем, што даје широку могућност примене развијених електрода. Резултати су остварени у

оквиру пројекта сарадње Савезне Републике Немачке са земљама Западног Балкана (NOVATRODES; 01DS21010, позив WBC2019), уз учешће индустријских партнера, који су показали заинтересованост за тестирање добијених материјала у својим постројењима. Део резултата остварен је у партнерској институцији са поменутог пројекта, Fraunhofer IFAM институту из Дрездена.

Верификација резултата у оквиру ове докторске дисертације остварена је објављивањем радова у водећим међународним часописима из релевантне области.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

У свом досадашњем истраживачком раду кандидат Јелена Д. Гојгић, мастер инжењер технологије, показала је стручност и самосталност у претраживању и коришћењу научне литературе, планирању и реализацији експеримената, обради и анализи добијених података, дискусији резултата и припреми публикација. Такође, показала је и велику мотивацију у раду, као и способност критичког расуђивања резултата и литературних навода. Комисија је на основу досадашњег залагања и постигнутих резултата, као и на основу поднете докторске дисертације, утврдила да кандидат поседује све квалитете неопходне за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Најзначајнији научни доприноси, проистекли као резултат докторске дисертације, су следећи:

- Дефинисана је успешна процедура за електрохемијско таложење легура никал-калај на порозне никлене супстрате комплексног облика.
- Доказано је да састав легуре са високом инхерентном активношћу за издвајање водоника одговара легури Ni_3Sn_2 .
- Добијене електроде – никлене пене са превлаком никал-калај, показују знатно унапређена каталитичка својства у односу на чисте никлене пене као индустријски стандард катодног материјала.
- Оптимизован је процес таложења превлака за сваки од четири коришћена супстрата, чиме су добијене пренапетости издвајања водоника ниже од 90 mV на -1000 mA cm^{-2} , испитивано у троделној електрохемијској ћелији у 30 mas% КОН на 70°C, што представља значајно унапређење у односу на доступне литературне податке.
- Реакција издвајања водоника испитана је у широком опсегу густине струја, чиме су добијени резултати релевантни за поређење са индустријским подацима, као и са научном литературом.
- Тестирањем формираних електрода у проточном електролизеру јасно је доказана њихова применљивост у индустријским условима, при чему је постигнуто смањење напона на електролизеру за $\sim 0,5 \text{ V}$ у односу на истоветан систем са чистом никленом пеном као катодом, на радној густини струје од $0,5 \text{ A cm}^{-2}$, што представља значајну уштеду приликом примене у реалним системима.

Наведени доприноси представљају добру основу за даљу сарадњу са индустријом у развоју стабилних и ефикасних електродних материјала за алкалну електролизу воде.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати проистекли из ове дисертације представљају основу за даљи развој електрода за алкалну електролизу воде у проточним електролизерима са нултим електродним растојањем. Резултати

пружају разумевање механизма електрохемијског таложења никал-калај легуре на супстрате комплексне површине, дефинишући једноставну процедуру припреме супстрата за таложење применљиву у индустрији. Дата је и јасно постављена методологија за увећање размера процеса таложења као и оптимизацију параметара електрохемијског таложења прилагођена коришћеном супстрату.

Тако формиране електроде показују значајно побољшање каталитичких својстава у односу на стандардно коришћене никлене пене, како у лабораторијским, тако и у индустријским условима, чиме је показано да су добијени материјали погодни за примену у реалним системима увећаних размера. Добијени резултати представљају значајан помак како у развоју катодних материјала за алкалну електролизу, где се отварају могућности даље модификације састава превлаке, тако и у дефинисању протокола за испитивање реакције издвајања водоника који су релевантни и за научне и за индустријске примене.

4.3. Верификација научних доприноса

Категорија M21:

1. **Gojgić, J.D.**, Petričević, A.M., Rauscher, T., Bernacker, C.I., Weißgarber, T., Pavko, L., Vasilić, R., Krstajić Pajić, M.N., Jović, V.D. (2023). Hydrogen evolution at Ni foam electrodes and Ni-Sn coated Ni foam electrodes. *Applied Catalysis A, General* 663 119312. (IF(2023)=4,7) (ISSN: 0926-860X) (<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2023.119312>)
2. **Gojgić, J.D.**, Petričević, A.M., Rauscher, T., Bernäcker, C.I., Weißgärber, T., Vasilić, R., Pavko L., Bele M., Ruiz-Zepeda, F., Smiljanić, M., Hodnik, N., Krstajić Pajić, M.N., Jović V.D. (2024). High-Performance Cathodes for Alkaline Water Electrolysis in a Zero-Gap Setting: Ni–Sn/Ni Foam Prepared by Galvanostatic Electrodeposition. *ACS Applied Energy Materials*, 8, 3570–3580. (IF(2024)=5,5) (ISSN: 2574-0962) (<https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03140>)

5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204 од 22. јуна 2018. године), коришћењем програма iThenticate 30. септембра 2025. извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидата Јелене Д. Гојгић под називом „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодне за производњу водоника алкалном електролизом воде“.

Утврђено подударање текста износи сумарно **10 %** и закључено је да је овај степен подударности претежно последица општеприхваћених појмова, личних имена и назива, устаљених стручних термина и израза. Део подударности обухвата и податке и називе/номенклатуру узорака из претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из ове докторске дисертације и чине њен саставни део, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изложеног Комисија сматра да је докторска дисертација „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодне за производњу водоника алкалном електролизом воде“, кандидата Јелене Д. Гојгић, оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега наведеног Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Јелене Д. Гојгић, мастер инжењера технологије, под називом „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“ представља значајан и оригиналан научни допринос у области којој дисертација припада (Технолошко инжењерство; Хемијско инжењерство), што је и потврђено објављивањем радова у водећим међународним часописима (M21).

Предмет и циљеви који су дефинисани у извештају за оцену научне заснованости теме су у потпуности остварени.

Стога, Комисија је мишљења да ова докторска дисертација испуњава све захтеване критеријуме као и да је кандидат током израде дисертације показао научно-истраживачку способност и самосталност у свим фазама израде дисертације.

Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих и приказаних резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, да прихвати овај Извештај, пружи на увид јавности поднету докторску дисертацију под називом „Електрохемијски исталожене превлаке легура никал-калај на никленим пенама као порозне катодe за производњу водоника алкалном електролизом воде“, кандидата Јелене Д. Гојгић, мастер инжењера технологије, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се након завршетка ове процедуре кандидат позове на усмену одбрану Дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду,
09.10.2025.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Снежана Гојковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Бранимир Гргур, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Игор Пашти, редовни професор
Универзитет у Београду, Факултет за физичку хемију