

ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ
ФАКУЛТЕТ

35/636
(Број захтева)
06.02.2017.
(датум)

Образац 2
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ВЕЋЕ НАУЧНИХ ОБЛАСТИ ТЕХНИЧКИХ
НАУКА

(назив већа научне области коме се захтев упућује)

Београд, Студентски трг бр. 1

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5. Статута Универзитета у Београду (“Гласник Универзитета” број 131/06),
дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата

СЛАЂАНЕ (Љубомир) МАСЛОВАРЕ, мастер инж. технологије

КАНДИДАТ: **СЛАЂАНА (Љубомир) МАСЛОВАРА, мастер инж. технологије**

пријавила је докторску дисертацију под називом:

**„Утицај трокомпонентних јонских активатора на повећање енергетске ефикасности
алкалног електролизера“**

Из научне области: **ТЕХНОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО**

Универзитет је дана **08.06.2015.** године, својим актом **02 број: 61206-2569/2-15,** дао сагласност на
предлог теме докторске дисертације која је гласила:

**„Утицај трокомпонентних јонских активатора на повећање енергетске ефикасности
алкалног електролизера“**

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата:

СЛАЂАНЕ (Љубомир) МАСЛОВАРЕ, мастер инж. технологије

(име, име једног од родитеља и презиме)

образована је на седници одржаној **24.11.2016.** године Одлуком Факултета под бр. **35/518** у
саставу:

Име и презиме	Звање	Научна област
1. Др Мирјана Кијевчанин	Редовни професор	Хемијско инжењерство
2. Др Милица Марчета Канински	Научни саветник	Физичка хемија
3. Др Ивона Радовић	Ванредни професор	Хемијско инжењерство
4. Др Владимир Николић	Виши научни сарадник	Физичка хемија
5. Др Гвозден Тасић	Научни сарадник	Физичка хемија

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске
дисертације на седници одржаној дана **29.12.2016.** године.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Ђорђе Јанаковић

На основу чл. 30. став 3. Закона о високом образовању, чл. 40. Статута ТМФ и чл. 39. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 29.12.2016. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Мирјана Кијевчанин, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Милица Марчета Канински, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, др Ивона Радовић, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Владимир Николић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, др Гвозден Тасић, научни сарадник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Утицај трокомпонентних јонских активатора на повећање енергетске ефикасности алкалног електролизера“** коју је поднела **СЛАЂАНА МАСЛОВАРА**, мастер. инж. 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 Слађане Масловаре, под називом **„Утицај трокомпонентних јонских активатора на повећање енергетске ефикасности алкалног електролизера“** Одлуком 02 број: 61206-2569/2-15 од 08.06.2015. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M21:

1. **S. Maslovara**, S. Miulović, M. Marčeta Kaninski, G. Tasić, V. Nikolić, Energy consumption of the electrolytic hydrogen production using Zn-Co-Mo based activators–Part I, Applied Catalysis A, 451(2013)216-219;IF 3.674; ISSN: 0926-860X.
2. **S. Maslovara**, M. Marčeta Kaninski, I. Perović, P. Laušević, G. Tasić, B. Radak, V. Nikolić, Novel ternary Ni-Co-Mo based ionic activator for efficient alkaline water electrolysis, International Journal of Hydrogen Energy, 38(2013)15928-15933;IF 2.930; ISSN: 0360-3199.

Категорија M34

1. **Sladjana Lj. Maslovara**, Snezana M. Miulovic, Milica P. Marceta Kaninski, Ivana M. Perovic, Gvozden S. Tasic, Dragana L. Zugic, Vladimir M. Nikolic, *Energy Consumption of the Alkaline Electrolyser using Zn-Co-Mo Electrocatalyst for Hydrogen Evolution Activity*, Summer School on Electrochemistry for Environmental and Biomedical Applications, 17-21 June 2013., Cluj-Napoca, Romania, Book Abstracts, p. 44.
2. Snezana M. Miulovic, **Sladjana Lj. Maslovara**, Ivana M. Perovic, Dragana L. Zugic, Gvozden S. Tasic, Vladimir M. Nikolic, Milica P. Marceta Kaninski, *Alkaline Electrolysis- Lowering the Energy Consumption of Hydrogen Production by using Co-Cr based Ionic Activators*, Summer School on Electrochemistry for Environmental and Biomedical Applications, 17-21 June 2013., Cluj-Napoca, Romania, Book Abstracts, p. 46

3. Dragana Vasic Anicijevic, **Sladjana Maslovara**, Vladimir Nikolic, Milica Marceta Kaninski, *Improved HER Activity of Ni Cathode Activated By NiCoMo Ionic Activators – A DFT Aspect*, 2nd International Meeting on Materials Science for Energy Related Applications, September 29-30, 2016, Belgrade, Book Abstracts, p.
4. **Sladana Lj. Maslovara**, Dragana D. Vasić Anićijević, Dragana L. Žugić, Milica P. Marčeta Kaninski, Vladimir M. Nikolić, *Influence of in situ addition of different combinations of d-metals on electrolytic hydrogen production in alkaline electrolyzer*, Fifteenth Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering, December 7-9, 2016, Belgrade, Book Abstracts, p. 59

Докторска дисертација и Реферат о оцени докторске дисертације достављају се на увид јавности, а по истеку рока од 30 дана, на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

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

Д Е К А Н

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

**UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET
NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU**

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije

Odlukom br. 35/518 od 24.11.2016. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije, pod naslovom

„Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera”.

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom Komisija je sačinila sledeći

R E F E R A T

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

09.04.2015. Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, prijavljena je tema doktorske disertacije kandidata Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije pod naslovom: „Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera” i usvojen je sastav Komisije za ocenu zasnovanosti predložene teme (Odlukom br. 35/102 od 14.04.2015.).

07.05.2015. Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, doneta je Odluka o odobravanju predloga teme doktorske disertacije kandidata Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije pod naslovom: „Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera” i imenovani su mentori dr Mirjana Kijevčanin, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu i dr Milica Marčeta Kaninski, naučni savetnik Instituta za nuklearne nauke „Vinča” Univerziteta u Beogradu (Odluka br. 35/191 od 11.05.2015.).

08.06.2015. Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, doneta je Odluka o davanju saglasnosti na predlog teme doktorske disertacije kandidata Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije pod naslovom: „Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera” i imenovani su mentori dr Mirjana Kijevčanin, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu i dr Milica Marčeta Kaninski, naučni savetnik Instituta za nuklearne nauke „Vinča” Univerziteta u Beogradu (Odluka br. 61206-2569/2-15 od 08.06.2015.).

24.11.2016. Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, doneta je odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije pod naslovom: „Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera” i imenovani su mentori dr Mirjana Kijevčanin, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu i dr Milica Marčeta Kaninski, naučni savetnik Instituta za nuklearne nauke „Vinča” Univerziteta u Beogradu (Odluka br. 35/518 od 24.11.2016.).

1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo, uža naučna oblast Hemijsko inženjerstvo, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Za mentora je imenovana dr Mirjana Kijevčanin, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a komentor je dr Milica Marčeta Kaninski, naučni savetnik Instituta za nuklearne nauke „Vinča” Univerziteta u Beogradu. Na osnovu objavljenih publikacija i iskustava, moentor i komentor su kompetentne da rukovode izradom ove doktorske disertacije.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Slađana Maslovara, rođena 07.06.1987 u Beogradu. Završila Treću beogradsku gimnaziju, prirodno-matematičkog smera. 2006. godine je upisala Tehnološko-metalurški fakultet, smer Hemijsko inženjerstvo. Osnovne studije je završila 2010. i stekla zvanje diplomiranog inženjera tehnologije-hemijska tehnologija. Odbranila je Završni rad sa temom „Energetsko i ekonomsko poboljšanje procesa sinteze metanola primenom Pinch metodologije” koji je ocenjen ocenom 10. Master studije je upisala u septembru 2010 na Tehnološko-metalurškom fakultetu, smer Hemijsko inženjerstvo. Odbranom Master rada sa temom „Ispitivanje mogućnosti povećanja energetske efikasnosti procesa elektrolitičkog dobijanja vodonika primenom katalizatora na bazi prelaznih metala” sa ocenom 10, završila je master studije u junu 2011 i. Prva od svoje generacije je stekla zvanje Master inženjera tehnologije.

Doktorske studije na Studijskom programu Hemijsko inženjerstvo, Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, upisala je školske 2011/2012. godine. Položila je sve ispite predviđene planom i programom sa prosečnom ocenom 10. Eksperimentalni deo doktorske teze uradila je u Institutu za nuklearne nauke „Vinča” Univerziteta u Beogradu.

Od septembra 2011. godine zaposlena je u Laboratoriji za fizičku hemiju, Instituta za nuklearne nauke “Vinča”, na projektu “Vodonična energija - razvoj novih materijala: elektrolitičko dobijanje vodonika, vodonične gorivne ćelije, izotopski efekat.” (projekt br. 172045, Ministarstva za nauku Republike Srbije), 2011 – 2015, rukovodilac projekta dr Milica Marčeta Kaninski. Takođe je angažovana i u okviru Evropskog FP7-JTI projekta „Efficient use of resources in energy converting applications” Grant No. 303024, period trajanja 2012-2015, učesnik projekta.

Zvanje istraživač saradnik je stekla 28.12.2011., a reizabrana u isto zvanje 29.01.2015.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija Slađane Maslovara predstavljena je na 148 strana i uključuje 28 tabela, 80 slika, kao i 124 literaturna navoda. Posle *Rezimea* na srpskom i engleskom jeziku sledi tekst organizovan u osam poglavlja: *Uvod, Analiza proizvodnih procesa dobijanja vodonika, Teorijske osnove elektrolitičkih reakcija, Eksperimentalni deo, Rezultati i diskusija, Zaključak, Literatura i Prilozi*.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

Uvodni deo disertacije opisuje ulogu vodonika kao medijuma za skladištenje energije kao i mogućnosti njegove proizvodnje. Dato je objašnjene procesa elektrolize vode i različitih tipova elektrolizera.

Deo *Analize proizvodnih procesa dobijanja vodonika* posvećen je procesu alkalne elektrolize i pregledu komercijalno dostupnih alkalnih elektrolizera. Posebno su objašnjene mogućnosti povećanja energetske efikasnosti pri proizvodnji vodonika ponovnim korišćenjem otpadne toplote dobijene u proizvodnom procesu i sprečavanjem toplotnih gubitaka za vreme procesa. Alkalni elektrolizer pri vrednostima napona većih od termoneutralnog odaje višak dovedene električne energije u vidu toplote. Toplota koja se oslobađa u procesu elektrolize može se standardnim razmenjivačima toplote izdvojiti iz elektrolizera (održavanje temperaturene radne tačke na optimalnom položaju) i koristiti u drugim delovima postrojenja. Optimizacija se vrši u cilju smanjenja ukupnih troškova, pri čemu ovaj kriterijum treba uskladiti i sa ostalim zahtevima procesa. Integracija alkalnog elektrolizera sa razmenjivačem toplote i gorivnom ćelijom dalje ima mogućnost primene u decentralitovanim sistemima napajanja električnom energijom. Primarni cilj razvoja alkalnih elektrolizera je povećanje brzine proizvodnje vodonika uz održanje energetske efikasnosti postrojenja razvojem elektrokatalizatora baziranih na d-metalima koji se *in situ* dodaju u osnovni rastvor elektrolita.

U delu *Teorijske osnove elektrolitičkih reakcija* dat je opis procesa alkalne elektrolize sa termodinamičkog aspekta i definisan je pojam efikasnosti elektrolize. Detaljno je objašnjen mehanizam reakcije izdvajanja vodonika na katodi alkalnog elektrolizera, koji podrazumeva jedan od dva reakciona puta: Folmer – Tafelov ili Folmer – Hejrovski. Definisan je pojam elektrokatalize i predstavljana je Brojerova teorija intermetalnih veza kao teorijski okvir za predviđanje sinergetskog efekta na katalitičku aktivnost za reakciju izdvajanja vodonika, kod legura baziranih na kombinaciji više prelaznih metala. Opisan je proces *in situ* aktivacije kojim se može postići značajno smanjenje potrošnje energije u procesu alkalne elektrolize. Analiziran je matematički model uspostavljen po Ullebergovim jednačinama, u cilju praćenja procesnih parametara alkalnog elektrolizera. Na osnovu dobijenih rezultata postavljen je termički i elektrohemijski model alkalnog elektrolizera.

U *Eksperimentalnom delu* su opisane elektrohemijske ćelije posebno dizajnirane i napravljene za primenu u opisanim eksperimentima. U dvoelektrodnoj elektrolitičkoj ćeliji su rađena ispitivanja uticaja jonskih aktivatora na bazi nikla, cinka, kobalta, bakra i molibdena, na ponašanje strujno naponske krive. Elektrohemijska ispitivanja jonskih aktivatora uz temperaturni opseg od 298K

do 343K su rađena u troelektrodnoj ćeliji. Merenja potrošnje energije u procesu *in situ* aktivacije alkalne elektrolize trokomponentnim jonskim aktivatorima su rađena u elektrolitičkoj ćeliji za izdvajanje gasne smeše H_2/O_2 . Ispitivanja potrošnje energije u elektrolizeru i uticaj jonskog aktivatora na bazi NiCoMo na energetska efikasnost u poređenju sa čistim elektrolitom, 6M KOH, su rađena u laboratorijskom alkalnom elektrolizeru.

Izložene su eksperimentalne tehnike, za dobijanje strujno naponskih krivih i impedansnih EIS dijagrama korišćenih u cilju ispitivanja katalitičke aktivnosti dobijenih prevlaka za reakciju izdvajanja vodonika. Prikazane su i tehnike za ispitivanje morfologije dobijenih prevlaka – skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) i tehnika za ispitivanje topografije površine dobijenih prevlaka- profilometrija. Promene u elektrolitu nastale za vreme elektrolitičkog procesa su analizirane spektrofotometrijskom analizom.

U poglavlju, pod nazivom *Rezultati i diskusija*, dat je pregled dobijenih rezultata. Izračunato je smanjenje potrošnje energije alkalnog elektrolizera *in situ* aktivacijom ispitanim trokomponentnim jonskim aktivatorima prvo u elektrolitičkoj ćeliji za izdvajanje gasne smeše H_2/O_2 , a ternarni jonski aktivator sa najboljim performansama potom i u laboratorijskom alkalnom elektrolizeru pri radu na industrijskim uslovima. Utvrđen je uticaj pojedinih parametara procesa *in situ* aktivacije na katalitičku aktivnost katoda za reakciju izdvajanja vodonika, kao i na morfologiju dobijenih prevlaka. Termodinamička analiza procesnih parametara je korišćena kako bi se opisali procesi u elektrolizeru. Analiziran je matematički model po Ulleberogovim jednačinama za laboratorijski elektrolizer u cilju praćenja termodinamičkih i procesnih parametara. Kombinacijom rezultata dobijenih modelom i eksperimentalnim putem pokazano je da se ovaj model može koristiti u predviđanju ponašanja napona elektrolitičke ćelije pri različitim strujama i temperaturama. Korišćenjem elektroda *in situ* aktiviranih sa trokomponentnim jonskim aktivatorom na bazi NiCoMo povećava se efikasnost i minimizuje proizvodnja toplote unutar samog elektrolizera što je i potvrđeno termičkim modelom laboratorijskog elektrolizera. Analizom termičkog modela pokazano je da se korišćenjem jonskih aktivatora dolazi do smanjenja generisanja toplote u sistemu pa samim tim i do smanjenja toplotnih gubitaka u sistemu jer nema potrebe za odvođenjem toplote usled optimalnog rada elektrolizera. Analizom mogućnosti integracije alkalnog elektrolizera sa PEM gorivnom ćelijom prikazana je tehnička specifikacija pločasto dobošastog razmenjivača toplote koji bi mogao da se koristi u ovakvom sistemu. Iskorišćenje toplote na temperaturama od 343K moguće je uskladiti sa korišćenjem Rankinovog ciklusa sa organskim fluidima pri čemu je moguće iskoristi otpadnu toplotu za dodatno grejanje ili hladjenje, naravno u slučajevima kada dobit prevazilazi troškove ulaganja. Korelacijom trendova katalitičke aktivnosti trokomponentnih jonskih aktivatora sa sopstvenim materijalima zaključeno je da se u slučaju NiCoMo jonskog aktivatora, dobijeno povećanje aktivnosti u odnosu na čistu Ni elektrodu može pripisati prisustvu optimalne količine molibdena na površini elektrode, pri čemu Ni i Co doprinose kontroli količine Mo na katodi i ukupnom održanju stabilnosti elektrode, s obzirom na to da je njihovo ponašanje u katalizi HER u fundamentalnom smislu veoma slično ponašanju čiste Ni elektrode.

Rezultati doktorske disertacije su sumirani u delu *Zaključak*, gde je analizom polarizacionih krivih ternarnih jonskih aktivatora, i poređenjem sa 6M KOH pokazano da je postignuto značajno sniženje nadnapona potrebnog za izdvajanje vodonika, što ukazuje na značajno poboljšanje kinetike reakcije izdvajanja vodonika. Dodatak trokomponentnih jonskih aktivatora u standardni elektrolit u elektrolitičkoj ćeliji za izdvajanje gasne smeše H_2/O_2 dovodi do

smanjenja potrošnje energije po jedinici mase izdvojenog vodonika. Upotreba jonskih aktivatora smanjuje potrošnju energije po jedinici mase izdvojenog vodonika za oko 18% u poređenju sa sistemom koji nije aktiviran.

U poslednjem poglavlju disertacije, *Literatura*, dat je pregled literature korišćene pri izradi disertacije.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Poslednjih decenija energetskom sektoru posvećena je velika pažnja. Poseban akcenat dat je na razvoj novih tehnologija za proizvodnju energije u okviru kojih se javlja i koncept vodonične energije, a u čiju oblast spada i ova disertacija. Intenzivno se razvijaju sistemi koji koriste alkalne elektrolizere povezane sa gorivnim ćelijama u cilju dobijanja električne i toplotne energije. Najperspektivniji način dobijanja vodonika na ovom stupnju razvoja tehnologije predstavlja elektroliza vode u solarno-vodoničnoj sprezi, a debalans između termodinamički neophodnog minimuma energetskog ulaganja i stvarne potrošnje pri konačnim gustinama struje, moguće je smanjiti jedino elektrokatalizom i savršenstvom u razvoju elektrokatalizatora. Originalnost ove doktorske disertacije ogleda se u kombinaciji trokomponentnih sistema jonskih aktivatora (Ni, Co, Cu, Zn i Mo) dodavanih *in situ* u standardni rastvor elektrolita, njihov uticaj na energetsku efikasnost i elektrohemijske performanse elektrode. Novija teorijska istraživanja pokazala su da razvoj novih elektrokatalitičkih materijala na bazi kombinacije različitih d-metala dodavanih *in situ* u rastvor elektrolita utiču na smanjenje nadnapona na elektrodama što doprinosi povećanju efikasnosti ovog procesa.

U ovoj doktorskoj disertaciji su predstavljeni rezultati uticaja trokomponentnih jonskih aktivatora dodavanih *in situ* u rastvor 6M KOH na reakciju izdvajanja vodonika i energetsku efikasnost alkalnih elektrolizera. Nastali depoziti na elektrodi pokazuju veću aktivnost u odnosu na pojedinačne metale, ali i u odnosu na aktivnost plementih metala, koji su se pokazali kao najbolji katalizatori za ovu reakciju. Elektrode prevlake dobijene *in situ* taloženjem trokomponentnih sistema pokazuju veću aktivnost za reakciju izdvajanja vodonika u odnosu na čiste elektrode, a utvrđeno je i da aktivnost ovih elektroda zavisi od koncentracije elektroaktivnih vrsta, gustina struje taloženja i temperatura. Uspostavljen je matematički model laboratorijskog elektrolizera, na osnovu Ullebergovih jednačina i fundamentalnih elektrohemijskih, termodinamičkih i električnih jednačina, a zatim uradjena analiza njegovog rada primenom modela, što doprinosi predviđanju naponskih karakteristika ćelije pri različitim strujama i temperaturama. Smatra se da dobijeni matematički model za laboratorijski alkalni elektrolizer treba da prati dobijene eksperimentalne podatke. Analizom termičkog modela prikazan je temperaturni trend u laboratorijskom elektrolizeru usled zadatog napona i temperature. Toplota generisana u sistemu je manja u slučaju korišćenja jonskih aktivatora na bazi trokomponentnog sistema NiCoMo. Mogućnošću integracije razmenjivača toplote (pločasto dobošasti i lemljeni razmenjivač toplote) u sistem alkalni elektrolizer-gorivna ćelija prikazano je iskorišćenje energije sistema i očuvanje toplote unutar sistema. Kao jedno od rešenja ponuđeno je i korišćenje Rankinovog ciklusa sa organskim fluidima, s obzirom na to da se radi o potencijalnom toplotnom rezervoaru na temperaturama od oko 343 K, a u cilju rekuperacije otpadne toplote.

Savremenost i originalnost istraživanja ove doktorske disertacije potvrđeni su objavljivanjem rezultata disertacije kroz više radova u istaknutim međunarodnim časopisima i saopštenjima sa skupova od nacionalnog i međunarodnog značaja.

3.2.Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

Tokom izrade doktorske disertacije kandidat je izvršio pregled naučne i stručne literature iz relevantnih naučnih oblasti vezanih za problematiku koja se u disertaciji obrađuje, u kojima su teorijski i eksperimentalno proučavana i analizirana svojstva, postupci sinteze i karakterizacija katodnih depozita, sa posebnim osvrtom na kombinaciju kompleksa d-metalna sa solima molibdena. Literaturni navodi predstavljaju istraživanja iz navedene problematike mnogih autora, analizu i diskusiju dobijenih rezultata i izvedene zaključke.

Takođe, u listi referenci su i radovi kandidata koji su proistekli iz sprovedenih istraživanja u oblasti doktorske disertacije, a objavljeni su u časopisima međunarodnog značaja.

Na osnovu pregleda korišćene literature i obrazloženja predložene teme doktorske disertacije, proizilazi da je kandidat adekvatno ovladao predmetnom oblasti istraživanja i da je detaljno upoznat sa aktuelnim stanjem istraživanja u oblasti.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U postupku realizacije naučnih rezultata, odnosno predmeta i cilja istraživanja, kao i da bi se potvrdile postavljene hipoteze, tokom izrade ove doktorske disertacije korišćene su elektrohemijske analitičke metode ispitivanja elektrodnih reakcija: linearna voltametrija i elektrohemijska impedansna spektroskopija. Neelektrohemijske metode koje su korišćene za ispitivanje morfologije i topografije elektrodnih površina su skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) i profilometrija. U svim eksperimentima, bez obzira na metodu koja se primenjuje, neophodna je kontrola merenog potencijala kao i zadavane struje u ćeliji. Kako bi rezultati bili što precizniji moraju da se poštuju principi o konstrukciji ćelije, kao i osobine elektrode i elektrolita. Radi smanjenja troškova i povećanja performansi elektroda korišćen je troškovno efikasan i tehnološki pojednostavljen proces: *in situ* elektrodna aktivacija elektrode koja se postiže rastvaranjem supstanci direktno u elektrolitu tokom procesa proizvodnje vodonika. U ovom slučaju, efikasnost procesa će zavisiti od koncentracionih vrsta u rastvoru i od zadavanih vrednosti temperatura i gustina struja. Energetske promene u sistemu i elektrohemijski procesi koji se odvijaju u alkalnom elektrolizeru su osnove analize matematičkog modela u softverskom paketu „MatLab”. Dobijanje ovakvog modela služi da poboljša praćenje parametara tokom procesa i da predvidi osetljivost sistema na određene promene. Odlično slaganje eksperimentalnih rezultata sa vrednostima izračunatim iz parametara dobijenih pri njihovom korelisanju pozitivno ocenjuje odabrane jednačine modela za obradu podataka prikazane u disertaciji. Analizom sistema povezivanja alkalnog elektrolizera sa gorivnom ćelijom, utvrđivanjem i analizom mogućnosti rekuperacije toplote, optimizacijom rada razmenjivača toplote, kao i utvrđivanjem njegovog uticaja na iskorišćenje energije u sistemu doprinosi uspešnoj energetskoj efikasnosti celokupnog procesa uz korišćenje Rankinovog ciklusa sa organskim fluidima (ORC), s obzirom na to da se radi o temperatnim izvorima od oko 343 K.

3.4.Primljenljivost ostvarenih rezultata

Rezultati prikazani u ovoj doktorskoj disertaciji su veoma primenljivi, kako na polju industrijske primene trokomponentnih elektrokatalizatora u alkalnim elektrolizerima na uslovima rada pri povišenim temperaturama i gustinama struje, tako i na polju upotrebe ovakvih alkalnih elektrolizera u sinergiji sa gorivnim ćelijama i sistemima za rekuperaciju toplote u cilju decentralizovanog snabdevanja električnom energijom i toplotom. Predstavljanjem upotrebe Ullebergovih jednačina i fundamentalnih elektrohemijskih, termodinamičkih i električnih jednačina dolazi do predviđanja naponskih karakteristika ćelije pri različitim uslovima (strujama i temperaturama) uz korišćenje trokomponentnih jonskih aktivatora i osnovnog elektrolita.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat Slađana Lj. Maslovara, master inž. tehnologije, je tokom izrade doktorske disertacije ovladao pronalaženjem i korišćenjem stručne literature; iskazao je izuzetnu stručnost u planiranju i realizaciji eksperimenata; ovladao je korišćenjem različitih tehnika elektrohemijske karakterizacije kompozitnih materijala kao elektrokatalizatora, i veoma spremno pristupio sistematizaciji, analizi i tumačenju dobijenih eksperimentalnih rezultata, kao i iznošenju zaključaka. Kandidat poseduje sve kvalitete koji su neophodni za samostalni naučni rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Doktorska disertacija kandidata Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije pod naslovom: “Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera“ pruža značajan naučni doprinos u okviru elektrohemijske karakterizacije trokomponentnih jonskih aktivatora pri različitim uslovima (gustinama struje i temperaturama), kao i u oblasti upotrebe matematičkog modela radi predviđanja naponskih i temperaturnih karakteristika alkalnog elektrolizera, pri čemu se naučni doprinos rezultata istraživanja ogleda u:

- Ustanovljen je uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na potrošnju energije u alkalnom elektrolizeru industrijskim uslovima;
- Određen je uticaja aktiviranog sistema *in situ* dodatih trokomponentnih jonskih aktivatora na kinetiku i mehanizam reakcije izdvajanja vodonika u novim experimentalnim uslovima;
- Poboljšanju aktivnost trokomponentnih jonskih aktivatora, pri njihovoj upotrebi kao katalitički materijali;
- Uspostavljeno konstrukcijsko rešenje laboratorijskog alkalnog elektrolizera za efikasno dobijanje vodonika;
- Uspostavljen model koji se može koristiti u predviđanju ponašanja napona elektrolitičke ćelije pri različitim strujama i temperaturama.
- Primena analize fundamentalnog aspekta korelacije trendova katalitičke aktivnosti trokomponentnih aktivatora sa sopstvenim svojstvima materijala.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Ova doktorska disertacija sadrži opis primene trokomponentnih jonskih aktivatora kao elektrokatalizatora u alkalnom elektrolizuru dodavanih *in situ* u rastvor standardnog elektrolita na povišenim temperaturama i gustinama struje. Uspešnom karakterizacijom i određivanjem

svojstva trokomponentnih sistema baziranih na niklu, kobaltu, bakru, cinku i molibdenu ukazuje se na njihovu potencijalnu primenu i u većim sistemima i mogućnost izgradnje *scale up* sistema sa korišćenjem ovih d-metala u cilju povećanja energetske efikasnosti elektrolitičkog procesa. S obzirom da se pri alkalnoj elektrolizi troši velika količina energije po jedinici mase izdvojenog vodonika, to je relativno skupa metoda i kako bi se ona učinila i ekonomski prihvatljivijom, poboljšanja koja vode povećanju energetske efikasnosti elektrolitičkog procesa, odnosno sniženju energije potrebne za izdvajanje vodonika su upravo adekvatan izbor elektrokatalizatora. Primenom matematičkog modela po Ullebergovim jednačinama dobija se uvid u naponske karakteristike aktiviranog i neaktiviranog sistema u laboratorijskom alkalnom elektrolizeru na različitim temperaturama i na osnovu dobijenih parametara upoređuje se slaganje modela sa eksperimentalnim podacima. Mogućnost povezivanja alkalnog elektrolizera sa pločasto dobošastim razmenjivačem toplote i iskorišćenjem energije unutar sistema pomoću Rankinovog ciklusa sa organskim fluidima s obzirom da se radi na temperaturama gde je primeljav ovakav vid izračunavana toplote.

Dobijeni rezultati ostvaruju nove mogućnosti u pravcu projektovanja *scale up* sistema alkalnog elektrolizera sa aktiviranim elektrodama sa trokomponentnim elektrokatalizatorima i povezivanje sa PEM gorivnim ćelijama do 5kW u cilju pravljenja sistema decentralizovanog snabdevanja električnom energijom, kao nastavka predmetne problematike. Stoga, ova teza predstavlja sveobuhvatan naučno-istraživački rad.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Kandidat Slađana Lj. Maslovara, master inž. tehnologije, je u svom istraživačkom radu vezanom za doktorsku disertaciju pod naslovom „Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera”, objavila dva rada u vrhunskim međunarodnim časopisima (M21) na kojima je prvi autor i četiri saopštenja sa skupova, čime je verifikovala naučni doprinos svoje doktorske teze.

SPISAK OBJAVLJENIH NAUČNIH RADOVA KOJI ČINE DEO TEZE:

Radovi u vrhunskim međunarodnim časopisima (M21)

1. **S. Maslovara**, S. Miulović, M. Marčeta Kaninski, G. Tasić, V. Nikolić, Energy consumption of the electrolytic hydrogen production using Zn-Co-Mo based activators– Part I, Applied Catalysis A, 451(2013)216-219; IF 3.674; ISSN: 0926-860X.
2. **S. Maslovara**, M. Marčeta Kaninski, I. Perović, P. Laušević, G. Tasić, B. Radak, V. Nikolić, Novel ternary Ni-Co-Mo based ionic activator for efficient alkaline water electrolysis, International Journal of Hydrogen Energy, 38(2013)15928-15933; IF 2.930; ISSN: 0360-3199.

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (M34)

1. **Slađana Lj. Maslovara**, Snezana M. Miulovic, Milica P. Marceta Kaninski, Ivana M. Perovic, Gvozden S. Tasic, Dragana L. Zugic, Vladimir M. Nikolic, *Energy Consumption of the Alkaline Electrolyser using Zn-Co-Mo Electrocatalyst for Hydrogen Evolution Activity*, Summer School on Electrochemistry for

- Environmental and Biomedical Applications, 17-21 June 2013., Cluj-Napoca, Romania, Book Abstracts, p. 44.
2. Snezana M. Miulovic, **Sladjana Lj. Maslovara**, Ivana M. Perovic, Dragana L. Zugic, Gvozden S. Tasic, Vladimir M. Nikolic, Milica P. Marceta Kaninski, *Alkaline Electrolysis- Lowering the Energy Consumption of Hydrogen Production by using Co-Cr based Ionic Activators*, Summer School on Electrochemistry for Environmental and Biomedical Applications, 17-21 June 2013., Cluj-Napoca, Romania, Book Abstracts, p. 46
 3. Dragana Vasic Anicijevic, **Sladjana Maslovara**, Vladimir Nikolic, Milica Marceta Kaninski, *Improved HER Activity of Ni Cathode Activated By NiCoMo Ionic Activators – A DFT Aspect*, 2nd International Meeting on Materials Science for Energy Related Applications, September 29-30, 2016, Belgrade, Book Abstracts, p.
 4. **Sladana Lj. Maslovara**, Dragana D. Vasić Anićijević, Dragana L. Žugić, Milica P. Marčeta Kaninski, Vladimir M. Nikolić, *Influence of in situ addition of different combinations of d-metals on electrolytic hydrogen production in alkaline electrolyzer*, Fifteenth Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering, December 7-9, 2016, Belgrade, Book Abstracts, p. 59

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu svega iznetog, Komisija smatra da doktorska disertacija Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije, pod naslovom „Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera” predstavlja originalan i značajan naučni doprinos u oblasti Tehnološko inženjerstvo, odnosno užoj naučnoj oblasti Hemijsko inženjerstvo, što je potvrđeno objavljivanjem radova u relevantnim časopisima međunarodnog značaja i saopštenjima na međunarodnim konferencijama.

Na osnovu kvaliteta, obima i naučnog doprinosa postignutih rezultata, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, da se doktorska disertacija kandidata Slađane Lj. Maslovara, master inž. tehnologije, pod naslovom „Uticaj trokomponentnih jonskih aktivatora na povećanje energetske efikasnosti alkalnog elektrolizera” prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu i da nakon završetka procedure pozove kandidata na usmenu odbranu disertacije pred Komisijom u istom sastavu.

U Beogradu, 19.12.2016. godine.

ČLANOVI KOMISIJE

Prof. Dr Mirjana Kijevčanin, redovni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Milica Marčeta Kaninski, naučni savetnik
Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Prof. Dr Ivona Radović, vanredni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Vladimir Nikolić, viši naučni saradnik
Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Dr Gvozden Tasić, naučni saradnik
Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“