

## УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ – ФАКУЛТЕТ ЗА ФИЗИЧКУ ХЕМИЈУ НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

На VIII редовној седници Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду, одржаној 16.07.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације мастер физикохемичара Снежане Брковић под насловом: „**Испитивање нестехиометријских оксида и карбида волфрама као адитива и носача анодних катализатора за горивне ћелије са протонски проводном мембраном**“. Израда докторске дисертације под наведеним насловом одобрена је одлуком Наставно-научног већа са IX редовне седнице од 13.06.2019. године. На основу те одлуке, Веће научних области природних наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 30.04.2020. године дало сагласност да се прихвати предложена тема докторске дисертације. На основу прегледа и анализе докторске дисертације, подносимо Наставном-научном већу следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### А. Приказ садржаја дисертације

Докторска дисертација Снежане Брковић написана је на 107 страна куцаног текста према Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду и садржи следеће делове: насловне странице на српском и енглеском језику (2 стране), страницу са информацијама о менторима и члановима комисије (1 страна), захвалницу (1 страна), странице са подацима о докторској дисертацији на српском и енглеском језику (2 стране), садржај (2 стране). Текст рада по поглављима је подељен на **Увод** (1 страна), **Теоријски део** (24 стране), **Циљ истраживања** (1 страна), **Експериментални део** (10 страна), **Резултати и дискусија** (42 стране), **Закључци** (4 стране) и **Литература** (200 навода, 12 страна). Кандидат је уз текст дисертације приложио Биографију и изјаве прописане од стране Универзитета. Дисертација садржи укупно 54 слике и 20 табела, од којих 41 слика и 12 табела приказују резултате истраживања кандидата.

У делу **Увод** описани су општи проблеми који настају као последица примене фосилних горива и значај примене обновљивих извора енергије и технологија које користе те изворе, а пре свега горивне ћелија са протонски проводном мембраном, које су и предмет истраживања ове дисертације. Такође, у овом делу је наглашен и циљ истраживања.

Поглавље **Теоријски део** подељен је на пет целина. У првој целини описани су извори енергије – фосилна горива и обновљиви извори енергије. Представљен је проблем и мана коришћења фосилних горива и предност употребе обновљивих извора енергије. У другој целини приказан је значај и улога водоника као потенцијалног горива. У трећој целини описане су горивне ћелије, њихов развој и подела. У четвртој целини описане су горивне ћелије са протонски проводном мембраном (ПЕМ горивне ћелије), њихове компоненте и својства тих компоненти. У овом делу описане су и оксидо-редукционе реакције које се одвијају у ПЕМ горивним ћелијама, опште карактеристике и ефикасност горивних ћелија. Такође су описани и анодни катализатори, њихово тровање и толеранција на угљен-моноксид, као и угљенични и неугљенични носачи ових катализатора. У петој целини описана је електрохемијска анализа анодних катализатора коришћењем цикличне волтаметрије и методе ротирајућег диска, као и поларизационе криве ПЕМ горивних ћелија.

У делу **Циљ истраживања** дефинисан је циљ ове докторске дисертације, а он је: развијање нових, ефикасних нестехиометријских оксида и карбида волфрама као носача анодних катализатора базираних на платини (Pt) и платина-рутенијуму (PtRu), за примену у горивним ћелијама са протонски проводном мембраном. У складу са постављеним циљем, истраживање је подељено на три дела. Први део истраживања обухвата синтезу нестехиометријских волфрам-оксида и волфрам-карбид-оксида као носача катализатора и испитивање њихове проводљивости, као и припрему катализатора на бази Pt и PtRu (са синтетисаним носачима) и њихову структурну и морфолошку карактеризацију. Други део истраживања односи се на електрохемијска испитивања комерцијалних и припремљених катализатора цикличном волтаметријом и волтаметријом на ротирајућој диск електроди уз коришћење  $\text{H}_2/\text{O}_2$  и  $\text{H}_2+\text{CO}/\text{O}_2$  гасова. Трећи део истраживања односи се на припрему мембранско електродних склопова (МЕА и полу-МЕА) са комерцијалним и припремљеним анодним катализаторима и њихово тестирање у полућелији и јединичним ПЕМ горивним ћелијама. Посебна пажња је посвећена испитивању перформанси ПЕМ горивне ћелије на повишеним температурама, уз коришћење реформата као горива, чиме се симулирају реални услови рада јединичне ПЕМ горивне ћелије.

У поглављу **Експериментални део** детаљно су описане све експерименталне процедуре: синтеза носача катализатора, припрема анодних катализатора и мембранско електродних склопова за полу-ћелију (полу-МЕА) и јединичну ПЕМ горивну ћелију (МЕА). Такође, детаљно су описане методе физичкохемијске карактеризације синтетисаних катализатора и њихових носача, електрохемијска испитивања катализатора у класичној троелектродној ћелији и полу-ћелији, као и одређивање перформанси јединичних ПЕМ горивних ћелија.

Поглавље **Резултати и дискусија** подељено је у пет делова у којима су детаљно приказани, објашњени и упоређени са литературним подацима резултати добијени у овој дисертацији. У првом делу приказано је испитивање морфологије и састава припремљених катализатора њихових носача/адитива. У другом делу приказано је испитивање проводљивости носача/адитива катализатора. У трећем делу приказана су електрохемијска испитивања анализираних катализатора коришћењем цикличне волтаметрије и кинетике HOR, као и електрооксидације  $\text{CO}_{\text{ads}}$  и кинетике оксидације водоника у присуству угљен-моноксида. У четвртном делу приказано је испитивање катализатора у полу-ћелији. Пето поглавље приказује резултате добијене испитивањем катализатора у јединичној ПЕМ горивној ћелији, добијене перформансе МЕА са припремљеним катализаторима у присуству чистог водоника као и у присуству смеше водоника и угљен-моноксида као горива. Такође, приказане су и добијене перформансе МЕА са одабраним катализатором тестираног у јединичној ПЕМ горивној ћелији уз симулирање реалних услова рада горивних ћелија.

У делу **Закључци** су сумирани сви закључци изведени на основу резултата приказаних у докторској дисертацији.

У поглављу **Литература** су наведене цитиране референце по редоследу њиховог појављивања.

## **Б. Опис резултата дисертације**

Циљ ове дисертације био је синтеза нестехиометријских оксида и карбида волфрама као носача и адитива анодних катализатора базираних на платини (Pt) и платина-рутенијуму (PtRu), за примену у горивним ћелијама са протонски проводном мембраном. Синтетисана су два носача анодних катализатора: нестехиометријски волфрам-оксид ( $\text{WO}_x$ ) и нестехиометријски волфрам-карбид-оксид ( $\text{W}_x\text{C}_y\text{O}_z$ ). Коришћењем ових носача припремљени су катализатори базирани на платини (Pt) и платина-рутенијуму (PtRu). Најпре је урађена физичкохемијска карактеризација

припремљених катализатора и њихових носача/адитива - XRPD анализом одређен је фазни састав, SEM анализом морфологија, EDS анализом елементарни састав и LCR метром електрична проводљивост. Нестехиометријски волфрам-оксид добијен је као прах лимун жуте боје доминантно састављен од  $WO_3$  и мањег удела  $WO_2$ , fine слојевите структуре са микро и мезо порама и јако великом електричном отпорношћу. Нестехиометријски волфрам-карбид-оксид је добијен у виду праха црне боје, велике електричне проводљивости, са микро и мезо порама, састављен од WC фаза сферног облика прекривених fino распоређеним фазама  $WO_x$  и W. Припремљени катализатори добијени су у виду праха црне боје, са фином расподелом Pt и PtRu по  $WO_x$  и  $W_xC_yO_z$  носачима са локалним агломерацијама.

Сви припремљени катализатори, као и комерцијални, тестирани су електрохемијским методама. Цикличном волтаметријом показано је постојање већег или мањег одступања у понашању синтетисаних катализатора у односу на катализаторе који већ имају комерцијалну примену. Волтаметријом на ротирајућој диск електроди показано је да се дифузиона гранична струја оксидације водоника достиже врло брзо (на наднапонима од око 60-70 mV) и да је она константна у широкој области потенцијала који одговарају анодним потенцијалима активне ПЕМ горивне ћелије. Анализом кинетике оксидације водоника добијене су вредности кинетичке густине струје и масене активне свих анализираних катализатора.

С обзиром да је јако битно да катализатори за ПЕМ горивне ћелије буду толерантни на присуство угљен-моноксида у гориву, сви анализирани катализатори тестирани су у атмосфери водоника са примесама CO (98%  $H_2$  + 2% CO). Методом електрооксидације адсорбованог CO испитивана је толеранција катализатора на CO. Примећена је значајна разлика у понашању синтетисаних у односу на комерцијалне катализаторе, посебно у области високих потенцијала у којима долази до чишћења електрода од  $CO_{ads}$ . Струјни максимуми оксидације  $CO_{ads}$  углавном су померени ка негативнијим потенцијалима у односу на комерцијалне катализаторе за 10 mV до 120 mV. Ово олакшано уклањање  $CO_{ads}$  приписује се електронском ефекту носача који утиче на хемисорпциона својства Pt односно PtRu честица у синтетисаним катализаторима. Кинетика оксидације водоника у присуству угљен-моноксида даје више информација о слободним активним местима на Pt за оксидацију водоника. На кривама оксидације водоника, за већину катализатора, уочавају се по три области потенцијала. У области ниских потенцијала ( $E < 0,3$  V vs. RHE), код катализатора базираних на Pt и  $WO_x$  носачу/адитиву, уочавају се мале, константне струје које указују да или не постоји прогресивно уклањање адсорбованог CO са површине катализатора или се мала количина уклоњеног  $CO_{ads}$  надокнађује адсорпцијом нових CO из електролита. Са друге стране, код катализатора на бази PtRu на носачима  $WO_x$  и  $W_xC_yO_z$ , у овој области потенцијала бележи се раст струје у целом опсегу и овакво понашање се објашњава донацијом OH са  $WO_x$  фазе ( $WO_x$  и  $W_xC_yO_z$  носача) за оксидацију  $CO_{ads}$  на контакту фаза PtRu и носача. Друга област је област средњих потенцијала (0,3 V – 0,5V vs. RHE) у којој долази до раста струје са порастом потенцијала као последица постојања стабилне  $H_yWO_x$  фазе која обезбеђује OH за уклањање  $CO_{ads}$ . Трећа област је област високих потенцијала ( $E > 0,5$  V vs. RHE) у којој постоји активно уклањање  $CO_{ads}$  које потиче од настајања Pt-OH<sub>ads</sub> (односно Ru-OH<sub>ads</sub>) без обзира на присуство фаза  $WO_x$  из носача ( $WO_x$ , односно  $W_xC_yO_z$ ). Додатна олакшана оксидација  $CO_{ads}$  код синтетисаних катализатора, објашњава се постојањем „чистих“ Pt места за формирање OH<sub>ads</sub> у простору између наночестица и носача/адитива (која настају на ниским потенцијалима) за оксидују  $CO_{ads}$  на високим потенцијалима. Поређењем потенцијала десорпције  $CO_{ads}$ , потенцијала почетка оксидације  $CO_{ads}$  и кинетичке струје у присуству CO (свих испитиваних катализатора) потврђује се да су на тровање угљен-моноксидом најтолерантнији катализатори на бази PtRu и то: 30% PtRu/ $WO_x$ -C и 30% PtRu/ $W_xC_yO_z$  катализатори.

За испитивање толеранције катализатора на CO при дужој временској изложености угљен-моноксиду, тестиране су полу-МЕА са синтетисаним 30% PtRu/WO<sub>x</sub>-C и 30% PtRu/W<sub>x</sub>C<sub>y</sub>O<sub>z</sub> катализаторима, као и комерцијалним 30% PtRu/C катализатором, у полу-ћелији. Још једном је показано да су синтетисани катализатори, и при дужој изложености угљен-моноксиду, толерантнији на присуство CO у гориву у односу на комерцијални катализатор.

Сви припремљени, као и комерцијални катализатори тестирани су у јединичној ПЕМ горивној ћелији. Припремљени катализатори коришћени су као анодни катализатори, док је комерцијални 40% Pt/C катализатор коришћен као катодни катализатор при припреми мембранско електродног склопа (МЕА) за тестирање у ПЕМ горивној ћелији. Перформансе су испитиване при различитим радним условима: H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>+CO/ваздух, реформат/ваздух и на различитим температурама. Најбоље перформансе даје ПЕМ горивна ћелија са анодним 30% PtRu/W<sub>x</sub>C<sub>y</sub>O<sub>z</sub> катализатором, која на 70°C има ~40% већу искоришћеност Pt у односу на комерцијални катализатор. Већа искоришћеност имплицира могуће смањење количине Pt, а тиме и нижу цену ПЕМ горивне ћелије. На основу добијених резултата може се рећи да би 30% PtRu/W<sub>x</sub>C<sub>y</sub>O<sub>z</sub> катализатор могао бити добар кандидат за комерцијалну примену и замена за коришћење Pt/C катализатора.

## **В. Упоредна анализа резултата дисертације са подацима из литературе**

Катализатори у ПЕМ горивним ћелијама морају бити од племенитих метала како би се постигла добра хемијска кинетика у условима рада горивне ћелије на ниским температурама. С обзиром да су племенити метали прилично скупи и да цена катализатора чини чак 40-50% укупне цене горивне ћелије, тежи се да се они делимично или потпуно замене јефтинијим материјалима или да се њихова количина у мембранско електродном склопу смањи. Најчешће коришћени катализатор у ПЕМ горивним ћелијама је платина на угљенику (Pt/C). Прве количине платинског катализатора које су се користиле за електроде у горивним ћелијама биле су велике, око 28 mg платине по cm<sup>2</sup> електроде, док касних деведесетих година XX века те количине су знатно редуковане - на око 0,3 - 0,4 mg<sub>Pt</sub> cm<sup>-2</sup> [1]. Међутим, те количине су и даље прилично економски неисплативе, тако да су у оквиру ове дисертације тестиране јединичне ПЕМ горивне ћелије (са припремљеним катализаторима) са 0,2 mg платине по cm<sup>2</sup> електроде.

Најчешће коришћено гориво за ПЕМ горивне ћелије добија се реформисањем угљоводоника (природног гаса, метанола) воденом паром. Добијена смеша, реформат, у свом саставу поред водоника садржи: угљен-диоксид, угљен-моноксид као и део неизреагованих угљоводоника. Угљен-моноксид се лако адсорбује на површини платине и на тај начин смањује број активних места за адсорпцију и оксидацију водоника [2]. Како би се постигла боља CO толеранција анодних катализатора, Pt се легира са другим металом (бинарни катализатори) или са више метала (терцијални или квартерални катализатори) који су толерантнији на присуство CO у горивну од саме платине. Велики број експеримената потврдио је да катализатори на бази Pt/Ru имају знатно већу CO толеранцију при раду горивне ћелије на 80°C у односу на Pt-катализаторе, [3]. Легирањем платине са рутенијумом умањује се стабилност везивања CO на површини катализатора због нарушавања електронских својстава чистог метала другим металом [4]. У оквиру ове дисертације испитивани су катализатори на бази Pt и PtRu и још једном је потврђена знатно већа толеранција PtRu-катализатора у односу на Pt-катализаторе.

Најчешће коришћени носач катализатора за ПЕМ горивне ћелије је угљеник који има велику електричну проводљивост, релативно велику хемијску и електрохемијску стабилност, велику специфичну површину и порозност, као и приступачну цену. Међутим, при радним условима ПЕМ горивне ћелије може доћи до корозије угљеничних носача. Бројни експерименти потврдили су да током рада горивне ћелије са катализаторима на бази угљеничних носача

долази до корозије која изазива растварање, агломерацију и одвајање наночестица метала. Деградација угљеничних носача смањује каталитичку активност катализатора и тиме узрокује лоше перформансе ПЕМ горивних ћелија [5]. Ово је подстакло интензивна истраживања ка развоју не-угљеничних носача катализатора на бази оксида [6], карбида [7], као и нитрида, борида, проводних полимера и других, отпорних на корозију. У оквиру ове докторске дисертације синтетисани су и испитивани нестехиометријски волфрам-оксид ( $WO_x$ ) и волфрам-карбид-оксид ( $W_xC_yO_z$ ) као носачи анодних катализатора. Волфрам-оксид поред тога што је отпорнији на корозију, побољшава и активност за оксидацију отрова као што је CO код Pt- $WO_3$  електрода у односу на угљеничне електроде [8]. Волфрам-карбид-оксид је хибрид кога чине волфрам-оксидне и волфрам-карбидне фазе сабране у једну целину дајући карактеристике новог побољшаног носача катализатора. Познато је да: (i) су оксиди и карбиди метала стабилнији од угљеника и могу заштити угљеничне материјале од корозије [9], (ii) такође, оксиди и карбиди метала јаком интеракцијом (која постоји између њих и наночестица метала) могу стабилисати наночестице метала [10], као и то да су (iii) метални оксиди углавном хидрофилни и могу помоћи при регулацији воде у горивним ћелијама. Коришћењем нестехиометријских  $WO_x$  и  $W_xC_yO_z$  носача припремљени су катализатори базирани на Pt и PtRu. Припремљени катализатори тестирани су као анодни катализатори у јединичној ПЕМ горивној ћелији. Показано је да синтетисани нестехиометријски носачи доприносе побољшању отпорности катализатора на CO тровање. Додавањем рутенијума платини при припреми катализатора са синтетисаним  $WO_x$  и  $W_xC_yO_z$  носачима, додатно је побољшана CO толеранција у односу на катализаторе базирани на Pt и носачима ( $WO_x$  и  $W_xC_yO_z$ ) катализатора. Већа CO толеранција омогућује активније уклањање адсорбованог CO са Pt наночестица чиме се повећава активност за оксидацију водоника, а самим тим побољшавају се и перформансе ПЕМ горивних ћелија.

- [1] F. Barbir, PEM fuel cells: Theory and practice, Second Ed., Elsevier, 2012.
- [2] X. Cheng, Z. Shi, N. Glass, L. Zhang, J. Zhang, D. Song, Z.S. Liu, H. Wang, J. Shen, A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation, *J. Power Sources* **165** (2007) 739–756
- [3] T.R. Ralph, M.P. Hogarth, Catalysis for Low Temperature Fuel Cells part II: The Anode Challenges, *Platin. Mater. Rev.* **46** (2002) 117–135
- [4] L. Giorgi, A. Pozio, C. Bracchini, R. Giorgi, S. Turtù,  $H_2$  and  $H_2/CO$  oxidation mechanism on Pt/C, Ru/C and Pt-Ru/C electrocatalysts, *J. Appl. Electrochem.* **31** (2001) 325–334
- [5] L. Castanheira, L. Dubau, M. Mermoux, G. Berthomé, N. Caqué, E. Rossinot, M. Chatenet, F. Maillard, Carbon corrosion in proton-exchange membrane fuel cells: From model experiments to real-life operation in membrane electrode assemblies, *ACS Catal.* **4** (2014) 2258–2267
- [6] S.-Y. Huang, P. Ganesan, S. Park, B.N. Popov, Development of a Titanium Dioxide-Supported Platinum Catalyst with Ultrahigh Stability for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Applications, *J. Am. Chem. Soc.* **131** (2009) 13898–13899
- [7] W. Zhu, A. Ignaszak, C. Song, R. Baker, R. Hui, J. Zhang, F. Nan, G. Botton, S. Ye, S. Campbell, Nanocrystalline tungsten carbide (WC) synthesis/characterization and its possible application as a PEM fuel cell catalyst support, *Electrochim. Acta.* **61** (2012) 198–206
- [8] P.K. Shen, A.C.C. Tseung, Anodic Oxidation of Methanol on Pt/ $WO_3$  in Acidic Media, *J. Electrochem. Soc.* **141** (1994) 3082–3090

[9] E. Antolini, Composite materials: An emerging class of fuel cell catalyst supports, *Appl. Catal. B Environ.* **100** (2010) 413–426

[10] R. Kou, Y. Shao, D. Mei, Z. Nie, D. Wang, C. Wang, V. V. Viswanathan, S. Park, I.A. Aksay, Y. Lin, Y. Wang, J. Liu, Stabilization of electrocatalytic metal nanoparticles at metal-metal oxide-graphene triple junction points, *J. Am. Chem. Soc.* **133** (2011) 2541–2547

### Г. Научни радови и саопштења публиковани из резултата дисертације

Из резултата докторске дисертације кандидата Снежане Брковић објављена су два рада у врхунским међународним часописима (M21):

1. **Snežana M. Brković**, Vladimir M. Nikolić, Milica P. Marčeta Kaninski, Igor A. Pašti. *Pt/C catalyst impregnated with tungsten-oxide – Hydrogen Oxidation Reaction vs. CO tolerance*, International Journal of Hydrogen Energy, *Int. J. Hydrogen Energy* **44** (2019) 13364-13372. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.270> (IF2019 = 4.939; Electrochemistry 7/27, Energy & Fuels 30/112)
2. **Snežana M. Brkovic**, Milica P. Marceta Kaninski, Petar Z. Lausevic, Aleksandra B. Saponjic, Aleksandra M. Radulovic, Aleksandra A. Rakic, Igor A. Pasti, Vladimir M. Nikolic, *Non-stoichiometric tungsten-carbide-oxide-supported Pt–Ru anode catalysts for PEM fuel cells – From basic electrochemistry to fuel cell performance*, *Int. J. Hydrogen Energy* **45** (2020) 13929–13938. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.086> (IF2019 = 4.939; Electrochemistry 7/27, Energy & Fuels 30/112)

и два саопштења на међународним скуповима штампана у изводу (M34):

1. **Snežana M. Brković**, Vladimir M. Nikolić, Dragana L. Žugić, Gvozden S. Tasić, Milica P. Marčeta Kaninski, *Investigation of non-stoichiometric tungsten oxide supported Pt and Ru electrocatalysts for increased CO tolerance*, 3rd International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion, 10-12 September 2018., Belgrade, Serbia, p.85.
2. **Snezana M. Brkovic**, Vladimir M. Nikolic, Gvozden S. Tasic, Dragana L. Zugic, Milica P. Marceta Kaninski, *Electrochemical investigation of non-stoichiometric tungsten oxide supported Pt and Ru electrocatalysts for CO tolerance in PEM FC*, 3rd International Meeting on Materials Science for Energy Related Applications, 25-26 September, 2018., Belgrade, Serbia, p.101-102.

### Д. Провера оригиналности докторске дисертације

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма „iThenticate“ којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације „**Испитивање нестехиометријских оксида и карбида волфрама као адитива и носача анодних катализатора за горивне хелије са протонски проводном мембраном**“, дана 20.08.2020, кандидата Снежане Брковић, констатовано је да подударање текста са другим изворима износи **9%**. Овај степен подударности последица је цитата, личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, општих места и података, одређених фраза као и претходно публикованих резултата

истраживања проистеклих из дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду. Комисија сматра да је докторска дисертација Снежане Брковић **у потпуности оригинална**, као и да су **у потпуности поштована академска правила цитирања**.

## **Ђ. Закључак комисије**

На основу изложеног може се закључити да резултати кандидата Снежане Брковић представљају оригиналан и значајан научни допринос у области физичке хемије материјала и електрохемије. Из резултата дисертације кандидата проистекла су два научна рада у врхунским међународним часописима (M21) и два саопштења са међународних скупова штампана у изводу (M34). У складу са наведеним, Комисија сматра да кандидат испуњава услове за прихватање завршене докторске дисертације прописане од стране Универзитета у Београду и услове дефинисане Правилником о изради и оцени докторске дисертације на Факултету за физичку хемију Универзитета у Београду. На основу изложеног Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду да рад Снежане Брковић под насловом **„Испитивање нестехиометријских оксида и карбида волфрама као адитива и носача анодних катализатора за горивне ћелије са протонски проводном мембраном“** прихвати као дисертацију за стицање научног степена доктора физичкохемијских наука и одобри њену јавну одбрану.

Комисија:

**др Игор Пашти**, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Факултет за физичку хемију.

---

**др Владимир Николић**, виши научни сарадник  
Институт за општу и физичку хемију у Београду

---

**др Биљана Шљукић Паунковић**, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Факултет за физичку хемију

---

## Прилог 1. – Комплетна библиографија кандидата

### 1. Радови у међународним часописима изузетних вредности (M21a)

- 1.1. Aleksandar D. Maksic, **Snezana M. Miulovic**, Vladimir M. Nikolic, Ivana M. Perovic, Milica P. Marceta Kaninski, Energy consumption of the electrolytic hydrogen production using Ni–W based activators — Part I, *Applied Catalysis A: General* **405** (2011) 25-28. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.07.017>
- 1.2. Sladjana Lj. Maslovara, **Snezana M Miulovic**, Milica P. Marceta Kaninski, Gvozden S. Tasic, Vladimir M. Nikolic, Energy consumption of the electrolytic hydrogen production using Zn-Co-Mo based activators – Part I, *Applied Catalysis A: General* **451** (2013) 216-219. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2012.09.057>
- 1.3. **Snezana M. Miulovic**, Sladjana Lj. Maslovara, Ivana M. Perovic, Vladimir M. Nikolic, Milica P. Marceta Kaninski, Electrocatalytic activity of ZnCoMo based ionic activators for alkaline hydrogen evolution – Part II, *Applied Catalysis A: General* **451** (2013) 220-226. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2012.09.056>

### 2. Радови у врхунским међународним часописима (M21):

- 2.1. Vladimir M. Nikolić, Gvozden S. Tasić, Aleksandar D. Maksić, Đordje P. Šaponjić, **Snežana M. Miulović**, Milica P. Marčeta Kaninski, Raising efficiency of hydrogen generation from alkaline water electrolysis - Energy saving, *International Journal of Hydrogen Energy* **35** (2010) 12369-12373. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.069>
- 2.2. Milica P. Marceta Kaninski, **Snezana M. Miulovic**, Gvozden S. Tasic, Aleksandar D. Maksic, Vladimir M. Nikolic, A study on the Co-W activated Ni electrodes for the hydrogen production from alkaline water electrolysis - Energy saving, *International Journal of Hydrogen Energy* **36** (2011) 5227-5235. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.046>
- 2.3. **Snezana M. Miulovic**, SladjanaLj. Maslovara, Mina M. Seovic, Bojan B. Radak, Milica P. Marceta Kaninski, Energy saving in electrolytic hydrogen production using Co-Cr activation - Part I, *International Journal of Hydrogen Energy* **37** (2012) 16770-16775. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.075>
- 2.4. Milica P. Marceta Kaninski, Mina M. Seovic, **Snezana M. Miulovic**, Dragana L. Zugic, Gvozden S. Tasic, Djordje P. Saponjic, Cobalt-chrome activation of the nickel electrodes for the HER in alkaline water electrolysis - Part II, *International Journal of Hydrogen Energy* **38** (2013) 1758-1764. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.117>
- 2.5. Sladjana Maslovara, Dragana Vasić Aničijevića, **Snežana Brković**, Jelena Georgijević, Gvozden Tasić, Milica Marčeta Kaninski, Experimental and DFT study of CoCuMo ternary ionic activator for alkaline HER on Ni cathode, *Journal of Electroanalytical Chemistry* **839** (2019) 224–230. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.03.044>
- 2.6. **Snežana M. Brković**, Vladimir M. Nikolić, Milica P. Marčeta Kaninski, Igor A. Pašti. Pt/C catalyst impregnated with tungsten-oxide – Hydrogen Oxidation Reaction vs. CO tolerance, *International Journal of Hydrogen Energy* **44** (2019) 13364-13372. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.270>
- 2.7. **Snežana M. Brkovic**, Milica P. Marceta Kaninski, Petar Z. Lausevic, Aleksandra B. Saponjic, Aleksandra M. Radulovic, Aleksandra A. Rakic, Igor A. Pašti, Vladimir M. Nikolic, Non-



stoichiometric tungsten-carbide-oxide-supported Pt–Ru anode catalysts for PEM fuel cells – From basic electrochemistry to fuel cell performance, *International Journal of Hydrogen Energy* **45** (2020) 13929–13938. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.086>

### 3. Радови у међународним часописима (M23):

- 3.1. **Snezana M. Miulovic**, Vladimir M. Nikolic, Petar Z. Lausevic, Danka D. Acimovic, Gvozden S. Tasic, Milica P. Marceta Kaninski, Electrochemistry of cobalt ethylenediamine complexes at high pH, *Journal of the Serbian Chemical Society* **80** (2015) 1515-1527. <https://doi.org/10.2298/JSC150327079M>
- 3.2. Dragana Vasic Anicijevic, Ivana Perovic, Sladjana Maslovara, **Snezana Brkovic**, Dragana Zugic, Zoran Lausevic, Milica Marceta Kaninski, Ab initio study of graphene interaction with O<sub>2</sub>, O and O<sup>-</sup>, *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering* **35** (2016) 271-274. <https://doi.org/10.20450/mjcc.2016.1038>

### 4. Саопштења са међународних скупова штампаних у целини (M33):

- 4.1. Gvozden S. Tasic, Petar Z. Lausevic, Ivana M. Perovic, **Snezana M. Miulovic**, Vladimir M. Nikolic, Milica P. Marceta Kaninski, *Independent power and energy sources for military applications*, 6th International scientific conference on defensive technologies, ОТЕН 2014, 9 – 10 October 2014, Belgrade, Serbia, Proceedings, p. 749-51.

### 5. Саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (M34):

- 5.1. **Snezana M. Miulovic**, Vladimir M. Nikolic, Gvozden S. Tasic, Aleksandar D. Maksic, Milica P. Marceta Kaninski, *A study of the Co-W activated Ni cathodes for hydrogen generation*, International Conference on Hydrogen Production, 19-22 June 2011., Thessaloniki, Greece, Book of Abstracts, 208ELE.
- 5.2. Aleksandar D. Maksic, Gvozden S. Tasic, Vladimir M. Nikolic, Djordje P. Saponjic, **Snezana M. Miulovic**, Milica P. Marceta Kaninski, *Raising efficiency of hydrogen production via alkaline water electrolysis*, International Conference on Hydrogen Production, 19-22 June 2011., Thessaloniki, Greece, Book of Abstracts, 201ELE.
- 5.3. Djordje P. Saponjic, Vladimir M. Nikolic, **Snezana M. Miulovic**, Gvozden S. Tasic, Milica P. Marceta Kaninski, *Stability of the Ni-Mo based cathode for the alkaline hydrogen production*, International Conference on Hydrogen Production, 19-22 June 2011., Thessaloniki, Greece, Book of Abstracts, 207ELE.
- 5.4. Marijana M. Tasic, Milica P. Marceta Kaninski, Gvozden S. Tasic, Djordje P. Saponjic, **Snezana M. Miulovic**, Vladimir M. Nikolic, *Ni-W alloys electrodeposited on a Ni substrate electrode - electrodeposition vs. in situ activation for hydrogen production via alkaline electrolysis*, International Conference on Hydrogen Production, 19-22 June 2011., Thessaloniki, Greece, Book of Abstracts, 190ELE.
- 5.5. **Snezana M. Miulovic**, Milica P. Marceta Kaninski, Vladimir M. Nikolic, Gvozden S. Tasic, Aleksandar D. Maksic, *A study of the Co-W activated Ni cathodes for hydrogen generation*, 10<sup>th</sup> International Conference on Catalysis in Membrane Reactors, Saint-Petersburg, Russia, 20-24 June 2011., Book of Abstracts, p. 18152-53.

- 5.6. **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, Poster Book Abstracts, p. 46.
- 5.7. 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, Poster Book Abstracts, p. 44.
- 5.8. Ivana M. Perovic, Sladjana Lj. Maslovara, Petar Z. Lausevic, Vladimir M. Nikolic, **Snezana M. Miulovic**, Danka D. Acimovic, Milica P. Marceta Kaninski, *Non-stoichiometric tungsten oxide based low platinum electrocatalysts for increase CO tolerance in PEM FC*, Workshop on Medium Temperature PEM FC – Materials, Stacks and Systems, 2-3 December 2014, Freiburg, Germany.
- 5.9. Milica P Marceta Kaninski, **Snezana M Brkovic**, Ivana M Perovic, Petar Z Lausevic, Igor A Pasti, Djordje P Saponjic, Vladimir M Nikolic, *Low Platinum Content Catalyst on the Non-Stoichiometric Tungsten Oxide Based Catalyst Support for the Increased CO Tolerance in PEMFC*, 230<sup>th</sup> The Electrochemical Society Meeting, October 2-7, 2016, Honolulu, Hawaii, Meeting Abstracts 2016-02, 2630, ISBN: 978-1-5108-3342-5
- 5.10. Milica P Marceta Kaninski, **Snezana M Brkovic**, Ivana M Perovic, Petar Z Lausevic, Djordje P Saponjic, Igor A Pasti, Vladimir M Nikolic, *Hydrogen Oxidation Reaction Activity of RuO<sub>2</sub> Nanosheets Modified Pt–Ru/C*, 230<sup>th</sup> The Electrochemical Society Meeting, October 2-7, 2016, Honolulu, Hawaii, Meeting Abstracts 2016-02, 2631, ISBN: 978-1-5108-3342-5
- 5.11. **Snežana M. Brković**, Vladimir M. Nikolić, Dragana L. Žugić, Gvozden S. Tasić, Milica P. Marčeta Kaninski, *Investigation of non-stoichiometric tungsten oxide supported Pt and Ru electrocatalysts for increased CO tolerance*, 3rd International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion, 10-12 September 2018., Belgrade, Serbia, p.85.
- 5.12. Aleksandra Šaponjić, Dragana Žugić, Milena Pijović, **Snežana Brković**, Đorđe Šaponjić, Vladimir Nikolić, Maja Kokunešoski, *Synthesis and characterization of Co/Mo bimetallic carbides as catalyst support in PEM fuel cells*, 3rd International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion, 10-12 September 2018., Belgrade, Serbia, p.107.
- 5.13. Slađana Maslovara, Dragana Žugić, Yuri Kochnev, Petar Laušević, **Snežana Brković**, *Novel PVA membrane doped with Ti and Zr dioxide for the use in alkaline electroliser*, 3rd International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion, 10-12 September 2018., Belgrade, Serbia, p.114.
- 5.14. **Snezana M. Brkovic**, Vladimir M. Nikolic, Gvozden S. Tasic, Dragana L. Zugic, Milica P. Marceta Kaninski, *Electrochemical investigation of non-stoichiometric tungsten oxide supported Pt and Ru electrocatalysts for CO tolerance in PEM FC*, 3rd International Meeting on Materials Science for Energy Related Applications, 25-26 September, 2018., Belgrade, Serbia, p.101-102.
- 5.15. Aleksandra Saponjic, Dragana Zugic, Djordje Saponjic, **Snezana Brkovic**, Milena Pijovic, Vladimir Nikolic, Maja Kokunesoski, *Catalysts support materials based on Co/Mo bimetallic carbides*, 3rd International Meeting on Materials Science for Energy Related Applications, 25-26 September, 2018., Belgrade, Serbia, p.54.