

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

На V редовној седници Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду, одржаној 22.02.2024. године именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Јелене Д. Рмуш Мравик, мастер физикохемичара, под насловом:

**„Електролитичко издвајање водоника на хидротермално синтетисаном молибден-дисулфиду модификованом озрачивањем јонским сноповима средњих енергија и механохемијским поступком“.**

Одлуком Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду, са IV редовне седнице одржане 18.01.2021. године одобрена је израда докторске дисертације под горе наведеним насловом. На основу те одлуке, Веће научних области природних наука Универзитета у Београду је на својој седници одржаној 28.01.2021. године дало сагласност да се прихвати предложена тема докторске дисертације.

Након прегледа и анализе докторске дисертације кандидата, Наставно-научном већу подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Приказ садржаја дисертације

Докторска дисертација кандидата Јелене Д. Рмуш Мравик написана је на српском језику, на 98 страна А4 формата куцаног текста (фонт Times New Roman величине 12 pt и прореда 1). Дисертација је припремљена према упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Дисертација се састоји из 8 поглавља: **Увод** (18 страна), **Циљ истраживања** (1 страна), **Експериментални део** (9 страна), **Резултати и дискусија** (41 страна), **Закључак** (2 стране), **Литература** (10 страна), **Биографија аутора са библиографијом** (5 страна) и **Прилози прописани правилима Универзитета о подношењу докторске дисертације на одобравање** (4 стране). Поред наведеног, дисертација садржи и **Насловну страну на српском језику** (1 страна), **Насловну страну на енглеском језику** (1 страна), **Списак ментора и чланова комисије** (1 страна), **Захвалницу** (1 страна), **Сажетак на српском језику** (1 страна), **Сажетак на енглеском језику** (1 страна) и **Садржај** (2 стране).

У дисертацији је приказано 50 слика (10 у Уводу, 4 у Експерименталном делу и 36 у Резултатима и дискусији) и 16 табела (2 у Уводу, 2 у Експерименталном делу и 12 у Резултатима и дискусији), од којих 41 слика и 14 табела приказују истраживање кандидата.

У поглављу **Увод** је дат кратак преглед својстава водоника као обновљивог извора енергије. Приказане су различите методе добијања водоника, са посебним освртом на зелени водоник, тј. водоник добијен коришћењем електролизе воде. Описана је реакција издвајања водоника из водених раствора, као и сам механизам реакције. Дат је приказ неких од најчешће коришћених катализатора за ову реакцију и истакнута су пожељна својства која би он требало да испуњава. Потом је описан молибден-дисулфид, као катализатор за реакцију издвајања водоника, и приказане су карактеристике хидротермалне синтезе као методе његовог добијања. Такође дискутована су каталитички активна места материјала и приказане могуће методе његове модификације са циљем повећања каталитичке активности. Посебно су истакнуте модификација материјала озрачивањем јонским сноповима и механохемијским

поступком. Дискутовани су ефекти које ове методе изазивају у материјалу и утицаји на каталитичку активност за реакцију издвајања водоника. У склопу механохемијске модификације описани су графен-оксид и бизмут-селенид, као конституенти за припрему композита са молибден-дисулфидом, у циљу повећања проводљивости.

У поглављу **Циљ истраживања** наведени су циљеви истраживања у докторској дисертацији и то су: развој хидротермалног поступка за синтезу каталитички активног молибден-дисулфида и карактеризација материјала као катализатора за реакцију издвајања водоника; модификација синтетисаног материјала озрачивањем јонским сноповима угљеника и водоника како би се испитао утицај врсте јона, енергије и флуенса на каталитичку активност; механохемијска модификација синтетисаног материјала током различитог временског интервала млевења и припрема композита са графен-оксидом и бизмут-селенидом како би се испитао утицај времена млевења и врсте проводног адитива на каталитичку активност.

У поглављу **Експериментални део** описан је поступак синтезе почетних материјала и методе модификације синтетисаног материјала. Наведени су експериментални услови и апаратура коришћена приликом озрачивања јонским сноповима, као и приликом механохемијске модификације. Такође, описани су и експериментални услови приликом карактеризације узорака методама: скенирајућом електронском микроскопијом, енергетски дисперзионом спектроскопијом рендгенских зрака, рендгенском дифракцијом, Раманском спектроскопијом, линеарном волтаметријом, цикличном волтаметријом и електрохемијском импедансном спектроскопијом. Описан је и поступак извођења прорачуна коришћењем софтверског пакета SRIM (*Stopping and Range of Ions in Matter*).

У поглављу **Резултати и дискусија** приказани су добијени резултати и, у складу са задатим циљевима дисертације, ово поглавље је подељено на три дела. У првом делу је представљен и описан поступак хидротермалне синтезе молибден-дисулфида, и извршена његова карактеризација. Други део обухвата модификацију синтетисаног материјала озрачивањем јонским сноповима угљеника и водоника средњих енергија, карактеризацију добијених узорака и њихову употребу као катализатора за реакцију издвајања водоника из воденог раствора сумпорне киселине. У трећем делу су представљени резултати добијени применом механохемијске модификације синтетисаног материјала током различитих временских интервала, као и механохемијске модификације композита молибден-дисулфида са графен-оксидом или бизмут-селенидом.

У поглављу **Закључци** сумирани су најважнији резултати и закључци проистекли из дисертације.

У поглављу **Литература** дат је преглед научних радова, књига и других извора који су коришћени при изради докторске дисертације, приказаних према редоследу појављивања у тексту.

## 2. Кратак преглед остварених резултата

У овој докторској дисертацији развијена је процедура за хидротермалну синтезу каталитички активног молибден-дисулфида и испитан је утицај озрачивања јонским сноповима средњих енергија и механохемијског поступка на својства овако синтетисаног материјала, како би се побољшала његова каталитичка активност за реакцију издвајања водоника из водених раствора.

Најпре је извршена морфолошка и структурна карактеризација хидротермално синтетисаног молибден-дисулфида. Испитивање морфологије показало је да се синтетисан материјал састоји од сферних слојевитих структура налик цветовима, пречника неколико микрометара, које су груписане у веће агломерате. Дебљина латица, од којих се ови цветови састоје, износи ~40 nm. Рендгеноструктурном анализом потврђено је присуство хексагоналне 2H фазе молибден-дисулфида, док је анализа просторне расподеле хемијских елемената

показала равномерну дистрибуцију молибдена и сумпора и њихов стехиометријски однос. Електрохемијска испитивања дала су увид у каталитичку својства ових материјала за реакцију издвајања водоника. Утврђено је да молибден-дисулфид, синтетисан једноставном и јефтином хидротермалном методом, без коришћења органских растварача и сурфактаната, испољава израженију каталитичку активност у поређењу са комерцијалним материјалом, упоредиву са материјалима добијеним софистициранијим техникама или коришћењем метода штетних по животну средину.

Побољшање каталитичке активности синтетисаног молибден-дисулфида постигнуто је модификацијом материјала озрачивањем јонским сноповима угљеника и водоника, при чему је испитан утицај врсте јона, енергије и флуенса. Анализом морфологије утврђено је да приликом озрачивања долази до стварања процепа, удубљења или откидања делова сферних структура налик цветовима, при чему су ефекти независни од врсте коришћених јона, енергије или флуенса. *SRIM* прорачуни предвиђају стварање већег броја шупљина и мању дубину продирања упадног снопа при озрачивању јонима угљеника, услед израженијих губитака енергије путем нуклеарних интеракција код ових јона у односу на јоне водоника. Ови резултати су потврђени анализом Раманских спектра, где је уочено да узорци озрачени јонима угљеника показују израженије промене у односу на узорке озрачене водоником, што указује на већи степен структурне модификације при озрачивању јонима угљеника. Поред тога, примећено је да виши флуенси проузрокују мање структурне промене, независно од врсте коришћених јона.

Електрохемијска мерења показала су побољшану каталитичку активност материјала након озрачивања јонским сноповима. Уочено је смањење потенцијала потребног да се достигне густина струје од  $10 \text{ mA/cm}^2$  за око  $100 \text{ mV}$  у односу на почетни узорак, при чему најмању вредност овог потенцијала има узорак озрачен јонима водоника са већим флуенсом ( $1 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ ). Анализа електрохемијски активне специфичне површине указује на повећање количине каталитички активних места код свих озрачених узорака у односу на почетни. Запажено је присуство већег броја активних места код узорака озрачених јонима угљеника, и то мање енергије ( $20 \text{ keV}$ ), него код узорака озрачених јонима водоника, указујући да је осим концентрације дефеката, њихово присуство ближе површинским слојевима кључно за повећање електрохемијски активне специфичне површине. Међутим, анализом електрохемијске импедансне спектроскопије уочено је да узорци озрачени јонима угљеника имају веће вредности отпорности при процесу преноса наелектрисања у поређењу са узорцима озраченим јонима водоника, што доводи до отежане рекомбинације  $\text{H}^+$  јона при издвајању  $\text{H}_2$  и нешто лошије каталитичке активности ових материјала. Како каталитичка активност материјала зависи од броја активних места, квалитета односно сопствене каталитичке активности тих места и проводљивости између ових места, тј. ефикасности процеса преноса наелектрисања, потребно је постићи баланс ових параметара у циљу добијања материјала са најповољнијом каталитичком активношћу.

Други приступ повећању каталитичке активности синтетисаног молибден-дисулфида, увођењем промена по читавој запремини материјала, постигнут је применом механохемијске модификације. Уочено је да употребом високоенергетског млевења долази до потпуне промене морфологије материјала, при чему су карактеристичне сферне структуре налик цветовима деформисане и долази до њиховог стапања у веће агломерате неправилних димензија и облика. Рендгеноструктурна анализа указала је на присуство неуређенијих структура и структурних дефеката у материјалу, насталих као последица високоенергетског млевења. Најпре је испитивањем утицаја времена млевења на каталитичка својства почетног материјала установљено да оптимално време за постизање најбоље каталитичке активности износи 15 минута, при чему се потенцијал потребан да се достигне густина струје од  $10 \text{ mA/cm}^2$  смањује за  $62 \text{ mV}$  у односу на почетни узорак. С обзиром да узорак млевен 15 минута показује високу електрохемијски активну специфичну површину, као и малу вредност отпорности при преносу наелектрисања, може се закључити да током овог временског периода долази до стварања оптималног броја дефеката у структури материјала који служе као

каталитички активна места. Како би се додатно побољшала каталитичка својства материјала, механохемијски поступак је искоришћен и за припрему и модификацију композита молибден-дисулфида са проводним адитивима: графен-оксидом и бизмут-селенидом. На основу претходних резултата, у овом делу коришћено је време млевења од 15 минута.

Композити молибден-дисулфида припремљени су са 5, 10 и 20 мас.% графен-оксида. Морфолошка и рендгеноструктурна анализа млевеног графен-оксида показала је да при млевењу долази до аморфизације и преласка у аморфни угљеник. Ове промене резултују негативним утицајем на каталитичку активност композита за реакцију издвајања водоника, при чему је код узорка са 20 мас.% графен-оксида вредност потенцијала потребног да се достигне густина струје од  $10 \text{ mA/cm}^2$  повећана за 24 mV. Додатно, примећене су мање вредности електрохемијски активне специфичне површине и исте или чак веће вредности отпорности при процесу преноса наелектрисања код млевених композита са графен-оксидом у поређењу са засебно млевеним молибден-дисулфидом. Овакво понашање материјала може бити последица смањене количине активних места која потичу од молибден-дисулфида, као и њихова заклоњеност релативно великим слојевима графен-оксида, који поседују знатно слабију каталитичку активност за реакцију издвајања водоника. На основу електрохемијских мерења може се рећи да аморфни угљеник, добијен као продукт млевења графен-оксида, нема значајну проводљивост која би поспешила перформансе материјала.

Са друге стране, композити молибден-дисулфида са 10 и 20 мас.% бизмут-селенида млевени 15 минута показују побољшање каталитичких својстава. Морфолошка анализа и анализа просторне расподеле хемијских елемената показале су да су наноплочице бизмут-селенида хомогено распоређене у млевеном композиту, док је рендгеноструктурна анализа композита показала стабилност фаза конституената приликом млевења. Електрохемијска испитивања показала су смањење отпорности при преносу наелектрисања код млевених композита са различитим уделима бизмут-селенида и побољшану кинетику реакције издвајања водоника. Како су, за разлику од графен-оксида, наноплочице бизмут-селенида много мањих димензија од молибден-дисулфида, оне не могу преклопити и блокирати активна места на молибден-дисулфиду. Осим тога, присуство каталитичке активности за реакцију издвајања водоника у самом бизмут-селениду утиче на примећено благо повећање електрохемијски активне специфичне површине код млевених композита са 20 мас.% адитива.

Осим побољшане каталитичке активности за реакцију издвајања водоника, хидротермално синтетисани молибден-дисулфид, као и материјали модификовани коришћењем оба приступа показали су и изразито добру стабилност при дугорочном коришћењу, што је од изузетне важности за комерцијалну примену катализатора.

### **3. Упоредна анализа резултата кандидата са резултатима из литературе**

Молибден-дисулфид је слојевит материјал који у наноструктурним формама поседује велики број каталитички активних места за реакцију издвајања водоника [1]. Показало се да су каталитички активна места ивице, различите врсте дефекти, као и незасићене везе, док је базална раван каталитички инертна. Како би се добио материјал што бољих својстава користе се различите методе синтезе, међу којима се хидротермална метода издвојила услед лакоће припреме, могућности подешавања и дизајна жељене морфологије и својстава материјала [2], као и приступачне цене процеса синтезе и могућности његовог скалирања на веће димензије. Међутим, доступне хидротермалне процедуре у литератури углавном користе јака оксидоредукциона средства, сурфактанте или изразито киселе или базне средине. У овој докторској дисертацији испитивана су својстава молибден-дисулфида синтетисаног поједностављеним хидротермалним поступком, без коришћења додатних загађујућих реактаната.

Како би се побољшала каталитичка активност молибден-дисулфида за реакцију издвајања водоника, развијају се различите стратегије модификације материјала, које се

углавном базирају на повећању броја активних места на површини материјала и/или на повећању електричне проводљивости [3]. Озрачивање јонским сноповима доводи до структурне модификације материјала и стварања дефеката попут шупљина, уметнутих атома, измештања атома из равнотежних положаја, замене места атома и др., као и до допирања упадних јона у материјал [4]. Природа доминантног типа насталих дефеката, њихова количина и дистрибуција по дубини узорка зависе од параметара озрачивања [4,5]. Тако су, на пример, јони ниских енергија ( $<1 \text{ keV}$ ) погодни за измену површинске морфологије и допирање хетероатомима, док су јони виших енергија (неколико десетина  $\text{keV}$ ) погодни за производњу дефеката [4]. Горбани (*Ghorbani*) и сарадници су показали да при коришћењу различитих племенитих гасова највећу вероватноћу настајања имају шупљине на месту атома сумпора, као и да количина расејаних атома зависи од енергије и упадног угла снопа [5]. Сун (*Sun*) и сарадници су показали да, при озрачивању јонима угљеника енергије  $3 \text{ MeV}$ , умерена количина створених тачкастих дефеката (попут шупљина на местима атома сумпора) доводи до активирања базалне равни молибден-дисулфида и поспешивања каталитичке активности за реакцију издвајања водоника [6].

На основу наведеног, може се закључити да се озрачивање јонским сноповима може користити за контролисано увођење дефеката у структуру који могу служити као каталитички активна места за реакцију издвајања водоника. У литератури је до сада испитиван углавном утицај озрачивања на макроскопски молибден-дисулфид или материјал у форми танких филмова, монослоја или неколико слојева, док озрачивање наноструктурног хидротермално синтетисаног молибден-дисулфида није истражено. Стога је у овој докторској дисертацији стављен акценат на испитивање утицаја јонских снопова различитих врста јона, енергија и флуенаса на цветне структуре хидротермално синтетисаног молибден-дисулфида са нагласком на испитивање промена морфологије, структуре и каталитичке активности за реакцију издвајања водоника.

Механохемијском модификацијом материјала може се проузроковати смањење величине честица, тј. повећање специфичне површине, стварање структурних промена (настајање дефеката и помераја атома, цепање слојева), аморфизација и др. [7]. Промене које ће механохемијска модификација изазвати у материјалу зависе од различитих параметара мљења. Амбрози (*Ambrosi*) и сарадници користили су индустријски ротирајући челични млин током 20 дана како би екслолирали и смањили димензију макроскопског молибден-дисулфида [8]. Показали су да мљење уноси одређени удео нечистоћа у материјал, пре свега базираних на гвожђу, али да те нечистоће не учествују у каталитичкој активности, већ да она потиче само од молибден-дисулфида услед смањења величине честица и повећане доступности ивица.

Осим тога, механохемијским поступком се веома једноставно могу припремити и композити са различитим проводним материјалима (попут графен-оксида и бизмут-селенида) како би се побољшала својства катализатора и поспешила каталитичка активност за реакцију издвајања водоника. Ђи (*Ji*) и сарадници су користили мљење како би направили нанокомпозите од макроскопског молибден-дисулфида и графен-оксида [9]. Током мљења дошло је до редукције графен-оксида до редукованог графен-оксида, екслолијације макроскопских материјала, као и до организације добијених нанолистова у хетероструктуре. Овако припремљен композит показао је одлична својства при коришћењу као супркондензатор и у литијум–јонским батеријама.

Са друге стране, количина података у литератури о композитима молибден-дисулфида и бизмут-селенида је ограничена. Један од примера су наноцветови бизмут-селенида коришћени као супстрат за раст нанолистова молибден-дисулфида [10]. Овакав композит показао је супериорна каталитичка својства за реакцију издвајања водоника у односу на појединачне конституенте услед одличног преноса наелектрисицања са бизмут-селенида на молибден-дисулфида, као и великог броја активних места на нанолистима молибден-дисулфида чија је агломерација спречена коришћењем бизмут-селенида као подлоге.

Досадашња истраживања механохемијске модификације молибден-дисулфида присутна у литератури углавном подразумевају употребу макроскопског или комерцијалног молибден-дисулфида. Иако постоји пар примера комбинације употребе механохемије и хидротермалне синтезе, оне се углавном односе на нанолистове молибден-дисулфида. У овој докторској дисертацији је механохемијским поступком модификован хидротермално синтетисан молибден-дисулфида са структуром налик цветовима, као и његови композити са графен-оксидом и бизмут-селенидом, и пружен је додатни увид у разумевање физичкохемијских својстава и примене ових материјала. Применом механохемијског поступка постигнуто је стварање дефеката у структури материјала који служе као каталитички активна места, а додатком бизмут-селенида долази до смањења отпорности при преносу наелектрисања и додатног побољшања кинетике реакције издвајања водоника.

## Референце:

- [1] J.D. Benck, T.R. Hellstern, J. Kibsgaard, P. Chakthranont, T.F. Jaramillo, Catalyzing the hydrogen evolution reaction (HER) with molybdenum sulfide nanomaterials, *Acs Catal.* 4 (2014) 3957–3971. <https://doi.org/10.1021/cs500923c>.
- [2] N. Zhang, H. Li, K. Yu, Z. Zhu, Differently structured MoS<sub>2</sub> for the hydrogen production application and a mechanism investigation, *J. Alloys Compd.* 685 (2016) 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.228>.
- [3] Y. Chen, K. Yang, B. Jiang, J. Li, M. Zeng, L. Fu, Emerging two-dimensional nanomaterials for electrochemical hydrogen evolution, *J. Mater. Chem. A.* 5 (2017) 8187–8208. <https://doi.org/10.1039/C7TA00816C>.
- [4] Z. Li, F. Chen, Ion beam modification of two-dimensional materials: Characterization, properties, and applications, *Appl. Phys. Rev.* 4 (2017) 11103. <https://doi.org/10.1063/1.4977087>.
- [5] M. Ghorbani-Asl, S. Kretschmer, D.E. Spearot, A. V Krasheninnikov, Two-dimensional MoS<sub>2</sub> under ion irradiation: from controlled defect production to electronic structure engineering, *2D Mater.* 4 (2017) 25078. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa6b17>.
- [6] C. Sun, P. Wang, H. Wang, C. Xu, J. Zhu, Y. Liang, Y. Su, Y. Jiang, W. Wu, E. Fu, Defect engineering of molybdenum disulfide through ion irradiation to boost hydrogen evolution reaction performance, *Nano Res.* 12 (2019) 1613–1618. <https://doi.org/10.1007/s12274-019-2400-1>.
- [7] J. Joy, A. Krishnamoorthy, A. Tanna, V. Kamathe, R. Nagar, S. Srinivasan, Recent developments on the synthesis of nanocomposite materials via ball milling approach for energy storage applications, *Appl. Sci.* 12 (2022) 9312. <https://doi.org/10.3390/app12189312>.
- [8] A. Ambrosi, X. Chia, Z. Sofer, M. Pumera, Enhancement of electrochemical and catalytic properties of MoS<sub>2</sub> through ball-milling, *Electrochem. Commun.* 54 (2015) 36–40. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2015.02.017>.
- [9] H. Ji, S. Hu, Z. Jiang, S. Shi, W. Hou, G. Yang, Directly scalable preparation of sandwiched MoS<sub>2</sub>/graphene nanocomposites via ball-milling with excellent electrochemical energy storage performance, *Electrochim. Acta.* 299 (2019) 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.12.188>.
- [10] D. Li, J. Lao, C. Jiang, Y. Shen, C. Luo, R. Qi, H. Lin, R. Huang, G.I.N. Waterhouse, H. Peng, Heterostructured MoS<sub>2</sub>@ Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanoflowers: A highly efficient electrocatalyst for hydrogen evolution, *J. Catal.* 381 (2020) 590–598. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2019.11.039>.

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

Кандидат је коаутор два научна рада објављена у врхунским међународним часописима и девет саопштења са међународних научних скупова штампаних у изводу, који су публиковани из резултата дисертације:

##### Радови у врхунском међународном часопису (M21):

1. **J. Rmuš**, B. Belec, I. Milanović, M. Fanetti, S. Gardonio, M. Valant, S. Kurko, *Composites of transition metal dichalcogenides and topological insulators as catalytic materials for HER*, Journal of Energy Storage, 2023, 68, 107719, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107719>  
Oblast: Energy & Fuels 19/121 IF: 9,4/2022
2. **J. Rmuš Mravik**, I. Milanović, S. Milošević Govedarović, A. Mraković, E. Korneeva, I. Stojković Simatović, S. Kurko, *Improvement of MoS<sub>2</sub> electrocatalytic activity for hydrogen evolution reaction by ion irradiation*, International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(98), 38676-38685, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.178>  
Oblast: Electrochemistry 7/30 IF: 7,2/2022

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

1. **J. Rmuš Mravik**, V. Rajić, B. Belec, Ž. Mravik, Z. Jovanović, I. Stojković Simatović, S. Kurko, *Modification of MoS<sub>2</sub>/GO composites with ball milling and thermal treatment for catalytic application*, Twenty fourth Annual Conference YUCOMAT 2023, September 4-8, 2023, Herceg Novi, Montenegro, p. 156
2. **J. Rmuš Mravik**, B. Belec, Ž. Mravik, Z. Jovanović, S. Milošević Govedarević, I. Stojković Simatović, S. Kurko, *Influence of milling time and thermal treatment on catalytic activity of MoS<sub>2</sub>/graphene oxide composites*, Solid-State Science & Research Meeting, 28-30 June 2023, Zagreb, Croatia, p. 78
3. **J. Rmuš**, B. Belec, Ž. Mravik, S. Mijaković, Z. Jovanović, I. Stojković Simatović, S. Kurko, *Mechanochemically modified composites of molybdenum disulfide and graphene oxide for hydrogen evolution reaction*, Twentieth Young Researchers Conference – Materials Science and Engineering, November 30 – December 2, 2022, Belgrade, Serbia, p. 31,
4. **J. Rmuš**, B. Belec, I. Milanović, M. Fanetti, S. Gardonio, M. Valant, S. Kurko, *Composites of transition metal dichalcogenides and topological insulators as a new class of catalytic materials*, The 6th International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion, mESC-IS 2022, July 5.-8. 2022, Bol, island of Brač, Croatia, Book of Abstracts, p. 21
5. **J. Rmuš**, A. Mitrović, A. Mraković, Ž. Mravik, T. Pantić, I. Stojković Simatović, S. Kurko, *Increasing catalytic activity of molybdenum disulfide for hydrogen evolution reaction*, Twenty second Annual Conference YUCOMAT 2021, August 30.- September 3. 2021, Herceg Novi, Montenegro, p. 77
6. **J. Rmuš**, K. Radinović, S. Dimitrijević, Ž. Mravik, I. Milanović, I. Stojković Simatović, S. Kurko, *Effects of morphology on electrochemical performance of mechanochemically milled molybdenum disulfide*, Solid-State Science & Research Meeting, 10 & 11 June 2021, Zagreb, Croatia, p. 58

7. **J. Rmuš**, A. Mraković, Ž. Mravik, A. Mitrović, I. Milanović, I. Stojković Simatović, S. Kurko, *Ion beam irradiated molybdenum disulfide for improved hydrogen evolution reaction*, Eighteenth Young Researchers Conference – Materials Science and Engineering, December 4-6, 2019, Belgrade, Serbia, Program and the Book of Abstracts, p. 61
8. **J. Rmuš**, Ž. Mravik, A. Mraković, T. Pantić, S. Milošević Govedarović, J. Grbović Novaković, S. Kurko, *Influence of carbon ion irradiation on structural properties of MoS<sub>2</sub>*, 4rd International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion, mESC-IS 2019, September 11-13, 2019, Akyaka, Turkey, Program and the Book of Abstracts, p. 89
9. **J. Rmuš**, S. Milošević Govedarović, A. Mraković, D. Rajnović, N. Novaković, J. Grbović Novaković, S. Kurko, *Structural changes in MoS<sub>2</sub> induced by hydrogen ion irradiation*, 3rd International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion, mESC-IS 2018, 10. - 12. Sep, 2018, Belgrade, Serbia, Program and the Book of Abstracts, p. 106

## 5. Провера оригиналности докторске дисертације

Провера оригиналности докторске дисертације извршена је на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду („Гласник Универзитета у Београду“ број 204 од 22.06.2018.). Помоћу програма iThenticate извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидата под називом „Електролитичко издвајање водоника на хидротермално синтетисаном молибден-дисулфиду модификованом озрачивањем јонским сноповима средњих енергија и механохемијским поступком“ и установљено је да количина подударња текста (similarity index) износи 1%. Наведени степен подударности последица је употребе цитата, личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, тзв. општих места и података, као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из његове дисертације што је у складу са чланом 9. поменутог Правилника. На основу свега изнетог, Комисија је утврдила да је докторска дисертација кандидата Јелене Д. Рмуш Мравик оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

## 6. Закључак комисије

На основу изложеног може се закључити да резултати кандидата Јелене Д. Рмуш Мравик представљају оригиналан и значајан научни допринос у области физичке хемије, посебно у ужој научној области физичке хемије материјала и физичке хемије – електрохемије. Део резултата докторске дисертације кандидата публикован је у научним часописима: два рада у врхунском међународном часопису (категирија М21). Додатно, из резултата докторске дисертације кандидата проистекло је и девет саопштења са међународног научног скупа штампаних у изводу (категирија М34). У складу са наведеним, Комисија сматра да кандидат испуњава све 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 позитивно оцењује дисертацију мастер физикохемичара Јелене Д. Рмуш Мравик под називом:

**„Електролитичко издвајање водоника на хидротермално синтетисаном молибден-дисулфиду модификованом озрачивањем јонским сноповима средњих енергија и механохемијским поступком“**

и предлаже Наставно – научном већу Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду да прихвати ову оцену Комисије, чиме би били испуњени сви услови за одобрење јавне одбране докторске дисертације и стицања звања кандидата доктор физичкохемијских наука.

У Београду, 11.03.2024. године

Чланови комисије:

---

др Биљана Шљукић Паунковић, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Факултет за физичку хемију

---

др Немања Гаврилов, ванредни професор,  
Универзитет у Београду, Факултет за физичку хемију

---

др Јасмина Грбовић Новаковић, научни саветник,  
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“,  
Институт од националног значаја за Републику Србију