

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ - ХЕМИЈСКОГ ФАКУЛТЕТА

ПРЕДМЕТ: Извештај комисије за оцену докторске дисертације кандидаткиње Јасмине Ј. Мушовић, мастер хемичара.

На редовној седници Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Хемијског факултета, одржаној 12.09.2025. године, одређени смо у Комисију за оцену докторске дисертације кандидаткиње Јасмине Ј. Мушовић, мастер хемичара, под називом:

**„Развој одрживе стратегије
засноване на бифазним воденим системима и тетрабутилфосфонијум
јонским течностима за издвајање критичних метала из катодног
материјала литијум јонских батерија“**

Веће научних области природних наука Универзитета у Београду је на својој седници одржаној дана 27.06.2024. године, на захтев Хемијског факултета, дало сагласност на предлог теме докторске дисертације (одлука бр. 61206-2373/2-24).

Комисија је докторску дисертацију прегледала и подноси Наставно-научном већу Хемијског факултета следећи

ИЗВЕШТАЈ

А. Приказ садржаја дисертације

Докторска дисертација Јасмине Ј. Мушовић написана је на 117 страна А4 формата (фонт *Times New Roman*; величина 12 pt, проред 1, маргине 2 cm) и садржи 32 слике и 6 табела. Рад обухвата следећа поглавља: *Увод* (17 страна), *Експериментални део* (10 страна), *Резултати и дискусија* (47 страна), *Закључак* (3 стране), *Литература* (12 страна) и *Прилози* (28 страна) који садрже допунске табеле, слике, дијаграме и податке који подржавају главни текст. Поред наведеног дисертација садржи *Насловну страну* на српском и енглеском језику, *Страну са именима чланова Комисије*, *Захвалницу*, *Сажетак* на српском и енглеском језику, *Садржај*, *Биографију* кандидата, *Листу радова* проистеклих из дисертације, *Изјаву о ауторству*, *Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада* и *Изјаву о коришћењу*. Дисертација је по својој структури и садржају у потпуности у складу са стандардима прописаним од стране Универзитета у Београду.

Увод садржи предмет и основне циљеве истраживања ове докторске дисертације, уз истицање значаја развоја ефикасних и одрживих хидрометалуршких метода за издвајање критичних метала (кобалта, никла, мангана и литијума) из катодног материјала истрошених литијум јонских батерија (ЛЈБ). У целини „*Литијум јонске батерије*“ приказане су основне карактеристике, принцип рада, структура ЛЈБ и врсте катодних материјала који чине ЛЈБ, као и разлози значаја њихове рециклаже. Целина

„Методе рециклаже катодног материјала ЛЈБ“ обухвата опис фаза предтретмана (селекцију, пражњење и механичку обраду) и преглед главних метода рециклаже, са фокусом на хидрометалуршке поступке, њихове предности и ограничења. У целини „Улога јонских течности у савременој хидрометалургији“ дефинисан је појам јонских течности (ЈТ), описана је њихова структура и физичко-хемијска својства, као и предности у односу на конвенционалне раствараче. Посебна пажња посвећена је њиховој примени у процесима лужења и селективне екстракције метала у оквиру бифазних водених система (БВС) из катодних материјала ЛЈБ. Последња целина „Циљ рада“ формулише истраживачке задатке усмерене на развој и оптимизацију интегрисаних и еколошки прихватљивих поступака за издвајање и раздвајање критичних метала из катодних материјала ЛЈБ, уз максималну могућност рециклаже коришћених јонских течности. Уводна целина показује да је кандидаткиња темељно проучила релевантну литературу и критички анализирала научне резултате и истраживачке правце у овој области.

У **Експерименталном делу** детаљно су описане методе коришћене у овој докторској дисертацији, почев од избора употребљених хемикалија, синтезе и карактеризације тетрабутилфосфонијум јонских течности, као и одређивања фазних дијаграма, везних линија и састава бифазних водених система. Приказани су поступци екстракције литијума, кобалта, никла и мангана и испитивања оптималних услова у модел системима познатих концентрација, као и методологија за одређивање константи стабилности комплекса формираних између ЈТ и металних јона. Описани су кораци припреме и предтретмана реалних узорака катодних материјала ЛЈБ, поступци лужења метала и испитивања оптималних услова процеса, као и интеграција процеса лужења, екстракције и издвајања метала у циљу развоја ефикасног и одрживог поступка рециклаже. Методологија је описана прецизно, систематично и на начин који омогућава поновљивост експеримената.

У поглављу **Резултати и дискусија** приказани су резултати добијени током истраживања у оквиру ове докторске дисертације, систематично организовани у више целина. У првом делу испитана је течно-течна равнотежа бифазних водених система заснованих на тетрабутилфосфонијум јонским течностима и амонијум-сулфату, одређене су везне линије и састави фаза, чиме су дефинисани услови за постизање стабилне двофазне сепарације. У другом делу посебна пажња посвећена је екстракцији кобалта, никла, мангана и литијума из модел раствора познатих концентрација метала применом система заснованих на једанаест различитих тетрабутилфосфонијум јонских течности и амонијум-сулфата. У трећој целини детаљно је анализиран утицај рН вредности, температуре, дужине везне линије и односа запремина фаза на ефикасност екстракције, у циљу дефинисања оптималних услова процеса. Четврти део обухвата одређивање константи стабилности комплекса између металних јона и ЈТ применом UV-Vis спектроскопије, ради бољег разумевања механизма екстракције и селективности. У петом делу приказани су резултати лужења метала из катодних материјала ЛЈБ применом неорганских киселина и девет тетрабутилфосфонијум ЈТ. Након идентификације најпогоднијих кандидата за лужење, у наредном делу испитани су оптимални услови лужења реалних узорака применом одабраних јонских течности, уз

анализу утицаја масеног удела ЈТ, температуре, времена и односа чврсте и течне фазе на ефикасност процеса. Последњи део обухвата развој интегрисаних процеса који комбинују лужење, екстракцију и издвајање метала из реалних узорака катодних материјала, при чему су детаљно размотрене могућности циркуларне примене ЈТ. Додатно, дата је критичка анализа потенцијала и ограничења ЈТ у предложеним интегрисаним процесима, са освртом на њихову индустријску применљивост, одрживост и еколошке предности. Дискусија је поткрепљена бројним графичким приказима и поређењем са литературним подацима, што омогућава да се јасно уочи оригиналност и научни допринос рада.

Закључак сумира главне резултате, наглашавајући научни и примењени допринос у развоју одрживих и селективних хидрометалуршких поступака заснованих на тетрабутилфосфонијум ЈТ. Закључци су логично изведени из резултата и у потпуности одговарају постављеним циљевима истраживања.

Литература (199 цитата) обухвата научне радове, књиге и докторске дисертације које покривају области хидрометалургије, ЈТ и рециклаже батерија, на основу којих је изграђен теоријски и методолошки оквир рада.

Б. Кратак опис истраживања

Ова докторска дисертација је обухватала примену тетрабутилфосфонијум ЈТ у процесима издвајања метала из катодних материјала ЛЈБ, са посебним освртом на њихову улогу у лужењу и формирању бифазних водених система као еколошки прихватљивих екстракционих медијума. Основни циљ истраживања био је да се кроз синтезу, карактеризацију и оптимизацију процесних услова развију одрживи поступци који омогућавају ефикасно, селективно и економично издвајање критичних метала, уз минималан утицај на животну средину.

У првом делу истраживања синтетисано је и карактерисано једанаест тетрабутилфосфонијум јонских течности са истим катјоном и различитим комплексирајућим анијонима (хлорид, ацетат, пропионат, хидрогенсулфат, метансулфонат, лактат, гликолат, никотинат, салицилат, етилендиаминтетраацетат и диетилентриаминпентаацетат). Испитана је њихова способност формирања бифазних водених система у присуству амонијум-сулфата, при чему су одређени фазни дијаграми и везне линије. Ови подаци послужили су као основа за анализу растворљивости и интеракција јонских течности са водом, као и за одређивање хидрофобног или хидрофилног карактера различитих анијона, самим тим и ЈТ, што директно утиче на стабилност фазног раздвајања. Овим сегментом постављени су темељи за разумевање утицаја структуре јонских течности на фазно понашање и њихов потенцијал у екстракционим процесима.

Други сегмент истраживања био је усмерен на детаљну анализу утицаја структуре ЈТ, односно природе анијона који их чине, на ефикасност и селективност екстракције литијума, кобалта, никла и мангана у модел системима са познатим концентрацијама. Испитан је утицај кључних параметара као што су рН вредност, температура, дужина везне линије и промене у саставу система дуж везне линије (однос запремина фаза). За

одабране системе спроведена је и спектроскопска карактеризација комплекса формираних између јонских течности и металних јона, чиме је омогућено дубље разумевање механизма везивања и преноса метала између фаза. Оваквим приступом не само да је било могуће поређење ефикасности различитих тетрабутилфосфонијум ЈТ, већ је и разјашњен механизам њихове селективности.

Трећи сегмент истраживања обухватио је примену тетрабутилфосфонијум ЈТ за лужење метала из реалних узорака катодних материјала ЛЈБ различитог састава. Лужење је спроведено употребом минералних киселина и девет одабраних ЈТ које садрже исти тетрабутилфосфонијум катјон и различите анјоне као што је хлорид, ацетат, салицилат, хидрогенсулфат, лактат, гликолат, никотинат, етилендиаминтетраацетат и диетилентриаминпентаацетат. Испитан је утицај кључних процесних параметара као што су концентрација киселине, масени удео јонске течности, температура, време реакције и однос чврсте и течне фазе (S/L однос). Анализом утицаја ових параметара дефинисани су оптимални услови који омогућавају ефикасно и максимално издвајање метала из реалних узорака, при чему је посебна пажња посвећена очувању стабилности примењених јонских течности.

У завршном делу докторске дисертације извршена је интеграција процеса лужења и екстракције у јединствену, затворену технолошку целину, чиме је омогућена поновна употреба ЈТ и смањење количине отпадних токова. Развијена су два концепта интеграције, први је омогућио издвајање кобалта и литијума из литијум-кобалт-оксидног (LCO) катодног материјала, накнадно раздвајање метала у бифазном воденом систему, таложење метала из различитих фаза и успешну рециклажу ЈТ. Други концепт омогућио је истовремено лужење свих метала из литијум-никл-манган-кобалт-оксидног (NMC) катодног материјала у присуству ЈТ, а затим и издвајање у БВС-у који се састоји од лужног раствора са ЈТ и амонијум-сулфата без њиховог међусобног раздвајања, директно у фазу богату амонијум-сулфатом. Метали су из фазе богате соли селективно раздвојени таложењем, док је фаза богата ЈТ поново коришћена без додатних корака пречишћавања.

На тај начин, истраживање је обухватило читав процесни ланац од синтезе и основне карактеризације ЈТ, преко екстракције, оптимизације услова и испитивања механизма у модел системима, до примене у реалним узорцима. Оваквим приступом развијени су ефикасни, интегрисани и циркуларни поступци рециклаже који представљају значајан научни допринос савременој хидрометалургији.

В. Упоредна анализа резултата кандидата са резултатима из литературе

Развој савремених технологија за складиштење енергије, пре свега литијум јонских батерија (ЛЈБ), довео је до наглог пораста глобалне потражње за критичним металима као што су кобалт, никл, манган и литијум. Истовремено, све веће количине истрошених батерија представљају озбиљан еколошки изазов, што је подстакло интензиван развој стратегија њихове рециклаже [1]. Катодни материјали садрже значајне количине наведених метала, па њихово издвајање и поновно коришћење представљају један од кључних корака ка остваривању концепта циркуларне економије

[1]. Иако су традиционални хидрометалуршки поступци показали високу ефикасност у лужењу катодних материјала, њихова примена је често условљена употребом јаким неорганских киселина и органских растварача, што доводи до повећане потрошње реагенса, али и генерисања отпадних токова који су проблем за животну средину [2]. Ови недостаци указују на потребу за развојем еколошки прихватљивијих, одрживих и економски исплативих алтернативних поступака.

Јонске течности (ЈТ) су препознате као перспективни растварачи у процесима лужења и екстракције метала, захваљујући својој структурној прилагодљивости, хемијској стабилности и могућности селективне интеракције са различитим јонима. Ипак, већина досадашњих истраживања фокусирана је на хидрофобне ЈТ које, иако често показују високу ефикасност, имају бројна ограничења: токсичност, ниску биоразградивост и велику вискозност, што у значајној мери смањује њихову применљивост у одрживим системима [3]. Као одговор на ове недостатке, све више се истражује примена хидрофилних ЈТ које, у комбинацији са другим у води растворним и нетоксичним компонентама, могу формирати бифазне водене системе (БВС) и представљају обећавајућу алтернативу класичним течно–течним системима.

Последњих година велики број истраживања усмерен је на развој бифазних водених система као алтернативе класичним течно–течним екстракционим системима [3]. У литератури су приказани различити приступи, од БВС-а заснованих на полимерима и солима до комбинација полоксамера и аминокиселина [4–7]. Показано је да избор компоненте која гради БВС, као и рН вредност, утиче на селективност раздвајања, при чему су у појединим случајевима постигнуте изузетно високе вредности ефикасности екстракције (преко 99% за кобалт) или веома високи сепарациони фактори (преко 300 за систем бакар/кобалт) [4,5]. Међутим, овакви системи често захтевају присуство додатних комплексирајућих агенаса, а стабилност и поновљивост процеса могу бити ограничени. Хидрофилне јонске течности, као компонента бифазних водених система, омогућавају селективно раздвајање кобалта, никла и мангана у више корака [6,7]. Селективном екстракцијом метала у воденој средини елиминише се потреба за токсичним и испарљивим органским компонентама, а стабилност, подесивост рН, као и могућност фине контроле поларности и јонске јачине додатно повећавају применљивост ових система [3]. Ипак, упркос охрабрујућим резултатима, број студија које систематски анализирају примену хидрофилних јонских течности за екстракцију метала из катодних материјала и даље је ограничен. У малом броју радова обрађени су раствори добијени лужењем катодних материјала, док су систематске анализе селективности, термодинамичке стабилности и регенерације ЈТ фазе изузетно ретке. Фосфонијумске и амонијумске ЈТ имају повољнији токсиколошки и стабилносни профил у односу на имидазолијумске аналоге, али је њихова примена у овој области и даље слабо заступљена. У оквиру ове докторске дисертације, по први пут су испитане хидрофилне тетрабутилфосфонијум ЈТ са једанаест различитих анјона у контексту формирања БВС-а и селективне екстракције метала. Одређени су фазни дијаграми и везне линије за све системе у комбинацији са амонијум-сулфатом. Резултати су показали да ЈТ са мултидентатним анјонима попут диетилентриаминпентаацетата $[DTPA]^{3-}$ и етилендиаминтетраацетата $[EDTA]^{2-}$ омогућавају селективну екстракцију кобалта,

никла и мангана, док једноставнији анјони, попут ацетата, хлорида и других, омогућавају симултано издвајање свих метала у фазу богату амонијум-сулфатом. Оптимизацијом рН вредности, температуре и састава система, постигнуте су вредности ефикасности екстракције веће од 85% за кобалт, никл и манган у фази богатој ЈТ, док је литијум екстрахован у фази богатој соли, чиме је омогућена његова накнадна изолација. Стабилност насталих комплекса потврђена је Uv-Vis спектроскопијом, док је могућност поновне употребе ЈТ омогућила циркуларну примену.

Поред екстракционих поступака, у литератури су описани и покушаји примене јонских течности у процесима лужења метала из различитих врста електронског отпада, попут штампаних плоча. У таквим системима, ЈТ су обично коришћене у комбинацији са неорганским киселинама, са циљем побољшања ефикасности или селективности издвајања метала као што су бакар, кобалт, олово, сребро и злато [8]. Међу ретким примерима примене ЈТ за лужење катодног материјал ЛЈБ издваја се студија у којој је јонска течност заснована на имидазолијум-гликолу (1-(2,3-дихидроксипропил)-3-метилимидазолијум-хлорид) успешно примењена за лужење кобалта и литијума из литијум-кобалт-оксидног катодног материјала, уз ефикасност лужења преко 99% за оба метала и очувану стабилност ЈТ током пет узастопних циклуса [9]. Иако су у појединим радовима постигнуте високе вредности ефикасности лужења, стабилност ЈТ у веома киселој средини и њихова економска исплативост остају значајни изазови. Поред тога, досадашња истраживања најчешће су била ограничена на испитивање једне или две јонске течности без систематичног поређења и оптимизације процесних услова. У оквиру ове докторске дисертације први пут је спроведена систематска анализа примене девет различитих тетрабутилфосфонијум јонских течности за лужење два реална узорка литијум-кобалт-оксидних и литијум-никл-кобалт-манган-оксидних катодних материјала ЛЈБ. У присуству тетрабутилфосфонијум ЈТ постигнута је ефикасност лужења преко 90% за кобалт, никл и манган, док је литијум био готово потпуно излужен у свим системима. Добијене вредности су упоредиве, а у више случајева и супериорније у односу на имидазолијум ЈТ описане у литератури, при чему је додатна предност фосфонијум ЈТ њихова већа хемијска стабилност, нижа токсичност и боља економска исплативост. Добијени резултати потврђују потенцијал ових јонских течности као одрживих реагенса за примену у циркуларним хидрометалуршким процесима.

У већини досадашњих истраживања јонске течности нису коришћене као примарни реагенси за лужење катодних материјала, већ су увођене у раствор тек након поступка лужења применом неорганских киселина, са циљем да се побољша селективност применом различитих екстракционих метода или омогући издвајање метала стандардним процедурама, попут таложења или електродепозиције. Са друге стране, мали је број радова у којима су ЈТ коришћене директно као агенси за лужење метала, као и оних који обухватају интеграцију поступака лужења и екстракције.

Један од ретких примера интегрисаног приступа представља рад у коме је предложен процес који обједињује лужење, екстракцију и електродепозицију кобалта, никла и мангана из катодних материјала никл-метал-хидридних батерија [10]. Кисели бифазни водени системи формиран су комбинацијом јонске течности трибутилтетрадецилфосфонијум-хлорида и лужног раствора заснованог на

хлороводоничној киселини. Кобалт је у бифазном воденом систему екстрахован у фази богатој јонском течностима са ефикасношћу екстракције већом од 85%, никл је екстрахован у киселој воденој фази, док је манган био подељен у обе фазе са вредности ефикасности екстракције од 40%. Такође је након екстракције из фазе богате јонском течностима кобалт издвојен селективном електродепозицијом. Ипак, иако ова студија показује да је могуће интегрисати више корака у један процес, њихов приступ се заснива на употреби токсичних концентрованих киселина, што значајно ограничава одрживост и није у складу са савременим захтевима зелене хемије и циркуларне хидрометалургије.

У оквиру ове докторске дисертације такође су развијена два интегрисана процеса у којима су кораци лужења, екстракције и издвајања метала из катодних материјала ЛЈБ међусобно повезани и функционално обједињени. Први приступ, заснован на [TBP][DTPA], подразумевао је лужење литијум-кобалт-оксидног катодног материјала сумпорном киселином. У добијени раствор затим је додат амонијум-хидроксид, генерисан амонијум-сулфат и уведена ЈТ, чиме је формиран бифазни водени систем. У таквом систему кобалт је екстрахован у фази богатој ЈТ, док је литијум екстрахован у фази богатој амонијум-сулфатом, што је омогућило њихово ефикасно раздвајање. Из фазе богате ЈТ је кобалт накнадно таложен, што је омогућило да ЈТ остане хемијски стабилна и поново употребљива за формирање новог система. Други концепт, заснован на [TBP][H₂SO₄], подразумева пажљиву оптимизацију процесних параметара, при чему је количина киселине неопходна за лужење смањена чак четири пута у односу на стандардне услове, управо захваљујући додатку ЈТ. Након тога, у добијени лужни раствор додат је амонијум-сулфат и формиран БВС у коме су сви метали (литијум, кобалт, никл и манган) из литијум-никл-кобалт-манган-оксидног катодног материјала екстраховани у фази богатој амонијум-сулфатом, док је ЈТ остала погодна за поновну примену у новом циклусу лужења. Метали су затим успешно раздвојени селективним таложењем. Додатна предност развијених процеса је могућност поновне употребе јонских течности. Такође, систематски је испитана њихова стабилност током више узастопних циклуса, чиме је показано да ове ЈТ задржавају високу ефикасност и након вишеструке примене. Овакав приступ значајно умањује укупну потрошњу реагенса и трошкове процеса, а истовремено доприноси смањењу отпадних токова. Док се у литератури најчешће ЈТ користе само једном, без анализе могућности њихове рециклаже, у овој докторској дисертацији је доказано да ЈТ могу бити поуздано враћене у процес, што представља важан корак ка њиховој индустријској примени.

Овакви интегрисани и циркуларни приступи омогућавају високу ефикасност издвајања метала, смањену потрошњу реагенса, циркуларну употребу јонске течности и затварање процесних токова, што представља значајан корак напред ка одрживој хидрометалургији и практичној примени у рециклажи катодних материјала ЛЈБ.

[1] K. Giza, B. Pospiech, J. Gega, Future Technologies for Recycling Spent Lithium-Ion Batteries (LIBs) from Electric Vehicles—Overview of Latest Trends and Challenges, *Energies* 16 (2023) 5777. <https://doi.org/10.3390/en16155777>.

[2] J. Spooren, K. Binnemans, J. Björkmalm, K. Breemers, Y. Dams, K. Folens, P. Kinnunen, Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw

materials in Europe: technology development trends, Resources, Conservation and Recycling 160 (2020) 104919. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104919>.

[3] M. G. Freire, A. F. M. Cláudio, J. M. M. Araújo, J. A. P. Coutinho, I. M. Marrucho, J. N. C. Lopes, L. P. N. Rebelo, Aqueous biphasic systems: a boost brought about by using ionic liquids, Chemical Society Reviews 41 (14) (2012) 4966. <https://doi.org/10.1039/C2CS35151J>.

[4] P. da R. Patrício, M.C. Mesquita, L.H.M. da Silva, M.C.H. Da Silva, Application of aqueous two-phase systems for the development of a new method of cobalt(II), iron(III) and nickel(II) extraction: A green chemistry approach, J. Hazard. Mater. 193 (2011) 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.062>

[5] D. da S. Leite, P.L.G. Carvalho, L.R. de Lemos, A.B. Mageste, G.D. Rodrigues, Hydrometallurgical separation of copper and cobalt from lithium-ion batteries using aqueous two-phase systems, Hydrometallurgy, 169 (2017) 245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.01.002>

[6] C. Cai, T. Hanada, A.T.N. Fajar, M. Goto, Novel Ionic Liquid-Based Aqueous Biphasic System with Amino Acids for Critical Metal Recovery from Lithium-Ion Batteries, Ind. Eng. Chem. Res., 61 (15) (2022) 5306. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00295>

[7] C. Cai, A.T.N. Fajar, T. Hanada, R. Wakabayashi, M. Goto, Amino Acid Leaching of Critical Metals from Spent Lithium-Ion Batteries Followed by Selective Recovery of Cobalt Using Aqueous Biphasic System, ACS Omega, (2022). <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06654>.

[8] Y. Barrueto, P. Hernández, Y.P. Jiménez, J. Morales, Properties and application of ionic liquids in leaching base/precious metals from e-waste. A review., Hydrometallurgy 212 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105895>

[9] Y. Hu, M. Yang, Q. Dong, X. Zou, J. Yu, S. Guo, F. Yan, Green and sustainable recycling of lithium-ion batteries via an ionic liquid-driven cathode reduction method, Energy Environ. Sci. (2024) 4238–4247. <https://doi.org/10.1039/d4ee00331d>

[10] N. Schaeffer, M. Gras, H. Passos, V. Mogilireddy, C.M.N. Mendonça, E. Pereira, E. Chainet, I. Billard, J.A.P. Coutinho, N. Papaiconomou, Synergistic aqueous biphasic systems: a new paradigm for the “one-pot” hydrometallurgical recovery of critical metals, ACS Sustain. Chem. Eng. 7 (2019) 1769–1777. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05754>.

Г. Објављени радови и саопштења који чине део докторске дисертације

Као резултат ове дисертације проистекла су два научна рада, један рад у међународном часопису изузетних вредности (M21a) и један рад у истакнутом међународном часопису (M22), три саопштења на међународном скупу штампаних у изводу (M34) и једно саопштење са скупова националног значаја штампана у изводу (M64).

Рад у међународном часопису изузетних вредности (M21a):

Jasmina Mušović, Danijela Tekić, Slađana Marić, Ana Jocić, Dalibor Stanković, Aleksandra Dimitrijević, Sustainable recovery of cobalt and lithium from lithium-ion battery cathode material by combining sulfate leachates and aqueous biphasic systems based on tetrabutylphosphonium-ionic liquids, Separation and Purification Technology, 2024, 348, 127707. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127707>

Рад у истакнутом међународном часопису (M22):

Jasmina Mušović, Danijela Tekić, Ana Jocić, Slađana Marić, Aleksandra Dimitrijević, Efficient Ionic Liquid-Based Leaching and Extraction of Metals from NMC Cathodes, Processes, 2025, 13(6), 1755. <https://doi.org/10.3390/pr13061755>

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (M34):

1. **Jasmina Mušović**, Danijela Tekić, Slađana Marić, Ana Jocić, Aleksandra Dimitrijević, Anion influence in phosphonium-based ionic liquids on the formation of the aqueous biphasic systems, 3rd DIFENEW International Student Conference DISC 2023, Novi Sad, Srbija, 2023, Proceeding: 49, ISBN: 978-86-6022-632-9.
2. **Jasmina Mušović**, Danijela Tekić, Slađana Marić, Ana Jocić, Aleksandra Dimitrijević, Extraction of cobalt and lithium using green aqueous biphasic systems based on ionic liquids, 3rd DIFENEW International Student Conference DISC 2023, Novi Sad, Srbija, 2023, Proceeding: 48, ISBN: 978-86-6022-632-9.
3. **Jasmina Mušović**, Danijela Tekić, Ana Jocić, Slađana Marić, Aleksandra Dimitrijević, Extraction of cobalt and nickel using tetrabutylphosphonium salicylate in aqueous biphasic systems, 4th DIFENEW International Student Conference DISC 2024, Novi Sad, Srbija, 2024, Proceeding: 69, ISBN: 978-86-6022-715-9.

Саопштења на скуповима националног значаја штампана у изводу (M64):

Jasmina Mušović, Danijela Tekić, Slađana Marić, Aleksandra Dimitrijević, Promising phosphonium-based ionic liquids aqueous biphasic systems for metal extraction, 9th Conference of Young Chemists of Serbia, Novi Sad, Srbija, 2023, Proceeding: 91, ISBN: 978-86-7132-084-9.

Д. Провера оригиналности докторске дисертације

Оригиналност докторске дисертације Јасмине Ј. Мушовић је проверена 08.09.2025. године на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204/22.06.2018). Помоћу програма “iThenticate”, утврђено је да количина подударарања текста износи 6%. Подударности од 2% су последица општих места, дефиниција, формула и описа коришћених експерименталних метода. Преостале подударности <1% су последица цитата, личних имена и звања, библиографских података у коришћеној литератури, назива и скраћеница једињења и инструменталних техника, као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су

проистекли из докторске дисертације, што је у складу са чланом 9. овог Правилника. Комисија сматра да је докторска дисертација Јасмине Ј. Мушовић оригинална, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

Ђ. Закључак

На основу свега изложеног може се закључити да је у поднетој дисертацији под насловом „*Развој одрживе стратегије засноване на бифазним воденим системима и тетрабутилфосфонијум јонским течностима за издвајање критичних метала из катодног материјала литијум јонских батерија*“ кандидаткиња, мастер хемичар Јасмина Ј. Мушовић, успешно одговорила на све постављене задатке који се тичу развоја одрживих процеса заснованих на тетрабутилфосфонијум ЈТ за лужење и екстракцију критичних метала из катодних материјала литијум јонских батерија.

Комисија сматра да резултати објављени у оквиру ове докторске дисертације представљају значајан и оригиналан научни допринос у области циркуларне хидрометалургије и хемије заштите животне средине имајући у виду системски приступ који обухвата развој и примену јонских течности у процесима лужења катодних материјала, формирање бифазних водених система за селективну екстракцију критичних метала, као и интеграцију ових поступака у одржив концепт рециклаже. Постигнути резултати одликују се високим степеном иновативности и применљивости, јер се по први пут представља свеобухватан метод који омогућава ефикасно издвајање и изолацију кобалта, никла, мангана и литијума, уз могућност поновне употребе јонских течности и затварања кружних, еколошки прихватљивих хидрометалуршких процеса.

Резултати истраживања проистекли из ове докторске дисертације објављени су у оквиру једног међународног часописа изузетних вредности (M21a) и једног истакнутог међународног часописа (M22), три саопштења на међународном скупу штампаних у изводу (M34) и једног саопштења са скупова националног значаја штампаног у изводу (M64). Ови радови и саопштења јасно потврђују да су резултати дисертације препознати и валоризовани у релевантној научној заједници.

На основу свега изложеног Комисија сматра да се ова дисертација уклапа у савремене трендове циркуларне хидрометалургије и хемије заштите животне средине, те на основу свега изложеног предлаже Наставно–научном већу Универзитета у Београду – Хемијског факултета да прихвати поднету докторску дисертацију **Јасмине Ј. Мушовић** под насловом *„Развој одрживе стратегије засноване на бифазним воденим системима и тетрабутилфосфонијум јонским течностима за издвајање критичних метала из катодног материјала литијум јонских батерија“* и одобри њену одбрану.

У Београду, _____

Комисија:

др Јелена Мутић, редовни професор
Хемијски факултет, Универзитет у Београду

др Слађана Ђурђић, доцент
Хемијски факултет, Универзитет у Београду

др Ана Јоцић, научни сарадник
Институт за нуклеарне науке „Винча“,
Институт од националног значаја за Републику Србију,
Универзитет у Београду