

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ХЕМИЈСКОГ ФАКУЛТЕТА  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

**Предмет:** Извештај о оцени научне заснованости и оправданости предложене теме за израду докторске дисертације Јоване Ђокић, мастер хемичара

На редовној седници Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Хемијског факултета, одржаној 09.09.2021. године, одлуком бр. 752/2, именовани смо за чланове Комисије за подношење Извештаја о оцени научне заснованости и оправданости предложене теме за израду докторске дисертације кандидаткиње Јоване Ђокић, мастер хемичара, пријављене под насловом:

**„Понашање калаја и хелатних комплекса различитих метала у споредним производима насталих током пиро-електрометалуршких трансформација електронског отпада“**

На основу поднете и проучене документације, као и увида у досадашњи рад кандидаткиње, Комисија подноси следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

**А. Биографски подаци о кандидаткињи**

Јована (Мирко) Ђокић рођена је 19.10.1989. године у Београду. Основну школу „Коста Абрашевић“ у родном граду завршила је 2004. године као носилац Вукове дипломе, а 2008. године, по завршетку Средње медицинске школе, образовни профил - Фармацеутски техничар, уписује студије на Хемијском факултету Универзитета у Београду, Студијска група – Хемичар за животну средину. Основне студије завршила је 2014. године са просечном оценом 8,23 (осам и 23/100) и одбраном завршног рада са оценом 10,00 (десет и 0/100) стекла звање Дипломирани хемичар. Исте године уписује мастер студије на студијском програму Хемија, које завршава у предвиђеном року са просечном оценом 10,00 (десет и 0/100), под менторством редовног професора Универзитета у Београду - Хемијског факултета, др Бранимира Јованчићевића, и стиче стручно звање Дипломирани хемичар - мастер. На матичном факултету, под менторством истог професора, 2015. године, као редован студент, уписује докторске студије,

Студијска група - хемичар. У периоду 2015 - 2018. године положила је све планом и програмом предвиђене испите са просечном оценом 9,83 (девет и 83/100). Од 2016. године запослена је у Иновационом центру Хемијског факултета д.о.о. у Београду.

Кандидаткиња је учесник пројекта технолошког развоја (*Иновативна синергија нус-продуката, минимизације отпада и чистије производње у металургији*, ТР34033) и иновационог пројекта (*Иновативни технолошки поступак рециклаже и виши нивои валоризације одабраних критичних метала из секундарних сировина поступком вакуумске дестилације*, 391-00-16/2017-16/1, 2017/18. год), финансираних од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, као и пројекта билатералне сарадње са НР Кином (*Recovery and Harmless Treatment of the Hazardous Jarosite*, 451-03-478/2018-09/01, 2017.-2019. год). Сарађивала је у пројектима са привредом (Elixir Group d.o.o., Spectra media d.o.o, ВВМ d.o.o), и у изради *Студије исплативости и изводивости за набавку постројења за решавање канализационог муља из постројења за третман отпадних вода општине Херцег Нови*, СИп\_ИСНФ-НН\_4/2-10012019 и *Студије о процени утицаја на животну средину пројекта Рециклажног центра „Yunirisk“ са постројењем за инертизацију индустријских отпада „MID-MIX“* технологијом, 205/2-2019-ИЦХФ.

Као члан тима, Јована Ђокић је добитница 8. награде на такмичењу за Најбољу технолошку иновацију 2019, у организацији Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Добитница је СЕЕPUS ("*Central european exchange program for university studies*") програма стипендија (2015. год), члан Српског хемијског друштва и Међународне асоцијације за чврсти отпад (*International Solid Waste Association*) у оквиру које је стални члан радне групе за рециклажу и минимизацију отпада (*Working Group on Recycling and Waste Minimisation*).

## **Б. Библиографија**

Јована Ђокић се бави научно-истраживачким радом из области примењене хемије на пољу металургије и рециклаже. Истраживачки и експериментални рад обухватају валоризацију метала из отпадних токова примарне и секундарне металургије и других синергетских сировина уз минимизирање отпада кроз изучавање механизма и хемијских феномена.

Од почетка рада на својој докторској дисертацији до сада, кандидаткиња је коаутор научног рада објављеног у врхунском часопису од међународног значаја, категорије М21, коаутор радова објављених у националним часописима категорија М24 и М51, као и коаутор или првопотписани аутор на преко 10 саопштења са скупова од међународног значаја, категорија М33 и М34. Осим наведеног, кандидаткиња има и једну пријаву домаћег патента, категорија М87. Библиографија докторанда, категорисана према Правилнику о стицању

истраживачких и научних звања (Сл. гласник РС, бр. 159/2020-82), дата је у Прилогу 1 овог Извештаја.

## **V. Образложење теме**

### **1. Научна област: Хемија**

**Ужа научна област:** Примењена хемија метала

### **2. Предмет научног истраживања**

Предмет истраживања у оквиру предложене докторске дисертације је експериментално испитивање хемијског понашања метала у систему хидро-пиро-електрометалуршких трансформација електронског отпада (е-отпада). Примарно истраживање обухватиће трансформације једињења калаја, бакра, олова, сребра и злата хидрометалуршким приступом, затим контролу калаја и растварање високо стабилне метастанатне киселине (хидратисаног калаја(IV) оксида) из добијених чврстих производа. Други део истраживања се односи на селективну екстракцију бакра из реалног раствора (специјално дизајнирани експерименти за циљано добијање нестандартног електролита екстремно сложеног хемијског састава). Биће урађена и термодинамичка анализа у изабраним системима.

Предмет истраживања укључује испитивање параметара реакција кључних корака процеса (превођења метала у раствор, електролизе, течно-течне екстракције) са акцентом на дефинисању механизма реакција те утврђивања понашања и расподеле одабраних метала у хемијски сложеном систему рециклаже е-отпада. Дефинисани оптимални параметри трансформација једињења одабраних метала на лабораторијском нивоу биће испитани на увећаним лабораторијским тестовима.

### **3. Циљ научног истраживања**

Генерални циљ истраживања у оквиру ове докторске дисертације је допринос смањењу губитака метала кроз постојеће токове рециклаже е-отпада, са фокусом на контроли калаја у хидро-пиро-електрометалуршким трансформацијама е-отпада. У том смислу, циљ је превазићи недостатке постојећих процеса расветљавањем и решавањем специфичног проблема на пољу трансформације калаја, настанка високо стабилне метастанатне киселине односно ограничења реакција њеног превођења у раствор. Секундарни циљ је испитати утицај параметара реакција за селективно превођење одабраних метала у раствор те дефинисати расподелу метала и одредити материјални биланс хидро-пиро-електрометалуршких трансформација е-отпада.

Имајући у виду сложеност е-отпада (као улазног материјала експерименталних испитивања) у смислу хемијског састава, предложени циљ докторске дисертације биће реализован кроз неколико задатака:

- физичко-хемијска карактеризација улазног материјала (механички припремљеног е-отпада и производа насталих металуршким трансформацијама предметног материјала) и добијених финалних производа (садржај влаге, одређивање насипне густине и гранулометријског, хемијског и фазног састава, морфологије честица, термичких особина, структуре и функционалних група узорака), у циљу сагледавања система, ефикасности примењених процесних услова те дефинисања ограничења процеса трансформације калаја и праћења расподеле одабраних метала,
- теоријско проучавање механизма и термодинамичка анализа сложених реакција у систему за рециклажу е-отпада као комплексног материјала са становишта хемијског састава: одређивање вредности равнотежне Гибсове енергије ( $\Delta rG^{\theta}$ ), конструисање дијаграма стабилности фаза одабраних метала у функцији оксидо-редукционих услова средине и рН вредности, у циљу одабира погодног система превозиња метала у раствор,
- специјално дизајнирани експерименти за циљано добијање екстремно сложених система (чврстих и течних производа) као почетних узорака планираних испитивања, који ће омогућити сагледавање будућих препрека у рециклажи искључиво е-отпада,
- оптимизација хидрометалуршког процеса селективног добијања метала из механички припремљеног гранулата е-отпада уз проверу дефинисаних услова на увећаном лабораторијском тесту, уз израду процесне шеме предложеног интегралног приступа,
- изучавање процеса растварања метастанатне киселине садржане у производима (калајном талогу и анодном муљу) насталим металуршким трансформацијама одабраних категорија е-отпада (гранулата, штампаних плоча, процесора, меморијских картица) уз постављање механизма растварања и проверу дефинисаних процесних услова на увећаном лабораторијском тесту,
- експериментално истраживање процеса селективног издвајања бакра методом течне екстракције (ТТЕ) из реалног узорка нестандардног електролита, екстремно сложеног хемијског састава, добијеног металуршким трансформацијама одабраних категорија е-отпада (гранулата, штампаних плоча, процесора, меморијских картица), уз праћење утицаја хелатних комплекса метала нечистоћа на ефикасност екстракције, и дефинисање њихове расподеле у примењеном систему.

#### **4. Методе истраживања**

У оквиру предложене теме докторске дисертације, а у циљу испуњења циља истраживања, планира се примена следећих метода:

- карактеризација полазног материјала, механички припремљеног гранулата е-отпада, и производа добијених металуршким трансформацијама одабраних категорија е-отпада (калајни талог, анодни муљ, електролит), укључиће примену различитих метода. Коришћењем стандардног сета сита биће одређен гранулометријски састав узорака. Садржај воде у узорак биће одређен гравиметријском методом а насипна густина мерењем масе слободно насутог слоја материјала познате запремине. Хемијски састав раствора биће одређен применом атомске апсорпционе спектрофотометрије (*AAS*) и индуктивно спрегнуте плазме са оптичком емисионом спектроскопијом (*ICP-OES*), а чврстих узорака применом рентгенске флуоресцентне спектрометрије (*XRF*), оптичке емисионе спектрометрије са варницом (*S-OES*) и елементалне анализе. Минералоскопи (фазни) састав биће одређен рентгено-дифракционом анализом (*XRD*) а морфологија честица чврстих производа коришћењем оптичке и сканирајуће електронске микроскопије са енергетско-дисперзивном рентгенском спектрометријом (*SEM-EDX*). Термичке особине чврстих узорака биће одређене применом термогравиметријске и диференцијалне термичке анализе (*TG-DTA*), док ће присуство функционалних група бити дефинисано применом инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом;
- теоријска разматрања биће извршена испитивањем механизма и термодинамичком анализом реакција у хидрометалуршком систему, коришћењем *HSC Chemistry* софтверског пакета;
- експериментална испитивања ће бити извршена у лабораторијским условима и увећаним лабораторијским тестовима, са циљем оптимизације и верификације процесних параметара и израде процесне шеме предложеног поступка;
- хидрометалуршки приступ:
  - изучавање процеса селективног добијања метала из гранулата е-отпада укључиће оптимизацију процеса превођења основних метала у раствор ( лужење Cu, Sn, Fe, Zn, Ni) уз одређивање утицаја реакционих параметара на степен излужења коришћењем сумпорне киселине уз додатак одговарајућег оксидационог средства (при варирању температуре, брзине мешања, времена трајања процеса, чврсто-течног односа (Ч:Т) и удела оксидационог средства). Добијање метала из раствора лужења извршиће се применом одговарајућих метода (електролиза; цементација; физичка сепарација) уз оптимизацију одговарајућих процесних параметара (густине струје; температуре; брзине мешања). За добијање метала из чврстог остатка након сулфатно-оксидативног лужења користиће се азотна киселина уз испитивање концентрације киселине, утицаја времена и Ч:Т односа фаза на степен излужења Pb и Ag. Издвајање метала из раствора лужења извршиће се поступком хемијског таложења.

Добијање племенитих метала (Au) из чврстог остатка претходна два корака лужења вршиће се коришћењем царске воде, праћено поступком хемијске редукције,

- након испитивања утицаја процесних параметара лабораторијских тестова, оптимални услови биће примењени на увећаном лабораторијском тесту интегралног хидрометалуршког поступка селективног добијања метала из е-отпада а резултати ће се користити за одређивање фактора расподеле метала;
- пиро-електрометалуршки приступ:
  - биће урађен специјално дизајниран пиро-електрометалуршки поступак који ће обезбедити добијање производа нестандардног хемијског састава а који укључује *i*) одабир посебних категорија е-отпада које карактерише висок удео основних и племенитих метала (Cu, Sn, Pb, Au, Ag), *ii*) примену нестандардне процедуре пирометалуршког приступа којим ће се елиминисати могућност губљења појединих елемената те обезбедити задржавање хемијске сложености система,
  - пиро-електрометалуршки приступ укључиће припрему улазног материјала е-отпада који садржи полимерне и друге органске компоненте поступком вакуумске пиролизе, затим редукционо топљење остатка након пиролизе заједно са другим одабраним категоријама е-отпада (метални гранулат) у лабораторијској електро-лучној пећи те изливање анода од добијене бакарне легуре нестандардног хемијског састава. Након физичке обраде, изливене бакарне аноде дефинисаних димензија биће коришћене у поступку електрорафинације бакра при дефинисаним условима (време трајања процеса, температура, проток електролита, густина струје). Суспендоване честице метастанатне киселине биће периодично издвајане из електролита поступцима коагулације применом коагуланта високе молекулске тежине, те физичке сепарације фаза (издвајање коагулисаног калајног талоба филтрацијом). Анодни муљ настао процесом електрорафинације биће издвојен из електролита по завршетку процеса методом физичке сепарације фаза. Издвојени чврсти производи (анодни муљ и калајни талоб) биће коришћени за испитивање утицаја параметара реакција на растварање метастанатне киселине,
  - оптимизација процеса растварања метастанатне киселине, настале пиро-електрометалуршким трансформацијама е-отпада, обухватиће испитивање утицаја температуре, концентрације хлороводоничне киселине, времена трајања процеса, удела и врсте редукционог средства те утицаја термичког пред-третмана улазног узорка и утицаја сумпорних једињења садржаних у улазном

- узорку на ефикасност излужења калаја односно растварања метастанатне киселине,
- након избора процесних параметара лабораторијских тестова, дефинисани процесни услови биће примењени на увећаном лабораторијском тесту у циљу верификације истих уз испитивање кинетике растварања метастанатне киселине;
  - увећаним лабораторијским тестом пиро-електрометалуршких трансформација одабраних категорија е-отпада, према претходно описаној методи, добиће се електролит нестандардног хемијског састава који ће се користити као улазни узорак за испитивање утицаја параметара на процес селективног издвајања бакра методом течне екстракције (ТТЕ):
    - оптимизација процеса ТТЕ бакра из реалног раствора и испитивање утицаја хелатних комплекса одабраних метала на ефикасност екстракције укључиће варирање концентрације и врсте екстракционог средства (три комерцијална екстрагенса који се разликују према хемијској групи активног центра), односа органске и водене фазе, времена контакта фаза и рН вредности улазног електролита. Експерименти ће бити извођени на собној температури у конусним левковима за одвајање, а након гравитационог раздвајања фаза, органска фаза ће се користити за експерименте селективне ре-екстракције метала, који ће укључити испитивање утицаја концентрације киселине као ре-екстракционог средства, времена контакта фаза и односа органске и водене фазе на ефикасност процеса,
    - у издвојеним воденим фазама (рафинати и раствори ре-екстракције) биће одређена концентрација одабраних металних јона (првенствено Cu, Sn, Fe, Zn и Ni али и других метала нечистоћа присутних у траговима) на основу које ће се, рачунским путем, одређивати селективност и ефикасност процеса, али и дефинисати расподела метала;
  - дефинисани услови лабораторијских и увећаних лабораторијских тестова користе се за одређивање фактора расподеле метала сваког од наведених процеса и израду предлога свеобухватне процесне шеме рециклаже е-отпада.

## 5. Актуелност проблематике у свету

Убрзан технолошки напредак, нарочито на пољу индустрије информационих технологија чији се производи као компоненте могу наћи у готово сваком савременом уређају, води ка све интензивнијем коришћењу природних ресурса, енергије, воде и земљишта. Истовремено, директна последица технолошког развоја и генерално потрошачког друштва, је смањење употребног века електронских уређаја, што за последицу има интензивно увећање

укупних количина електронског отпада (е-отпада). Према проценама, годишње се у свету генерише око 45 милиона тона новонасталог е-отпада, са годишњом стопом раста од 3-5% [1]. У поређењу са примарним сировинама, поменути врста чврстог отпада садржи знатно веће количине корисних металних материјала, због чега је значајна секундарна сировина. Имајући у виду опште промовисање рециклаже, као једно од значајних захтева данашњице, проистеклог из недостатка ресурса, питања очувања животне средине и здравља људи али и економског подстицаја, нови производни модели, требало би да омогуће значајну превенцију генерисања нових и минимизацију постојећих количина отпада. Из наведених разлога, рециклажа метала данас представља системски изазов (еколошки, економски и социјални) чија оптимизација омогућава најконкретнији одговор на неопходност за одрживим управљањем металима и одрживим развојем уопште. Још већи изазов је свеобухватна рециклажа метала из е-отпада која је отежана услед изузетне сложености у хемијском саставу те честим променама истог. Концепцијски, методологија добијања корисних материјала из е-отпада, аналогна је процесима добијања метала из примарних сировина, и заснива се на примени пиро- и хидрометалуршких поступака и/или њихових комбинација [2]. С обзиром да је основни покретач рециклаже е-отпада поновно добијање основних (Cu) и племенитих метала (Au, Ag), бројна истраживања описују различите методе валоризације појединих елемената. Суштински, хидрометалуршки приступ своди се на двостепено лужење, прво основних метала различитим минералним киселинама, затим злата и сребра применом цијанида, тиосулфата или царске воде. Имајући у виду токсичност цијанида и рестрикције у његовој примени, као и нестабилност, високу потрошњу и ниску ефикасност тиосулфатних-раствора, царска вода остаје као један од водећих средстава лужења злата [3]. Међутим, недовољна истраживања у вези свеобухватног процеса онемогућавају сагледавање ефикасности, расподеле и биланса материјала на увећаном нивоу. Уз то, иако су олово и калај по масеном уделу у е-отпаду одмах иза бакра, мали број истраживања је фокусиран на поновном добијању ових метала.

С тим у вези, преко 40% произведеног калаја користи се у легури лема у готово свакој електронској компоненти а услед новоразвијених безоловних легура лема, у којима калај заузима и до 95%, удео калаја у е-отпаду ће само расти. Ипак, калај није у фокусу рециклаже, јер његово поновно добијање из е-отпада представља велики технолошки изазов. Наиме, пирометалуршким приступом рециклаже, калај се расипа у производе топљења: у шљаку, као високо стабилан калај(IV) оксид ( $\text{SnO}_2$ ), у филтер прашину, као калај(II) оксид ( $\text{SnO}$ ) и легиран у металној фази умањујући ефикасност и економичност валоризације. Са друге стране, електро- и/или хидрометалуршки приступ резултују формирањем хидратисаног калај(IV) оксида ( $\beta$  модификација метастанатне киселине), стабилног једињења калаја које додатно отежава рециклажу – како добијање самог калаја тако и валоризацију других метала (нпр. племенитих метала из анодног муља насталог електролизом бакра а који садржи висок удео  $\beta$  метастанатне киселине) [4]. Истраживања која се тичу уклањања калаја из производа



металуршких трансформација е-отпада своде се на пирометалуршки приступ који подразумева алкално топљење, док су, када је реч о хидрометалуршком приступу резултати опречни, генерално указујући на слабо растварање метастанатне киселине, онемогућавајући валоризацију калаја [5-7]. Стога, питање растварања метастанатне киселине настале трансформацијама е-отпада и синергетских сировина и самим тим контроле и валоризације калаја - остаје отворено.

Рециклажа е-отпада на индустријском нивоу најчешће подразумева примену пирометалуршких метода. Процес подразумева топљење разблаженог улазног материјала, у ком е-отпад заузима до 30% удела. Међутим, традиционалан приступ је неодржив, имајући у виду стални раст генерисања ове врсте отпада. Топљење је праћено анодном оксидацијом блистер бакра у циљу смањења садржаја метала нечистоћа (уклањање оксида Al, Ba, Be, Ca, Cr, Fe, Mg, Mn, Na, и Zn), истовременим концентровањем племенитих метала у легури бакра у којој се задржавају и Bi, Pb, Ni, Cd, Sb, и Sn. Аноде изливене од легуре бакра нестандартног хемијског састава користе се даље у процесу електролизе и затим добијања бакра депозицијом на аноду [8]. Ипак, услед сложеног хемијског састава улазног материјала, захтевних а неселективних пирометалуршких метода, и електрометалуршки приступ је отежан а производи имају наслеђену хемијску сложеност. Растворени метали (Fe, Ni, Co, As, Sb и Sn) присутни у електролиту представљају ограничење примене целокупног процеса електрорафинације [9]. Стога, како би се постигла селективна валоризација метала и добили производи високе чистоће, генерисани раствори захтевају пречишћавање, које подразумева примену метода таложења, јонске измене и/или течно-течне екстракције (ТТЕ), која се и најчешће примењује. Међутим, иако ТТЕ има значајно место у хидрометалуршкој производњи метала из примарних сировина, примена ове методе у рециклажи е-отпада захтева прилагођавање и усавршавање, како би се осигурала селективност, повећала ефикасност екстракције и олакшала ре-екстракција циљаних метала. Одабир екстракционог средства је изазован а остаје крајње упитна примена методе ТТЕ у хемијски сложеном систему рециклаже искључиво е-отпада. У бројним истраживањима за екстракцију су коришћени екстрагенци на бази хидроксиоксима, хидроксибензофенон оксима, алдоксима, хинолина, органских киселина и једињења на бази органофосфорних једињења, са или без различитих модификатора [10]. Међутим, испитивања се углавном заснивају на коришћењу улазних раствора одабраних метала (упрошћених система), због чега није могуће сагледати ограничења у рециклажи искључиво е-отпада као ни утицај бројних метала нечистоћа којима су реални раствори оптерећени.

На основу изнетог долази се до закључка да методе које се традиционално примењују у производњи метала из примарних сировина а које су усвојене и за рециклажу е-отпада имају недостатке услед екстремне сложености хемијског састава поменутог материјала и ниске флексибилности процеса који не могу да испрате сталне промене хемијског састава поменутог материјала. Јасна је неопходност за унапређењем постојећег приступа рециклажи који би

омогућио одрживост и ефикасну валоризацију и оних елемената који због ограничења уобичајених метода до сада нису били од интереса. Такође је важно оптимизовати и дефинисати услове и механизме добијања метала и утврдити међусобан утицај те расподелу метала у циљу сагледавања будућих препрека у систему рециклаже е-отпада.

### Референце:

[1] Worell, E.; Reuter, M.A. Handbook of Recycling; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014; ISBN 978-0-12-396459-5

[2] Forti, V.; Baldé, C.P.; Kuehr, R.; Bel, G. The Global E-Waste Monitor 2020; United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR)—co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA): Bonn, Germany; Geneva, Switzerland; Rotterdam, The Netherlands, 2020; ISBN 978-92-808-9114-0.

[3] Zhang, L.; Xu, Z. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. J Cleaner Prod 2016, 127:19–36. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.004>

[4] Shuva, M.; Rhamdhani, M.; Brooks, G.; Masood, S.; Reuter, M. Thermodynamics data of valuable elements relevant to e-waste processing through primary and secondary copper production: a review. J Clean Prod 2016, 131:795–809. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.061>

[5] Ding, Y.; Zhang, S.; Liu, B.; Li, B. Integrated process for recycling copper anode slime from electronic waste smelting. J Cleaner Prod 2017, 165:48–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.094>

[6] Stewart, M.L. Separative treatment of anode slime. US patent US4283224A, 1980. <https://patents.google.com/patent/US4283224>

[7] Scott, K.; Chen, X.; Atkinson, J.W.; Todd, M.; Armstrong, R.D. Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit boards. Resour Conserv Recy 1997, 20(1):43–45. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(97\)01198-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(97)01198-1)

[8] Cui, J.; Zhang, L. Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review. J Hazard Mater 2008, 158:228–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>

[9] Vasilyev, F.; Virolainen, S.; Sainio, T. Modeling the Liquid–Liquid Extraction Equilibrium of Iron (III) with Hydroxyoxime Extractant and Equilibrium-Based Simulation of Counter-Current Copper Extraction Circuits. Chem Eng Sci 2018, 175:267–277. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.10.003>

[10] Habashi, F. A Textbook of Hydrometallurgy; Métallurgie extractive Québec: Sainte-Foy, QC, Canada, 1999; ISBN 978-2-9803247-7-2.

## **6. Очекивани резултати**

Очекивани резултати ове докторске дисертације били би дефинисање механизма и термодинамичких карактеристика сложених реакција хидрометалуршког система рециклаже механички припремљеног гранулата и одабраних категорија е-отпада. Одредиће се оптимални реакциони услови (температурни интервали, односи фаза, утицај оксидо-редукционих услова, врсте и концентрације реакционих средстава, и других кључних реакционих параметара) за селективно добијање метала из механички припремљеног гранулата е-отпада и карактеристике добијених производа, и услови за ефикасно растварање метастанатне киселине те селективно издвајање калаја (из чврстих), односно бакра (из течних) производа пиро-електрометалуршких трансформација одабраних категорија е-отпада. Очекује се да оптимизација процесних услова омогући допринос контроли калаја у сложенем систему рециклаже е-отпада кроз дефинисање механизма растварања метастанатне киселине односно дефинисање ограничења процеса. Очекивани резултат ове докторске дисертације је и дефинисање категорије односно хемијске групе активног центра екстрагенса оптималног за селективно издвајање те добијање бакра из нестандартног електролита као производа пиро-електрометалуршких трансформација одабраних категорија е-отпада кроз дефинисање утицаја хелатних комплекса одабраних метала нечистоћа на процес. На основу свеобухватног истраживања и добијених резултата очекује се конструисање дијаграма расподеле метала те материјалног биланса, уз предлог процесне шеме, у сложенем систему рециклаже е-отпада. У закључку, очекује се да резултати ове докторске дисертације допринесу смањењу губитака метала кроз постојеће токове рециклаже ефикасном контролиом калаја и пратећих метала у екстремно сложенем систему, са становишта хемијског састава, какав је е-отпад.

## **Г. Закључак**

Комисија за подношење извештаја о оцени научне заснованости и оправданости предложене теме за израду докторске дисертације предлаже измену формулације предложене теме у:

**„Трансформације једињења калаја и других метала током пиро-електро-хидрометалуршког третмана електронског отпада“.**

На основу изложеног, Комисија сматра да је предложена тема актуелна и научно заснована, а очекивани резултати би представљали напредак и научни допринос у области примењене хемије на пољу металургије и рециклаже. У складу са Законом о високом образовању и Статутом Хемијског факултета у Београду, сматрамо да кандидат испуњава све предвиђене услове за одобрење израде докторске дисертације. Комисија зато предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Хемијског факултета да кандидаткињи **Јовани Ђокић**, мастеру хемије, одобри израду докторске дисертације.

Комисија предлаже др Бранимира Јованчићевића, редовног професора Универзитета у Београду - Хемијског факултета и др Илију Брческог, ванредног професора Универзитета у Београду - Хемијског факултета за менторе ове дисертације. Списак радова који квалификују менторе за вођење докторске дисертације дат је у **Прилогу 2** овог Извештаја.

У Београду, 01.10.2021.

**Комисија:**

---

др Бранимир Јованчићевић, редовни професор  
Универзитета у Београду - Хемијског факултета

---

др Илија Брчески, ванредни професор  
Универзитета у Београду - Хемијског факултета

---

др Жељко Камберовић, редовни професор  
Универзитета у Београду - Технолошко-  
металуршког факултета

## Прилог 1:

Библиографија кандидата категорисана према критеријумима Министарства за науку Републике Србије

### Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21)

1. Ž. Kamberović, M. Ranitović, M. Korać, Z. Anđić, N. Gajić, **J. Đokić**, S. Jevtić, *Hydrometallurgical Process for Selective Metals Recovery from Waste-Printed Circuit Boards*, *Metals*, 8(2018)6, p. 441, <https://doi.org/10.3390/met8060441>.

### Rad u nacionalnom časopisu međunarodnog značaja (M24)

1. M. Ranitović, **J. Djokić**, M. Korać, N. Gajić, S. Dimitrijević, *Recyclability of technology metals from e-waste: case study of In and Ga recovery from magnetic fraction*, *Metallurgical and Materials Engineering*, 25(2019)3, <https://doi.org/10.30544/446>.

### Saopštenje sa skupa međunarodnog značaja, štampano u celini (M33)

- 1- **J. Đokić**, Ž. Kamberović, M. Korać, M. Ranitović, N. Todorović, *Conceptual study for valorization of In, Ga and Ge*, 49th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor Lake, Serbia, October 18-21, 2017, p. 452-455, ISBN 978-86-6305-066-2.
- 2- M. Ranitović, **J. Đokić**, Ž. Kamberović, M. Korać, M. Sokić, M. Debelak, *Improving the weee potentials: comprehensive characterization of magnetic fraction and proposal for recycling process*, VIIIth International Metallurgical Congress, Ohrid, Macedonia, May 30th – June 3rd, 2018.
- 3- **J. Đokić**, M. Ranitović, A. Zarić, Ž. Kamberović, *Dust from e-waste mechanical treatment as a valuable material*, 51st International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor Lake, Serbia, October 16 - 19, 2019, p. 299-302, ISBN 978-86-6305-101-0.

### Saopštenje sa skupa međunarodnog značaja, štampano u izvodu (M34)

- 1- **J. Đokić**, G. Gajica, A. Šajnović, M. Kašanin-Grubin, N. Vasić, B. Jovančičević, *Influence of volcanoclastic material on geochemistry of organic matter in Neogene lacustrine sediments - Blace basin*, IMOG2015 Book of abstracts, 27th International Meeting on Organic Geochemistry, Prague, Czech Republic (2015), p. 607-608.

- 2- N. Gajić, Z. Anđić, **J. Đokić**, Ž. Kamberović, *Synergistic solid lubricants system based on selected sulfides of technology metals*, XVI Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering, Belgrade, December 6-8, 2017, p. 64, ISBN 978-86-80321-33-2.
- 3- N. Gajić, Ž. Kamberović, Z. Anđić, J. Trepčevska, B. Plešingerova, **J. Đokić**, *Synthesis of tribological WS<sub>2</sub> powder from oxide precursor*, 20<sup>th</sup> annual conference YUCOMAT 2018, Herceg Novi, Montenegro, September 3-7, 2018, p. 71, ISBN 978-86-919111-3-3.
- 4- J. Mandić, **J. Đokić**, N. Gajić, Ž. Kamberović, *Thermodynamic modelling of Pb/Ag Jarosite sulfidation for valuable metals recovery*, Young Researchers conference 2019, Belgrade, Serbia, March 26-27, 2019, p. 41, ISBN 978-86-84231-48-4.
- 5- M. Mandić, **J. Đokić**, N. Gajić, J. Uljarević, Ž. Kamberović, *Production of technology metals from waste electronics*, Young Researchers conference 2019, Belgrade, Serbia, March 26-27, 2019, p. 42, ISBN 978-86-84231-48-4.
- 6- Ž. Kamberović, M. Ranitović, M. Korać, **J. Đokić**, N. Gajić, N. Jovanović, *Integrated recycling of the critical raw materials from waste electronics*, Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe, Belgrade, Serbia, June 5 – 7, 2019, p. 37, ISBN 978-86-87183-30-8.
- 7- A. Milošević, Ž. Kamberović, V. Manojlović, J. Djokić, Nataša Gajić, *Characterization of waste computers processors and proposal of the metals valorization process*, Circular economy and environmental labelling, Novi Sad, Serbia, January 29, 2021, p. 5, ISBN 978-86-6022-311-3
- 8- V. Balšić, J. Đokić, Z. Anđić, S. Jevtić, Ž. Kamberović, *Adsorpcija korisnih metala iz kondenzata dobijenog vakuum pirolizom baterija na alumosilikatnim mineralima*, Circular economy and environmental labelling, Novi Sad, Serbia, January 29, 2021, p. 8, ISBN 978-86-6022-311-3
- 9- V. Manojlović, Ž. Kamberović, S. Jevtić, N. Gajić, M. Ranitović, A. Milošević, **J. Djokić**, *Isoconversional analysis of jarosite residue thermal decomposition*, Deseti simpozijum o termodinamici i faznim dijagramima sa međunarodnim učešćem, Zbornik izvoda radova, Urednik: D.Minić, Kosovska Mitrovica, 25-26. jun 2021., 50-52. ISBN: 978-86-81656-22-8.

- 10- N. Gajić, Ž. Kamberović, M. Ranitović, A. Milošević, V. Manojlović, S. Jevtić, **J. Djokić**, *Thermodynamic modelling of the roasting process of the non-standard Pb/Ag Jarosite*, Deseti simpozijum o termodinamici i faznim dijagramima sa međunarodnim učešćem,

**Rad u vrhunskom časopisu nacionalnog značaja (M51)**

- 1- M. Mandić, **J. Đokić**, N. Gajić, J. Uljarević, Ž. Kamberović, *Production of technology metals from waste electronics*, Journal of Applied Engineering Science, 17(2019)3, 621, p. 400 – 403, <https://doi.org/10.5937/jaes17-22105>.

**Prijava domaćeg patenta (M87)**

- 1- Z. Anđić, Ž. Kamberović, **J. Đokić**, *Postupak prerade otpadne magnezijumove šljake u proizvode pogodne za dalju upotrebu*, br. patentne prijave П-2018/1460

## Прилог 2

Списак радова ментора предложених за вођење докторске дисертације:

др **Бранимир Јованчићевић**, редовни професор Универзитета у Београду - Хемијског факултета

1. Li J., Wang R., **Jovančićević B.** *The application of ionic liquids in the electrochemical synthesis of dimethyl carbonate from CO<sub>2</sub> and methanol*, in *Ionic Liquids: Electrochemistry, Uses and Challenges*. Edited by Bính Xuân, Nova, New York, 2017: 63-82. ISBN: 978-1-53612-689-1. <http://cherry.chem.bg.ac.rs/handle/123456789/326>
2. Li X., Qiao S., Wang R., **Jovančićević B.** *The application of ionic liquids in the electrochemical reduction of CO<sub>2</sub>*, in *Ionic Liquids: Electrochemistry, Uses and Challenges*. Edited by Bính Xuân, Nova Scineces Publisher, New York, 2017: 83-104. ISBN: 978-1-53612-689-1. <http://cherry.chem.bg.ac.rs/handle/123456789/327>
3. Grbović G., Malev O., Dolenc D., Sauerborn Klobučar R., Cvetković Ž., Cvetković B., **Jovančićević B.**, Trebše P. *Synthesis, characterization and aquatic ecotoxicity of the UV filter diethylaminohydroxybenzoylbenzoate (DHHB) and its chlorinated by-products*. In *Environmental Chemistry*. 2016;13: 119-126. <https://doi.org/10.1071/EN15013>
4. Grba N., Neubauer F., Šajnović A., Stojanović K.A., **Jovančićević B.** *Heavy metals in Neogene sedimentary rocks as a potential geogenic hazard for sediment, soil, and surface and groundwater contamination (eastern Posavina and the Lopare Basin, Bosnia and Herzegovina)*. in *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2015;80(6): 827-838. <https://doi.org/10.2298/JSC140317047G>
5. Stojanović K., **Jovančićević B.**, Šajnović A., Sabo T., Vitorović D., Schwarzbauer J., Golovko A. *Pyrolysis and Pt(IV)- and Ru(III)-ion catalyzed pyrolysis of asphaltenes in organic geochemical investigation of a biodegraded crude oil (Gaj, Serbia)*. in *Fuel*. 2009;88: 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.014>



др Илија Брчески, редовни професор Универзитета у Београду - Хемијског факултета

1. Miličić Lj., Terzić A., Pezo L., Mijatović N., **Brčeski I.**, Vukelić N. *Assessment of efficiency of rare earth elements recovery from lignite coal combustion ash via five-stage extraction.* in Science of Sintering. 2021;53(2): 169-185. <https://doi.org/10.2298/SOS2102169M>
2. Jeremić D., Anđelković L., Milenković M.R., Šuljagić M., Šumar-Ristović M., Ostojić S., Nikolić A.S., Vulić P., **Brčeski I.**, Pavlović V. *One-pot combustion synthesis of nickel oxide and hematite: From simple coordination compounds to high purity metal oxide nanoparticles.* in Science of Sintering. 2020;52(4):481-490. <https://doi.org/10.2298/SOS2004481J>
3. Ivanković N., Kasanin-Grubin M., **Brčeski I.**, Vukelić N. *Possible Sources of Heavy Metals in Urban Soils: Example from Belgrade, Serbia.* in Journal of Environmental Protection and Ecology. 2010;11(2):455-464. <http://cherry.chem.bg.ac.rs/handle/123456789/1091>
4. Novaković S.B., Bogdanović G.A., **Brčeski I.**, Leovac V.M. *Different intermolecular interactions in azido[2-(diphenylphosphino)benzaldehyde semicarbazonato-kappa P-2,N-1,O]nickel(II).* in Acta Crystallographica. Section C: Crystal Structure Communications. 2009;65: 263-265. <https://doi.org/10.1107/S0108270109021970>
5. Radanović D.D., Kaluđerović G., Gomez-Ruiz S., Sladić D., Šumar-Ristović M., **Brčeski I.**, Anđelković K.K. *Crystal Structure of 2-{1-[(1-(2-Pyridinio)ethylidene)hydrazono]ethyl}pyridinium diperchlorate, the Product of Template Condensation in the Presence of Cr(III).* in Journal of Chemical Crystallography. 2009;39(2):138-142. <https://doi.org/10.1007/s10870-008-9443-6>