

## **НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Луке З. Рубињонија, мастер инжењера технологије.

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду бр 35/311 од 9. јула 2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Луке З. Рубињонија, мастер инжењера технологије под насловом „Утицај гама зрачења на својства алкално активираних везива“.

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## **ИЗВЕШТАЈ**

### **1. УВОД**

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Школске 2017/18. године, Лука З. Рубињони, мастер инжењер технологије је уписао докторске академске студије на Универзитету у Београду, Технолошко-металуршки факултет – студијски програм Инжењерство заштите животне средине. Положио је све испите према плану и програму, а завршни испит под називом „Радијациона сигурност алкално активираних везива у кондиционирању радиоактивног отпада“ је одбранио 31. октобра 2019. године.

8. априла 2021. године на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/50 о именовању чланова Комисије за оцену подобности теме и подобности кандидата, и то у следећем саставу проф. др Ацо Јанићијевић, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, виши научни сарадник др Србољуб Станковић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, проф. др Рада Петровић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, проф. др Мирјана Ристић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, проф. др Мелина Калигасидис Крушић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

8. јула 2021. године на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/177 о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата у којој се одобрава кандидату Луки З. Рубињонију, мастер инжењеру технологије, израда докторске дисертације под називом „Утицај гама зрачења на

својства алкално активираних везива“. За менторе ове дисертације одређени су проф. др Ацо Јанићијевић, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Србољуб Станковић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“- Института од националног значаја за Републику Србију.

31. августа 2021. године Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, на седници доноси одлуку бр. 61206-3211/2-21 о давању сагласности на одлуку Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета о прихватању теме докторске дисертације кандидата Луке З. Рубињонија, мастер инжењера технологије, под називом „Утицај гама зрачења на својства алкално активираних везива“ и потврђује за менторе проф. др Аца Јанићијевића, ванредног професора Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Србољуба Станковића, вишег научног сарадника Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“- Института од националног значаја за Републику Србију.

9. јула 2026. године Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета на седници доноси Одлуку бр. 2026-35/311 о именовању Комисије за оцену докторске дисертације, у саставу: проф. др Антоније Оџија, , проф. др Рада Петровић, , доцент др Маја Ђолић, и др Мирјана Ђујић, виши научни сарадник, Института за нуклеарне науке „Винча“ – Института од националног значаја за Републику Србију.

## 1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Инжењерства заштите животне средине, за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Израда докторске дисертације је реализована у потпуности под менторством др Аца Јанићијевића, редовног професора Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду и др Србољуб Станковић, научног саветника Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“– Институт од националног значаја за Републику Србију. Ментори се дужи низ година активно баве проблематиком, која је предмет ове дисертације, а објавили су бројне научне радове у међународним часописима изузетних вредности и врхунским међународним часописима и тиме показали компетентност за руковођење израдом ове докторске дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Лука Рубињони рођен је 31. јула 1982. године у Земуну. Основну школу и гимназију (природни смер) завршава у Београду, где 2001. године уписује Биолошки факултет Универзитета у Београду. Са студијске групе Наставник биологије и хемије прелази на студијску групу Биологија 2002. године, уз каснији избор физиологије животиња за усмерење. Одбраном дипломског рада под називом „Обрасци варирања репродуктивне алокације код *Mercurialis perennis* L.“ 2009. године стиче стручни назив дипломирани биолог. По завршетку студија које одговарају мастер дипломи (300 ЕСПБ), 2009. године уписује докторске студије на Биолошком факултету Универзитета у Београду. Од 2011. запослен је на Биолошком факултету, Катедри за генетику и еволуцију, и ангажован је на пројекту МПНТР бр. 173025, као истраживач приправник. Одлуком Наставно-научног већа Биолошког факултета бр. 15/747 од 13. децембра 2013. стиче звање истраживач сарадник.

Студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду Лука Рубињони почиње школске 2016/2017. године, уписом мастер академских студија – студијски програм Инжењерство заштите животне средине. Завршни мастер рад под називом „Мерење ексхалације радона из узорака земље активном методом“ одбранио је 2017. године, и стекао

академски назив мастер инжењер технологије. Докторске академске студије на Технолошко-металурушком факултету Универзитета у Београду уписује школске 2017/2018. године, студијски програм Инжењерство заштите животне средине. Одлуком Наставно-научног већа ТМФ бр. 35/16 и Решењем бр. 20/10 од 22. фебруара 2018. године, Лука Рубињони стиче звање истраживач сарадник. Од августа 2018. до новембра 2022. кандидат је био запослен у Иновационом центру ТМФ. Одлуком Научног већа Института за општу и физичку хемију бр. 1005 од 31. октобра 2022. изабран је у звање стручни саветник. Запослен је на Институту за општу и физичку хемију од децембра 2022. године.

Лука Рубињони је члан Европског друштва за еволуциону биологију (ЕСЕБ) од 2011. године. У оквиру програма Godfrey Hewitt Mobility Award 2015. године од ЕСЕБ добија финансијску подршку за истраживање под називом Grubs of doubt: The impact of stem-borers on Mercurialis annua life-history traits, реализовано у сарадњи са проф. др Џоном Панелом са Универзитета у Лозани. Кандидат је један од оснивача друштва Ивоук (EvoKE, Evolutionary Knowledge for Everyone), и активни члан изборног комитета тог друштва од 2019. године. Учествовао је на научним скуповима и на друге начине доприносио раду Друштва за физиологију биљака Србије, Српског биолошког друштва, Друштва генетичара Србије и Друштва за електронику, телекомуникације, рачунарство, аутоматику и нуклеарну технику (ЕТРАН). Био је члан локалног организационог одбора конференције ЕТРАН 2019. године.

Уз научноистраживачки рад, Лука Рубињони успешно сарађује са привредом. Дугогодишњи је сарадник предузећа ЦЕП, Персонал Логистик, Планекс Милвес Плус на пословима у вези заштите животне средине и процене ризика. Обучен је за рад са софтвером VISUM i VISSIM фирме PTV. Носилац је лиценци Министарства унутрашњих послова за процену ризика у заштити лица, имовине и пословања (решење 03/4 бр. 34284 од 16. јула 2018), и за израду процене ризика од катастрофа и плана заштите и спасавања (бр. 00608 од 1. јуна 2020). Лука Рубињони течно говори енглески језик, и има основно знање италијанског и француског језика. Ожењен је, отац двоје деце.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### *2.1. Садржај дисертације*

Докторска дисертација кандидата Луке З. Рубињонија под називом „Утицај гама зрачења на својства алкално активираних везива“ написана је на 98 нумерисаних страна, у оквиру којих се налази 48 слика, 11 табела и 139 литературних навода.

Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Теоријски део, Алкално активирани материјали, Заштита од зрачења, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература. Поред тога, дисертација садржи Захвалницу, Сажетак на српском и енглеском језику, Листу скраћеница и Садржај. На крају дисертације дата је Биографија аутора, као и Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторске дисертације, Изјава о коришћењу и Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације.

По својој структури и садржају, докторска дисертација Луке З. Рубињонија задовољава стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

### *2.2. Кратак приказ појединачних поглавља*

У првом поглављу рада под насловом Увод кандидат је указао на актуелност теме која се истражује у докторској дисертацији.

У Теоријском делу - обрађена је теоријска основа јонизујућег зрачења и његових интеракција са материјалима. Наведени су физички, хемијски и биолошки ефекти интеракције зрачења и одговарајуће материје. Приказане су физичке величине које карактеришу пролаз високоенергетских честица кроз материјалну средину. Објашњени су концепти линеарног преноса енергије (*LET – Linear Energy Transfer*), масене зауставне моћи, релативне зауставне моћи, специфичне јонизације и домета честица у материјалу. Размотрене су интеракције тешких и лаких честица, и фотона, у еластичним и нееластичним сударима са атомом, електронским облаком и језгром. Приказана је основа феномена квантног тунеловања. Размотрене су високе специфичне јонизације које настају у интеракцији алфа честица и материје. Уведен је концепт Брегове криве. Приказана је, и објашњена Бете – Блокова формула. Укратко су размотрени ефекти радијације на својства од значаја за складиштење и одлагање високорадиоактивног отпада, узимајући у обзир развој топлоте и гасова у процесу радиоактивног распада физионих продуката у горивним елементима. При разматрању интеракције јонизујућег зрачења и полимерних материјала приказани су елементарни радиолитички процеси у полимерима. Дат је пример радиоллизе етиленско-пропиленских гума и утицаја кисеоника на промене етилен-пропилен-диен-мономер гуме. Приказана су достигнућа у области нанокомпозитних изолаторских материјала и њихове примене у инсталацијама нуклеарних реактора, на примерима унакрсно повезаног полиетилена, етиленско пропиленске гуме и поливинил хлорида.

У трећем поглављу - Алкално активирани материјали дат је детаљан приказ основних алкално активираних везива. Изложена је основа производње Портланд цемента, малтера и бетона заснованих на том везиву, и истакнут је проблем енергетске захтевности процеса производње и пратеће емисије гасова стаклене баште. Наведене су главне фазе настанка алкално активираних везива: делимично растварање алуминосиликатног прекурсора у алкалном активатору, нуклеација, формирање олигомера, умрежавање и очвршћавање гела. Као главни прекурсори алкално активираних материјала препознати су метакаолин, летећи пепео термоелектрана, и троска високих пећи. Размотрена је и улога летећег пепела и троске као адитива у мешавинама на бази Портланд цемента. Препозната је разлика између прекурсора сиромашних, и богатих калцијумом. Троска високе пећи је разматрана као прекурсор богат калцијумом, и дат је кратак историјски преглед њене употребе у грађевинској индустрији. Летећи пепео наведен је као прекурсор са ниским садржајем калцијума, и дат је кратак историјски преглед употребе. Изложен је утицај хемијског састава летећег пепела на својства очврслих матрица. Препозната је чињеница да се летећи пепео разликује по хемијском саставу у зависности од својстава лежишта угља и процеса сагоревања у термоелектрани. Истакнута је могућност валоризације секундарних индустријских сировина који по себи нису довољно реактивни за жељени развој чврстоће, у мешавини са реактивнијим алкално активираним прекурсорима. Алкално активирани мешавина летећег пепела и троске наведена је као високо ефикасно везиво, које постиже механичку чврстоћу од 100 МПа након 28 дана сазревања на 23 °С. Цитирани су наводи из актуелне литературе о постигнутим својствима С-А-S-Н, N-A-S-(Н) и хибридних гелова. У одељку који говори о утицају алкално активираних материјала на животну средину размотрена су смањења емисија загађујућих материја у односу на еквивалентне емисије при производњи Портланд цемента.

Препознато је да се очекиване уштеде драстично разликују у зависности од врсте прекурсора и активатора, и дизајна мешавина, и истакнут је значај студија случаја за појединачне примере употребе. Размотрено је питање производње активатора, и утицај тог процеса на животну средину. Општи закључак је да се применом алкално активираних материјала уместо Портланд цемента постижу значајна смањења емисија гасова стаклене баште. Поглавље се завршава излагањем о примени алкално активираних материјала у заштити од зрачења и управљању радиоактивним отпадом. Описани су општи случајеви употребе цементних материјала у управљању нискордиоактивним отпадом и производња форми отпада погодних

за дугорочно складиштење и одлагање. Истакнут је нижи садржај воде као једна од предности примене алкално активираних материјала, и могућност исушивања топлотним третманом након очвршћавања матрице.

Поглавље - Заштита од зрачења описује природне и вештачке изворе јонизујућег зрачења, даје историјски преглед развоја заштите од зрачења, приказује дозиметријске величине и јединице, и наводи тренутни законски оквир и институције којима је у надлежности заштита од зрачења у Републици Србији. Разматрани су утицаји активности човека, како они директно усмерени ка развоју и примени нуклеарних технологија, тако и активности у којима долази до концентрисања природно присутних радионуклида услед експлоатације и обраде минералних и других сировина. Такође, истакнута је улога и значај Међународне агенције за атомску енергију у јачању међународне сарадње у мирољубивим применама нуклеарних технологија, спречавању пролиферације нуклеарног оружја, и безбедности нуклеарних постројења. Одељак о мониторингу животне средине ближе објашњава спровођење мониторинга радиоактивности у Републици Србији, према Програму систематског испитивања радиоактивности у животnoj средини. Поглавље се завршава одељком о управљању радиоактивним отпадом.

Пето поглавље - Експериментални део подељено је у три одељка: заснованост постављеног експерименталног рада за планирана мерења, основни циљеви рада и почетни материјали за планирана мерења и експериментални рад. Одељак о заснованости постављеног експерименталног рада за планирана мерења излаже пресек објављених научних резултата о ефектима јонизујућег зрачења на неорганске цементе и бетоне, последицама радиогеног загревања и других ефеката зрачења, укључујући радиолизу воде, настанак пероксида и последичну убрзану карбонизацију калцијум хидроксида у калцијум карбонат у очврслим матрицама. Наведени експерименти спроведени су на очврслим пастама у различитим фазама сазревања. Образложени су сценарији употребе цемента у управљању радиоактивним отпадом, и избор да се у експерименталном раду симулира сценарио енкапсулације радиоактивног материјала у затвореном контејнеру, где је свеж неоргански малтер изложен зрачењу отпада, али је у контакту само са спољашњим зидом контејнера и не ступа у хемијске реакције са отпадом. Образложен је избор почетног и коначног времена очвршћавања као меродаван показатељ жељених својстава алкално активираних материјала. Описани су нежељени исходи експеримента: прерано (*flash set*) и одложено (*delayed set*) очвршћавање пасте.

Одељак Основни циљеви рада и почетни материјали за планирана мерења дефинише шире и специфичне циљеве истраживања, и даје општи приказ коришћених материјала. У одељку Експериментални рад наводе се институти и лабораторије у којима су вршене припреме и експериментална мерења, даје се прецизан опис коришћених материјала, наводе се експерименталне процедуре и приказују новоразвијени инструменти и опрема за одређивање времена очвршћавања пасте у пољу јонизујућег зрачења. Експериментални рад у оквиру израде ове тезе извршен је на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, Институту за нуклеарне науке „Винча“ – Институту од националног значаја за Републику Србију, и Институту за мултидисциплинарна истраживања – Институту од националног значаја за Републику Србију, и Рударском институту у Земуну. Материјали коришћени за синтезу алкално активираних пасте су летећи електрофилтерски пепео термоелектране, млевена гранулисана троска високе пећи челичане, и водено стакло. Пепео који је коришћен као полазни базични материјал у експерименту је мешавина честица сакупљених у каскади четири електростатичка филтера димних гасова („комполит”), пореклом из термелектране „Никола Тесла Б“ из Обреновца. Гранулисана троска високе пећи набављена је из челичане „ХБИС“, Смедерево. Троска је млевена, а електрофилтерски пепео механички активиран помоћу вибрационог млина са прстеновима у Рударском институту у Земуну, где је одређен и хемијски

састав сировина, и њихов губитак масе при жарењу. Описана је експериментална процедура озрачивања геополимерске пасте композит летећег пепела (први експеримент).

У другом експерименту излагања пасте јонизујућем зрачењу припремљене су пасте од механички активираниог електрофилтерског пепела, млевене гранулисане троске високе пећи, и њихове 1:1 мешавине. Описан је развој апаратуре која омогућава мерење продора Викат игле у пасту без померања калупа из поља зрачења. Конструисан је пар клима комора од клирита са поклопцима од полиуретанске пене, који по димензијама одговарају фантомима у редовној употреби у дозиметријској лабораторји. Осмишљени су, и конструисани носачи калупа од клирита. Осмишљен је и конструисан уређај за праћење температуре и релативне влажности на четири позиције у реалном времену, на бази Ардуино развојне платформе и DHT22 сензора. Сензори су на дугачким кабловима, што је омогућило вођење каблова кроз постојеће, наменске каналице у дозиметријској лабораторији, и безбедан рад уз примену свих мера заштите. У програму FreeCAD је пројектован, и од ласером сеченог клирита конструисан мост са носачем за Викат клип и иглу Састав пасте, однос активатора и праха, и воде према чврстим материјама представљени су табеларно. Процес оптимизације пасте искоришћен је за пробу опреме.

На локацији, у Секундарној стандардној дозиметријској лабораторији Института „Винча“, у референтном Со-60 пољу уређаја ИРПИК-Б клима коморе су позициониране на путању зрака, делимично испуњене водом и остављене да се топлотно стабилизују. Позиција калупа прецизно је одређена помоћу ласерског индикатора. Температура и релативна влажност у огледној и контролној комори, као и у просторији референтног поља и радном простору лабораторије праћене су помоћу конструисаног индикатора. Контролни узорак је смештен у другу климатску комору, у лабораторији ван просторије за зрачење, у простору који је опслуживан истим клима системом и ван директне сунчеве светлости. По напуштању просторије поља зрачења, и закључавању врата било је могуће подићи извор Цо-60 у уређају ИРПИК-Б и отпочети зрачење. Да би се извршило мерење пенетрације Викат игле у пасту која очввршћава, било је потребно да се извор спусти, а врата откључају и отворе. Тада истраживач улази у просторију, уклања поклопац клима коморе, позиционира мост са Викат клипом изнад узорка, изврши мерење продирањем игле на неколико места у узорку, уклони мост, врати поклопац и напусти просторију. Очврсле, сазреле незрачене пасте искоришћене су за одређивање брзине простирања ултразвучног импулса. Сазреле очврсле пасте синтетисане у раније описаном процесу оптимизације рецептуре испитиване су техником UPV (енг. *Ultrasonic Pulse Velocity*). Мерење је извршено према стандарду SRPS EN 12504-4:2008 – „Испитивање бетонских конструкција – Део 4: Одређивање брзине ултразвучног импулса“, помоћу уређаја „Matest“. Ултразвучне сонде – извор и детектор постављене су на супротне стране узорка, и намазане машћу због бољег контакта с узорком и преноса ултразвучног импулса. Дужина пута импулса одређена је мерењем дебљине узорка. На основу дужине пута и времена простирања одређена је брина простирања ултразвучног импулса кроз очврслу пасту алкално активираниог везива.

Поглавље под називом - Резултати и дискусија приказује резултате експерименталног рада, и разматра их у контексту наведених теоријских основа. XRD анализом су идентификоване присутне кристалне фазе у анализираним узорцима троске. Основни материјал, BFS пре алкалне активације, садржи изражене фазе акерманита и мервинита, што указује да је температурни градијент током хлађења био такав да је омогућио кристализацију. И поред тога, показује задовољавајућа механичка својства. Код алкално активираних узорака, С-А-S-Н матрица се не идентификује као јединствена фаза у референтној бази података, али показује изражен врх налик калциту. Врхови идентификовани као калцит су резултат С-А-S-Н полимеризације, и делимично карбонатије услед изложености атмосферском CO<sub>2</sub>. Прецизна идентификација фазе је отежана услед опсега врха који одговара обрасцима и акерманита, и мервинита.

У експерименту озрачивања геополимерске пасте композит летећег пепела, почетно време везивања је било 3 сата и 25 минута за озрачени узорак и 3 сата и 50 минута за контролни узорак. Коначно време везивања је било 4 сата и 5 минута за озрачени узорак и 4 сата и 50 минута за контролни узорак. Током очврсћавања, примећено је извесно одвајање воде на контакту пластичног калупа и стакленог дна, а мала количина несагорелих честица угља примећена је на површини пасте, што указује на вишак воде у смеши. Зрачење је довело до скраћивања почетног времена везивања за BFS, није показало значајан ефекат за MIX, и скраћивање времена коначног везивања, али не и времена почетног везивања, за FA. Резултати мерења брзине простирања ултразвучног импулса кроз очврслу пасту приказани су табеларно. Измерене брзине ултразвучног пулса су у складу са моделованим и измереним брзинама ултразвука у алкално активираним мешавинама и Портланд цементу. Густа BFS матрица са малом количином воде има највећу брзину простирања ултразвучног импулса.

У седмом поглављу под називом - Закључак су укратко сумирани сви добијени резултати у овој докторској дисертацији и птиказан је њихов значај и практична примењивост у циљу заштите животне средине. Остварени резултати указују да се алкално активирана везива произведена од индустријских секундарних сировина могу безбедно користити као алтернатива Портланд цементу у инкапсулацији радиоактивног отпада ниског до средњег нивоа, узимајући у обзир хемијске интеракције отпада и цементне матрице.

На крају дисертације наведена је - Литература, која садржи све коришћене литературне наводе.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Урађена докторска дисертација под насловом „Утицај гама зрачења на својства алкално активираних везива“ третира актуелни проблем нагомилавања и одлагања отпадног пепела у термоелектранама, као и отпадног материјала - троске у металуршким индустријским системима - железарама. Такође, и питање складиштења радиоактивног отпада у нашој земљи, али и у целом свету, све више добија на значају посебно у периоду новонастале енергетске кризе и дефинитивне потребе за динамичнији развој и коришћење нуклеарних технологија у области генерисања нових енергетских капацитета, затим у смислу интезивног развоја нуклеарне медицине, као и нових индустријских производних процеса уз присуство радиоактивних извора. Све ове наведене области генеришу значајне количине радиоактивног отпада који представља велики потенцијални ризик за животну средину и здравље човека. Ово може довести до контаминације природне средине и уласком алфа радиоактивних извора у ланац исхране, где су они изузетно опасни.

Са друге стране, као што је на почетку напоменуто, услед нагомилавања знатних количина поменутих отпада (пепела и троске) долази до веома негативних еколошких ефеката у огружењу таквих одлагалишта индустријских отпада. Зато се приступило оригиналној идеји да се конструктивним трансформацијама отпадних материјала (у овом случају пепела и троске) дође до модификованих рецепата за генерисање пасте које су послужиле за добијање геополимера и то како као изолационог грађевинског материјала, тако и материјала за безбедно складиштење радиоактивног отпада. Материјали коришћени за синтезу алкално активираних пасте су летећи електрофилтерски пепео термоелектране, млевена гранулисана троска високе пећи челичане, и водено стакло. Пепео који је коришћен као полазни базични материјал у експерименту је мешавина честица сакупљених у каскади четири електростатичка филтера димних гасова („композит“), пореклом из термелектране „Никола Тесла Б“ из Обреновца. Гранулисана троска високе пећи набављена је из челичане „ХБИС“, Смедерево.

Из наведених разлога, ова дисертација је резултатима приказала на који начин је могуће унапредити амбијентално еколошке услове живота у подручјима и окружењу дугогодишњих отпадних одлагалишта. Такође, укључујући у ток ошвршћавања изолационог материјала из наведених пасти и извор зрачења дошло се до унапређених структура материјала за грађевински материјал и материјал за складиштење радиоактивног отпада.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је цитирано 139 литературних навода, од којих највећи део чине новији радови у релевантним међународним часописима. Углавном су референце новијег датума биле коришћене за експериментални део дисертације и дискусију, док су старије референце најчешће биле повезане са теоретским основама. Овакв избор референци је била добра комбинација због саме природе тематике која се обрађивала.

Наведене референце садрже експерименталне резултате истраживања многих истраживача, анализу и дискусију добијених резултата и изведене закључке, као и теоријске основе примењених метода испитивања. Кандидат је проширио до сада позната сазнања о поступцима по питању примене алкално активираних материјала уместо Портланд цемента када се постижу значајна смањења емисија гасова стаклене баште.

Нарочито су занимљива и актуелна сазнања и излагања о примени алкално активираних материјала у заштити од зрачења и управљању радиоактивним отпадом. Описани су општи случајеви употребе цементних материјала у управљању нискордиоактивним отпадом и производња форми нових композита од индустријских отпада погодних за дугорочно складиштење и одлагање. Истакнут је нижи садржај воде као једна од предности примене алкално активираних материјала, и могућност исушивања топлотним третманом након очвршћавања матрице.

Из наведене литературе која је коришћена у истраживању, уочава се адекватно познавање предметне области истраживања, као и познавање актуелног стања истраживања у овој области у свету. Резултати приказани у дисертацији у потпуности су у складу са савременим научним токовима у наведеној области.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Хемијски састав полазног електрофилтерског пепела и троске високе пећи одређени су методом алкалног топљења. Време везивања одређено је применом Викат апарата према EN 196-3 стандарду, и применом наменски конструисаног носача Викат клипа и игле, функционално истоветног Викат апарату. Минерални састав троске високе пећи пре и након алкалне активације утврђен је рендгенском структурном анализом (енг. *X-ray diffraction*, *XRD*), употребом софтвера Match! верзија 3.8.2. Као референтна база образаца дифракционих максимума коришћена је база неорганских једињења „Open Crystallography Database“, која се дистрибуира уз Match! Софтвер. Идентификација фаза извршена је селекцијом вероватних фаза (према хемијској формули и познатим својствима) из листе могућих подрударних фаза са високим индексом подударности (енг. *Figure of Merit – FoM*). Мерење брзине простирања ултразвучног импулса кроз очврслу пасту извршено је према стандарду SRPS EN 12504-4:2008 – „Испитивање бетонских конструкција – Део 4: Одређивање брзине ултразвучног импулса“. Конзистенција свежих пасти алкално активираних везива одређена је распрострањањем на столу за распрострањање према EN 1015-:2008 стандарду. Корекција распрострањања пасте извршена је инкременталним додавањем активатора – воденог стакла модула 1,5. Озрачивање пасте у току очвршћавања вршено је у пољу кобалта Co-60, помоћу уређаја ИРПИК-Б у

Секундарној дозиметријској лабораторији Института за нуклеарне науке „Винча“. При пројектовању и изради апаратуре коришћен је савремени приступ примене рачунара и машина за брзу прототипизацију. За пројектовање и приказ 3D модела коришћен је софтвер FreeCAD. Одређени елементи израђени су техником 3D штампе (енг. *Filament Deposition Manufacturing* – FDM). Уређај за праћење температуре и релативне влажности израђен је помоћу Ардуино развојне платформе, приказује вредности очитане са DHT22 сензора.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Прегледом литературе из области истраживања, као и резултата проистеклих из докторске дисертације, може се закључити да је значајан допринос у генерисању нових карактеристика материјала геополимера. Описана је експериментална процедура озрачивања геополимерске пасте - композит летећег пепела. Такође, у процесу очвршћавања композитних узорака из претходно припремљени пасти три типа генерисаних пасти излагана су јонизујућем зрачењу. Композитни узорци су добијени од пасте припремљене од механички активираниог електрофилтерског пепела, млевене гранулисанае троске високе пећи, и њихове 1:1 мешавине. Резултати истраживања ове докторске дисертације доприносе смањењу нагомилавања отпадног пепела из термоелектана и троске из челичана као и радиоактивног отпада који предствља велики актуелни проблем у протеклих 40 година. Истакнута су еколошко комерцијална решења проблема насталих услед енергетске захтевности у познатим процесима индустријске производње и генерисање пратеће емисије гасова стаклене баште. Реализована је идеја о примени алкално активираних материјала у заштити од зрачења и управљању радиоактивним отпадом.

Резултати истраживања ове докторске дисертације верификовани су од стране светске научне јавности објављивањем у два истакнута међународна часописа.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Лука З. Рубињони је током израде докторске дисертације и научних радова непосредно везаних за докторску дисертацију показао да влада методама научно-истраживачког рада карактеристичним за техничке науке, уз допуну еколошког сегмента, који је незаоставни део њенговог професионалног опредељења, што потврђује и одабир студентског програма који је кандидат изабрао.

На основу свега реченог можемо утврдити да кандидат Лука З. Рубињони поседује све квалитете неопходне за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације остварени су следећи научни доприноси:

- Дефинисани су протоколи и процедуре за синтезу алкално активираних пасте и генерисање геополимера (летећи електрофилтерски пепео термоелектране, млевена гранулисана троска високе пећи челичане, и водено стакло);
- Утврђен је утицај гама зрачења на својства алкално активираних везива. Зрачење је довело до скраћивања почетног времена везивања за BFS, није показало значајан ефекат за MIX, и скраћивање времена коначног везивања, али не и времена почетног везивања, за FA;

- Аргументована је радијациона сигурност алкално активираних везива у кондиционирању радиоактивног отпада;
- Измерене брзине ултразвучног пулса су у складу са моделованим и измереним брзинама ултразвука у алкално активираним мешавинама и Портланд цементу. Густа BFS матрица са малом количином воде има највећу брзину простирања ултразвучног импулса;
- Пројектован је и реализован прототип апаратуре која омогућава мерење продора Викат игле у пасту без померања калупа из поља зрачења. Осмишљен је и конструисан уређај за праћење температуре и релативне влажности на четири позиције у реалном времену, на бази Ардуино развојне платформе и DHT22 сензора.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Прегледом литературе из области наведених материјала истакнуто је да се као алтернатива Портланд цементу могу користити алкално активирани материјали (ААМ) захваљујући повољним физичко-механичким и еколошким карактеристикама, при чему се као полазни материјали најчешће користе електрофилтерски пепео из термоелектрана (ЕФП) и згура (троска) високе пећи (ЗВП). Посебно је истакнут значај хибридних материјала на бази мешавине ЕФП и ЗВП (АА-ЕФПЗВП), који могу показати побољшана својства у односу на ААМ на бази ЕФП (АА-ЕФП) и ААМ на бази ЗВП (АА-ЗВП). Указано је на утицај састава полазног материјала и услова синтезе на структуру, механичка својства и способност имобилизације РАО алкално активираним материјалима.

У том контексту, остварени научни доприноси представљају суштински помак у унапређењу постојећег знања у области. Системска анализа утицаја извора радиоактивног зрачења на процес очвршћавања пасте за три експериментално креиране модификације материјала електрофилтерског пепела, мленене гранулисане троске високе пећи, и њихове 1:1 мешавине указују на широке могућности практичне примене нових композита у савременим високотехнолошким индустријама, пре свега у грађевинској индустрији генерално за изолацију, али и веома значајно за обликовање контејнера или других типова поузданих одлагалишта и складиштења радиоактивног отпада који настаје у нуклеарној индустрији. На основу свега изложеног може се закључити да резултати ове дисертације представљају значајан допринос разумевању описаних процесно-структурно-функционалних веза и отварају нове могућности за пројектовање ових материјала према конкретним захтевима индустријских апликација

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Лука З. Рубињони је резултате истраживања током израде ове дисертације потврдио објављивањем радова у међународним часописима и саопштењима на међународним скуповима. Из ове докторске дисертације проистекли су следећи радови:

##### ***Категорија M21:***

**Rubinjon, L., Stanković, S., & Janićijević, A. (2024).** Setting Time of Alkali-Activated Binders Exposed to Co-60 Gamma Radiation. *Minerals*, 15(1), 25. (IF5/2025: 2.8; Mining and Mineral Processing 8/33); (IF: 2.8)(EISSN: 2075-163X) (<https://doi.org/10.3390/min15010025>)

##### ***Категорија M22:***

## **5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204 од 22. јуна 2018. године), коришћењем програма iThenticate (10. јул 2026. године) извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидата Луке З. Рубињонија под називом „Утицај гама зрачења на својства алкално активираних везива“. На основу извештаја провере оригиналности утврђени проценат подударности је 8%. Овај степен подударности последица је употребе термина типичних за област којој припада дисертација, назива примењених метода истраживања, физичких величина, установа у којима су запослени чланови Комисије и слично. На основу свега изложеног, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата Луке З. Рубињонија оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

## **6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

На основу свега наведеног о кандидату и написаној докторској дисертацији Комисија сматра да докторска дисертације Луке З. Рубињонија, мастер инжењера технологије, под називом „Утицај гама зрачења на својства алкално активираних везива“, представља значајан и оригиналан научни и практични допринос у предметној области истраживања - области Инжењерства заштите животне средине, што је потврђено објављивањем адекватних научних радова у истакнутим међународним часописима. Комисија је установила да је ова докторска дисертација написана према упуству Универзитета у Београду и мишљења је да је испуњава све захтеване критеријуме, као и да је кандидат током израде докторске дисертације показао научноистраживачку способност, самосталност у раду и креативност у свим фазама истраживања и израде дисертације. Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-метаалуршког факултета Универзитета у Београду да поднегу докторску дисертацију под називом „Утицај гама зрачења на својства алкално активираних везива“ кандидата Луке З. Рубињонија, мастер инжењера технологије, прихвати, изложи на увид јавности у законски предвиђеном року и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да након завршетка ове процедуре позове кандидата на усмену одбрану дисертације, пред Комисијом у истом саствау.

У Београду 13. јул 2026. године

## ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....

др Антоније Оџија, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....

др Рада Петровић, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....

др Маја Ђолић, доцент,  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....

др Мирјана Ћујић, виши научни сарадник,  
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“  
Институт од националног значаја за Републику Срби