

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Гордане Г. Станојевић

Одлуком бр. 2026-35/166 од 7. маја 2026. године именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидаткиње Гордане Г. Станојевић под насловом „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“.

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

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Школске 2015/2016. године Гордана Г. Станојевић (девојачко Танасијевић), мастер инжењер технологије, уписала је докторске академске студије на студијском програму Хемијско инжењерство, на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду.

5. новембар 2020. године – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/313 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидаткиње Гордане Г. Станојевић, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“.

24. децембар 2020. године – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/390 о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме докторске дисертације под називом „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“ и кандидаткиње Гордане Г. Станојевић, мастер инж. технологије, за израду докторске дисертације. За ментора ове докторске дисертације именована је др Рада Петровић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду.

28. јануар 2021. године – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду донета је одлука бр. 61206-257/2-21 о давању сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације Гордане Г. Станојевић, под називом „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“ и одређивању проф. др Раде Петровић за ментора.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 76. Статута Универзитета у Београду Технолошко-металуршког факултета и захтева студенткиње, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до краја 2025/2026. године, будући да је на основу увида у поднету документацију кандидаткиња била у статусу мировања школске 2021/2022. и 2022/2023. године.

7. мај 2026. године – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука бр. 2026-35/166 о именовању Комисије за оцену докторске дисертације Гордане Г. Станојевић, под називом „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“ у саставу: др Снежана Грујић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, др

Звездана Башчаревић, научни саветник Универзитета у Београду – Института за мултидисциплинарана истраживања, Института од националног значаја за Републику Србију, и др Ђорђе Вељовић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа област Хемијско инжењерство, за коју је матичан Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду. Менторка др Рада Петровић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, на основу свог научног искуства и објављених научних радова компетентна је да руководи израдом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Гордана Г. Станојевић (девојачко Танасијевић) је рођена 15. августа 1986. године у Београду где је завршила основну и средњу школу. Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду уписала је школске 2005/2006. године, студијски програм Биохемијско инжењерство и биотехнологија, на ком је и дипломирала 2014. године са просечном оценом 8,44 и стекла звање дипломирани инжењер технологије. Мастер академске студије уписала је школске 2014/2015. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Биохемијско инжењерство и биотехнологија, изборно подручје Биохемијско инжењерство, и 2015. године завршила са просечном оценом 9,63, стекавши звање мастер инжењер технологије. Током 2015. године, као члан IAESTE организације, боравила је на стручној пракси на Lomonosov Moscow University of Fine Chemical Technology у Руској Федерацији у трајању од 6 недеља. Докторске академске студије уписала је школске 2015/2016. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Хемијско инжењерство. Положила је све испите предвиђене планом и програмом са просечном оценом 9,92.

Од априла 2018. године запослена је као истраживач-приправник у Универзитету у Београду – Институт за мултидисциплинарна истраживања, Институт од националног значаја за Републику Србију. У звање истраживач-приправник изабрана је 23. фебруара 2018. године, а у звање истраживач-сарадник 13. априла 2021. године. Учествовала је у реализацији пројеката: TP34026 „Геополимери - Развој технологије за конверзију индустријског отпада у функционалне материјале”, финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије; Доказ концепта 5033 „Развој филтера на бази биомасе из микроалги за апсорпцију тешких метала из отпадних вода“ финансираног од стране Фонда за иновациону делатност; и SPS 985402 (G5402) „Побољшана сигурност кроз безбеднију цементацију опасних отпада/Improved security through safer cementation of hazardous waste“, из НАТО програма: Наука за мир и сигурност. Током 2018. године похађала је двонедељну обуку за младе истраживаче на Универзитету у Шефилду, реализовану у оквиру међународног НАТО пројекта. Гордана Г. Станојевић је аутор и коаутор укупно 6 радова који су публиковани у међународним научним часописима и то: један рад из категорије M21a+, четири рада из категорије M21a и један рад из категорије M23, као четири саопштења штампана у целини категорије M33, два саопштења штампана у изводу категорије M34 и два техничка решења категорије M85. Члан је Друштва за керамичке материјале Србије.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње Гордане Г. Станојевић под називом: „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“ написана је на 117 нумерисане стране, у оквиру којих се налази 66 слика, 15 табела и 193 литературна навода. Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Теоријски део, 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 Гордане Г. Станојевић задовољава стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводу су наведени поступци управљања радиоактивним отпадом (РАО), са посебним освртом на имобилизацију цезијума-137 (^{137}Cs), као једног од најзаступљенијих продуката нуклеарне фисије урана и плутонијума у нуклеарним реакторима, који због дугог периода полураспада, високе специфичне активности и велике покретљивости представља значајан ризик по животну средину и здравље људи. Указано је на ограничења најчешће коришћених материјала на бази портланд цемента за имобилизацију Cs. 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 хибридни 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. На крају поглавља дефинисани су предмет и циљеви истраживања, који се односе на испитивање ефикасности и механизма имобилизације Cs у ААМ на бази ЕФП, ЗВП и њихове мешавине, при различитим концентрацијама Cs, као и утицаја имобилизације и излуживања Cs на физичко-механичка и структурна својства ААМ.

Теоријски део подељен је у три потпоглавља која обухватају преглед досадашњих сазнања из области РАО, ААМ и њихове примене за имобилизацију радионуклида, а посебно Cs. У првом потпоглављу дат је прво преглед управљања и значаја безбедног третмана РАО са аспекта заштите здравља људи и животне средине. Потом су наведени критеријуми за класификацију РАО према активности, периоду полураспада и пореклу. У оквиру овог дела описане су и основне фазе управљања РАО: карактеризација, предtretман, tretман, кондиционирање, складиштење и одлагање. Посебна пажња посвећена је физичко-хемијским и радиолошким карактеристикама, пореклу и понашању радиоактивног Cs у животној средини, као и проблемима који се јављају услед велике покретљивости и могућности миграције Cs у екосистемима. У другом потпоглављу детаљно су разматрани ААМ као потенцијалне матрице за имобилизацију Cs. У овом делу су приказане основна физичка својства, хемијски и минерални састав и механизам реакција алкалне активације ЕФП и ЗВП. Посебно је анализиран утицај хемијског састава и реактивности ових материјала на реакције алкалне активације и својства добијених ААМ. У наставку су детаљно размотрене структуре производа реакције алкалне активације ЕФП и ЗВП који су коришћени у дисертацији за добијање ААМ: N-A-S-H гела у АА-ЕФП, C-A-S-H гела у АА-ЗВП и хибридних гелова у АА-ЕФПЗВП. У овом делу су анализирани и услови синтезе ААМ, као што су концентрација и врста алкалног активатора, температура и време неговања, као и њихов утицај на микроструктуру, механичка својства и стабилност материјала. Посебан део другог потпоглавља посвећен је примени ААМ за имобилизацију Cs. Дат је преглед резултата досадашњих истраживања која се односе на механичка својства и отпорност на излуживање ових материјала, као и факторе који утичу на ефикасност имобилизације Cs. Разматрани су механизми имобилизације Cs у ААМ, укључујући: јонску измену између продуката реакције алкалне активације и Cs, физичку адсорпцију Cs^+ на површини продуката реакције алкалне активације и физичку инкапсулацију Cs. Приказан је преглед литературних података који се односе на примену ААМ за имобилизацију других радионуклида. На крају Теоријског дела, у трећем потпоглављу, образложени су предмет и основни научни циљеви докторске дисертације. Истакнуто је да у досадашњим истраживањима имобилизације Cs у ААМ на бази ЕФП, ЗВП и њихове мешавине недостају подаци о испитивању утицаја Cs на време везивања, иако је овај параметар од великог значаја за практичну примену ААМ. Недовољно је испитан и утицај гранулометријског састава ЕФП на имобилизацију Cs, иако је познато да реактивност ЕФП зависи од величине честица. Такође је истакнуто да су ААМ за имобилизацију Cs углавном припремани на собној температури, тако да нема информација о ефикасности имобилизације Cs када је синтеза ААМ извођена на повишеним температурама. Најзад, ААМ на бази мешавине ЕФП и ЗВП знатно су мање проучавани у односу на ААМ на бази појединачних полазних материјала, иако се активацијом смеше ЕФП и ЗВП могу оптимизовати својства ААМ у

погледу времена везивања, микроструктуре и механичких карактеристика, што може имати важну улогу у имобилизацији Cs и дугорочној стабилности ААМ. Имајући у виду наведено, резултати ове дисертације требало би да омогуће детаљније разумевање механизма имобилизације Cs у ААМ на бази ЕФП и ЗВП, утицај гранулометријског састава полазног ЕФП на ефикасност имобилизације Cs, утицај додатка ЗВП на ефикасност имобилизације Cs у АА-ЕФП, утицај удела Cs на физичко-механичка и структурна својства ААМ, као и утицај процеса излуживања на механичка и структурна својства ААМ са различитим уделима Cs.

Експериментални део подељен је у пет потпоглавља. У првом потпоглављу наведени су полазни материјали (ЕФП и ЗВП) и алкални активатор (натријум-силикат) коришћени за синтезу ААМ. У потпоглављу број два описана је припрема раствора за алкалну активацију, док је у трећем и четвртном приказана синтеза и услови синтезе пасте и малтера ААМ, редом, на бази ЕФП и ЗВП, као и мешавине ЕФП и ЗВП при масеном односу 75:25, при различитим уделима Cs (2 мас.% и 5 мас.% Cs). У петом потпоглављу су наведене методе испитивања полазних материјала и ААМ: XRD, FTIR, SEM/EDS, TGA, ^{29}Si MAS NMR и ВЕТ, и дати услови рада инструмената коришћених у истраживању.

У поглављу Резултати приказани су и анализирани резултати добијени у оквиру рада на овој дисертацији, кроз четири потпоглавља. У првом потпоглављу приказани су резултати карактеризације полазних материјала, две фракције ЕФП и једног узорка ЗВП. Утврђене су и анализирани разлике у хемијском и гранулометријском саставу између две фракције ЕФП, као и разлике у хемијском и минералном саставу између ЕФП и ЗВП. У другом потпоглављу приказани су резултати испитивања имобилизације Cs у АА-ЕФП. Испитано је време везивања, излуживање Cs, механичка својства и структурне промене изазване додатком Cs, као и процесом излуживања. Времена везивања су анализирана у складу са захтевима стандарда EN 197-1 за везива на бази портланд цемента. Показано је да су пасте на бази ЕФП са већим уделом честица величине $<45\ \mu\text{m}$ задовољиле вредности времена везивања прописане стандардом, независно од удела додатог Cs, док је код пасте АА-ЕФП синтетисаних са крупнијом фракцијом ЕФП крај времена везивања је био дужи од вредности прописаних стандардом. Ови резултати су показали да већи удео честица $<45\ \mu\text{m}$ у (полазном) ЕФП, захваљујући већој додирној површини између раствора активатора и честица, доводи до бржег растварања ЕФП и формирања производа реакције алкалне активације, односно N-A-S-H гела. Такође је утврђено да додаток Cs доводи до продужавања времена везивања код свих испитиваних узорака АА-ЕФП, што је указало да присуство Cs успорава реакције кондензације. Излуживање Cs из АА-ЕФП испитивано је према ANSI/ANS-16.1-2003 стандарду. Добијени резултати су показали да је брзина излуживања Cs (LR) највећа на почетку излуживања (у прва 2 h), када се излужују јони са површине и они који се налазе у близини површине узорка, а да се са временом LR смањује, јер се повећава дужина дифузионих путева, односно излужују се јони који су све даље од површине. Уочено је и да су вредности LR веће при уделу Cs од 5 % у односу на узорке са 2 % Cs, што указује на већи удео слабо везаног Cs у узорку са 5 % Cs, односно јона Cs^+ који су физички инкапсулирани у порама, а не као јони који компензују наелектрисање у структури алумосиликатног гела. Поређењем узорака АА-ЕФП на бази ЕФП различитог гранулометријског састава показано је да су кумулативне концентрације излуженог Cs након 5 дана излуживања биле веће код узорака на бази ЕФП крупније гранулометрије, иако су почетне LR биле приближно једнаке. На основу добијених резултата, даља испитивања ефикасности имобилизације Cs извођена су коришћењем АА-ЕФП који су добијени алкалном активацијом ЕФП са већим уделом честица мањих од $45\ \mu\text{m}$. Утврђено је да је током првих пет дана излуживања Cs из АА-ЕФП доминантан механизам излуживања била дифузија, а у каснијем периоду (од петог до 90 дана) исцрпљивање. Израчунат је средњи индекс излуживања (L_{sr}), квантитативни параметар за оцену ефикасности имобилизације Cs у АА-ЕФП. Према Америчкој нуклеарној регулаторној комисији (NRC), L_{sr} за првих пет дана треба да буде већи од 6 како би се материјал сматрао погодним за имобилизацију РАО, и тај услов задовољили су сви испитивани узорци АА-ЕФП. Показано је да присуство Cs доводи до повећаног излуживања Na, што указује на ефикасније везивање Cs^+ јона за структуру алумосиликатног гела АА-ЕФП, вероватно услед мање хидратне љуске Cs^+ јона у односу на јон Na^+ . Такође, уочено је смањено излуживање Si и Al у присуству Cs. Испитивање механичких својстава и структурна/микроструктурна анализа спроведене су на узорцима АА-ЕФП пре и након петодневног излуживања. Статистичком анализом варијансе (ANOVA) показано је да ни додаток Cs, ни процес излуживања нису имали статистички значајан утицај на чврстоћу при притиску ($p > 0,05$). Вредности чврстоће при притиску биле су веће од минимално прописане вредности (3,4 МПа) према NRC критеријумима, што указује на могућност примене испитиваних материјала у процесима кондиционарања РАО који садржи Cs. ВЕТ анализом је показано додаток Cs доводи до

повећања специфичне површине ($S_{\text{ВЕТ}}$) АА-ЕФП и померања максимума расподеле величина мезопора ка мањим вредностима, што указује на формирање компактније порозне структуре. Излуживање доводи до повећања укупне запремине пора и запремине мезопора, услед растварања нестабилних делова структуре и веће доступности унутрашњих пора, при чему је максимум расподеле величине мезопора померен је ка већим вредностима. XRD анализом је одређен минерални састав АА-ЕФП, где је поред кристалних фаза карактеристичних за ЕФП (мулит, кварц, фелдспат, хематит, анхидрит), у АА-ЕФП детектован и калцит, који је настао као резултат карбонатизације АА-ЕФП током припреме узорака за анализу или током одлежавања. У АА-ЕФП са Cs уочено је формирање Cs-фазе, вероватно $\text{Cs}_2\text{Al}(\text{OH})(\text{SiO}_4)_2$, која се не јавља у узорцима након петодневног излуживања, што указује на нестабилност ове фазе у воденој средини. FTIR анализом АА-ЕФП није уочено померање положаја главне T–O–Si (T = Al, Si) траке са додатком Cs. Међутим, уочено је да се смањује интензитет трака O–H и H–O–H молекула воде, као и карбонатних трака, што је објашњено мањим уделом везане воде и делимичном заменом Na^+ јона Cs^+ јонима у структури гела, односно формирањем N(Cs)-A-S-H гела. TG анализа показала је да су сви АА-ЕФП узорци имали слично термичко понашање, при чему су уочена три карактеристична корака губитка масе: уклањање физички и хидратационо везане воде, дехидроксијација алумосиликатног гела и разлагање карбонатних фаза и/или нове фазе са Cs у случају АА-ЕФП узорака са Cs. У АА-ЕФП узорцима синтетисаним са додатком Cs дехидроксијација алумосиликатног гела уочена је на нижим температурама у односу на узорак АА-ЕФП синтетисан без додатка Cs. SEM анализа није показала значајне промене у микроструктури услед додавања Cs, нити након излуживања. Међутим, EDS резултати су указали да се са повећањем удела Cs смањује однос Na/Al, док однос Cs/Al расте, чиме је потврђено да Cs^+ јони делимично преузимају улогу Na^+ јона у компензацији негативног наелектрисања у структури алумосиликатног гела. Након излуживања, Cs/Al однос остаје приближно константан, док се Na/Al смањује, што указује да је Cs стабилније везан у структури N(Cs)-A-S-H гела од Na. Равномерна расподела Cs у матрици, потврђена EDS мапирањем, додатно указује на успешно инкорпорирање Cs у структуру алумосиликатног гела. Структурне разлике најбоље су уочене ^{29}Si MAS NMR анализом, која је показала промене у расподели $Q^n(\text{Al})$ структурних јединица у зависности од удела Cs, као у услед излуживања. Показано је да је додаток Cs у АА-ЕФП довео до повећања удела $Q^4(\text{mAl})$ структурних јединица богатијих Al, односно до смањења удела структурних јединица богатијих Si. Након излуживања у дејонизованој води показано је да долази до раскидања дела Si-O-Al веза у структури алумосиликатног гела, излуживања Al и формирања гела са већим уделом Si-O-Si веза.

Резултати испитивања имобилизације Cs у АА-ЗВП приказани су у трећем потпоглављу. Пасте АА-ЗВП су показале брзо почетно везивање, са временима која су краћа од минимално дозвољеног према стандарду EN 197-1 (60 min), осим за узорак код кога је удео Cs био 5 %. Поређењем резултата добијених за АА-ЗВП и АА-ЕФП пасте утврђено је да, иако повећање удела Cs у оба случаја доводи до продужења времена везивања, АА-ЗВП материјали показују значајно брже везивање, што указује да својства полазних материјала имају највећи утицај на кинетику реакција, при чему висок удео Ca у ЗВП доприноси бржем формирању C–A–S–H гела. Као и у случају АА-ЕФП узорака, брзине излуживања Cs су највеће у почетном периоду излуживања, током прва 2 h. Кумулативне концентрације излуженог Cs су много веће из АА-ЗВП него из АА-ЕФП, што указује на значајно мању ефикасност имобилизације Cs у АА-ЗВП у односу на АА-ЕФП материјале. Уочене разлике објашњене су различитом природом и структуром гелова који се формирају у овим материјалима, при чему N-A-S-H гел у АА-ЕФП обезбеђује ефикаснију имобилизацију Cs у односу на C-A-S-H гел у АА-ЗВП. Указано је и да већи степен излуживања из АА-ЗВП може бити последица веће порозности и повезаности пора, што омогућава лакшу дифузију Cs јона кроз матрицу. Утврђено је да је доминантан механизам излуживања Cs током 5 дана излуживања из АА-ЗВП растварање, за разлику од АА-ЕФП код којих је процес током првих дана контролисан дифузијом. Добијене L_{sr} вредности за Cs биле су мало веће од минимално препоручених NRC вредности и знатно мање од оних за АА-ЕФП. Поред тога, показано је да повећање удела Cs доводи до повећаног излуживања Ca, Si и Al, што указује на повећано растварање и делимичну деградацију, односно декалцификацију C-A-S-H гела у присуству Cs. Статистичком анализом показано је да је утицај удела Cs и процеса излуживања на чврстоће при притиску АА-ЗВП углавном изузетно значајан ($p < 0,001$). Додатак Cs довео је до повећања чврстоћа при притиску, док је излуживање довело до смањења чврстоћа. Добијене вредности чврстоћа при притиску задовољавају NRC критеријум. Показано је да постоји директна корелација између односа Ca/Al и Ca/Si, одређених ЕДС анализом, и вредности чврстоће при притиску, јер се Ca/Al и Ca/Si односи повећавају са додатком Cs, а смањују са излуживањем. XRD анализом је показано да као доминантан производ алкалне активације ЗВП настаје слабо кристални C–A–S–H гел. Поред тога,

идентификоване су кристалне фазе пореклом из ЗВП (мелилит и мервинит), као и фазе које настају услед карбонатизације. Као и код АА-ЕФП узорака, могуће је да је присутна $Cs_2Al(OH)(SiO_4)_2$ фаза, која се не јавља у узорцима АА-ЗВП након излуживања. FTIR анализа је указала да додаток Cs утиче на структуру С-А-С-Н гела, подстиче карбонатизацију АА-ЗВП, као и формирање N-A-S-H гела. SEM анализом нису уочене значајне промене у микроструктури услед додавања Cs у АА-ЗВП, као ни након излуживања. Додатак Cs доводи до повећања атомских односа Ca/Si и Ca/Al, док однос Al/Si остаје приближно константан. Уочена је јасна корелација између Ca/Si и Ca/Al односа и чврстоће при притиску, што указује да повећање Ca/Si и Ca/Al односа доприноси порасту чврстоћа при притиску АА-ЗВП. Након излуживања, Ca/Si и Ca/Al односи се смањују, што је повезано са излуживањем Ca и могућом декарбонизацијом С-А-С-Н гела, што доводи до смањења чврстоћа при притиску АА-ЗВП. ^{29}Si MAS NMR резултати су показали смањење $Al^{(IV)}/Si$ односа и скраћивање силикатних ланаца (MCL), као и појаву Q^n (mAl) структурних јединица које указују на формирање N-(C)-A-S-H типа гела, посебно при већем уделу Cs. Након излуживања дошло је до изражене структурне реконструкције: С-А-С-Н гел се делимично трансформисао у С-С-Н и алумосиликатне (N,C)-A-S-H фазе, уз повећање степена полимеризације силикатне мреже. Успостављене су јасне корелације између $Al^{(IV)}/Si$, MCL, Q^n (mAl) структурних јединица и чврстоћа при притиску.

У четвртном потпоглављу приказани су резултати испитивања имобилизације Cs у АА-ЕФПЗВП. Као и за АА-ЕФП и АА-ЗВП, анализирано је време везивања, механичка својства и структурне промене изазване додатком Cs, као и процесом излуживања. Добијени резултати су упоређени са резултатима добијеним за АА-ЕФП и АА-ЗВП. Показано је да Cs доводи до продужавања времена везивања као и код АА-ЕФП и АА-ЗВП узорака, при чему су времена везивања значајно краћа него за АА-ЕФП, а мало већа него за АА-ЗВП, без обзира на знатно већи удео ЕФП у мешавини. Овакво понашање резултат је веће реактивности ЗВП у односу на ЕФП, односно брзог формирања С-А-С-Н гела. Утврђено је да је дифузија примарни механизам излуживања Cs из АА-ЕФПЗВП при обе концентрације Cs, слично као код АА-ЕФП, за разлику од АА-ЗВП код којих је доминантан механизам било растварање. Закључено је да механизам излуживања зависи пре свега од хемијског састава и структуре формираних гелова, а не од удела Cs. С друге стране, уочено је да узорци са већим уделом Cs показују веће кумулативне концентрације излуженог Cs и веће брзине излуживања, као што је то био случај и за АА-ЕФП и АА-ЗВП. Добијене вредности L_{sr} показале су да АА-ЕФПЗВП материјали имају знатно већу ефикасност имобилизације Cs у односу на АА-ЗВП, док су добијене вредности блиске, али ипак мало мање него за АА-ЕФП. Показано је да кумулативне концентрације излужених Si и Al у малој мери зависе од удела Cs, што указује на релативно добру стабилност алумосиликатне мреже. Са друге стране, повећање удела Cs доводи до повећаног излуживања Na и Ca, што указује на већу конкурентност Cs^+ јона као јона који компензују негативно наелектрисање алумосиликатне мреже. Статистичком анализом показано је да је утицај удела Cs и процеса излуживања на чврстоће при притиску углавном изузетно значајан ($p < 0,001$). Иако није уочен очекивани синергистички ефекат ЕФП и ЗВП у погледу механичких својстава, добијене чврстоће при притиску АА-ЕФПЗВП материјала су задовољиле критеријуме NRC. Показано је да са порастом удела Cs долази до смањења укупне запремине и величине пора, што је довело до пораста чврстоћа при притиску, док излуживањем долази до повећања пора, што је приписано растварању нестабилних фаза и смањења чврстоћа при притиску. Показано је да је додаток Cs довео до смањења средњег пречника пора, укупне запремине пора и запремине мезопора. Истовремено, максимум расподеле величина пора умерен је ка мањим вредностима што указује на формирање компактније структуре са већим уделом мањих пора, што је последично довело и до пораста чврстоћа при притиску. Након излуживања долази до померања расподеле величина пора у АА-ЕФПЗВП ка већим вредностима, што је довело до смањења чврстоћа при притиску. Рендгенска структурна анализа свих АА-ЕФПЗВП указала је на присуство аморфне фазе, највероватније N-A-S-H и С-А-С-Н гелова. Поред аморфне фазе, детектоване су кристалне фазе пореклом из ЕФП (кварц, мулит, хематит, анхидрит и фелдспат) и ЗВП (мелилит и мервинит), као и калцит и/или слабо искристалисали С-S-H/C-A-S-H гел. Додатак Cs довео је до повећања удела аморфне фазе и продуката карбонатизације. Као и у случају АА-ЕФП и АА-ЗВП, рендгенска дифракциона анализа је указала на могуће присуство $Cs_2Al(OH)(SiO_4)_2$ фазе у узорку АА-ЕФПЗВП синтетисаном са 5 мас.% Cs. Након излуживања, ова Cs-фаза нестаје, што указује да је растворљива у води. FTIR анализом показано је да у АА-ЕФПЗВП узорцима доминира N-A-S-H гел. Додатак Cs не доводи до значајнијег померања главне траке, што указује да не долази до већих промена у структури гела, али је указано на интензивнију карбонатизацију. Након излуживања уочена је реорганизација структуре гела и повећање удела Si-O-Si веза у структури АА-ЕФПЗВП, као и трансформација карбонатних фаза. SEM анализом уочено је да додаток Cs није довео до значајних промена у микроструктури, док је након излуживања уочена нешто

већа порозност, посебно код узорка без Cs. Због изражене хетерогености гела и високих стандардних девијација, EDS резултати су коришћени првенствено за праћење трендова у односима главних елемената. Са повећањем удела Cs уочено је благо повећање Si/Al и Ca/Si односа, што указује на интензивније растварање ЗВП. Пораст Cs/Al односа са повећањем удела Cs указује да Cs⁺ јони учествују у компензацији негативног наелектрисања алумосиликатне мреже. Након излуживања није уочено фазно раздвајање, али долази до смањења Na/Al и Na/Si односа, што указује на веће излуживање Na у односу на Cs и Ca. Односи Cs/Al и Cs/Si се нису значајно променили услед излуживања, што потврђује да је Cs стабилније везан у структури гела у односу на Na. Уочена је позитивна корелација између Si/Al односа и чврстоће при притиску. У односу на АА-ЕФП и АА-ЗВП материјале, АА-ЕФПЗВП имају мање Si/Al односе и мање чврстоће при притиску. ²⁹Si MAS NMR анализом уочено је присуство Qⁿ (mAl) структурних јединица карактеристичних за N-A-S-H и C-A-S-H гелове. Такође, уочено је да додаток Cs доводи до повећања удела Q¹ и Q² структурних јединица, карактеристичних за C-A-S-H гелове, што је довело до повећања чврстоћа при притиску, док је излуживање условило обрнути тренд.

У Закључку су сумирани најважнији резултати истраживања имобилизације Cs у ААМ на бази ЕФП, ЗВП и мешавине, приказани у претходним поглављима.

У поглављу Литература дат је преглед литературних извора коришћених при изради докторске дисертације који обухватају радове из области ААМ, имобилизације Cs, као и метода синтезе и карактеризације ААМ, а који укупно обухвата 193 референце.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Управљање радиоактивним отпадом, који настаје током производње електричне енергије у нуклеарним реакторима, али и у бројним радијационим делатностима, представља веома актуелну област истраживања у свету, будући да нуклеарне електране представљају значајан и сигуран извор енергије, које последњих година добијају на још већем значају. Велики број научних истраживања је усмерен на имобилизацију радиоактивног цезијума ¹³⁷Cs у циљу безбедног складиштења и одлагања, јер ¹³⁷Cs представља један од најзаступљенијих радионуклида у РАО, који има изражени негативни утицај на здравље људи. У том контексту, ова дисертација представља значајан допринос развоју одрживих материјала за кондиционирање и стабилизацију РАО који садржи радиоактивни цезијум. Такође, тема дисертације је у складу са савременим истраживачким правцима који се односе на примену индустријског отпада, као и на развој еколошки прихватљивих алтернатива материјалима на бази портланд цемента, чија је производња праћена великим емисијама CO₂. Оригиналност истраживања огледа се у систематском испитивању и поређењу имобилизације Cs у АА-ЕФП, АА-ЗВП и АА-ЕФПЗВП материјалима, при различитим уделима Cs, применом различитих метода карактеризације, при чему је ²⁹Si MAS NMR по први пут коришћена за анализирање имобилизације Cs у ААМ на бази ЕФП и ЗВП. Досадашња истраживања имобилизације Cs у ААМ на бази индустријског отпада углавном су била заснована на употреби једног од прекурсора, ЕФП или ЗВП, док је број истраживања која која су се бавила имобилизацијом Cs у хибридном везивима јако мали. При томе, ни у једном од тих истраживања имобилизације у хибридном везивима није разматран утицај различитих удела Cs на имобилизацију, нити физичко-механичка својства везива и излуживање других елемената, као што су Na, Ca, Si и Al. Посебан допринос истраживања приказаних у овој дисертацији огледа се у утврђивању утицаја додатка ЗВП на физичко-механичка и структурна својства ААМ на бази ЕФП, као и на механизам имобилизације Cs. По први пут је систематски анализиран утицај процеса излуживања на механичка и структурна својства ААМ са различитим уделима Cs, као и стабилност имобилисаног Cs у тим условима. На основу добијених резултата успостављене су корелације између удела Cs, структурних карактеристика ААМ и ефикасности имобилизације Cs. Савременост и научна заснованост истраживања потврђује се и применом већег броја савремених и међусобно комплементарних експерименталних метода, које су омогућиле свеобухватну анализу структуре, својстава и механизма имобилизације Cs у ААМ.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији је коришћено 193 библиографске јединице, које се односе на ААМ на бази ЕФП и ЗВП и њихову примену у имобилизацији РАО. У оквиру израде докторске дисертације кандидаткиња је систематично анализирала научну и стручну литературу из области релевантних за тему рада. Већина наведених литературних навода представља научне радове новијег датума који су објављени у реномираним међународним часописима, монографије и важеће стандарде. У оквиру литературних навода коришћене су и научне публикације ранијег датума у којима се налазе основна сазнања за истраживања спроведена у дисертацији. Кроз анализу доступне литературе дефинисан је јасан теоријски оквир и постављени су истраживачки правци на којима се дисертација заснива. Сагледавањем структуре и обима коришћених литературних извора, као и начина њихове примене, уочава се да је кандидаткиња добро упозната са актуелним научним сазнањима и да их доследно повезује са сопственим експерименталним резултатима. Укупно посматрано, литература је адекватног обима, актуелна и научно релевантна, што значајно доприноси научној утемељености и поузданости резултата приказаних у дисертацији.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру ове дисертације примењен је широк спектар савремених експерименталних и инструменталних метода, које су у потпуности адекватне за испитивање полазних материјала, синтетисаних ААМ и процеса имобилизације Cs. Хемијски састав полазних ЕФП и ЗВП одређен је класичном методом алкалног топљења, док је расподела величина честица одређена просејавањем на мокро, на ситима са отворима величине 45 μm , 63 μm и 100 μm . Време везивања одређено је према EN 196-3 стандарду. Излуживање Cs, као и Na, Ca, Al и Si, праћено је према семи-динамичком тесту излуживања, ANSI/ANS-2003. Мерна је рН вредност раствора током процеса излуживања. Концентрације излужених Cs, Na, Ca, Al и Si одређене су коришћењем оптичког емисионог спектрометра са индуктивно спрегнутом плазмом (ICP-OES). Конзистенција свежих пасти и малтера одређена је распростирањем на потресном столу према EN 1015-3:2008 стандарду. Специфична површина, запремина и расподела величина пора узорака полазних и алкално активираних материјала одређене су методом адсорпције-десорпције азота. Специфична површина узорака израчуната је према BET методи, а запремина мезопора и расподела величина мезопора одређене су према ВЈН методи из изотерме десорпције. Минерални састав полазних и алкално активираних материјала одређен је рендгенском структурном анализом (XRD). Применом термогравиметријске анализе (TGA) испитана су термичка својства АА-ЕФП. Микроструктура ААМ испитивана је скенирајућом електронском микроскопијом (SEM), а хемијски састав је одређен енергетском дисперзионом спекторскопијом (EDS). Локално хемијско окружења атома силицијума у полазним и алкално активираним материјалима одређено је спектроскопијом нуклеарне магнетне резонанце ^{29}Si са ротацијом под магичним углом (^{29}Si MAS NMR). Механичка својства ААМ су одређена према EN 196-1 стандарду. Статистичка обрада резултата добијених за чврстоће при притиску ААМ извршена је анализом варијансе (ANOVA) и t-тестовима, чиме је обезбеђена поузданост и валидност добијених резултата. Применом наведених метода омогућена је детаљна карактеризација ААМ, као и успостављање корелације између механичких својстава, структуре и ефикасности имобилизације Cs у ААМ.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати остварени у оквиру докторске дисертације имају значајну научну и практичну применљивост у области имобилизације Cs у ААМ на бази ЕФП и ЗВП. Са научног аспекта, резултати доприносе бољем разумевању утицаја састава полазних материјала, удела Cs и услова синтезе на механизме имобилизације Cs алкално активираним материјалима и стабилност формираних структура. Са практичног аспекта, истраживање указује на могућност примене еколошки прихватљивих материјала за имобилизацију Cs, уз значајан допринос принципима циркуларне економије кроз валоризацију индустријског отпада, ЕФП и ЗВП, и смањење загађења животне средине. Резултати испитивања излуживања пружају релевантне податке за процену дугорочне стабилности материјала у реалним условима, као и за боље разумевање механизма имобилизације Cs у ААМ.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Гордана Г. Станојевић је током израде докторске дисертације показала способност за самосталан истраживачки рад. Током израде дисертације демонстрирала је добро разумевање предметне научне области, као и способност критичке анализе доступне литературе и интеграције теоријских и експерименталних сазнања. Кандидаткиња је успешно планирала и реализовала експериментална истраживања, као и обраду и интерпретацију добијених резултата. Све наведено указује да кандидаткиња поседује све квалитете неопходне за самосталан научно истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације остварени су следећи научни доприноси:

- Дефинисани су механизми имобилизације Cs у ААМ на бази ЕФП и ЗВП, при различитим уделима Cs,
- Утврђен је утицај удела Cs на физичко-механичка и структурна својства ААМ на бази ЕФП и ЗВП,
- Утврђен је утицај додатка ЗВП на физичко-механичка и структурна својства ААМ на бази ЕФП, као и на механизам имобилизације Cs,
- Утврђен је утицај излуживања на механичка и структурна својства ААМ са различитим уделима Cs.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Остварени научни доприноси представљају унапређење постојећих научних сазнања у области ААМ, посебно у контексту њихове примене за имобилизацију радионуклида, као што је Cs. Применом савремених експерименталних метода обезбеђена је поузданост добијених резултата у складу са актуелним истраживањима у овој области. Главни допринос огледа се у систематском испитивању утицаја састава полазних материјала и удела Cs на механизам имобилизације, као и на физичко-механичка и структурна својства ААМ. Посебан значај има анализа својстава у условима излуживања, чиме је оцењена стабилност ААМ. Добијени резултати указују да ови материјали представљају перспективно и еколошки прихватљиво решење за имобилизацију Cs и развој одрживих система за третман радиоактивног отпада. У целини посматрано, резултати ове дисертације проширују постојећа сазнања и доприносе бољем разумевању механизма имобилизације Cs у ААМ, чиме се ствара основа за даља истраживања и потенцијалну практичну примену ових материјала.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидаткиња Гордана Г. Станојевић је резултате истраживања током израде ове дисертације потврдила објављивањем радова у међународним часописима и саопштењима на међународним скуповима. Из ове докторске дисертације проистекли су следећи радови:

Категорија M21a+:

1. **Stanojević, G. G.**, Komljenović, M. M., Džunuzović N.M., Lazarević, S. S., Provis, J. L., Petrović, R. D. (2025). Structural alterations of fly ash-based geopolymers caused by cesium immobilization and leaching. *Construction and Building Materials*, 500, 144217. (IF=8,6) (ISSN: 0950-0618) (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144217>)

Категорија M23:

1. **Stanojević, G. G.**, Komljenović, M. M., Petrović, J. Lj., Petrović, R. D. (2026). Influence of fly ash fineness on cesium immobilization in geopolymers. *Journal of the Serbian Chemical Society* (prihvaćen za štampu) (IF= 0,9) (ISSN: 0352-5139) (<https://doi.org/10.2298/JSC260516030S>)

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 (7. мај 2026. године) извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидаткиње Гордане Г. Станојевић под називом „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и и згуре високе пећи“. На основу извештаја провере оригиналности утврђени проценат подударности је 11 %. 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 кандидаткиње Гордане Г. Станојевић 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, Комисија сматра да докторска дисертација кандидаткиње Гордане Г. Станојевић, мастер инжењера технологије, под називом „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“ представља значајан и оригиналан научни допринос у области Технолошког инжењерства, ужа област Хемијско инжењерство, што је потврђено објављивањем радова у међународним часописима и саопштавањем резултата на међународним скуповима. Постављени предмет и циљеви истраживања, који су дефинисани у извештају о оцени научне заснованости теме су у потпуности остварени. Комисија сматра да ова докторска дисертација испуњава све захтеване критеријуме, као и да је кандидаткиња током израде дисертације показала научноистраживачку способност и самосталност у свим фазама израде дисертације.

Узимајући у обзир квалитет, обим и научни допринос постигнутих резултата, Комисија предлаже Наставно–научном већу Технолошко–металуршког факултета Универзитета у Београду да прихвати овај Извештај након увида јавности у законом предвиђеном року и да овај Извештај заједно са поднетом докторском дисертацијом под називом „Имобилизација цезијума алкално активираним материјалима на бази електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“ кандидаткиње Гордане Г. Станојевић, мастер инжењера технологије, упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 8. јун 2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Снежана Грујић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Звездана Башчаревић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања,
Институт од националног значаја за Републику Србију

.....
Др Ђорђе Вељовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет