

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ**  
**Технолошко-металуршки факултет**

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије

Одлуком бр. 35/107 од 11.05.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије под називом:

**„Синтеза и карактеризација везивних материјала на бази алкално активираних електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“**

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

**РЕФЕРАТ**

**1. УВОД**

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

**24. 12. 2008.** Кандидат Наташа Марјановић, дипл. инж. геологије, је одбранила магистарски рад под називом: „Синтеза портланд-цементног клинкера са електрофилтерским пепелом термоелектране "Никола Тесла" као сировинском компонентом“ на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду.

**04. 04. 2014.** На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета у Београду донета је Одлука о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије за израду докторске дисертације под називом: „Синтеза и карактеризација везивних материјала на бази алкално активираних електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“.

**22. 05. 2014.** На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је Одлука о одобрењу теме докторске дисертације кандидата мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије. За менторе ове докторске дисертације именовани су др Рада Петровић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду и др Мирослав Комљеновић, научни саветник Института за мултидисциплинарна истраживања Универзитета у Београду.

**09. 06. 2014.** На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије, под називом „Синтеза и карактеризација везивних материјала на бази алкално активираних електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“.

**07. 05. 2015.** На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета у Београду донета је Одлука о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије.

### 1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Хемија и хемијска технологија, за коју је матичан Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду. Ментори др Рада Петровић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду и др Мирослав Комљеновић, научни саветник Института за мултидисциплинарна истраживања Универзитета у Београду, су на основу објављених публикација и научно-истраживачког искуства компетентни да руководе изработом ове докторске дисертације.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Мр Наташа Марјановић (девојачко презиме Јовановић) рођена је 13. 04. 1973. године у Београду, где је завршила основну школу и гимназију. Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду, смер минералогиија и кристалографија, уписала је школске 1992/1993. године. Дипломирала је 04. 05. 2001. године са просечном оценом у току студија 8,22.

Магистарске студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду уписала је 2002. године, на смеру минералогиија индустријских продуката, под менторством проф. др Миховила Логара. Магистарску тезу под називом: "Синтеза портланд-цементног клинкера са електрофилтерским пепелом термоелектране "Никола Тесла" као сировинском компонентом" одбранила је 24. 12. 2008. године и тиме стекла академски назив магистра техничких наука у области геологије – минералогиија индустријских продуката.

Од 01. 10. 2001. запослена је у Институту за мултидисциплинарна истраживања (тадашњи назив Центар за мултидисциплинарне студије Универзитета у Београду). Звање истраживач-приправник стекла је 14. 03. 2006. У звање истраживач-сарадник изабрана је 06. 03. 2009., а реизабрана 01. 03. 2012. године. У досадашњем раду учествовала је у реализацији три национална пројекта у оквиру програма технолошког развоја (МНТ.2.06.0053.В/2, ТР6720Б и ТР19001) и четири међународна пројекта из Еурека програма (Е!2936, Е!3688, Е!3824 и Е!5415). Тренутно је ангажована на националном пројекту у оквиру програма технолошког развоја који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије: ТР34026 и учествује у COST акцији COST TU1301.

Област научно-истраживачког рада мр Наташе Марјановић је наука о материјалима, а ужа област истраживања је примена индустријског минералног отпада за синтезу грађевинских материјала. Актуелне активности Наташе Марјановић обухватају синтезу и испитивање својстава нове врсте везива на бази алкално активираниог електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи из производње сировог гвожђа.

Мр Наташа Марјановић је аутор и коаутор укупно 38 радова који су публиковани у научним часописима и саопштени на научним скуповима. Од тога, 7 радова публиковано је у врхунским научним часописима међународног значаја (М21) и 1 у научном часопису међународног значаја (М23). Из области истраживања из које је предложена тема докторске дисертације до сада је објављено 7 радова у врхунским научним часописима међународног значаја (М21), а 9 радова је саопштено на скуповима међународног значаја (М33).

На скупу "3<sup>rd</sup> Serbian Congress for Microscopy", одржаном од 25. до 28. септембра 2007. године у Београду, освојила је награду за најбоље усмено излагање.

Члан је Српског друштва за микроскопију, Друштва за керамичке материјале Србије и Зеолитског друштва Србије.  
Говори течно енглески језик.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије, под називом „Синтеза и карактеризација везивних материјала на бази алкално активираниог електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“ написана је на укупно 204 стране и садржи 6 поглавља, 82 слике (графичка приказа), 13 табела и 302 литературна навода. Докторска дисертација се састоји од следећих поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментална процедура, Резултати и дискусија, Закључци и Литература. Дисертација садржи и изводе на српском и енглеском језику, изјаве захвалности и 3 обавезна прилога (изјаве).

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводу дисертације истакнут је значај рециклаже и валоризације индустријског отпадног материјала, електрофилтерског пепела термоелектрана (ЕФП) и згуре високе пећи (ЗВП), са аспекта заштите животне средине. Представљен је значај примене ових материјала као полазних материјала за синтезу нових везивних материјала у грађевинарству – алкално активираних везивних материјала. Наведене су предности примене алкално активираних везивних материјала у односу на комерцијалне везивне материјале на бази портланд-цемента, у виду снижавања емисије угљен-диоксида, смањења потрошње природних минералних сировина, значајних енергетских уштеда и побољшаних физичко-механичких карактеристика везива. У овом поглављу дефинисани су предмет и главни научни циљеви докторске дисертације. Предмет истраживања ове докторске дисертације било је проучавање услова синтезе и карактеристика везивних материјала добијених алкалном активацијом ЕФП и ЗВП. Главни научни циљеви ове докторске дисертације били су дефинисање утицаја различитих параметара алкалне активације на структуру и својства добијених везивних материјала и успостављање корелације синтеза-структура-својства.

У Теоријском делу дисертације дефинисан је појам алкално активираних везива. Дат је преглед материјала који се користе као полазни материјали за синтезу алкално активираних везива. Приказани су алкални раствори који имају улогу активатора у реакцији алкалне активације, односно, синтези алкално активираних везива. Дата је класификација алкално активираних везива и њихове основне карактеристике. Детаљно су описане карактеристике ЕФП и ЗВП као полазних материјала за синтезу алкално активираних везива, као и процеси који се одвијају током реакције алкалне активације. Посебно је истакнута комплексност структуре продуката реакције, натријум-алумосиликатног гела (N-A-S-H<sup>1</sup> гела), као главног продукта алкалне активације ЕФП, односно хидратисаног калцијум-силикатног гела са супституисаним алуминијумом у структури (C-A-S-H<sup>2</sup> гела), као главног продукта алкалне активације ЗВП.

---

<sup>1,2</sup> Уобичајене скраћенице у хемији цемента и алкално активираних материјала: N=Na<sub>2</sub>O, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S=SiO<sub>2</sub>, H=H<sub>2</sub>O, C=CaO

Истакнут је значај испитивања структуре продуката реакције алкалне активације, с обзиром да физичко-механичка својства алкално активираних везива зависе од структуре продуката реакције. Детаљно су приказане методе које се користе за карактеризацију полазних материјала и алкално активираних везива. Описана су физичко-механичка својства алкално активираних везива у зависности од карактеристика полазног материјала и услова алкалне активације. Посебни делови овог поглавља посвећени су физичко-механичким карактеристикама алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП, као и механички и алкално активирани ЕФП. Њихове карактеристике су упоређене са карактеристикама алкално активираних индивидуалних полазних материјала (ЕФП и ЗВП). Дат је преглед доступне научне литературе на тему досадашњих испитивања синтезе и карактеризације везивних материјала на бази алкално активираних ЕФП, ЗВП, смеше ЕФП-ЗВП и механички активирани ЕФП. Такође су приказане могућности примене везивних материјала на бази алкално активираних ЕФП и ЗВП у области грађевинарства. На крају овог поглавља детаљно су образложени предмет и главни научни циљеви докторске дисертације.

У поглављу Експериментална процедура наведени су материјали који су коришћени у току истраживања. Као полазни материјали за синтезу алкално активираних везива коришћени су узорци ЕФП из пет термоелектрана у Србији (ЕФП Свилајнац, ЕФП Обреновац (ТЕНТ А и ТЕНТ Б), ЕФП Колубара и ЕФП Костолац) и узорак ЗВП из железаре Смедерево. Детаљно су описани експериментални услови под којима је извршена синтеза везива на бази алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП и механички и алкално активирани ЕФП. Наведене су инструменталне методе коришћене за карактеризацију полазних материјала и синтетисаних алкално активираних везива и приказани услови рада наведених инструменталних метода у току истраживања.

У поглављу Резултати и дискусија приказани су резултати добијени у експерименталном раду у овој докторској дисертацији, њихова анализа и дискусија, као и поређење са подацима из литературе. Поглавље Резултати и дискусија састоји се из два основна потпоглавља: 1. Карактеризација везивних материјала на бази алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП и 2. Карактеризација везивних материјала на бази механички и алкално активираних ЕФП.

У првом потпоглављу су дати резултати хемијске, физичке и минералошке карактеризације узорака ЕФП и ЗВП који су коришћени као полазни материјали за синтезу алкално активираних везива. Затим су приказани и дискутовани резултати испитивања утицаја услова синтезе на физичко-механичка својства везива на бази алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП. Анализиран је утицај састава смеше (масени однос ЕФП/ЗВП у смеши), модула (масени однос  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) и концентрације (изражен у %  $\text{Na}_2\text{O}$ ) алкалног активатора, као и односа вода/везиво на чврстоће и време везивања алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП. Такође је анализиран утицај састава смеше, модула и концентрације активатора, као и температуре реакције на интензитет скупљања при сушењу алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП. Утврђено је да чврстоће значајно зависе од састава смеше ЕФП-ЗВП, али и од модула и концентрације активатора. При ниској вредности модула активатора (0,5) и при концентрацијама активатора од 4 %  $\text{Na}_2\text{O}$  и 7 %  $\text{Na}_2\text{O}$  чврстоћа на савијање расте са порастом удела ЗВП у смеши. При вишим вредностима модула активатора (1, 0 и 1,5) и концентрацији од 7 %  $\text{Na}_2\text{O}$  чврстоћа на савијање опада са порастом ЗВП у смеши. Са даљим порастом концентрације активатора (до 10 %  $\text{Na}_2\text{O}$ ), независно од вредности модула активатора, чврстоћа на савијање опада са порастом удела ЗВП у смеши. Утицај састава смеше на чврстоће израженији је када је у питању чврстоћа на притисак. Наиме, са порастом удела ЗВП у смеши чврстоћа на притисак расте независно од вредности модула и концентрације активатора. Пораст модула и концентрације активатора углавном позитивно утиче на чврстоће на савијање и притисак. При концентрацији активатора од 4 %  $\text{Na}_2\text{O}$  код већине синтетисаних узорака развиле су се веома ниске чврстоће. Повећање концентрације

активатора до 7 % утицало је на пораст чврстоће на притисак без обзира на састав смеше и модул активатора. Пораст концентрације активатора до 10 %  $\text{Na}_2\text{O}$  повољно утиче на чврстоће узорака код којих у саставу смеше преовлађује ЕФП, док неповољно утиче на чврстоће узорака код којих у саставу смеше преовлађује ЗВП, што је нарочито изражено при вишим вредностима модула активатора (1,0 и 1,5). Уочено је да снижење односа вода/везиво има повољан утицај на чврстоће, што је нарочито изражено код чврстоће на притисак. Највеће чврстоће постижу се при најнижем односу вода/везиво и обрнуто. Снижење односа вода/везиво, односно смањење потребе за водом приликом синтезе везива на бази алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП, поклапа се са повећањем удела ЗВП у смеши. Највећи однос вода/везиво уочен је код малтера ЕФП 100, а најнижи код малтера ЗВП 100. Показано је да време везивања алкално активираних смеша ЕФП-ЗВП доминантно зависи од концентрације активатора. На интензитет скупљања при сушењу узорака алкално активираних смеша ЕФП-ЗВП доминантан утицај има температура реакције у прва 24 h.

Структурне карактеристике везива на бази алкално активираних смеша ЕФП-ЗВП детаљно су анализирани на узорцима синтетисаним при концентрацији активатора од 10 %  $\text{Na}_2\text{O}$  и вредностима модула од 1,0 и 1,5. Посебан допринос разумевању механизма алкалне активације смеше ЕФП-ЗВП дала је анализа резултата скенирајуће електронске микроскопије и енергетско дисперзивне спектроскопије (СЕМ и ЕДС). Утврђено је да продукти реакције алкалне активације смеша ЕФП-ЗВП у погледу хемијског састава и структуре пре свега зависе од састава смеше. Утврђено је да је главни продукт алкалне активације ЕФП N-A-S-H гел, док су главни продукти алкалне активације ЗВП C-A-S-H гел и хидроталкит. Показано је да се алкалном активацијом узорака код којих су у саставу смеше заступљени и ЕФП и ЗВП формирају комплекснији продукти реакције. Пораст удела ЗВП у смеши утиче на пораст садржаја растворљивог  $\text{Ca}^{2+}$  у систему, услед чега долази до реакције са силикатним и алуминатним врстама у раствору и преципитације C-A-S-H гела. Преципитати C-A-S-H гела имају улогу центара нуклеације око којих се формира и гради мрежа хибридног (C)-N-A-S-H гела већег степена полимеризације доприносећи већој компактности везива. Успостављена је корелација формиране структуре и механичких карактеристика везива на бази алкално активираних смеша ЗВП-ЕФП. Са порастом атомског односа Al/Si у матриксу везива, односно, доминантним присуством (C)-N-A-S-H гела у продуктима реакције, расте чврстоћа на савијање. Пораст удела ЗВП у смеши доводи до пораста чврстоће на притисак услед пораста атомског односа Ca/Si у матриксу, односно, већег присуства C-A-S-H гела у продуктима реакције. Утврђене су оптималне карактеристике везива на бази алкално активираних смеша ЕФП-ЗВП.

У другом потпоглављу дати су резултати хемијске анализе узорака ЕФП који су коришћени као полазни материјали за синтезу алкално активираних везива на бази механички активираних ЕФП. На основу расподеле величине честица механички активираних ЕФП дефинисано је оптимално време механичке активације. Механичка активација у трајању од 15 минута доводи до смањења величине честица ЕФП за више од 10 пута, док дуже време механичке активације не доводи до значајних промена. Механичка активација ЕФП такође узрокује аморфизацију појединих кристалних фаза присутних у полазним ЕФП. Приказани су и анализирани резултати карактеризације везива на бази механички и алкално активираних ЕФП. Утврђено је да механичка активација ЕФП утиче на смањење количине воде потребне за постизање стандардне конзистенције малтера. Посебно је интересантно да механичка активација ЕФП доводи до драматичног пораста чврстоћа малтера, како на савијање, тако и на притисак. Детаљном структурном карактеризацијом узорака механички и алкално активираних ЕФП утврђено је да је главни продукт реакције алкалне активације (како полазних тако и механички активираних) ЕФП N-A-S-H гел. Посебан допринос разумевању структурних промена везива на бази механички и алкално активираних ЕФП дала је анализа резултата скенирајуће електронске микроскопије и енергетско дисперзивне спектроскопије (СЕМ и ЕДС). Показано је да механичка активација ЕФП утиче на пораст садржаја растворљивог  $\text{Al}^{3+}$  и његову равномернију расподелу у

систему.  $Al^{3+}$  реагује са реактивним силикатним врстама у раствору градећи центре нуклеације од којих се формира и даље гради мрежа N-A-S-H гела већег степена полимеризације доприносећи већој компактности везива. Утврђена је корелација механичких карактеристика везива на бази алкално активираних полазних/механички активираних ЕФП и карактеристика ЕФП. Смањење величине честица ЕФП доводи до повећања површине која ступа у реакцију у току алкалне активације, што узрокује пораст чврстоће на притисак малтера механички и алкално активираних ЕФП. Нижи садржај воде у систему код везива на бази механички и алкално активираних ЕФП подразумева већу концентрацију активатора и утиче на брже растварање реактивних алуминатних и силикатних врста из ЕФП и формирање полимеризованог N-A-S-H гела, узрокујући побољшану чврстоћу на притисак код ових везива. Успостављена је веза између формиране структуре и механичких карактеристика везива на бази алкално активираних полазних/механички активираних ЕФП. Пораст односа  $Al/Si$  у матриксу везива на бази механички и алкално активираних ЕФП узрокује веће чврстоће на притисак у односу на везива на бази алкално активираних полазних ЕФП код којих је однос  $Al/Si$  нижи. Већим чврстоћама на притисак такође одговара и нижи однос  $Na/Al$  у матриксу везива на бази механички и алкално активираних ЕФП. Утврђено је да је при датим условима синтезе оптималне карактеристике, односно максималне чврстоће, показало везиво на бази механички и алкално активираних ЕФП ТЕНТ Б.

У поглављу Закључци сумирани су најзначајнији закључци проистекли из рада на овој дисертацији.

У шестом поглављу дата је Литература, која садржи све референце цитиране у раду.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Развој нових врста везива на бази алкално активираних индустријских отпадних материјала представља научно-истраживачку област која се непрестано развија, унапређује и усавршава. Значај истраживања у области везива на бази алкално активираних ЕФП и ЗВП огледа се у могућности освајања нове технологије за рециклажу ових материјала, односно њихове валоризације и могућности синтезе везивних материјала побољшаних физичко-механичких карактеристика. Количине ових отпадних материјала које континуирано настају и депонују се на земљиште мере се у милионима тона на годишњем нивоу и представљају озбиљан економски и еколошки проблем савременог технолошки развијеног друштва. Алкална активација ЕФП и ЗВП представља нов и атрактиван правац истраживања и примене ових материјала, с обзиром да подразумева не само веће искоришћење индустријског отпада, већ и добијање новог производа – алкално активираних везива, чија су физичко-механичка својстава упоредива са традиционалним портланд-цементом.

У доступној научној литератури постоји значајан број података који се односе на алкалну активацију како индивидуалних материјала (ЕФП и ЗВП), тако и смеша ЕФП-ЗВП. Међутим, с обзиром на велики број утицајних параметара, као и на чињеницу да су ЕФП и ЗВП индустријски нуспроизводи са променљивим карактеристикама, не постоји једноставан поступак алкалне активације који би могао универзално да се примењује. Алкално активирани везива на бази само једног полазног материјала (ЕФП или ЗВП) у погледу физичко-механичких карактеристика показују одређене предности али и мане у односу на везива на бази портланд-цемента. Оптимизовањем састава смеше на бази оба полазна материјала, као и услова реакције алкалне активације, могуће је добити везива код којих ће се задржати добре карактеристике везива на бази појединачних материјала и евентуално

елиминисати присутне мане. Досадашња истраживања су указала на могућност добијања везива задовољавајућих физичко-механичких својстава алкално активацијом смеше ЕФП-ЗВП. Међутим, синтеза алкално активираних везива на бази смеше ЕФП-ЗВП оптималних карактеристика у смислу високих вредности чврстоћа, задовољавајућег времена везивања и минималног скупљања при сушењу, није постигнута. У доступној научној литератури такође нема података о синтези малтера на бази алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП на повишеној температури, као и његовим карактеристикама, што је проучавано у овој докторској дисертацији.

С друге стране, модификацијом карактеристика полазних материјала може да се повећа њихова реактивност у реакцији алкалне активације, чиме се консеквентно побољшавају чврстоће везива на бази алкално активираних ЕФП. Реактивност ЕФП у реакцији алкалне активације може да се повећа механичком активацијом у високо-енергетском планетарном млину и на тај начин побољшају физичко-механичке карактеристике везива на бази алкално активираних ЕФП. У доступним публикованим научним радовима веома мало пажње је посвећено структурним променама алкално активираних везива на бази механички активираних ЕФП, што за последицу има недостатак јасне везе између структуре и испитиваних својстава. У овој докторској дисертацији пажња је посвећена оптимизацији услова синтезе, као и корелацији услова синтезе, формиране структуре и карактеристика везива на бази алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП, као и везива на бази механички и алкално активираних ЕФП. Успостављање јасне корелације између структурних и механичких карактеристика алкално активираних везива је неопходан предуслов за практичну примену ове врсте материјала.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру докторске дисертације цитирана су укупно 302 литературна навода који су омогућили да се прикаже актуелно стање истраживања у испитиваној области. Већина навода је новијег датума (публиковани у последњих неколико година) и представља научне радове публиковане у врхунским међународним часописима са тематиком значајном за израду докторске дисертације, што указује на актуелност теме докторске дисертације. Истраживања приказана у наведеним научним радовима су описана и продискутована у докторској дисертацији, а резултати других аутора коришћених у литературном прегледу су анализирани и упоређени са резултатима добијеним током израде докторске дисертације. Приказани литературни наводи, коришћени током израде докторске дисертације, указују на адекватно познавање предметне области, као и познавање актуелних праваца истраживања у овој области у свету.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Хемијски састав полазних узорака ЕФП и ЗВП одређен је методом алкалног топљења.

Испитивање чврстоћа на савијање и притисак малтера алкално активираних смеса ЕФП-ЗВП и малтера алкално активираних полазних/механички активираних ЕФП извршено је према поступку предвиђеном стандардом SRPS EN 196-1 (2008), који се односи на портланд-цемент. За испитивање физичко-механичких карактеристика алкално активираних везива не постоји одговарајући стандард. Из тог разлога користе се стандардни поступци за испитивање портланд-цемента, с обзиром да исти представља референтни везивни материјал.

Време везивања пасти алкално активираних смеса ЕФП-ЗВП одређено је према поступку предвиђеном стандардом SRPS EN 196-3 (2007), који се односи на портланд-цемент.

Скупљање при сушењу малтера алкално активираних смеша ЕФП-ЗВП праћено је према поступку датом у стандарду SRPS B.C8.029 (1979), који се односи на портланд-цемент.

Механичка активација полазних ЕФП извршена је у високо енергетском планетарном млину са куглама. Механичком активацијом ЕФП повећава се његова реактивност у процесу алкалне активације, односно повећава ефикасност синтезе алкално активiranог везива.

Расподела величина честица полазних/механички активираних ЕФП, обављена је методом ласерске дифракције светлости.

Минералозна карактеризација испитиваних алкално активираних везива извршена је методом рендгенске структурне анализе (РСА), дифрактометром за прах. Ова метода се пре свега користи за идентификацију присутних кристалних фаза, као и за детекцију евентуалних промена у саставу (структури) кристалних фаза у испитиваном материјалу.

Детаљна структурна карактеризација везива на бази алкално активираних смеша ЕФП-ЗВП, као и везива на бази механички и алкално активираних ЕФП обављена је методама инфрацрвене спектроскопске анализе (ИЦСА), као и скенирајуће електронске микроскопије (СЕМ) у комбинацији са енергетски дисперзивном спектроскопском (ЕДС) анализом. Испитивање структуре алкално активираних везива методом ИЦСА у основи је бројних истраживања механизма и кинетике реакције алкалне активације, с обзиром да поменуто метода омогућава диференцијацију различитих типова хемијских веза које се јављају у испитиваном материјалу. СЕМ/ЕДС анализа, такође веома важна инструментална метода омогућава анализу развоја микроструктуре везива и састава продуката алкалне активације ЕФП и ЗВП (N-A-S-H и C-A-S-H гела), од којих неоспорно зависе физичко-механичка својства синтетисаних везива.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Тематика ове докторске дисертације је веома актуелна и савремена. Остварени експериментални резултати, поред научног значаја, могу бити од значаја за развој алкално активираних везива, односно њихову практичну примену. Најважнија примена алкално активираних везива је у области грађевинарства, где се ови материјали могу употребити као алтернативни везивни материјали, односно као замена за традиционална везива на бази портланд-цемента. Главна предност везивних материјала синтетисаних алкалном активацијом индустријског отпада над традиционалним везивним материјалима је пре свега у значајно смањеној емисији угљен-диоксида у атмосферу приликом њихове синтезе. Не мање значајна је и чињеница да се синтеза алкално активираних везива може спровести на релативно ниским температурама (~100 °C), што доприноси значајним енергетским уштедама у односу на процес синтезе портланд-цементног клинкера који се одиграва на температурама од приближно 1500 °C. Употреба индустријског отпада (ЕФП и ЗВП) као полазног материјала за синтезу везива има позитивне ефекте у еколошком погледу, као што су уштеда природних минералних сировина, смањено загађење животне средине и валоризација индустријског отпадног материјала.

Истраживањима спроведеним у оквиру ове докторске дисертације показано је да је алкалном активацијом смеше ЕФП-ЗВП, односно механички активiranог ЕФП могуће добити малтере чија су физичко-механичка својства поредива са својствима портланд-цемента. Избором одговарајућих (оптималних) услова синтезе, алкалном активацијом смеше ЕФП-ЗВП могуће је добити малтере чија је чврстоћа на притисак после 24 h реакције на температури од 95 °C значајно већа од чврстоће коју показују малтери на бази портланд-цемента после 28 дана неговања на собној температури. Поред тога, резултатима оствареним у оквиру ове докторске дисертације показано је да је алкалном активацијом претходно механички активiranог ЕФП могуће добити малтере изванредне чврстоће на притисак после само 4 h реакције на температури од 95 °C, такође веће у поређењу са чврстоћом малтера на



бази портланд-цемента после 28 дана неговања на собној температури. С обзиром на задовољавајућа механичка својства и могућност синтезе на повишеној температури (95 °C), везива синтетисана алкалном активацијом индустријског отпада би могла да нађу примену у производњи бетонских елемената и префабрикованих конструкционих материјала, као што су армиране бетонске цеви, зидни елементи, елементи за поплочавање и ивичњаци, железнички прагови, грађевински монтажни елементи, итд.

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

Кандидат мр Наташа Марјановић, дипл. инж. геологије, је током израде докторске дисертације показала стручност, самосталност и систематичност у претраживању и коришћењу научне литературе, планирању и реализацији експеримента, обради и анализи добијених резултата, као и њиховој дискусији и припреми публикација. Истраживачке квалитете исказала је применом различитих инструменталних метода (РСА, ИЦСА, СЕМ/ЕДС). На основу досадашњег рада, поднете докторске дисертације и постигнутих резултата кандидата, Комисија је утврдила да кандидат поседује квалитете за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру ове докторске дисертације остварен је значајан допринос разумевању процеса алкалне активације смеше ЕФП-ЗВП и механички активираниог ЕФП. Најзначајнији научни доприноси ове дисертације су:

- Дефинисани су оптимални услови синтезе везива на бази алкално активирание смеше ЕФП-ЗВП, при чему су коришћени ЕФП и ЗВП из индустријских погона у Републици Србији;
- Утврђен је утицај услова синтезе на физичко-механичка својства и структуру везива на бази алкално активирание смеше ЕФП-ЗВП;
- Дефинисан је механизам алкалне активације смеше ЕФП-ЗВП;
- Утврђен је утицај механичке активације ЕФП на механичка својства и структуру везива на бази механички и алкално активираниог ЕФП;
- Дефинисан је механизам алкалне активације механички активираниог ЕФП.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Прегледом доступне научне литературе из области алкално активираних везива и разматрањем резултата добијених у оквиру ове докторске дисертације може се оценити да се остварени резултати не само надовезују на постојећа знања, већ их значајно унапређују.

У доступној научној литератури постоји значајан број радова који се односе на алкалну активацију смеша ЕФП-ЗВП. Досадашња истраживања су указала на могућност добијања везива задовољавајућих физичко-механичких својстава, пре свега високих чврстоћа. Међутим, синтеза алкално активираниог везива на бази смеше ЕФП-ЗВП оптималних карактеристика у смислу високих вредности чврстоћа, задовољавајућег времена везивања и минималног скупљања при сушењу, није постигнута. Високе вредности чврстоће на притисак најчешће су праћене негативним појавама, као што су скраћено време везивања и велико скупљање услед сушења. Кориговање ових нежељених својстава применом

различитих dodataka, kao što su različiti superplastifikatori i dodaci za redukovanje skupljanja koji se uobичajeno koriste za veziva na бази портланд-цементa, најчешће има за последицу пад чврстоћа. Поред тога, у доступној научној литератури такође нема података о синтези малтера на бази алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП на повишеној температури. Синтеза на повишеној температури може да буде од великог значаја за производњу бетонских префабриката с обзиром да обезбеђује високе ране чврстоће. У оквиру ове докторске дисертације извршена је оптимизација услова синтезе, као и физичко-механичких и структурних карактеристика везива на бази алкално активираних смеше ЕФП-ЗВП, дефинисан механизам алкалне активације смеше ЕФП-ЗВП и успостављена корелација синтеза-структура-својства добијених везива.

У доступној научној литератури постоји релативно мали број публикација посвећених механичкој активацији ЕФП и синтези алкално активираних везива на бази механички активираних ЕФП. Досадашња испитивања везива синтетисаних на бази механички и алкално активираних ЕФП обављена су само на пастама (везиво и вода), док нема података о карактеристикама малтера (везиво, песак и вода). Поред тога, у доступној литератури веома мало пажње је посвећено структурним карактеристикама везива на бази механички и алкално активираних ЕФП. У оквиру ове докторске дисертације извршена је оптимизација услова синтезе, механичких и структурних карактеристика везива на бази механички и алкално активираних ЕФП, дефинисан механизам алкалне активације механички активираних ЕФП и на крају успостављена корелација синтеза-структура-својства добијених везива.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат мр Наташа Марјановић, дипл. инж. геологије, је резултате истраживања током израде ове дисертације потврдила објављивањем радова у врхунским часописима међународног значаја и саопштавањем резултата на међународном скупу.

##### Категорија M21:

1. **Marjanović N.**, Komljenović M., Baščarević Z., Nikolić V.: Improving reactivity of fly ash and properties of ensuing geopolymers through mechanical activation, *Construction and Building Materials*, vol 57, pp. 151-162, 2014 (IF = 2,769) (ISSN 0950 – 0618).
2. **Marjanović, N.**, Komljenović, M., Baščarević, Z., Nikolić, V., Petrović, R.: Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-blast furnace slag blends, *Ceramics International*, Vol 41, pp. 1421-1435, 2015 (IF = 2,110) (ISSN 0272 – 8842).

##### Категорија M33:

1. **Marjanović, N.**, Komljenović, M., Baščarević, Z., Nikolić, V., Petrović, R.: “Comparison of two alkali-activated systems: mechanically activated fly ash and fly ash-blast furnace slag blends”, *-7th Scientific-Technical Conference on Material Problems in Civil Engineering, MATBUD’2015*, Cracow, Poland, 2015., (<http://www.matbud.edu.pl>).

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације дају велики допринос повећању нивоа знања у области везива добијених алкалном активацијом индустријских отпадних материјала. Кандидат мр Наташа Марјановић, дипл. инж. геологије је показала

стручност, самосталност и систематичност у току израде докторске дисертације, па Комисија сматра да поседује све квалитете неопходне за самостални научно-истраживачки рад.

На основу свега изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије, под називом: „Синтеза и карактеризација везивних материјала на бази алкално активираног електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“, представља значајан и оригиналан научни допринос у области Хемија и хемијска технологија, што је потврђено објављивањем радова у врхунским научним часописима међународног значаја и саопштењем на међународном скупу.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да се докторска дисертација под називом: „Синтеза и карактеризација везивних материјала на бази алкално активираног електрофилтерског пепела термоелектрана и згуре високе пећи“ кандидата мр Наташе Марјановић, дипл. инж. геологије, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, те да се након завршетка ове процедуре кандидат позове на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

## ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

.....  
Др Мирослав Комљеновић, научни саветник  
Универзитет у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања

.....  
Проф. др Ђорђе Јанаћковић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

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

.....  
Др Љиљана Петрашиновић-Стојкановић, научни саветник  
Универзитет у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања