

35/230

(Број захтева)

13.09.2019.

(датум)

(назив већа научне области коме се захтев упућује)

Београд, Студентски трг бр. 1

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тачка 4. Статута Универзитету у Београду (“Гласник Универзитета у Београду” број 162/11, пречишћен текст, 167/12, 172/13 и 178/14), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

АНДРИЈЕ (Божидар) САВИЋА, дипломираног инжењера технологије

КАНДИДАТ: **АНДРИЈА САВИЋ** пријавио је докторску дисертацију под називом:

„Синтеза, карактеризација и примена адсорбената на бази магнетита за уклањање фосфата из воде“

Из научне области: **ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**

Универзитет је дана **23.04.2018.** године, својим актом **61206-1790/2-18**, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

„Синтеза, карактеризација и примена адсорбената на бази магнетита за уклањање фосфата из воде“.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **АНДРИЈЕ САВИЋА** образована је на седници Наставно-научног већа одржаној **30.05.2019.** године Одлуком Факултета под бр. **35/197-1**, у саставу:

Име и презиме	Звање	Научна област
1. Др Рада Петровић	Редовни професор	Инжењерство неорганских хемијских производа
2. Др Љиљана Живковић	Научни саветник	Хемија и хемијска технологија
3. Др Ђорђе Јанаковић	Редовни професор	Инжењерство неорганских хемијских производа
4. Др Славица Лазаревић	Научни сарадник	Техничко-технолошке науке- хемијско инжењерство
5. Др Ивона Јанковић-Частван	Научни сарадник	Техничко-технолошке науке- хемијско инжењерство

Студент је први пут уписан на докторске студије шк. **2008/2009.** године. Након истека рока за завршетак студија, студент поновно уписује докторске студије шк. **2015/2016.** године, уписом на трећу годину, уз признавање положених испита.

На захтев студента, у складу са Статутом Универзитета у Београду и Статутом Факултета, декан је донео Решење бр.20/128-1 од 28.09.2018. године о продужењу рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до краја школске 2018/2019. године, с обзиром на то да је шк. 2016/2017. године био у статусу мировања због теже болести.

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана **04.07.2019.** године.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 39. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 04.07.2019. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Рада Петровић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Љиљана Живковић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, др Ђорђе Јанаковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Славица Лазаревић, научни сарадник Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Ивона Јанковић-Частван, научни сарадник Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: „**Синтеза, карактеризација и примена адсорбената на бази магнетита за уклањање фосфата из воде**“ коју је поднео **АНДРИЈА САВИЋ**, дипломирани инжењер технологије и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Андрије Савића, под називом „**Синтеза, карактеризација и примена адсорбената на бази магнетита за уклањање фосфата из воде**“ Одлуком број: 61206-1790/2-18 од 23.04.2018. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M21:

1. **Savić A. B.**, Čokeša Dj., Lazarević S., Jokić B., Janačković Dj., Petrović R., Živković Lj.S., Tailoring of magnetite powder properties for enhanced phosphate removal: effect of PEG addition in the synthesis process, - *Powder Technology*, Vol. 301, 2016, pp. 511-519 (IF=2,942, ISSN 0032-5910). doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.028>
2. **Savić A. B.**, Čokeša Dj., Savić Biserčić M., Janković-Častvan I., Petrović R., Živković Lj.S., Multifunctional use of magnetite-coated tuff grains in water treatment: Removal of arsenates and phosphates, - *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, 2019, pp. 1687-1695 (IF=2,943, ISSN 0921-8831). doi: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.05.020>

Докторска дисертација и реферат о оцени докторске дисертације достављају се на увид јавности, а по истеку рока од 30 дана, на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, ментору, Служби за наставно-студентске послове, Библиотеци и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

**UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET
NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU**

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata **Andrije B. Savića**, diplomiranog inženjera tehnologije

Odlukom br. 35/197-1 od 30. 05. 2019. imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **Andrije B. Savića**, diplomiranog inženjera tehnologije, pod naslovom „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**”.

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

R E F E R A T

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

12. 02. 2018. godine – Kandidat **Andrija B. Savić**, diplomirani inženjer tehnologije, predložio je temu doktorske disertacije pod nazivom: „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**”.

22. 02. 2018. godine – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu doneta je Odluka br. 35/33 o imenovanju Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata **Andrije B. Savića**, diplomiranog inženjera tehnologije, za izradu doktorske disertacije pod nazivom: „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**”.

29. 03. 2018. godine – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu doneta je Odluka br. 35/86 o prihvatanju Referata Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata i odobravanju izrade doktorske disertacije **Andriji B. Saviću**, diplomiranom inženjeru tehnologije, pod nazivom „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**”, a za mentore ove doktorske disertacije su imenovani dr Rada Petrović, redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet i dr Ljiljana Živković, naučni savetnik Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“.

23. 04. 2018. godine – Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu data je saglasnost na predlog teme doktorske disertacije **Andrije B. Savića**, diplomiranog inženjera tehnologije, pod nazivom „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**”.

30. 05. 2019. godine - Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je Odluka br. 35/197-1 o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije **Andrije B. Savića**, diplomiranog inženjera tehnologije, pod nazivom „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**”.

Kandidat **Andrija B. Savić**, diplomirani inženjer tehnologije, upisao je doktorske akademske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Inženjerstvo zaštite životne sredine, školske 2008/2009. godine, a 2015/2016. godine je upisan ponovo na doktorske studije, na treću godinu studijskog programa Inženjerstvo zaštite životne sredine. Iz zdravstvenih razloga, odobren mu je status mirovanja u školskoj 2017/2018. godini.

1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo, uža oblast Inženjerstvo zaštite životne sredine, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Mentori, dr Rada Petrović, redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet i dr Ljiljana Živković, naučni savetnik Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča”, su, na osnovu objavljenih radova i naučno-istraživačkog iskustva, kompetentni da rukovode izradom ove doktorske disertacije.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Andrija B. Savić je rođen 21. 05. 1971. u Loznici, Republika Srbija, gde je završio osnovnu školu, a srednjoškolsko obrazovanje stiče završetkom gimnazije „Uroš Predić” u Pančevu. Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, odsek Hemijsko inženjerstvo, upisao je 1990. godine i diplomirao 1997. godine. U periodu 1997. - 2007. godine radio je u preduzeću „Savis” kao tehnolog projektant. Stručni ispit iz oblasti tehnologije položio je 2005. godine. Od 2007. godine zaposlen je u Institutu za nuklearne nauke „Vinča”. Doktorske studije na studijskom programu Inženjerstvo zaštite životne sredine Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2008/2009. godine.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija kandidata **Andrije B. Savića**, diplomiranog inženjera tehnologije, pod naslovom: „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**” napisana je na 150 strana, u okviru kojih se nalazi 66 slika, 41 tabela i 152 literaturna navoda. Doktorska disertacija sadrži sledeće celine: Uvod, Teorijski deo (sa 3 poglavlja), Eksperimentalnu proceduru, Rezultate i diskusiju i Zaključak. Pored toga, sadrži Izvod na srpskom i engleskom jeziku, Literaturu, Sadržaj, Zahvalnicu i

odatke propisane pravilima Univerziteta o podnošenju doktorskih teza na odobravanje. Po formi i sadržaju, napisana disertacija zadovoljava sve standarde Univerziteta u Beogradu za doktorsku disertaciju.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U *Uvodu* disertacije je obrazložen predmet istraživanja i definisani naučni ciljevi. Istaknut je značaj magnetita i adsorbenata na bazi magnetita, kompozitnih i modifikovanih materijala, za uklanjanje fosfata iz vode. Ukazano je na povezanost parametara sinteze i njihovog uticaja na dobijanje materijala dobrih magnetnih svojstava i velikog adsorpcionog kapaciteta.

U okviru *Teorijskog dela* dat je literaturni pregled predmetne oblasti, izložen kroz tri poglavlja: Postupci uklanjanja fosfata iz voda, Magnetit i Adsorpcija na čvrstim adsorbentima.

U prvom poglavlju *Teorijskog dela* analizirani su postupci i načini uklanjanja fosfata iz voda kao i različiti materijali, prirodni i sintetski, korišćeni u tim procesima. U drugom poglavlju je dat literaturni pregled metoda sinteze magnetita, uz prikaz uticaja određenih parametara sinteze na veličinu čestica, magnetna svojstva, teksturalne karakteristike i prisustvo drugih oksida gvožđa. Takođe je dat i prikaz materijala koji su korišćeni u sintezi adsorbenata na bazi magnetita u ovom radu. U poglavlju „Adsorpcija na čvrstim adsorbentima“ analizirani su mehanizmi adsorpcije iz vode, modeli kinetike procesa adsorpcije, modeli koji se koriste za opisivanje adsorpcione ravnoteže u statičkim uslovima, kao i modeli adsorpcije u dinamičkim uslovima. U ovom poglavlju dat je i literaturni prikaz adsorpcije fosfata na magnetitu i materijalima na bazi magnetita.

U poglavlju *Eksperimentalna procedura* opisan je postupak hidrotermalne sinteze prahova magnetita, postupak sinteze kompozitnih adsorbenata na bazi magnetita i ugljeničnog kriogela, kao i postupak modifikacije tufa oblaganjem magnetitom. Navedene su i opisane sve metode i postupci karakterizacije dobijenih adsorbenata. Detaljno su opisani postupci adsorpcionih eksperimenata za određivanje adsorpcionih izoterma, ispitivanja uticaja vremena kontakta, adsorpcije u dinamičkim uslovima (kolona) i uticaja promene pH vrednosti rastvora na adsorpciju.

U poglavlju *Rezultati i diskusija* prikazani su i diskutovani rezultati istraživanja. U ovom poglavlju su prvo prezentovani rezultati karakterizacije svih sintetisanih uzoraka magnetita, kompozitnih uzoraka na bazi magnetita i ugljeničnog kriogela i uzorak modifikovanog, odnosno magnetitom obloženog tufa. U drugom delu su dati rezultati ispitivanja adsorpcije, koji su analizirani uzimajući u obzir rezultate karakterizacije adsorbenata.

Rendgenskom difrakcionom analizom (XRD), infracrvenom spektroskopskom analizom (FT-IR) i analizom saturacione magnetizacije potvrđeno je da su hidrotermalnom metodom sintetisani uzorci magnetita. Korišćenjem polietilen glikola (PEG) različitih molarnih masa (400 i 20.000) i različitih odnosa PEG/voda u sintezi, uticalo se na promene morfoloških, strukturnih, teksturalnih i magnetnih osobina magnetita. Uvođenje PEG(400) u sintezu u odnosu PEG/voda 1:3, prouzrokovalo je smanjenje čestica magnetita od mikrometarskih do nanometarskih dimenzija, dok je povećanje ovog odnosa na 3:1 uticalo na stvaranje sitnih sfernih nanočestica prečnika oko 10 nm. Primena PEG(20.000), uz

zadržavanje istog odnosa PEG/voda, nije dovela do značajnije promene morfologije, osim što su čestice bile još sitnije i mestimično organizovane u sferulitnu strukturu, oponašajući strukturu polimera, što je utvrđeno skenirajućom elektronskom mikroskopijom (SEM). Povećanje odnosa PEG/voda i molarne mase PEG-a uticalo je na postepeno smanjenje dimenzija kristalita magnetita. Veličina kristalita za uzorak sa odnosom PEG(20.000)/voda 3:1 je bila skoro 6 puta manja u poređenju sa uzorkom sintetisanim bez prisustva PEG-a. Utvrđeno je i da magnetizacija uzoraka očekivano opada sa smanjenjem veličine čestica. Uočeno je da je dodatak PEG-a u sintezu uticao na porast vrednosti specifične površine dobijenih prahova magnetita. Specifična površina uzorka sa odnosom PEG(20.000)/voda 3:1 uvećana je 8 puta u poređenju sa uzorkom sintetisanim bez prisustva PEG-a. Rezultati ukazuju da je PEG imao ulogu surfaktanta koji je služio da se odvoje nukleacioni centri za stvaranje magnetita, što je dovelo do smanjivanja veličine čestica i povećanja poroznosti sintetisanih prahova. Ključni faktor kod povećanja mezoporoznosti bio je odnos PEG/voda, dok je molarna masa PEG-a imala manji uticaj.

Za sintetisane uzorke kompozita ugljenični kriogel(UK)/magnetit, XRD analiza je pokazala da sadrže kristalite magnetita malih dimenzija, reda veličine 10 nm. Na osnovu FT-IR analize spektara uzoraka na bazi oksidisanog kriogela (UKO) uočeno je da se magnetit vezuje za površinu UKO preko C=O veze, a ne preko C—O veza jer je intenzitet trake koja odgovara ovoj vezi ostao nepromenjen. Analizom specifične površine ugljeničnog kriogela i kompozitnih uzoraka utvrđeno je da se procesom oksidacije narušava postojeća teksturalna struktura UK što dovodi do smanjenja zapremine pora i specifične površine kriogela (smanjenje od 35%). Formiranje kristalita magnetita na kriogelu dovelo je do smanjenja ukupne zapremine mikro i mezopora kao i specifične površine UK, dok se sa povećanjem udela magnetita u kompozitu sa 1:1 na 3:1 smanjila i specifična površina i zapremina pora, ali je raspodela veličina pora ostala približno ista. Diferencijalno-termijskom i termogravimetrijskom analizom (DTA-TGA) je ustanovljeno da je kod uzoraka sintetisanih sa oksidisanim kriogelom i uz dodatak HCl, odnos UKO/magnetit iznosio 1,3:1 i 1,2:1. Rezultat ukazuje da je u datim uslovima sinteze magnetit ravnomernije raspoređen na površini kriogela nego u sintezi uz korišćenje nemodifikovanog ugljeničnog kriogela bez dodatka HCl, gde je odnos iznosio 1,7:1.

Modifikacija tufa oblaganjem magnetitom (MMT) dovela je do ispunjavanja pora česticama magnetita, što je prouzrokovalo smanjenje dimenzija pora, ali istovremeno i povećanje specifične površine materijala što je jedan od preduslova za povećanje adsorpcionog kapaciteta materijala. Specifična površina MMT uzorka povećana je oko 35%, u odnosu na nemodifikovani tuf, dok je analiza sadržaja gvožđa metodom ekstrakcije pokazala da u uzorku MMT ima ~26,4 mg/g gvožđa, odnosno ~36,5 mg/g magnetita. Sadržaj gvožđa u uzorku MMT je potvrđen i energetski disperzivnom rendgenskom spektroskopijom (EDS).

Rezultati adsorpcije su pokazali da je čak 8 puta veća količina fosfata adsorbovana korišćenjem uzorka magnetita sintetisanim pri odnosu PEG(20.000)/voda 3:1 u poređenju sa uzorkom dobijenim bez PEG-a. Na osnovu nelinearnog fitovanja adsorpcionih izoterma utvrđeno je da je Langmuir-ov model bio najpogodniji za opisivanje adsorpcije fosfata za navedene uzorke, dok za uzorke gde je korišćen PEG(400) pri odnosima 1:3 i 3:1 najbolje slaganje je pokazao Freundlich-ov model. Izračunati maksimalni adsorpcioni kapaciteti na osnovu Langmuir-ovog modela su pokazali da se kapacitet povećava sa dodatkom PEG-a, sa

povećanjem odnosa PEG:voda i sa povećanjem molske mase PEG-a. Najveći adsorpcioni kapacitet od 26,2 mgP/g je imao uzorak dobijen sa PEG(20.000), pri odnosu PEG:voda = 3:1.

Analiza kinetike adsorpcije pokazala je da pseudo-drugi red najbolje opisuje eksperimentalne podatke za uzorak sintetisan bez prisustva PEG-a, dok je Elovich-ev model najpogodniji za opisivanje adsorpcione kinetike uzoraka sintetisanih uz dodatak PEG-a. Sva 4 sintetisana praha magnetita su imala približno istu tačku nultog naelektrisanja (TNN) $pH_{TNN} \approx 4,6$, dok je izoelektrična tačka (IET) za sva 4 uzorka magnetita iznosila oko $pH \approx 8$. Pomeranje TNN i IET u suprotnim smerovima je ukazalo da se adsorpcija fosfata na magnetitu odigrava putem specifičnih interakcija, dok su FT-IR analiza i analiza jonskom hromatografijom potvrdile da je u toku adsorpcije došlo do zamene površinskih OH i sulfatnih grupa fosfatnim (formiranje unutrašnjeg kompleksa) Na značajan doprinos i elektrostatičnih interakcija procesu adsorpcije ukazala je korelacija količine adsorbovanih fosfata i površinskog naelektrisanja uzoraka magnetita, izraženog zeta potencijalom. Najveći adsorpcioni kapacitet za fosfate postignut je uslovima gde je magnetit pozitivno naelektrisan ($pH < IET$).

U slučaju kompozita magnetit/ugljenični kriogel, najbolji rezultat adsorpcije fosfata je postignut kod uzoraka sintetisanih sa oksidisanim kriogelom i uz dodatak rastvora HCl što je potvrdilo da je kod ovih kompozita magnetit ravnomernije raspoređen, bez formiranja krupnijih aglomerata.

Na osnovu nelinearnog fitovanja adsorpcionih izoterma pokazano je da Langmuir-ov model bolje opisuje adsorpciju fosfata na tufu (T), dok se Freundlich-ov model pokazao kao pogodniji za opisivanje adsorpcije na uzorku MMT. Izračunati maksimalni adsorpcioni kapaciteti Langmuir-ovim modelom su iznosili 0,45 i 1,91 mgP/g za T i MMT, redom. Unutarčestični kinetički model se pokazao kao najpodesniji za opisivanje adsorpcije fosfata na magnetitom modifikovanom tufu, dok su eksperimentalni rezultati adsorpcije u koloni pokazali da je maksimalni adsorpcioni kapacitet za MMT 6 puta veći nego u slučaju nemodifikovanog tufa. Nelinearnim fitovanjem eksperimentalnih podataka utvrđeno je da Yan-ov model ima najbolje poklapanje sa procesom adsorpcije fosfata na adsorbentima T i MMT. Analizom zavisnosti adsorpcionih kapaciteta od pH u opsegu 3 – 9 utvrđeno je da kapacitet adsorpcije raste sa opadanjem pH vrednosti rastvora i da dostiže najveću vrednost na pH 3.

Adsorpciono-desorpcionim eksperimentima ustanovljeno je da je adsorpcija fosfata na sintetisanim prahovima magnetita relativno reverzibilan proces i da regeneracija dostiže konstantnu vrednost od oko 60% u odnosu na maksimalan adsorpcioni kapacitet. Dobijeni rezultati ponovnog korišćenja MMT uzorka pokazuju da regeneracija dostiže čak 95% od prvobitnog adsorpcionog kapaciteta nakon dva ciklusa.

U poglavlju *Zaključak* su navedeni postignuti rezultati koji su u potpunosti saglasni sa postavljenim ciljevima disertacije. Na kraju rada, u poglavlju Literatura, navedena je literatura korišćena tokom izrade disertacije.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Magnetit kao adsorbent ima veliki potencijal u oblasti tretmana voda zahvaljujući adsorpcionim i redukcionim svojstvima, dok mu svojstvena magnetičnost daje dodatni kvalitet zbog mogućnosti da se iz tretirane vode izdvoji dejstvom magnetnog polja. Iako nema veliki adsorpcioni kapacitet zbog manje specifične površine u odnosu na neke druge materijale, primenom novih načina sinteze i dobijanjem nanočestičnih prahova, efikasnost magnetita kao adsorbenta se može višestruko poboljšati. Primena PEG-a u hidrotermalnoj sintezi imala je za cilj razdvajanje nukleacionih centara, što je uticalo na smanjivanje veličina čestica i povećanja mezoporoznosti prahova magnetita. Optimizacijom odnosa PEG/voda, kao i primenom različitih molarnih masa PEG-a imalo je za cilj dobijanje praha sa česticama nanometarskih veličina, najveće specifične površine, a time i adsorpcionim kapacitetom za uklanjanje fosfata.

Ideja o sintetisanju kompozitnih materijala na bazi magnetita imala je za cilj sprečavanje aglomeracije nanočestica njihovim nanošenjem na odgovarajuće nosače. U ovom istraživanju korišćen je oksidisani i neoksidisani ugljeni kriogel. Formiranjem kompozitnog materijala postignut je dvostruki efekat: prvi se ogledao u sprečavanju agregacije nanočestica magnetita što bi uticalo na smanjenje specifične površine materijala, dok se drugi odnosio na stvaranje multifunkcionalnog materijala sposobnog da omogući i adsorpciju fosfata, pored postojeće odlične sposobnosti za uklanjanje organskih zagađujućih materija.

Modifikacija filtracionog materijala tufa oblaganjem magnetitom nije do sada zabeležena u literaturi. Navedenom modifikacijom višestruko je poboljšan adsorpcioni kapacitet tufa za uklanjanje fosfata. Originalnost se ogleda i u postignutoj multifunkcionalnosti osnovnog materijala. Tuf, materijal koji se koristi u procesu filtracije i prečišćavanja vode, dobio je novi aspekt primene u adsorpciji fosfata.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

Tokom izrade doktorske disertacije kandidat je analizirao naučnu i stručnu literaturu iz predmetne oblasti, a u doktorskoj disertaciji su data 152 literaturna navoda, od kojih najveći broj čine radovi iz međunarodnih časopisa sa tematikom značajnom za izradu doktorske disertacije. Navedene reference sadrže eksperimentalne rezultate istraživanja mnogih istraživača, analizu i diskusiju dobijenih rezultata i izvedene zaključke, kao i teorijske osnove primenjenih metoda ispitivanja, njihove mogućnosti i ograničenja. Najveći broj navedenih referenci je novijeg datuma. Na osnovu pregledane literature, kandidat je analizirao do sada poznate postupke uklanjanja fosfata iz voda, primenu različitih adsorbenata korišćenih za uklanjanje fosfata, metode sinteze magnetita i adsorbenata na bazi magnetita i njihovu karakterizaciju, mehanizme adsorpcije, kao i uticaj parametara adsorpcije na efikasnost uklanjanja fosfata iz vodene sredine.

U okviru literaturnih navoda nalaze se i reference kandidata Andrije B. Savića, diplomiranog inženjera tehnologije, proisteklih iz sprovedenih istraživanja u oblasti doktorske disertacije, a koje su objavljene u časopisima međunarodnog značaja. Iz

obrazloženja predložene teme doktorske disertacije i objavljenih radova koje je kandidat priložio, kao i iz pregleda literature koja je korišćena u istraživanju, uočava se adekvatno poznavanje predmetne oblasti istraživanja i aktuelnog stanja istraživanja u ovoj oblasti.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

Za sintezu uzoraka magnetita korišćena je hidrotermalna metoda sa i bez prisustva PEG-a, dok je za sintezu kompozitnih i magnetitom modifikovanih adsorbenata primenjena metoda koprecipitacije Fe^{2+} i Fe^{3+} jona u inertnoj atmosferi, da bi se sprečila oksidacija magnetita. Uzorci magnetita su osušeni korišćenjem *Freeze Dryer* sistema u vakuumu u cilju sprečavanja aglomeracije, dok su ostali uzorci osušeni u vakuum sušnici, zbog smanjenja mogućnosti oksidacije magnetita tokom visokotemperaturnog sušenja. Za karakterizaciju dobijenih adsorbenata primenjene su različite klasične i savremene metode i postupci. Morfologija uzoraka analizirana je visokorezolucionom skenirajućom elektronskom mikroskopijom (FESEM). Rendgenska difrakciona analiza (XRD) korišćena je za identifikaciju prisutnih kristalnih faza, a infracrvenom spektroskopskom analizom (FT-IR), određene su površinske grupe i vrste veza u sintetisanim uzorcima. Diferencijalno-termijskom i termo-gravimetrijskom analizom (DTA i TGA) ispitana su termička svojstva kompozitnih uzoraka. Teksturalne karakteristike su određene adsorpcijom/desorpcijom gasovitog azota na temperaturi tečnog azota (- 196 °C). Magnetna svojstava određena su korišćenjem SQUID (engl. *superconducting quantum interference device*) magnetometra. Energetski disperzivnom rendgenskom spektroskopijom (EDS) ispitivan je sadržaj gvožđa u uzorku MMT. Tačka nultog naelektrisanja određena je korišćenjem metode uravnotežavanja posebnih proba. Izoelektrična tačka određena je iz elektrokinetičkih podataka (zeta (ζ)-potencijal vs pH) pomoću uređaja zetasizer. Adsorpcija fosfatnih jona u statičkim uslovima ispitana je primenom metode uravnotežavanja na konstantnoj temperaturi, dok je za uzorke T i MMT ispitana adsorpcija i u dinamičkim uslovima (korišćenjem kolone). Koncentracije fosfatnih jona u eksperimentima adsorpcije sa uzorcima magnetita i magnetitom modifikovanim uzorcima određivane su tehnikom jonske hromatografije, a koncentracije fosfata u eksperimentima adsorpcije sa kompozitnim materijalima primenom UV-Vis spektroskopije. Za obradu rezultata adsorpcionih eksperimenata u statičkim uslovima korišćeni su kinetički modeli (pseudo-prvog reda, pseudo-drugog reda, Elovich-ev i unutar-čestične difuzije) i modeli adsorpcionih izoterma (Langmuir, Freundlich i Sips). Za obradu rezultata adsorpcije u koloni korišćeni su: Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson i Yan-ov model.

Primenjene metode su omogućile detaljnu karakterizaciju sintetisanih uzoraka magnetita, kompozitnih i magnetitom modifikovanih uzoraka i utvrđivanje zavisnosti svojstava i adsorpcionih karakteristika od parametara sinteze.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

U okviru disertacije ispitivan je uticaj molarne mase i odnosa PEG/voda u hidrotermalnoj sintezi na fizičko-hemijska svojstva i adsorpcioni kapacitet sintetisanih prahova magnetita za uklanjanje fosfata iz vode. Dobijeni rezultati su pokazali da se

optimizacijom procesa sinteze može značajno povećati adsorpcioni kapacitet prahova, uz zadržavanje magnetnih osobina koje omogućavaju magnetnu separaciju nakon adsorpcije. Takođe je ispitan i uticaj parametara sinteze na fizičko-hemijska svojstva i adsorpcioni kapacitet kompozitnih uzoraka magnetita na bazi ugljeničnog kriogela. Pokazano je da se optimizacijom procesa sinteze mogu dobiti magnetno separabilni kompoziti sa mogućnošću uklanjanja fosfata, što doprinosi višestrukoj primenljivosti ugljeničnog kriogela kao adsorbenta. Modifikacijom prirodnog filtracionog materijala tufa, oblaganjem magnetitom, poboljšane su postojeće filtracione karakteristike tufa. Dobijen je multifunkcionalni materijal sposoban da u tretmanu voda uklanja i fosfate kao biološke nutrijente.

Rezultati i zaključci izneti u disertaciji daju doprinos za dalji razvoj magnetnih adsorbenata željenog sastava, strukture i adsorpcionih svojstava, i otvaraju nove mogućnosti primene ovih materijala u oblasti adsorpcije i zaštite životne sredine.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat Andrija B. Savić, diplomirani inženjer tehnologije, tokom izrade doktorske disertacije je pokazao veliku sklonost za bavljenje naučno-istraživačkim radom, ispoljavajući stručnost i samostalnost u analizi naučne literature, planiranju i realizaciji eksperimenta, kao i u obradi i diskusiji dobijenih rezultata. Tokom istraživanja u potpunosti je ovladao velikim brojem eksperimentalnih tehnika i instrumentalnih metoda. Na osnovu dosadašnjeg rada, Komisija je utvrdila da kandidat poseduje sposobnosti za samostalni naučno-istraživački rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Naučni doprinosi rezultata istraživanja ove doktorske disertacije su:

- optimizacija parametara sinteze nanočestičnih prahova magnetita i kompozita na bazi magnetita i ugljeničnog kriogela za dobijanje efikasnih adsorbenata za uklanjanje fosfatnih jona iz vode
- utvrđivanje uticaja količine i dužine lanca molekula PEG-a na svojstva i adsorpcioni kapacitet dobijenog magnetita
- utvrđivanje uticaja vrste ugljeničnog kriogela (netretirani ili oksidisani) na svojstva i adsorpcioni kapacitet sintetisanih kompozita
- ispitivanje uticaja pH vrednosti i vremena kontakta na adsorpcioni kapacitet sintetisanih materijala
- objašnjenje mehanizma adsorpcije fosfatnih jona na sintetisanim magnetnim materijalima
- poboljšanje sposobnosti uklanjanja fosfatnih jona iz vode modifikacijom prirodnog silikatnog filtracionog materijala – tufa oblaganjem magnetitom

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Sagledavanjem dostupne literature iz ove oblasti, konstatovano je da se rezultati razmatrane disertacije nadovezuju na postojeće rezultate i dopunjuju ih. Iako je sinteza magnetita uz korišćenje PEG-a bila predmet ranijih istraživanja, potrebno je istaći da nije analiziran uticaj promene količine i molarne mase PEG-a u toku sinteze na teksturalna svojstva i adsorpcioni kapacitet za fosfate ovako dobijenog magnetita. S druge strane FT-IR analizom u sprezi sa jonskom hromatografijom potvrđena su i dosadašnja objašnjenja mehanizma adsorpcije fosfatnih jona na magnetitnim materijalima. Sinteze kompozitnih adsorbenata na bazi magnetita i ugljeničnih nosača takođe su već istraživane, međutim ne postoje podaci o korišćenju ugljeničnog kriogela u ovu svrhu. Proizilazi da su i podaci o uticaju oksidacije ugljeničnog nosača na svojstva i adsorpcioni kapacitet kompozita dobijeni u disertaciji takodje originalni. Značajno je istaći i da u literaturi nije do sada zabeležena modifikacija tufa oblaganjem magnetitom u cilju postizanja multifunkcionalnosti materijala sa novim adsorptivnim sposobnostima pored već postojeće filtracione namene. Detaljno su analizirani mehanizmi i kinetika adsorpcije, kao i uticaj pH vrednosti na adsorpcione kapacitete. Stoga, ova doktorska disertacija predstavlja važan korak ka praktičnoj primeni magnetita, kompozita i materijala na bazi magnetita u procesima prerade voda koje sadrže fosfate kao biološke nutrijente i otvara mogućnosti za dalja istraživanja i primenu.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21):

1. **Savić A. B.**, Čokeša Dj., Lazarević S., Jokić B., Janačković Dj., Petrović R., Živković Lj.S., Tailoring of magnetite powder properties for enhanced phosphate removal: effect of PEG addition in the synthesis process, - *Powder Technology*, Vol. 301, 2016, pp. 511-519 (IF=2,942, ISSN 0032-5910). doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.028>
2. **Savić A. B.**, Čokeša Dj., Savić Biserčić M., Janković-Častvan I., Petrović R., Živković Lj.S., Multifunctional use of magnetite-coated tuff grains in water treatment: Removal of arsenates and phosphates, - *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, 2019, pp. 1687-1695 (IF=2,943, ISSN 0921-8831). doi: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.05.020>

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (M34):

1. **Savić A.**, Čokeša Dj., Jokić B., Kusigerski V., Petrović R., Živković Lj., *Effect of polyethylene glycol addition on the properties of hydrothermally synthesized magnetite powders*, 3rd Conference of the Serbian Society for Ceramic Materials, June 15-17, 2015, Belgrade, Serbia, - Programme and the Book of Abstract, (P-3), pp. 78 (ISBN 978-86-80109-19-0).

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu navedenog, Komisija smatra da doktorska disertacija Andrije B. Savića, diplomiranog inženjera tehnologije, pod nazivom „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**” predstavlja značajan originalni naučni doprinos u oblasti Tehnološko inženjerstvo, što je potvrđeno objavljivanjem radova u relevantnim časopisima međunarodnog značaja. Komisija smatra da su postavljeni ciljevi u potpunosti ostvareni.

Imajući u vidu kvalitet, obim i naučni doprinos postignutih rezultata, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta da se doktorska disertacija pod nazivom „**Sinteza, karakterizacija i primena adsorbenata na bazi magnetita za uklanjanje fosfata iz vode**” kandidata Andrije B. Savića, diplomiranog inženjera tehnologije prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 24. 06. 2019.

ČLANOVI KOMISIJE

-
1. Dr Rada Petrović, redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

 2. Dr Ljiljana Živković, naučni savetnik Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“

 3. Dr Đorđe Janačković, redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

 4. Dr Slavica Lazarević, naučni saradnik Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

 5. Dr Ivona Janković-Častvan, naučni saradnik Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet