

Образац 3.

Факултет ТЕХНОЛОШКО-
МЕТАЛУРШКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

2026 - 35/157

Веће научних области техничких наука

(Број захтева)

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

8. 5. 2026.

(Датум)

ЗАХТЕВ

**за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације
и о одређивању ментора**

Молимо да, сходно чл. 48 ст. 5 тач. 3) Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“ бр. 201/2018, 207/2019, 213/2020, 214/2020, 217/2020, 230/21, 232/22, 233/22 и 236/22), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

Синтеза, карактеризација и примена високоактивног цинк-оксида као функционалног адитива

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Технолошко инжењерство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:

Александар (Ђорђе) Јанаћковић

2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):

Универзитет у Београду,

Технолошко-металуршки факултет, Инжењерство материјала, мастер инжењер технологије

3. Година завршетка
претходног нивоа студија: 2023.

4. Година уписа на докторске студије: 2023.

5. Назив студијског програма
докторских студија: Инжењерство материјала

6. Датум подношења пријаве
теме докторске дисертације: 9. 4. 2026.

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

за кандидата **Александар Јанаћковић**

Име и презиме ментора: **др Сања Јевтић**

Звање: ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Veljović, Đ., Matić, T., Stamenić, T., Kojić, V., Dimitrijević-Branković, S., Lukić, M. J., **Jevtić, S.**, Radovanović, Ž., Petrović R., Janačković Đ. (2019) Mg/Cu co-substituted hydroxyapatite – biocompatibility, mechanical properties and antimicrobial activity. *Ceramics International*, 45 22029-22039; ISSN 0272-8842; IF (2019)=3,830. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.07.219
2. Dimitrijević, J., **Jevtić, S.**, Simić, M., Koprivica, M., Tolić Stojadinović, Lj., Dikić, J., Petrović, J. (2026) Structural and Adsorptive Properties of Hybrid Alginate Beads Containing Aminosilane-Modified Clinoptilolite and Epoxy-Silane-Functionalized Oat Straw. *Arabian Journal for Science and Engineering*, ISSN 2193-567X; IF(2024)=2,9. <https://doi.org/10.1007/s13369-026-11284-0>
3. Ugrina M., Dikić J., Nuić I., **Jevtić S.** (2025) Sorption behavior of nickel(II) on natural and Fe(III)-modified clinoptilolite: optimization and mechanism insight, *Clean Technologies* 7(3), 78 ISSN: 2571-8797; IF(2024) = 4,7. DOI: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7030078>
4. Dinić D., Sokić K., Anđić Z., Kamberović Ž., Dikić J., **Jevtić S.** (2025) Eco-Friendly Porous Ceramics Based on Zeolite and Bentonite: Preparation and Assessment of Adsorption Efficiency toward Lead, Nickel, and Cobalt Ions, *Ceramics International* 51, 26B, 49295-49306; ISSN 0272-8842; IF (2024) = 5,6. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.08.171
5. Štulović M., Radovanović, D., Dikić, J., Gajić, N., Đokić, J., Kamberović, Ž., **Jevtić S.** (2024) Utilization of Copper Flotation Tailings in Geopolymer Materials Based on Zeolite and Fly Ash, *Materials*, 17, 6115; ISSN 1996-1944; IF (2022) = 3,4. DOI. 10.3390/ma17246115

ДЕКАНКА ФАКУЛТЕТА

Проф. др Мирјана Кијевчанин

Обавештавамо вас да је Наставно-научно веће

(назив надлежног тела факултета)

на седници одржаној 7. 5. 2026. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

- Прилог
1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
 2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

ДШ

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. 33. Правилника о докторским студијама ТМФ-а на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 7. 5. 2026. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације и одређивању ментора

Прихвата се Извештај Комисије о научној заснованости теме за израду докторске дисертације кандидата **Александра Јанаћковића**, број индекса 2023/4028, под називом: **„Синтеза, карактеризација и примена високоактивног цинк-оксида као функционалног адитива”**.

Одлуку о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације доноси Универзитет у Београду.

За ментора се одређује др Сања Јевтић, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко–металуршки факултет.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору, Служби за наставно студентске послове и архиви Факултета.

Д Е К А Н К А

Проф. др Мирјана Кијевчанин

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о оцени научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Александра Јанаћковића, мастер инжењера технологије

Одлуком бр. 2026-35/108 од 9. априла 2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Александра Јанаћковића, мастер инжењера технологије, под насловом „Синтеза, карактеризација и примена високоактивног цинк-оксида као функционалног адитива”.

На основу материјала приложеног уз пријаву теме кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Александар Јанаћковић рођен је 22. јануара 1997. у Београду, где је завршио основну школу, као носилац Вукове дипломе, као и средњу школу. Године 2016. је уписао основне академске студије на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду, студијски програм Хемијско инжењерство. Године 2022. завршио је основне академске студије одбраном завршног рада на тему „Уклањање јона цинка из водених раствора помоћу калцита и синтетских алумосиликата“, под менторством проф. др Сање Јевтић, са просечном оценом 8,60.

Мастер академске студије завршио је 2023. године на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду, студијски програм Инжењерство материјала, са просечном оценом 10. Мастер рад под називом „Утицај морфологије и величине честица цинк-оксида на процес вулканизације гумених смеша“, одбранио је под менторством проф. др Александра Маринковића.

Докторске академске студије на студијском програму Инжењерство материјала на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду започео је 2023. године. У новембру исте године изабран је у звање истраживач-приправник. Од 1. фебруара 2024. године је запослен на Институту за општу и физичку хемију у Београду, где се бави истраживањем у области материјала. Током докторских академских студија овладао је радом на различитим уређајима за карактеризацију, укључујући, скенирајућу електронску микроскопију са емисијом поља (FESEM), енергетску дисперзивну рендгенску спектроскопију (EDS), рендгенску дифракцију (XRD) и инфрацрвену спектроскопију са Фуријеовом трансформацијом (FTIR).

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Докторске академске студије на студијском програму Инжењерство материјала на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду уписао је 2023. године. Положио је све испите предвиђене програмом са просечном оценом 10. Списак положених испита са оценама и ЕСП бодовима приказан је у следећој табели:

Назив предмета	Оцена	ЕСПБ
Бионеорганска хемија	10	5
Наука о материјалима и инжењерство материјала	10	6
Докторска дисертација – уводни семинари и научноистраживачки рад 1	Не оцењује се	5
Хемија чврстог стања са кристалографијом	10	5
Математичко програмирање	10	6
Хемија функционалних оксида	10	6
Термодинамика чврстог стања	10	6
Функционални композитни материјали-виши курс	10	6
Метал, угљенични и керамички композити	10	5
Физичко-механичка испитивања материјала-виши курс	10	5
Докторска дисертација – уводни семинари и научноистраживачки рад 2	Не оцењује се	5
Завршни испит	10	30
Просек оцена/Збир ЕСПБ	10,00	90

Списак објављених радова и саопштења кандидата

Водећи међународни часопис категорије M21a

1. Ivana Barišić, Ivanka Netinger Grubeša, Milica Vasić, **Aleksandar Janačković**, “Assimilating nanographene into the pervious concrete - surface treatment for enhanced paving performance”, Case Studies in Construction Materials 2025, 23, IF(2024) = 6,6, ISSN: 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04917>

Водећи међународни часопис категорије M21

2. Sirje Liukko, Katarina Dimic-Misic, **Aleksandar Janačković**, Michael Gasik, “Improving Mechanical and Thermal Properties of Cellulose Foam with Alumina Nanofibers”, Polymers 2025, 17, IF(2024) = 4,9, ISSN: 2073-4360) <https://doi.org/10.3390/polym17081043>

1.3. Оцена оспособљености кандидата за рад на предложеној теми

На основу досадашњег научноистраживачког рада и постигнутих резултата током докторских академских студија Александар Јанаћковић, мастер инжењер технологије, је показао изражену склоност ка научноистраживачком раду. То се потврђује кроз његову способност критичког приступа литератури, самосталног планирања и реализације истраживања, као и анализе, обраде и јасног представљања научних резултата. Сагледавајући све наведено, Комисија сматра да кандидат испуњава све неопходне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Цинк-оксид је неорганско једињење које поседује специфичну комбинацију физичко-хемијских, електронских и оптичких својстава, што је довело до пораста интересовања за његову примену у последњим деценијама. Представља једињење које има широку примену у различитим индустријским гранама, укључујући производњу керамике, боја и пластичних материјала (као антирефлексионни додатак за заштиту од ултраљубичастог зрачења), кремама за сунчање и козметици, батеријама, као и

материјал који успорава ширење пожара. Највећи значај и најширу примену има у индустрији гума и пнеуматика, где се користи као веома ефикасан активатор у процесу вулканизације [1]. Захваљујући својим антибактеријским својствима, примену има и као антимикуробни адитив, нарочито у исхрани животиња [2].

Са порастом индустријске производње, континуирано расте и потражња за цинк-оксидом у различитим секторима. Иако је цинк есенцијалан елемент и природно присутан у живим организмима, његове повишене концентрације могу довести до токсичних ефеката, посебно у воденим екосистемима [3]. Према критеријумима Европске хемијске агенције (ЕХНА), штетни утицаји постају значајни када концентрације премаше прописане граничне вредности. Агенција за заштиту животне средине Сједињених Америчких Држава (ЕРА) дефинише максималну дозвољену концентрацију цинка у води за пиће од 5 mg/L, док је за растворени цинк у површинским водама постављена граница од 120 µg/L. Због потенцијалног негативног утицаја на животну средину све више се тежи смањењу употребе цинк-оксида у индустрији. У том контексту, Европска Унија је увела ограничења којима је максимална дозвољена количина цинка као антимикуробног адитива у храни за животиње смањена са 3000 mg/kg на 150 mg/kg (Commission Implementing decision of 26th June 2017 – Directive 2001/82/EC). Такође, Агенција за заштиту животне средине САД (ЕРА) препоручује редукацију употребе цинк-оксида у индустрији гума, будући да има највећи удео у његовој потрошњи.

Разлог за примену високих концентрација комерцијалног цинк-оксида лежи у његовој релативно ниској реактивности, односно малој специфичној површини честица (~5 m²/g) [4]. Највећи део цинк-оксида добија се индиректним (француским) поступком. Полазни реактант у наведеном поступку је метални цинк, који се загрева у графитним судовима на температурама у опсегу 1230-1270 °C, при чему паре цинка достижу притисак од 0,2-1,1 МПа. У контакту са ваздухом долази до брзе оксидације паре цинка, након чега следи хлађење система и формирање цинк-оксида. Честице цинк-оксида добијене овим поступком имају издужен облик, са величином кристалита у распону од 30 до 2000 nm, док се специфична површина креће између 3 и 5 m²/g. Директни (амерички) поступак је следећи по заступљености, а цинк-оксид произведен овом методом има специфичну површину у опсегу од 1 до 3 m²/g. Као полазни реактанти користе се различите сировине које садрже цинк, као што су оксидне или сулфидне руде цинка, материјали у којима заостаје цинк, оловне шљаке, pepeo настао услед топлог цинковања, које се подвргавају редукацији угљеником на повишеним температурама дајући цинк у гасовитој фази. Добијена пара цинка се затим у комори за сагоревање оксидује у присуству ваздуха, чиме се формира цинк-оксид [5].

Најраспрострањенију и најширу примену цинк-оксид има у индустрији гума и пнеуматика где се користи као активатор вулканизације. Вулканизација је сложен процес у коме се полимерни ланци међусобно умрежавају и при томе настаје тродимензионална структура која пнеуматичима обезбеђује својства попут еластичности и отпорности на кидање. Овај процес се заснива на формирању моно-, би- и полисулфидних веза између ланаца полимера на повишеним температурама. Цинк-оксид учествује у стварању активног сумпора који служи за умрежавање каучукових молекула, а додатно се активира у присуству масних киселина, као што су стеаринска киселина или њене соли, чиме настаје цинк-стеарат који је растворан у каучуку за разлику од хидрофобног цинк-оксида [1,6]. Количина цинк-оксида која се користи у индустријској производњи гума се креће од 3-8 phg цинк-оксида (phg је јединица која се користи у гумарству, а подразумева 3-8 делова на сто делова гуме.) Веће концентрације цинк-оксида доводе до повећања масе саме гуме због веће специфичне тежине, а што као негативну последицу има велики отпор приликом котрљања гуме, односно већу потрошњу горива [7].

Недавна истраживања су показала да сам процес вулканизације, као и његова ефикасност, умногоме зависе од морфологије, специфичне површине и величине честица цинк-оксида. Утврђено је да морфологија честица цинк-оксида има пресудан утицај на степен умрежавања сумпором, док је утицај специфичне површине мање изражен и постаје значајнији углавном у контексту система за умрежавање (енгл. curing system). Поређењем утицаја различите морфологије честица цинк-оксида на ефикасност вулканизације и механичка својства, уочено је да су најбоље вредности добијене употребом наночестица хибридне морфологије које су игличастог облика са заравњеним врховима које су израсле на глобуларним честицама (честице у облику карфиола), што је довело до веће ефикасности процеса вулканизације и побољшања механичких својстава у поређењу са конвенционалним честицама. Даље, глобуларне честице доприносе бољим механичким својствима у односу на игличасте, без обзира на

специфичну површину. Такође је установљено да наночестице цинк-оксида игличастог облика смањују енергију активације и убрзавају процес вулканизације, док честице глобуларног облика, успоравају овај процес и повећавају енергију активације[8].

Један од савремених приступа смањењу количине примењеног комерцијалног цинк-оксида у индустрији гума при вулканизацији, а самим тим и смањењу његовог излуживања у животну средину, заснива се на примени хибридног активатора који се састоји од наночестица цинк-оксида депонованих на носачу, нано силицијум-диоксиду (ZnO-NP@SiO₂-NP). При томе је важно истаћи да овај систем истовремено може да се користи и као пунилац у гуменим смешама. Синтеза овог материјала обухвата припрему раствора одговарајућих прекурсора, инкорпорацију нано силицијум-диоксида и накнадну сепарацију и сушење, чиме се омогућава формирање диспергованих наночестица цинк-оксида на површини честица носача. Посебан значај овог система огледа се у чињеници да је за постизање ефикасне активације у процесу вулканизације потребна знатно мања количина активатора у поређењу са конвенционалним цинк-оксидом, што указује на његов висок степен ефикасности. Сходно томе, примена оваквих наноструктурираних материјала има потенцијал да допринесе смањењу укупног садржаја цинка у гуменим производима и, последично, редукацији његовог излуживања у животну средину током експлоатације, чиме се умањује негативан еколошки утицај [9].

Мултифункционалност цинк-оксида, као што је већ речено, произилази из његових специфичних физичко-хемијских својстава, као што су изражена реактивност, површинска активност и способност интеракције са различитим компонентама система. Управо та својства омогућавају његову примену и у биолошким системима, где цинк-оксид показује изражену антимикуробну активност према широком спектру бактеријских врста. Све веће интересовање за антимикуробна својства цинк-оксида огледа се у великом броју истраживања микро- и наночестица овог једињења која су показала да се антимикуробна способност знатно повећава код наночестичног узорка оксида услед знатно веће специфичне површине самих честица. Наночестице ступају у контакт са површином бактерија, односно са ћелијским зидом, или могу продрети у унутрашњост бактерије и на тај начин ометати и онемогућити њихове виталне функције, што доводи до уништавања ћелија различитим механизмима. Иако се антимикуробна активност наночестичног цинк-оксида доводи у везу са више различитих фактора, тачан механизам инхибиције још увек није сасвим познат. У оквиру његовог антимикуробног деловања постоје бројна нерешена питања која захтевају детаљнија истраживања, а у литератури се наводи неколико различитих механизма, међу којима су најзначајнији: директан контакт наночестица са ћелијским зидом бактерије услед чега долази до нарушавања структуре саме ћелије, ослобађање антимикуробних Zn²⁺ јона, као и формирање реактивних кисеоничних врста које додатно доприносе оштећењу бактеријске ћелије [10].

Недавна истраживања усмерена на синтезу, карактеризацију и процену антимикуробне активности наночестица цинк-оксида инкорпорираних у матрицу на бази хитозана, у присуству сепиолита и силике, показала су да ова метода омогућава добијање композитних материјала са добро диспергованим наночестицама и контролираним морфолошким својствима. Утицај минералних адитива огледа се у модификацији величине, степена агломерације и просторне расподеле ZnO честица, где сепиолит доприноси стабилизацији система и равномернијој дистрибуцији, док силика условљава формирање сложенијих, хетерогених структура. Антимикуробна испитивања спроведена на бактеријама *Escherichia coli* показују да синтетисани композити испољавају значајно инхибиторно дејство, које је израженије у присуству честица носача – сепиолита, услед повећане специфичне површине и боље доступности активних места. Механизам деловања доводи се у везу са генерисањем реактивних кисеоничних врста и нарушавањем интегритета бактеријске ћелијске мембране, што указује на потенцијал ових материјала за примену у развоју савремених антимикуробних система [11].

Захваљујући антибактеријским својствима, изражена је његова примена као антибактеријског адитива у храни за животиње са једне стране, али и потреба за његовом редукацијом са друге. Недавна истраживања су показала да је могуће заменити високе концентрације комерцијалног цинк-оксида (3000 mg/kg) у исхрани прасади након њиховог преласка са млечне хране на чврсту храну, нижим дозама алтернативних облика, као што су порозни и нано-цинк-оксид, уз задржавање или унапређење биолошких ефеката. У недавним истраживањима, 128 прасади (Duroc × Landrace × Yorkshire) било је распоређено у четири експерименталне групе (контролна, комерцијални ZnO, порозни ZnO и нано ZnO), током 28 дана, при чему су праћени параметри раста, учесталост дијареје, оксидативни стрес,

морфологија црева, експресија гена и акумулација цинка у органима. Резултати су показали да додаци цинк-оксида значајно побољшавају производне перформансе у односу на контролу, при чему су порозни и нано облици у нижим концентрацијама испојили упоредиво или боље деловање у смањењу дијареје, побољшању морфологије цревне слузокоже и антиинфламаторним ефектима, уз потенцијално мањи негативан утицај на животну средину и смањен ризик од акумулације цинка у ткивима. Наведени резултати указују на оправданост примене алтернативних форми цинк-оксида као ефикасније и еколошки прихватљивије замене за високе дозе конвенционалног ZnO у исхрани прасади [12].

На основу свега наведеног, предмет истраживања ове докторске дисертације обухвата синтезу, карактеризацију и примену високоактивног цинк-оксида као активатора у процесу вулканизације гума и као антимикробног адитива у исхрани животиња, уз испитивање могућности смањења количине цинк-оксида као адитива у храни, уз очување његове антимикробне ефикасности. Честице високоактивног цинк-оксида ће бити синтетисане у зависности од примене: као самосталне честице за процес вулканизације гума или на различитим неорганским носачима у циљу примене као антимикробног адитива у храни за животиње. Синтеза ће се заснивати на примени ултразвучног поља у воденом раствору соли цинка, као што је цинк-ацетат и његова даља неутрализација помоћу базе, као што је амонијум-хидроксид. Специфична површина и морфологија самих честица биће оптимизирана у зависности од примене.

У циљу испитивања високоактивног цинк-оксида као антимикробног адитива у исхрани животиња, биће спроведена *in vitro* антимикробна испитивања на бактерији *Escherichia coli*, уз поређење његове ефикасности са комерцијалним цинк-оксидом и комерцијалним нано-цинк-оксидом. Након тога, биће реализована *in vivo* испитивања на фармама прасади, у којима ће се упоређивати ефекти синтетисаног високоактивног цинк-оксида у концентрацији од 150 g Zn/т хране (у складу са важећом европском регулативом) са применом комерцијалног цинк-оксида у дози од 3000 g/т хране.

Током експеримента спроводиће се следеће анализе:

- Квантитативна PCR (qPCR) анализа за детекцију и квантификацију циљних патогена, укључујући *Escherichia coli* F4 и F18 (на основу присуства гена за фимбријалне адхезине), као и *Brachyspira pilosicoli* и *Lawsonia intracellularis* (путем специфичних маркер гена);
- Процена оштећења ДНК применом Комет теста (Comet assay);
- Анализа оксидативног стреса мерењем активности антиоксидативних ензима: глутатион-S-трансферазе (GST), супероксид-дисмутазе (SOD) и каталазе (CAT), као и одређивањем концентрације малондиалдехида (MDA) као индикатора липидне пероксидације.

У својству испитивања високоактивног цинк-оксида као активатора у процесу вулканизације гума, поредиће се својства и карактеристике вулканизованих гума добијених употребом комерцијалног цинк-оксида у комерцијалним рецептурама и својства вулканизованих гума добијених употребом знатно мањих количина високоактивног цинк-оксида. Параметри и испитивања које ће се пратити су: одређивање реолошких својстава приликом процеса вулканизације, одређивање механичких карактеристика (затезне чврстоће, издужења при кидању, модула еластичности, специфичне масе смеше, тврдоће и хабања), испитивање механичких карактеристика након симулације старења узорка и одређивање расподеле цинка у вулканизованим узорцима методом скенирајуће електронске микроскопије и енергетско-дисперзионе спекторскопије (EDS).

Као коначан резултат ових истраживања, очекује се утврђивање у којој мери примена високоактивног цинк-оксида омогућава смањење цинк-оксида као антимикробног адитива у сточној храни, као и процена његове применљивости као активатора у процесу вулканизације гуме.

Списак литературе

- [1] Silvia Mostoni, Paola Milana, Barbara Di Credico, Massimiliano D'Arienzo, Roberto Scotti Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process, *Catalysts*, 9, 664, 2019
- [2] Babayevska, N., Przysiecka, Ł., Iatsunskyi, I., Nowaczyk, G., Jarek, M., Janiszewska, E. and Jurga, S., 2022. ZnO size and shape effect on antibacterial activity and cytotoxicity profile. *Scientific Reports*, 12(1), p.8148.

- [3] Bordin, E. R., Ramsdorf, W. A., Domingos, L. M. L., de Souza Miranda, L. P., Mattoso Filho, N. P., & Cestari, M. M. (2024). Ecotoxicological effects of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) on aquatic organisms: Current research and emerging trends. *Journal of environmental management*, 349, 119396.
- [4] Kołodziejczak-Radzimska, A. and Jesionowski, T., 2014. Zinc oxide—from synthesis to application: a review. *Materials*, 7(4), pp.2833-2881.
- [5] Amir Moezzi, Andrew M. McDonagh, Michael B. Cortie, Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications, *Chemical Engineering Journal*, 185– 186, 1-22, 2012
- [6] Vladimir Petkovic, Tehnologija gume, Gumarsko-hemijska industrija Balkanbelt, 1999.
- [7] Paulthangam, K.M., Som, A., Ahuja, T., Srikrishnarka, P., Nair, A.S. and Pradeep, T., 2022. Role of zinc oxide in the compounding formulation on the growth of nonstoichiometric copper sulfide nanostructures at the brass–rubber interface. *ACS omega*, 7(11), pp.9573-9581
- [8] Dariusz M. Bielinski, Katarzyna Klajn, Tomasz Gozdek, Rafał Kruszynski, Marcin Swiatkowski, Influence of n-ZnO Morphology on Sulfur Crosslinking and Properties of Styrene-Butadiene Rubber Vulcanizates, *Polymers*, 13, 1040, 2021
- [9] Bragato, C., Mostoni, S., D’Abramo, C., Gualtieri, M., Pomilla, F. R., Scotti, R., & Mantecca, P. (2022). On the In Vitro and In Vivo Hazard Assessment of a Novel Nanomaterial to Reduce the Use of Zinc Oxide in the Rubber Vulcanization Process. *Toxics*, 10(12), 781.
- [10] Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N.H.M., Ann, L.C., Bakhori, S.K.M., Hasan, H. and Mohamad, D., 2015. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-micro letters*, 7(3), pp.219-242.
- [11] Tan, E., Karakus, S., Soyulu, G.S.P., Birer, Ö., Zengin, Y. and Kilislioglu, A., 2017. Formation and distribution of ZnO nanoparticles and its effect on E. coli in the presence of sepiolite and silica within the chitosan matrix via sonochemistry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, pp.720-725.
- [12] Long, L., Chen, J., Zhang, Y., Liang, X., Ni, H., Zhang, B. and Yin, Y., 2017. Comparison of porous and nano zinc oxide for replacing high-dose dietary regular zinc oxide in weaning piglets. *Plos one*, 12(8), p.e0182550

3. Полазне хипотезе

На основу прегледа литературе и до сада постигнутих резултата, полази се од следећих претпоставки:

- Повећањем специфичне површине и постизањем одговарајуће морфологије честица цинк-оксида постиже се већа активност, а тиме и примена мањих количина цинк-оксида у односу на тренутну која се користи у пракси.
- Примена ултразвучног поља у воденом раствору соли цинка, оптимизација температуре и времена излагања омогућава постизање одговарајуће морфологије и структуре честица високоактивног цинк-оксида.
- Синтеза честица високоактивног цинк-оксида на неорганском носачу (у функцији антимикуробног адитива у храни за животиње) омогућава појачано антимикуробно дејство услед повећања специфичне површине, чиме се омогућава употреба мање количине цинк-оксида у односу на ону која се тренутно користи.
- Синтеза самосталних честица високоактивног цинк-оксида (активатор у процесу вулканизације гума) и његова површинска модификација ацетатним групама омогућава бољу мешљивост и бољу расподелу центара цинка у смеши за вулканизацију, а самим тим и бољу искоришћеност и његову редукцију.

4. Научне методе истраживања

Реализација наведених истраживања ће се базирати на синтези честица високоактивног цинк-оксида, или као самосталних честица или честица високоактивног цинк-оксида депонованог на честице неорганског носача, зависно од примене. Сама синтеза ће бити изведена применом ултразвучног поља у воденим растворима соли цинка, као што је цинк-ацетат, затим његова неутрализација помоћу базе, амонијум-хидроксида или натријум-хидроксида. Постизање одређене структуре и морфологије честица, као и специфичне површине биће оптимизовано и зависиће од процесних параметара синтезе,

као што су температура и рН на којој се одвија реакција, време изложености ултразвучном пољу, концентрацији почетних реактаната.

Синтеза самосталних честица цинк-оксида, чија ће се примена испитати као активатор у процесу вулканизације, ће се базирати на растварању соли цинка у воденом раствору, а затим и неутрализацији базом под дејством ултразвучног поља. Очекује се да ће честице синтетисане на овај начин имати велику специфичну површину, преко 40 m²/g и ацетатне групе на површини што ће омогућити боље дисперговање центара цинка у смеси за вулканизацију, као и већу реактивност са гуменим матриксом. Све наведено ће довести до смањења потребних количина цинк-оксида за успешан процес вулканизације.

Синтеза честица цинк-оксида депонованих на честицама неорганских носача, који ће се испитати као антимикуробни адитив у храни за животиње, засниваће се на растварању соли цинка у воденом раствору, затим на неутрализацији базом под дејством ултразвучног поља, а потом на додавању неорганских носача на које ће се настале честице депоновати. Применом концепта неорганског носача, очекује се знатно повећање специфичне површине, што ће као директну последицу имати повећани антибактеријски ефекат.

Синтетисане честице високоактивног цинк-оксида, као самосталне честице или на неорганском носачу, биће испитиване различитим методама карактеризације како би им се утврдио састав, структура, морфологија и физичко-хемијска својства од значаја за њихову примену. Користиће се термичка (TG-DSC) анализа како би се одредио садржај преосталих ацетата на површини синтетисаних честица, структурна анализа и одређивање средње величине кристалита методом рендгенске дифракције праха (XRPD), мерење специфичне површине BET методом, инфрацрвена спектроскопска анализа (FTIR), SEM/EDS испитивање морфологије и микроструктуре, расподела величина честица као и састава.

У циљу испитивања високоактивног цинк-оксида као антимикуробног адитива у исхрани животиња, биће спроведена *in vitro* антимикуробна испитивања на бактерији *Escherichia coli*, уз поређење његове ефикасности са комерцијалним цинк-оксидом и комерцијалним нано-цинк-оксидом. Након тога, биће реализована *in vivo* испитивања синтетисаних производа на фармама прасади, у оквиру којих ће се упоређивати ефекти високоактивног цинк-оксида у концентрацији од 150 g Zn/t хране (у складу са важећом европском регулативом) са применом комерцијалног цинк-оксида у дози од 3000 g/t хране. Током експеримената пратиће се следећи параметри:

- Квантитативна PCR (qPCR) анализа за детекцију и квантификацију циљних патогена: *Escherichia coli* F4 и F18 (на основу гена за фимбријалне адхезине), као и *Brachyspira pilosicoli* и *Lawsonia intracellularis* (применом специфичних маркер гена);
- Процена степена оштећења ДНК применом Комет теста (Comet assay);
- Анализа оксидативног стреса одређивањем активности антиоксидативних ензима: глутатион-S-трансферазе (GST), супероксид-дисмутазе (SOD) и каталазе (CAT), као и мерењем концентрације малондиалдехида (MDA) као индикатора липидне пероксидације.

У циљу процене примене високоактивног цинк-оксида као активатора у процесу вулканизације гума, биће извршено поређење својстава вулканизованих гума добијених коришћењем комерцијалног цинк-оксида у стандардним рецептурама и оних добијених уз значајно смањене количине високоактивног цинк-оксида. Током истраживања пратиће се следећи параметри: реолошка својства у току вулканизације, механичке карактеристике (затезна чврстоћа, издужење при кидању, модул еластичности, специфична маса смеше, тврдоћа и хабање), промене механичких својстава након симулираног старења узорака, као и расподела цинка у вулканизованим материјалима применом скенирајуће електронске микроскопије (SEM) и енергетско-дисперзионе спектроскопије (EDS).

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да се на основу наведених истраживања остваре следећи научни доприноси:

- Објашњење утицаја структуре и морфологије, специфичне површине, као и површинске модификације ацетатним групама самосталних честица високоактивног цинк-оксида на његово смањење као активатора у процесу вулканизације.
- Утврђивање утицаја употребе знатно нижих концентрација високоактивног цинк-оксида на својства вулканизоване гуме (одређивање реолошких својстава приликом процеса вулканизације, одређивање механичких карактеристика - затезне чврстоће, издужења при кидању, модула еластичности, специфичне масе смеше, тврдоће и хабања, испитивање механичких карактеристика након симулације старења узорка и одређивање расподеле цинка у вулканизованим узорцима методом скенирајуће електронске микроскопије и енергетско-дисперзионе спекторскопије) у поређењу са вулканизованом гумом у којој се као активатор користи комерцијални цинк-оксид.
- Оптимизација процеса синтезе високоактивног цинк-оксида депонованог на неорганске носаче у циљу постизања што веће специфичне површине и специфичне морфологије честица.
- Одређивање утицаја структуре, морфологије и специфичне површине честица цинк-оксида депонованих на неорганске носаче на могућност смањења количине цинк-оксида као антимикробног адитива у храни за животиње.
- Утврђивање ефеката примене значајно нижих концентрација високоактивног цинк-оксида као антимикробног адитива у храни за животиње, кроз испитивања у *in vitro* и *in vivo* условима, уз поређење са комерцијалним цинк-оксидом који се примењује у високим концентрацијама.

6. План истраживања и структура рада

Истраживања у овој докторској дисертацији су планирана по следећим фазама:

- Синтеза високоактивног цинк-оксида, као самосталних честица и честица високоактивног цинк-оксида депонованих на неорганском носачу применом ултразвучног поља у воденим растворима соли цинка, њихова карактеризација и поређење структуре и специфичне површине са комерцијалним цинк-оксидом.
- Оптимизација синтезе и постизање тачно одређене структуре и морфологије честица високоактивног цинк-оксида, као и специфичне површине (преко 40 m²/g).
- Спровођење експеримената вулканизације са употребом знатно нижих концентрација честица високоактивног цинк-оксида и поређење добијених својстава вулканизоване гуме са комерцијалним рецептурама које као активатор користе високе концентрације комерцијалног цинк-оксида.
- Спровођење *in vitro* експеримената ради утврђивања антибактеријске активности високоактивног цинк-оксида депонованог на неорганским носачима, уз поређење са антимикробном активношћу комерцијалног цинк-оксида.
- Спровођење *in vivo* експеримената на фармама прасади, у оквиру којих ће се упоређивати ефекти примене високоактивног цинк-оксида у концентрацији од 150 g Zn/t хране (у складу са важећом европском регулативом) са применом комерцијалног цинк-оксида у дози од 3000 g/t хране.
- Евалуација добијених резултата у циљу утврђивања у којој мери се високе концентрације комерцијалног цинк-оксида могу заменити високоактивним цинк-оксидом, како у индустрији гума тако и у исхрани животиња.

Предложена докторска дисертација ће бити организована по следећим поглављима: *Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература.*

Поглавље *Увод* ће садржати кратак осврт на подручје испитивања, предмет и главне циљеве истраживања.

Поглавље *Теоријски део* обухватиће преглед релевантне литературе о структури, својствима и добијању комерцијалног цинк-оксида, о основним принципима вулканизације и примени цинк-оксида као активатора процеса, антибактеријском деловању цинк-оксида и његовом механизму деловања, као и примени као антимикробног адитива у храни за животиње. Такође ће се приказати и до сада истражене алтернативе чији је циљ смањене количине цинк-оксида у индустрији гума и индустрији хране за животиње.

Поглавље *Експериментални део* садржаће опис поступка синтезе самосталних честица високоактивног цинк-оксида (активатор у процесу вулканизације гума) и честица високоактивног цинк-оксида синтетисаних на различитим неорганским носачима (антимикробни адитив у храни за животиње). Такође, у овом поглављу ће бити наведене методе и услови карактеризације добијених честица, као и начини за испитивање њихове употребе.

У поглављу *Резултати и дискусија* биће систематично приказани и анализирани резултати добијени током израде докторске дисертације, са посебним освртом на успостављање корелације између физичко-хемијских својстава и ефикасности примене високоактивног цинк-оксида. У том контексту, разматраће се у којој мери његова употреба омогућава смањење количине комерцијалног цинк-оксида као антимикробног адитива у исхрани животиња, као и његову улогу као активатора у процесу вулканизације.

Поглавље *Закључак* ће сумирати целокупно истраживање и истакнути најважније резултате и доприносе овог истраживања, док ће поглавље *Литература* садржати цитиране литературне наводе, као и објављене научне радове који су проистекли из истраживања.

7. Закључак и предлог

На основу изнетих података о досадашњем раду и постигнутим резултатима, Комисија сматра да кандидат Александар Јанаћковић, мастер инжењер технологије, испуњава све потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације. Такође, на основу изложеног, Комисија сматра да је тема предложене докторске дисертације Александра Јанаћковића под насловом „Синтеза, карактеризација и примена високоактивног цинк-оксида као функционалног адитива“ научно заснована и предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да је прихвати. Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Инжењерство материјала, за коју је матичан Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду. За ментора се предлаже др Сања Јевтић, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 30. април 2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Сања Јевтић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Мелина Калагасидис Крушић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Александар Маринковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Марко Ристанић, доцент,
Универзитет у Београду, Факултет ветеринарске медицине

.....
Др Стеван Благојевић, научни саветник,
Институт за општу и физичку хемију, Београд