

Факултет Технолошко-металуршки

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/222
(Број захтева)
29. 8. 2025.
(Датум)

Веће научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану

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::

КАНДИДАТ Иван (Драган) Пешић
(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму: **Инжењерство материјала**

пријавио је докторску дисертацију под називом:

Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена

из научне области: Технолошко инжењерство
Универзитет је дана 19. 1. 2022. својим актом под бр. 61206-175/2-22 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена

Име и презиме ментора: др Весна Радојевић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет
Име и презиме ментора 2: др Милош Петровић, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној 27. 5. 2025. одлуком факултета под бр. 35/126, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Петар Ускоковић	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
2.	Др Марија Пергал	научни саветник	Хемија макромолекула	ИХТМ
3.	Др Радмила Јанчић Хајнеман	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
4.	Др Маја Поповић	научни саветник	Физика	Институт за нуклеарне науке-Винча

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 7. 7. 2025.

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 28. 8. 2025.

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној **28. 8. 2025.**

одлуком факултета под бр. 35/222, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Петар Ускоковић	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
2.	Др Марија Пергал	научни саветник	Хемија макромолекула	ИХТМ
3.	Др Радмила Јанчић Хајнеман	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
4.	Др Маја Поповић	научни саветник	Физика	Институт за нуклеарне науке-Винча

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Студент је уписан на докторске студије школске 2018/2019. године.

Решењем декана бр. 20/228 од 29. 10. 2024. одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до 30. 9. 2027. године

ДЕКАНКА ФАКУЛТЕТА

др Мирјана Кијевчанин, редовни професор

-
- Прилози:**
1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације
 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације
 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама

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



Република Србија
Универзитет у Београду
Технолошко-металуршки факултет

РЕПУБЛИКА СРБИЈА
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ТЕХНОЛОШКО МЕТАЛУРШКИ ФАКУЛТЕТ

Бр. 20/228
29 OCT 2024

год.

БЕОГРАД

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета у Београду бр. 201/2018") и члана 76. Статута Технолошко-металуршког факултета у Београду, као и захтева студента за продужење рока за завршетак студија Декан доноси

РЕШЕЊЕ

о продужењу рока за завршетак студија

Студенту **Иван Пешић**, број индекса 2018/4010, уписан у прву годину докторских академских студија школске 2018/2019 године продужава се рок за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до 30.09.2027 године.

Деканка
Za S. Kevic
Проф. др Мирјана Кијевчанин



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. 41. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 28. 8. 2025. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Извештаја о оцени докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије у саставу: др Петар Ускоковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Марија Пергал, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију, Институт од националног значаја за Републику Србију, Београд, др Радмила Јанчић Хајнеман, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Маја Поповић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке "Винча", Институт од националног значаја за Републику Србију, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“** коју је поднео **Иван Пешић**, мастер 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 Ивана Пешића, под називом **„Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“** Одлуком број: 61206-175/2-22 од 19. 1. 2022. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M21:

1. **Pešić, I.**, Durand, J.O., Radović Vasiljević, D., Ostojić, S., Petrović, M., Radojević, V., Spasenović, M., Pergal, M.V. (2025). Synthesis and properties of in situ prepared polyurethane/PEG-Mxene nanocomposites. *Progress in Organic Coatings*, 203, 109158. (IF=6,5) (ISSN: 0300-9440) (<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109158>)

Категорија M22:

1. **Pešić, I.**, Petrović, M., Vuksanović, M., Popović, M., Rabasović, M.S., Šević, D., Radojević, V., (2022) Structural, optical, and mechanical characterization of PMMA-MXene composites functionalized with MEMO silane. *Nanocomposites*, 8(1), 215-226. (IF=4,2) (ISSN: 2055-0332) (<https://doi.org/10.1080/20550324.2023.2168844>)

Категорија M23:

1. **Pešić, I.**, Pergal, M.V., Vasiljević-Radović, D., Popović, M., Uskoković, P., Petrović, M., Radojević, V., (2024) Capacitance breakthroughs in free-standing electrodes through MXene functionalization. *Science of Sintering*, 00, 28. (IF=1,4) (ISSN:0350-820X) (<https://doi.org/10.2298/SOS240513028P>)

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

Д Е К А Н К А

Проф. др Мирјана Кијевчанин

ДV

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. 41. и 42. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 28. 8. 2025. године, донета је

О Д Л У К А

о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације

Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације **Ивана Пешића**, мастер инжењера технологије, са темом под називом **„Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“**, у саставу:

1. Др Петар Ускоковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
2. Др Марија Пергал, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију, Институт од националног значаја за Републику Србију,
3. Др Радмила Јанчић Хајнеман, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
4. Др Маја Поповић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке ”Винча”, Институт од националног значаја за Републику Србију

Одлуку доставити: Одлуку доставити: члановима Комисије, Универзитету у Београду, 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 урађеној докторској дисертацији кандидата Ивана Д. Пешића

Одлуком бр 35/126 од 4. јуна 2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Ивана Д. Пешића под насловом „Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“.

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

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Школске 2018/19. године кандидат Иван Д. Пешић, мастер инжењер технологије, уписао је докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Инжењерство материјала.

18. новембра 2021. године је на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета одлука бр. 35/294 о именовању чланова Комисије за оцену подобности теме и кандидата Ивана Д. Пешића, мастер инжењера технологије, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“.

23. децембра 2021. године је на седници Наставно-научног већа Технолошко металуршког факултета Универзитета у Београду прихваћен извештај Комисије (одлука бр. 35/373) за оцену подобности теме и кандидата Ивана Д. Пешића, мастер инжењера технологије, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“, а за менторе ове докторске дисертације су именовани др Весна Радојевић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Милош Петровић, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

19. јануара 2022. године је на седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду донета одлука 02 број: 61206-175/2-22 о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације кандидата Ивана Д. Пешића, мастер инжењера технологије, под називом: „Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 76. Статута Универзитета у Београду Технолошко-металуршког факултета и захтева студента Ивана Д. Пешића 2018/4010 одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

19. маја 2025. године је на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета одлука број 35/126 о образовању Комисије за оцену докторске дисертације, у саставу који чине:

1. Др Петар Ускоковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко металуршки факултет, Београд;
2. Др Марија Пергал, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за хемију технологију и металургију, Београд;
3. Др Радмила Јанчић Хајнеман, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко металуршки факултет, Београд;
4. Др Маја Поповић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча, Београд.

1.2. Научна област дисертације

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. Ментори ове докторске дисертације су др Весна Радојевић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета и др Милош Петровић, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета. Компетенција оба професора за вођење докторске дисертације је потврђена на основу искуства и објављених радова из области којој дисертација припада.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Иван Д. Пешић, мастер инжењер технологије, рођен је 7. фебруара 1994. године у Београду. Основну и средњу медицинску школу завршио је у Београду, смер фармацевтски техничар. Основне академске студије завршио је на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм инжењерство материјала, 2017. године са просечном оценом 8,14. Завршни рад под називом „Добијање превлака цирконијум (IV) оксида на алуминијуму сол-гел поступком“ одбранио је на Катедри за неорганску хемијску технологију са оценом 10. Мастер академске студије завршио је на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду 2018. године са просечном оценом 10. На Катедри за конструкционе и специјалне материјале одбранио је мастер завршни рад под називом „Структура и својства материјала са 2Д структуром за примену у области складиштења енергије“ са оценом 10. Године 2018. уписао је докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету, студијски програм Инжењерство материјала. Похађао је предмете предвиђене наставним планом и програмом докторских академских студија и положио испите са просечном оценом 9,91. Од априла 2019. године ангажован је на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР 34011 „Развој опреме и процеса за производњу полимерних композитних материјала са унапред дефинисаним функционалним својствима“, као стипендиста Министарства у звању истраживача приправника. 8. септембра 2022. године извештај о избору у звање истраживача сарадника достављен је на јавни увид. Одлуку о прихватању теме докторске дисертације под називом „Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“ донео је Универзитет у Београду 23. децембра 2021. године. Од децембра 2022. године запослен је на Институту за хемију, технологију и металургију, Катедра за микроелектронске технологије, као истраживач сарадник.

Коаутор је три рада из категорије М21, једног из категорије М22 и два рада из категорије М23. Такође, публиковао је и један рад у истакнутом домаћем часопису М52. Кандидат је и аутор бројних саопштења штампаних у изводу и целини са националних и међународних скупова и добитник неколико награда за најбољи постер/презентацију.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Ивана Д. Пешића, мастер инжењера технологије, под називом „Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“ написана је на 106 страна и садржи 59 слика, 18 табела и 148 литературних навода. Дисертација садржи 5 поглавља (Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултате и дискусију и Закључак), Прилоге, Литературу, биографске податке о аутору као и прилоге са Изјавама о ауторству, о истоветности штампане и

електронске верзије докторског рада, о коришћењу, и оцени извештаја о провери оригиналности докторске дисертације.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **Уводу** је описан циљ дисертације уз кратак опис значаја полимерних нанокомпозита са 2Д материјалима.

Теоријски део је подељен у 6 поглавља. У **првом поглављу** је дат осврт на нанокомпозитне материјале са посебним освртом на полимерне нанокомпозите и типове матрица које се користе. Затим је дат преглед типова наноојачања уз детаљнији опис 2Д материјала. У **другом поглављу** су детаљно описани максени – од открића до актуелних полимерних нанокомпозита уз преглед одговарајуће литературе. У **трећем поглављу** је описан поли (метилметакрилат) (PMMA) као матрица, затим нанокомпозити где се примењује са акцентом на нанокомпозите са максенима. **Четврто поглавље** је посвећено полиуретанима (PU). Описани су умрежени полиуретански еластомери уз детаљније описе реактаната помоћу којих се добијају и поступка синтезе. Такође је дат преглед литературе нанокомпозита са максенима. У **петом поглављу** је описан полианилин док је **шесто поглавље** посвећено силанима са детаљнијим описом силана који су коришћени у синтезама.

Експериментални део подељен је у 5 поглавља. У **првом поглављу** су описани сви реактанти који су коришћени у оквиру целе дисертације. У **другом поглављу** је описана синтеза максена „МИЛД“ поступком као и постуци функционализације максена 3-метакрилоксипропилтриметокси (MEMO) и 2-[метокси(полиетиленокси) 6–9 пропил] триметокси (PEG) силаном. **Треће поглавље** је посвећено синтези нанокомпозита са PMMA матрицом помоћу методе изливања раствора. У **четвртном поглављу** је представљена оптимизација услова и синтеза нанокомпозита са полиуретанском матрицом. Варирањем услова синтезе и састава полиуретана одређен је оптимални поступак синтезе овог типа нанокомпозита. **Пето поглавље** је подељено на четрнаест потпоглавља где су појединачно описане методе карактеризације: Инфрацрвена спектроскопија са Фуријеовом трансформацијом (FTIR), Раманска спектроскопија, Дифракција Рендгенских зрака (XRD), Фотоелектронска спектроскопија Х-зрака (XPS), Микроскопија атомске силе, мерење контактнег угла са водом, Скенирајућа електронска микроскопија (SEM) са енергетском дисперзивном спектроскопијом (EDS), Трансмисиона електронска микроскопија (TEM), одређивање специфичне површине чистих и функционализованих максена помоћу Браунер-Емет-Телер (BET) методе, Термогравиметријска анализа (TGA), Диференцијална скенирајућа калориметрија (DSC), Испитивање затезањем, Електрохемијска испитивања која обухватају цикличну волтаметрију и галваностатско пуњење и пражњење, Временски разложена ласерски индукована флуоресценција.

Резултати и дискусија подељени су у 10 поглавља. У **прва три поглавља** дат је преглед потенцијалних примена синтетисаних нанокомпозита. По једно поглавље је посвећено сваком материјалу: функционализованим максенима као електродама, нанокомпозитима са PMMA и нанокомпозитима са полиуретанском матрицом. У **четвртном поглављу** је дат преглед метода које су специфичне за карактеризацију максена и за добијене нанокомпозите. За потврду успешне синтезе максена користи се рендгенска дифракција, при чему је карактеристичан пик за $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_z$ на 8° , а његово померање указује на промену међуслојног растојања. Додатне методе попут SEM и EDS пружају информације о морфологији и елементарном саставу. Код PMMA нанокомпозита са максенима користи се временски разложена ласерски индукована флуоресценција за мерење оптичке активности у реалном времену. Метода се користи за испитивање процеса попут фотосинтезе, ензимске активности и рекомбинације у фотонапонским материјалима. Суперкондензаторски материјали се анализирају цикличном волтаметријом и галваностатским пуњењем/пражњењем. Прва метода омогућава одређивање типа електрохемијског процеса, док друга даје информације о капацитивности и цикличној стабилности. PU нанокомпозити се испитују на механичка својства (нпр. Јангов модул, чврстоћа, жилавост) и електричну проводљивост, што су кључни параметри за процену њихове употребљивости као сензора. У **петом поглављу** је представљена карактеризација чистих и функционализованих максена. XPS анализа потврђује функционализацију: у спектрима су поред основних елемената (Ti, C, O) детектовани и F, Cl (од синтезе максена) и Si (од силана), при чему се линије Si2p и Si2s јасно уочавају. Спектар високе резолуције Si2p додатно потврђује везивање силана. TEM слике показују међуслојни размак PEG-максена од 1,57 nm. BET анализа открива да функционализовани PEG-максен

има специфичну површину од 25 m²/g, знатно већу од 5 m²/g код нефункциолизованог максена. У **шестом поглављу** је представљена карактеризација функционизованих максена као самостојећих електрода. FTIR спектроскопија је коришћена за потврду присуства силана на површини максена. Код немодификованог максена уочен је широки пик при 3500 cm⁻¹, који одговара хидроксилним групама формираним током нагризања. Код функционизованог максена појављују се пикови при 2950 cm⁻¹ и 1470 cm⁻¹ (C–H истезање и савијање), што указује на присуство органских група из силана. Вибрације Ti–O забележене су у опсегу 550–700 cm⁻¹. Оба коришћена силана дају карактеристичне пикове Si–O–Si и Si–O–Ti веза, док пикови у опсегу 950–700 cm⁻¹ додатно потврђују формирање Si–O–Ti веза. Пик на 1300 cm⁻¹ указује на присуство C–F веза, а на 1050 cm⁻¹ на C–O везе. Присуство карбонилне групе (C=O) из MEMO силана потврђује се пиком на 1700 cm⁻¹. SEM анализа потврђује стандардну слојевиту структуру максена као и карактеристично „гужвање“ нанољуспи након функционизације услед киселе средине у којој се одвија. Електрохемијска мерења су изведена у воденом електролиту (1M H₂SO₄). Циклична волтаметрија потврђује механизам електричног двојног слоја као и повећање вредности капацитивности код функционизованих максена, нарочито у случају PEG силана због линеарне структуре. Галваностатско пуњење/пражњење је показало да чист максен има бољу стабилност али да у случају функционизације постоји знатно повећање капацитивности у почетним циклусима. У **седмом поглављу** су представљени резултати PMMA нанокомпозита. FTIR спектроскопија је урађена ради потврде успешне функционизације максена MEMO силаном. Спектри композита показују карактеристичне пикове PMMA матрице (1718 cm⁻¹ за C=O, 1430 cm⁻¹ за C–O и 2953 cm⁻¹ за CH₃), као и додатне пикове естарских и C–C веза (1136, 980, 846 и 751 cm⁻¹). У композитима са функционизованим максеном уочени су нови пикови при 552–596 cm⁻¹ (Ti–O) и око 3100 cm⁻¹ (Ti–OH), што потврђује присуство максена и хемијску интеракцију између максена и PMMA матрице. SEM анализа је показала да кисела средина доводи до појаве „гужвања“ нанољуспи и благог повећања међуслојног растојања. Такође, агрегација нанољуспи је примећена код композита са нефункционизованим максеном док су код композита са функционизованим максенима боље дисперговане. XPS анализом је потврђена функционизација максена MEMO силаном присуством силицијума на спектру. Испитивање затезањем показало је да додатак максена доводи до повећања Јанговог модула код оба композита. Јангов модул је израчунат из линеарног дела криве напон–деформација у опсегу од 0,5 до 2,5 МПа и већи је за 22,1% код PMMA-MX, док је код PMMA-MXM забележено повећање од 27,6%. То указује да је функционизовани максен ефикаснији у побољшању механичких својстава због боље интеракције са PMMA матрицом. С друге стране, напон при кидању је био нижи за PMMA-MXM, што може бити последица локалних напрезања изазваних присуством агрегираних нанољуспи. Ипак, њихова боља дисперзија и хемијска повезаност са матрицом доприносе бољем преносу оптерећења, чиме се постиже повећање затезне чврстоће – 9% за PMMA-MX и скоро 40% за PMMA-MXM. Уочено је да серија са функционизованим максеном (PMMA-MXM) показује вишу апсорбанцу у области близу 800 nm у поређењу са немодификованим максеном (PMMA-MX), што указује на додатне електронске прелазе услед хемијске модификације док сама PMMA матрица показује готово равну линију апсорбације кроз цео опсег, без изражених пикова. Флуоресцентни спектри за PMMA, PMMA-MX и PMMA-MXM, уз екситацију на 266 nm, показују да PMMA-MX има најјачи интензитет емисије, уз црвени помак пика. Код PMMA-MXM, пик је плаво померен и готово се поклапа са чистим PMMA, што указује на утицај функционизације силаном на распоред максена у матрици. Максен показује широкопојасну емисију у опсегу 400–600 nm, а ниски интензитет флуоресценције резултат је његовог умереног квантног приноса. Приказани резултати указују на смањење интензитета флуоресценције услед присуства силана и утицаја процеса функционизације на морфологију максена. У **осмом поглављу** је описана синтеза и карактеризација полиуретанских нанокомпозита са чистим максеном. Нанокомпозити полиуретан/максен (PUMX) припремљени су *in-situ* полимеризацијом у NMP/THF смеси користећи PDMS, MDI и хиперразгранати полиестер ВН-20 као реактанте. Максен је додат у концентрацији од 1 мас.%, а коришћене су две методе синтезе: МИЛД метода и лиофилизација водене дисперзије. Варијанти су начин додавања максена (на почетку или крају полимеризације) и однос NCO/OH (1,05 и 1,1). Сви узорци имали су 50 мас.% меких сегмената, с тим да је однос NCO/OH 1,1 коришћен само у серији PUMX 50-3. (ФТИР) анализом је потврђена структура полиуретана присуством карактеристичних пикова (3310–3315 cm⁻¹ (νN–H), 2965, 2900, 2870 cm⁻¹ (ν_{sim}(C–H), ν_{asim}(C–H)), 1650–1735 cm⁻¹ (ν C=O), 1600 и 1412 cm⁻¹ (ароматске C=C вибрације), 1535 и 1311 cm⁻¹ (вибрације C–N и δ N–H у секундарним и терцијарним амидима, 1232 и 1259 cm⁻¹ (ν_{sim}(C–O) и ν_{asim}(C–O) из естарских група ВН-20), 1016 и 1090 cm⁻¹ (истезање веза Si–O–Si и C–O–C). Одсуство пика на 2270 cm⁻¹ је потврдило потпуну реакцију изоцијаната и формирање уретанске везе. SEM анализа је показала да у серијама где се користи лиофилизовани

максен постоји изражена агломерација и неравномерно дисперговање максена. Термичка анализа је показала да су сви нанокмозити термички стабилнији у односу на чист полиуретан. Уочена су и три степена деградације (1. разградња тврђих сегмената, 2. разградња естарских компоненти, 3. разградња меких сегмената). Резултати механичких својстава су показали да сви нанокмозити имају већи Јангов модул и затезну чврстоћу али мање прекидно издужење. Серија PUMX 50-1 се показала као оптимална на основу свих резултата. У **деветом поглављу** су дати резултати карактеризације полиуретанских нанокмозита са функционализованим максеном. FTIR анализа је проширена деконволуцијом спектра нанокмозита на основу које се утврдило да серија PUMP 50 има најизраженије микрофазно раздвајање и највећи степен водоничног везивања. Помоћу Раманске спектроскопије је потврђена функционализација максена PEG силаном као и присуство функционализованог максена у нанокмозиту. Рендгенска дифракција је показала повећање међуслојног растојања код функционализованих максена померањем карактеристичног пика са $8,5^\circ$ на $4,5^\circ$. Присуство максена је потврђено једину у серији PUMP 50 уочавањем слабо израженог пика максена на око 5° . XPS анализа је потврдила функционализацију максена показујући већи удео силицијума. Спектар сваког елемента је посебно приказан и анализиран (Ti, C, O, F). Урађена је и анализа чистог PU и PUMP серије где је примећен тренд раста удела силицијума са повећањем меког сегмента као и већи удео мешаних оксида у односу на чист PU услед присуства функционализованих максена у структури. Спектри свих елемената су такође детаљно окарактерисани. AFM методом је анализирана површина PUMP серије и чистог PU ради поређења. Вредност хрпавости у серији опада по тренду $PUMP40 > PUMP30 > PUMP60 > PUMP50$. Уочавају се и специфичне овалне формације на свим узорцима које представљају тврде сегменте полиуретанске матрице. Код серије PUMP 50 су најмање величине ($0,5 \mu\text{m}$) што указује на најбоље микрофазно раздвајање. Фазне слике су додатно потврдиле хомогенију расподелу меких и тврђих сегмената у серији у односу на чист PU. Хидрофобност узорака је испитивана мерењем контактнoг угла са водом. Показало се да су серије PUMP 40 и PUMP 50 хидрофобне (вредности контактнoг угла су 109° и 94° редом) док серије PUMP 30 и PUMP 60 имају вредности 73° и 86° редом, што их чини умерено хидрофилним. TEM анализа је урађена на функционализованом максену и серији PUMP 50 у циљу утврђивања међуслојног растојања односно интеркалације полиуретанске матрице у структуру максена. Установљено је да је међуслојно растојање код функционализованог максена $1,57 \text{ nm}$. Код PUMP 50 серије је показана слојевита и наизменична структура функционализованих максена и полиуретана са међуслојном размаком од 17 nm . SEM анализа PUMP серије је изведена упарена са EDS анализом. Резултати су показали стандардну слојевиту структуру максена и „згужвану“ структуру код функционализованог максена због присуства сирћетне киселине у поступку синтезе. Примећено је да је површина свих нанокмозита хетерогенија у односу на чист PU. На сликама попречног пресека нанокмозита се уочавају светлије тачке које одговарају функционализованом максену који је диспергован у матрици. EDS анализом је потврђен састав чистих и функционализованих максена присуством одговарајућих елемената (Ti, C, O (присутан у функционалним групама на површини нанољуспи), F, Cl) и Si код функционализованог максена. Диференцијалном скенирајућом калориметријом је уочен пораст температуре стакластог прелаза код нанокмозита са растућим трендом са повећањем удела меког сегмента. Термогравиметријском анализом је показана повећана термичка стабилност нанокмозита у односу на чист PU такође са растућим трендом у оквиру серије са повећањем удела меког сегмента. Механчка својства су показала да додатак функционализованог максена у полиуретан доводи до повећања затезне чврстоће и Јанговог модула, а смањења издужења при кидању. Код серије PUMP 50 је примећено највише повећање наведених својстава (8 до 10 пута за Јангов модул и 5 пута за затезну чврстоћу). Ради поређења, у ово испитивање је уврштен и нанокмозит са чистим максенима са 50 % масеног удела меких сегмената који је показао нижи ефекат повећања Јанговог модула и затезне чврстоће док је смањење издужења при кидању такође мање у односу на PUMP серије са 30 и 60% меких сегмената. У **десетом поглављу** је представљен флексибилни сензор на бази полиуретанске подлоге и максена са одговарајућом карактеризацијом. Платформа сензора је полиуретан са 50% масеног удела меких сегмената а проводан слој максена је нанешен помоћу *spin-coating* методе. При том је коришћена дисперзија максена у NMP-у концентрације 10 мас.%. Димензије супстрата су $1 \times 2 \text{ cm}$ а дебљина $500 \mu\text{m}$. Добијени сензор је испитиван на циклично савијање и оптерећивање тегом од 100 g и мерена је промена отпорности сензора са напрезањем у реалном времену. Сензор је показао осетљивост на примену обе врсте напрезања и тиме као погодан за примену у овој области. Промена отпорности је реда величине $100 \text{ k}\Omega$.

У **Закључку** су сумирани сви резултати представљени у претходним поглављима.

У делу **Литература** су наведене све референце које су цитиране у дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Последњу деценију у области наноматеријала је обележио проналазак максена чија су својства и разноврсност врло брзо привукли пажњу истраживача широм света и многобројних области. Истраживање максена се од њиховог откривања развија у две гране а то су: проучавање самог поступка синтезе максена и макс фаза и развој нанокмпозитних и нанохибридних материјала на бази максена. Недуго након открића, показали су врло обећавајућа својства у више области (складиштење енергије, пречишћавање воде, контролисано отпуштање и достава лекова, катализа...).

Докторска дисертација мастер инжењера технологије Ивана Д. Пешића има савремену тему истраживања која се односи на проучавање поступка функционализације максена, синтезе полимерних нанокмпозита на бази максена и испитивања утицаја функционализације максена на физичко-механичка својства материјала. Истраживање обухвата анализу утицаја додатка силана на максен на електрохемијска, термичка, механичка, структурна, површинска и оптичка својства.

На основу детаљне анализе доступне литературе, може се закључити да истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације представљају оригиналан допринос науци, у потпуности прате савремене светске токове и истичу значај и актуелност обрађене теме.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији Ивана Д. Пешића, мастер инжењера технологије, цитирано је 148 библиографских јединица, релевантних за област истраживања која је обухваћена овом докторском дисертацијом. Наведена литература је највећим делом објављена од открића самих максена 2011. године. Литература обухвата објављене радове на тему: структуре и својстава макс фаза и максена, поступке синтезе и карактеризације максена, самостојећих електрода на бази максена, функционализације максена силанима, синтезе полимерних нанокмпозита са РММА и PU матрицом, флексибилних сензора на бази максена. У оквиру коришћених литературних навода налазе се и референце кандидата, проистекле из резултата истраживања ове докторске дисертације.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Максени су синтетисани „МИЛД“ методом, селективним нагризањем атома алуминијума из макс фазе. Функционализација максена силанима је изведена на основу већ познатих поступака функционализације других наноматеријала, а која обухвата хидролизу, поликондензацију и кондензацију. Самостојеће електроде су направљене поступком вакуум-филтрације, РММА нанокмпозит методом изливања раствора, PU нанокмпозити двостепеном полиадицијом у раствору док је сензор на бази полиуретана и максена направљен уз помоћ *spin-coating* методе. Структурна карактеризација свих материјала је урађена помоћу FTIR, Раманске спектроскопије SEM, EDS, TEM, Дифракцијом Рендгенских зрака и Фотоелектронском спектроскопијом X-зрака. Површинске карактеристике су утврђене коришћењем микроскопије атомске силе и мерењем контактнoг угла са водом док је термичка анализа урађена помоћу TGA и DSC метода. Електрохемијска својства самостојећих електрода су извршена коришћењем симетричне електрохемијске ћелије са две електроде. Механичка својства РММА и PU нанокмпозита су одређена испитивањем истезањем. Оптичка својства РММА композита су мерена помоћу временски разложене ласерски индуковане флуоресценције. Својства сензора су испитана мерењем промене отпорности са променом оптерећења у реалном времену.

3.4. Применљивост остварених резултата

Полимерни нанокмползитни материјали на бази максена су веома истраживана област у свету за примену у великом броју области. Максени се у полимерне матрице уграђују у облику дисперзије или праха самостално или допирани/функционализовани органским или неорганским једињењима.

У оквиру ове докторске дисертације приказан је утицај функционализације максена MEMO и PEG силанима на електрохемијска својства самостојећих електрода. Овакви материјали показују врло обећавајућа својства за примену у области складиштења енергије (суперкондензатори).

Показан је одговарајући поступак функционализације максена силанима који је и потврђен анализама као што су FTIR, EDS и Фотоелектронска спектроскопија X-зрака. Такође је испитан и утицај функционализације на структурна својства како максена тако и PMMA и PU нанокмползита. У оба случаја додаток максена повећава Јангов модул и затезну чврстоћу полимерне матрице и смањења издужења при кидању. Утврђено је да „гужвање“ нанољуспи максена и присуство силана доводи до смањења ефекта флуоресценције максена у PMMA композиту. Ови материјали би могли наћи примену као фотоосетљиви сензори за праћење неких биолошких процеса где долази до генерисања светлости. Показано је да додаток функционализованих максена побољшава термичку стабилност PU нанокмползита, утиче на хидрофилност и храпавост површине материјала. На основу свих анализа PUMP серије утврђено је да је оптималан удео меких сегмената 50 %. Овако добијени полиуретански композити су погодни за примену у флексибилној електроници.

Показан је поступак фабрикации механичког сензора на бази полиуретанског супстрата и максена. Утврђено је и да сензор показује задовољавајуће резултате при мерењу што отвара простор за усавршавање оваквог типа сензора.

Резултати и закључци изнети у овој дисертацији значајни су за даљи развој и потенцијалну примену материјала на бази максена у области складиштења енергије, оптике и сензорике. Резултати добијени у истраживањима у оквиру ове докторске дисертације верификовани су објављивањем радова у часописима међународног значаја, као и презентовањем добијених резултата на међународним и националним научним скуповима.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

У свом досадашњем истраживачком раду кандидат Иван Д. Пешића, мастер инжењер технологије, показао је стручност и самосталност у претраживању и коришћењу научне литературе, планирању и реализацији експеримената, обради и анализи добијених података, дискусији резултата и припреми публикација. Комисија је на основу досадашњег залагања и постигнутих резултата, као и на основу поднете докторске дисертације, утврдила да кандидат поседује све квалитете неопходне за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

- Утврђени су одговарајући поступци функционализације максена MEMO и PEG силаном. Уједно су и утврђене одговарајуће методе којима се може потврдити функционализација као и утицај функционализације на нека својства максена.
- Показан је утицај функционализације максена различитим силанима (MEMO и PEG) на њихова електрохемијска својства.
- Показан је утицај функционализације максена MEMO силаном на физичко-механичка својства PMMA матрице и утврђен је поступак синтезе ових нанокмползита.
- Оптимизовани су услови синтезе полиуретанских нанокмползита и урађена је успешна синтеза и детаљна карактеризација полиуретанских нанокмползита са функционализованим максенима са PEG силаном.
- Направљен је и флексибилни сензор на бази полиуретанског супстрата и максена који је показао задовољавајућу осетљивост на механичку побуду.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати проистекли из ове докторске дисертације пружају значајан допринос разумевању како поступка функционализације максена тако и поступака синтезе полимерних нанокомполита и промени физичко-механичких својстава у зависности од функционализације максена. Показано је како структура силана утиче на електрохемијска својства максена који су до сада показали изузетан потенцијал за примену у области складиштења енергије. Нанокомполити на бази поли (метилметакрилата) су показали потенцијалну примену као сензори у оптички активним процесима. Примена функционализованих максена као ојачања у полиуретанској матрици даје боље резултате у побољшањима физичко-механичких својстава нанокомполита. Сензор који је направљен у оквиру истраживања практично представља почетак истраживања и усавршавања таквог типа материјала.

4.3. Верификација научних доприноса

Категорија M21:

1. **Pešić, I.**, Durand, J.O., Radović Vasiljević, D., Ostojić, S., Petrović, M., Radojević, V., Spasenović, M., Pergal, M.V. (2025). Synthesis and properties of in situ prepared polyurethane/PEG-Mxene nanocomposites. *Progress in Organic Coatings*, 203, 109158. (IF=6,5) (ISSN: 0300-9440) (<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109158>)

Категорија M22:

1. **Pešić, I.**, Petrović, M., Vuksanović, M., Popović, M., Rabasović, M.S., Šević, D., Radojević, V., (2022) Structural, optical, and mechanical characterization of PMMA-MXene composites functionalized with MEMO silane. *Nanocomposites*, 8(1), 215-226. (IF=4,2) (ISSN: 2055-0332) (<https://doi.org/10.1080/20550324.2023.2168844>)

Категорија M23:

1. **Pešić, I.**, Pergal, M.V., Vasiljević-Radović, D., Popović, M., Uskoković, P., Petrović, M., Radojević, V., (2024) Capacitance breakthroughs in free-standing electrodes through MXene functionalization. *Science of Sintering*, 00, 28. (IF=1,4) (ISSN:0350-820X) (<https://doi.org/10.2298/SOS240513028P>)

5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204 од 22. јуна 2018. године), коришћењем програма iThenticate 18. јуна 2025. године извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидата Ивана Д. Пешића под називом „Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“ и утврђено подударане текста од 12 %. Овај степен подударности последица је цитата, личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, тзв. општих места и података као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из његове дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изложеног Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата Ивана Д. Пешића оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега наведеног Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Ивана Д. Пешића, мастер инжењера технологије, под називом „Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена“ представља значајан и оригиналан научни допринос у области којој дисертација припада, што је и потврђено објављивањем радова у часописима међународног значаја. Предмет и циљеви који су дефинисани у извештају за оцену научне заснованости теме су остварени. Стога, Комисија је мишљења да ова докторска дисертација испуњава све захтеване критеријуме као и да је кандидат током израде дисертације показао научно-истраживачку способност у свим фазама израде дисертације.

Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих и приказаних резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, да прихвати овај Извештај, пружи на увид јавности поднету докторску дисертацију под називом „**Синтеза и карактеризација композита са полимерном матрицом на бази максена**“, кандидата **Ивана Д. Пешића**, мастер инжењера технологије, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду и да се након завршетка ове процедуре кандидат позове на усмену одбрану Дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду,
25. јуна 2025. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Петар Ускоковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Марија Пергал, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за хемију технологију и металургију

.....
Др Радмила Јанчић Хајнеман, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Маја Поповић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча