

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ		
1. Датум и орган који је именовео комисију: 25.11.2022., Наставно-научно веће Технолошког факултета Нови Сад		
2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :		
1.	др Иконић Бојана	редовни професор
	презиме и име	звање
	Технолошки факултет Нови Сад	Хемијско инжењерство, 01.06.2022.
	установа у којој је запослен-а	ужа научна област и датум избора
		председник
		функција у комисији
2.	др Бера Оскар	ванредни професор
	презиме и име	звање
	Технолошки факултет Нови Сад	Хемијско инжењерство, 01.02.2018.
	установа у којој је запослен-а	ужа научна област и датум избора
		ментор, члан
		функција у комисији
3.	др Павличевић Јелена	редовни професор
	презиме и име	звање
	Технолошки факултет Нови Сад	Хемијско инжењерство, 14.10.2022.
	установа у којој је запослен-а	ужа научна област и датум избора
		члан
		функција у комисији
4.	др Којић Предраг	доцент
	презиме и име	звање
	Технолошки факултет Нови Сад	Хемијско инжењерство, 01.10.2021.
	установа у којој је запослен-а	ужа научна област и датум избора
		члан
		функција у комисији
5.	др Никачевић Никола	редовни професор
	презиме и име	звање
	Технолошко-металуршки факултет	Хемијско инжењерство, 17.04.2019.
	установа у којој је запослен-а	ужа научна област и датум избора
		члан
		функција у комисији
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ		
1. Име, име једног родитеља, презиме: Јелена, Драган, Лубура		
2. Датум рођења, општина, држава:		

13.03.1995., Котор, Црна Гора

3. Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив:
Универзитет у Новом Саду, Технолошки факултет Нови Сад, мастер академске студије, мастер инжењер технологије
4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:
2019., Хемијско-процесно инжењерство

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Моделовање, симулација и оптимизација добијања гумених производа на основу различитих каучукових смеша

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација је написана на српском језику, латиничним писмом, на 168 страна А4 формата, са 140 слика, 18 табела и 269 литературних навода.

Садржај дисертације је подељен у седам поглавља на следећи начин:

1. Увод (стр. 1-4),
2. Теоријски део (стр. 5-44, 22 слике),
3. Експериментални део (стр. 45-54, 2 слике, 4 табеле),
4. Резултати и дискусија (стр. 55-103, 37 слика, 13 табела),
5. Закључак (стр. 105-109),
6. Литература (стр. 111-131) и
7. Прилози (стр. 133-168, 79 слика, 1 табела).

Дисертацију чине и садржај, спискови слика и табела, кључна документацијска информација, сажетак на српском и енглеском језику, као и план третмана података.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

У поглављу *Увод* експлицитно је указано на значај и актуелност проблематике којом се докторска дисертација бави. Истакнут је значај оптимизације процесних параметара вулканизације у циљу смањења потрошње енергије. Објашњено је да експерименталне методе за одређивање оптималних параметара вулканизације представљају дуготрајан и скуп поступак, те да је примена нумеричких метода погодна за истовремено решавање једначина преноса топлоте и кинетичких једначина вулканизације. Представљена је деградација као саставни део вулканизације, и наведени су кинетички модели који истовремено описују умрежавање и реверзију каучукове смеше. Објашњено је да коришћење биопунила, као делимичне замене чађи као пунила у каучуковим смешама, доводи до смањене зависности од фосилних извора и производње еколошких прихватљивих гумених производа. Описан је напредак вештачких неуронских мрежа које омогућавају интелигентно моделовање сложених процеса.

У поглављу *Теоријски део* дат је систематски преглед литературе подељен у седам потпоглавља. У првом потпоглављу, *Природна гума и полимерни материјали*, објашњено је понашање макромолекула природног каучука, као и начини извођења полимеризације мономера у циљу настајања макромолекула. У другом потпоглављу, *Добијање гумених производа*, детаљно је описан технолошки процес производње гумених материјала који укључује припрему каучука и додатних компоненти, намешавање компоненти каучукове смеше, обликовање добијене смеше, умрежавање и завршну обраду гуменог производа. Темељно су описане компоненте каучукове смеше за добијање гумених производа различитих својстава. У трећем потпоглављу, *Пренос топлоте кроз гумени производ*, објашњени су начини преноса топлоте кроз гумени материјал, и дате су једначине преноса топлоте у различитим координатним системима. У следећем потпоглављу, *Топлотна својства гумених материјала*, разматрана су топлотна својства гумених материјала, густина, топлотни капацитет и топлотна проводљивост, и предложене су једначине за њихово одређивање. У петом потпоглављу, *Кинетички модели вулканизације*, представљени су различити модели за описивање вулканизације, тј., индукционог времена, умрежавања и реверзије. У следећем потпоглављу, *Оптимизација и симулација процеса производње гуме*, објашњене су различите методе за симулацију вулканизације, попут аналитичких метода, метода коначних разлика и метода коначних елемената. Потпоглавље *Вештачке неуронске мреже* описује разлику између различитих врста неуронских мрежа, као и поступак изградње неуронских мрежа. Такође, детаљно су описане различите активационе функције, као и њихова улога у неуронским мрежама.

Треће поглавље, *Експериментални део*, подељено је у три целине. Прва целина, *Добијање каучукових смеша*, детаљно описује сировине и рецептуру за добијање каучукових производа. Описан је поступак намешавања компоненти каучукове смеше, који укључује припрему уређаја за намешавање, припрему компоненти за намешавање, процедуру намешавања компонената и вулканизацију каучукове смеше. У другој целини, *Испитивање својства гумених производа*, детаљно су описане методе за испитивање гумених производа, попут скенирајуће електронске микроскопије, карактеризације функционалних група узорака, термогравиметријске анализе, механичких својстава гумених производа, динамичко механичких топлотних својстава и реолошка својства гумених производа. У трећој целини, *Анализа и обрада података*, описани су начини прикупљања, обраде, анализе и приказивања резултата, и дате су статистичке једначине за одређивање квалитета фитовања. Објашњена је нумеричка симулација процеса методом коначних елемената, и описани су кораци креирања модела за симулацију. Дате су геометрије гумених производа за симулацију вулканизације.

Резултати и дискусија су четврто, а уједно и најобимније поглавље, у коме су приказани резултати експерименталног рада, развијање кинетичког модела који укључује умрежавање и реверзију, симулације и оптимизације процесних параметара вулканизације, развијање модела вештачке неуронске мреже, а који су проистекли из активности реализованих у складу са предложеним програмом истраживања који је изложен у пријави теме докторске дисертације. Поглавље је подељено у шест целина. У првом потпоглављу, *Развијање новог кинетичког модела*, детаљно су описани кораци развијања новог кинетичког модела, у коме је, за описивање реверзије, уведен нови температурно зависни параметар, назван максимални степен реверзије, који омогућава одређивање минималне радне температуре вулканизације на којој не долази до појаве

реверзије. У потпоглављу *Нови поступак фитовања експерименталних података* представљен је поступак фитовања реолошких података каучукове смеше и дати су резултати фитовања комерцијалне каучукове смеше, на бази природног и стирен-бутадиен каучука. Статистичким методама је утврђен висок степен тачности предложеног модела. У следећем потпоглављу, *Потврда новог поступка фитовања за друге типове каучукових смеша*, нови поступак фитовања је примењен на други тип каучукове смеше, како би се потврдила тачност предложене методе. Други тип каучукове смеше садржи биочађ као делимично пунило природног каучука, а вариран је садржај биопунила и чађи, и испитана су бројна својства каучукове смеше са биочађи. Следеће потпоглавље, *Оптимизација вулканизације*, темељно описује једначине преноса топлоте унутар гуменог производа током вулканизације, где се оне решавају истовремено са једначинама кинетичког модела који описује умрежавање и реверзију, ради одређивања оптималних процесних параметара, температуре и времена вулканизације. Одређени су процесни параметри вулканизације за сферну геометрију производа, различитих пречника. Потпоглавље *Симулација вулканизације гумених производа различитих облика* детаљно описује изградњу модела за нумеричку симулацију применом методе коначних елемената. Представљен је оптимизациони поступак за одређивање оптималних процесних параметара добијања квалитетних производа, различитих облика и димензија, чија примена обезбеђује велику уштеду енергије. Шесто потпоглавље, *Вештачке неуронске мреже*, темељно описује развијање модела неуронских мрежа за предвиђање реолошких података каучукове смеше. Испитане су различите активационе функције, број скривених слојева и број неурона у њима, у циљу смањења грешке предвиђања. Предложени модел вештачке неуронске мреже је потврђен другим типом каучукове смеше, са додатком биочађи као пунила.

У поглављу *Закључак* систематизовани су општи закључак и специфични закључци који су концизно и разложно изведени из добијених резултата и њихове дискусије.

Поглавље *Литература* садржи 269 литературних навода, који су прегледно систематизовани и правилно цитирани. Изабране референце су актуелне и примерене проучаваној тематици.

Поглавље *Прилози* подељено је у седам целина, у којима су дати додатни резултати истраживања.

Поред наведених поглавља, дисертацију чине и *Садржај*, *Списак слика*, *Списак табела*, *Резиме* на српском и енглеском језику, који претходе основном тексту, као и *Кључна документацијска информација*. На крају докторске дисертације налази се *План третмана података*.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ:

M22:

1. **Jelena Lubura**, Predrag Kojić, Bojana Ikonić, Jelena Pavličević, Dragan Govedarica, Oskar Bera, 2022. "Influence of biochar and carbon black on natural rubber mixture properties". *Polymer International* 71 (11) 1347–1353.
2. Oskar Bera, Jelena Pavličević, Bojana Ikonić, **Jelena Lubura**, Dragan Govedarica, Predrag Kojić, 2021. "A new approach for kinetic modeling and optimization of rubber molding." *Polymer Engineering and Science* 61 (3): 879-890.

M23:

1. **Jelena D. Lubura**, Predrag Kojić, Jelena Pavličević, Bojana Ikonić, Radovan Omorjan and Oskar Bera 2021. "Prediction of rubber vulcanization using an artificial neural network". *Hemijaska industrija* 75(5) 277-283.

M33:

1. **Jelena Lubura**, Predrag Kojić, Bojana Ikonić, Jelena Pavličević, Mirjana Petronijević, Oskar Bera. "Natural rubber rheological and mechanical properties prediction using machine learning". *Ist International Conference on Advances in Science and Technology*, 439-447. Herceg Novi,

Montenegro: Faculty of Management, 2022.

2. **Jelena Lubura**, Ivana Dragičević, Predrag Kojić, Jelena Pavličević, Bojana Ikonić, Oskar Bera. "Comparison of the carbon black and biochar impact on the power consumption during rubber mixing". *Contemporary materials 2021*, 109-116. Banja Luka: Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska, 2021.

M34:

1. **Jelena Lubura**, Adam Strachota, Beata Strachota, Jelena Pavličević, Bojana Ikonić, Predrag Kojić, Oskar Bera. "The influence of hydrochar on the rubber products aging". *2nd International Conference on Advanced Production and Processing* 217. Novi Sad, 2022.
2. **Jelena Lubura**, Predrag Kojić, Jelena Pavličević, Bojana Ikonić, Oskar Bera. "Prediction of the natural rubber mechanical properties using machine learning". *5th International Conference on Sustainable Science and Technology* 27. Istanbul, 2022.
3. **Jelena Lubura**, Dario Balaban, Predrag Kojić, Jelena Pavličević, Bojana Ikonić, Oskar Bera. "The impact of Keras optimizers on the rubber curing prediction". *VII International scientific-professional symposium Environmental resources, sustainable development and food production* 10. Tuzla, 2021.
4. **Jelena Lubura**, Predrag Kojić, Jelena Pavličević, Bojana Ikonić, Radovan Omorjan, Oskar Bera. "Prediction of the rubber vulcanization using Artificial neural network". *VII International Congress Engineering, Environment and Materials in Process Industry* 47. Jahorina, 2021.
5. **Jelena D. Lubura**, Predrag S. Kojić, Dragan D. Govedarica, Jelena M. Pavličević, Bojana B. Ikonić, Mirjana C. Jovičić, Oskar J. Bera. "A new approach for modelling and optimization of rubber curing process". *1st International Conference on Advanced Production and Processing* 276. Novi Sad, 2019.

M64:

1. **Jelena Lubura**, Predrag Kojić, Oskar Bera. "A new kinetic model for optimization of rubber curing process". *Seventh Conference of the Young Chemists of Serbia* 130. Beograd, 2019.

M85:

1. Oskar Bera, **Jelena Lubura**, Predrag Kojić, Jelena Pavličević, Bojana Ikonić, Mirjana Jovičić, Dragan Govedarica. "Primena novog kinetičkog modela za optimizaciju i simulaciju procesa dobijanja gumenih proizvoda." 2020.

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

У склопу докторске дисертације, развијен је кинетички модел за симулацију и оптимизацију вулканизације смеше природног и стирен-бутадиен каучука. Развијени модел укључује умрежавање и реверзију, и као такав представља прву изведену форму једначине кинетичког модела који разматра утицај обе појаве, а које се истовремено одвијају током вулканизације. Уведен је нови поступак фитовања у ком се примењује развијени кинетички модел, и са високом тачношћу одређују кинетички параметри. Развијени кинетички модел, заједно са новом процедуром фитовања, омогућава прецизно одређивање параметара вулканизације неопходних за оптимизацију процесних параметара (температура и време). Уведен је нови температурно зависни кинетички параметар, назван максимални степен реверзије, који омогућава одређивање најниже препоручене температуре вулканизационе пресе, као и температуре на којој не долази до реверзије производа. Развијена процедура фитовања је потврђена другим типом каучукове смеше на бази природног каучука, која је намешана по комерцијалној рецептури, где је вариран садржај биочађи и комерцијално доступне чађи. Извршена је провера предложеног модела фитовања са пет различитих каучукових смеша, где су са високом тачношћу одређени кинетички параметри. Испитивање предложеног модела са различитим узорцима потврђује да је модел широко применљив. Извршена је оптимизација процесних параметара вулканизације сфера различитих пречника применом развијеног кинетичког модела у комбинацији са једначинама преноса топлоте, а критична тачка вулканизације је дефинисана као тренутак када површина и центар сфере имају једнак степен вулканизације. Развијене су једначине за одређивање оптималних процесних услова одабране величине гуменог производа, са неопходним ограничењима, што у потпуности дефинише поступак оптимизације за одабрану смешу природног и стирен-бутадиен каучука и сферну геометрију гуменог производа.

Применом развијеног кинетичког модела и одговарајућих ограничења, извршена је симулација вулканизације која укључује хлађење након вађења производа из пресе, током кога се одвијају додатне реакције умрежавања и добијају високо квалитетни производи. Симулација вулканизације је извршена за три сфере различитих пречника и за два гумена точка, где је један правоугаоне основе, а други представља комерцијални производ гумарске индустрије. Уведен је тренутак вађења производа из пресе, дефинисан као моменат када производ достиже средњи степен вулканизације једнак вредности 0,9, а који се током хлађења повећава, као последица одвијања реакција умрежавања у топлој унутрашњости гуменог производа. Симулација је изведена истовременим решавањем једначина развијеног кинетичког модела вулканизације и једначина преноса топлоте, при чему је укључена и ослобођена топлота вулканизације. Оптимизација процесних параметара је дефинисана минималном различитом максималног и минималног степена вулканизације након хлађења, чиме се постиже добијање хомогених производа, а одређени су оптимални процесни параметри свих испитиваних производа. Предложени оптимизациони приступ је успешно примењен на реалан облик производа у гумарској индустрији, и може се применити за различите каучукове смеше и производе комплексних облика.

Намешани узорци са додатком различитог садржаја биочађи су коришћени за потврду модела фитовања, и испитана је могућност делимичне замене традиционалног пунила са биочађи, добијене хидротермалном карбонизацијом тврдог дрвета. Изведена су детаљна истраживања која су довела до закључка да се 10 phg чађи може заменити са биочађи, без значајне промене механичких особина гумених производа.

Развијен је брз и прецизан модел вештачке неуронске мреже за предвиђање реолошких података смеше природног и стирен-бутадиен каучука. Развијени модел олакшава процену вулканизационе криве и доводи до уштеде времена и трошкова неопходних за дуга експериментална испитивања. Предложени модел је са високом тачношћу потврђен са другим типом каучукове смеше, са додатком биочађи као пунила.

Неопходно је истаћи могућност шире примене развијеног кинетичког модела и комплексног оптимизационог приступа применљивог за различите типове каучукових смеша, као и различите геометрије производа. Предложена метода омогућава једноставно и брзо одређивање кинетичких

<p>параметара, као и повезивање са одговарајућим једначинама за пренос топлоте. Предложени оптимизациони поступак представља потпуно нови приступ вулканизацији гумених производа, са великим научним и индустријским доприносом, обезбеђује висок квалитет коначних гумених производа и повећава енергетску ефикасност и исплативост процеса.</p>
<p>VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА: Приказ резултата докторске дисертације подељен је на адекватно конципиране сегменте, који сваки за себе представља целину, а у складу је са дефинисаним циљевима истраживања. Резултати истраживања проистекли су из оригинално осмишљених и постављених лабораторијских експеримената, систематизовани су у логичне целине, адекватно обрађени рачунски и статистички, и приказани прегледно и јасно у виду табела и слика. На основу студиозне дискусије и тумачења добијених резултата, које је изведено уз повезивање са резултатима других аутора у области производње гумених материјала, изведени су одговарајући закључци.</p>
<p>IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</p>
<p>1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме? Докторска дисертација је у потпуности написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.</p>
<p>2. Да ли дисертација садржи све битне елементе? Докторска дисертација садржи све битне елементе који се захтевају за радове овакве врсте.</p>
<p>3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци? Докторска дисертација доприноси унапређењу кинетичког модела вулканизације, уводи нови температурно зависни кинетички параметар реверзије, као и потпуно нову процедуру фитовања експерименталних података помоћу које се одређују кинетички параметри вулканизације. У докторској дисертацији, уведен је нови поступак за одређивање оптималних процесних параметара вулканизације. Такође, предложен је нови стохастички модел за брзо предвиђање вулканизационе криве различитих каучукових смеша.</p>
<p>4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања? Недостаци докторске дисертације нису уочени.</p>
<p>X ПРЕДЛОГ:</p>
<p>На основу наведеног, комисија предлаже:</p>
<p>а) да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана; б) да се докторска дисертација врати кандидату на дораду (да се допуни односно измени); в) да се докторска дисертација одбије.</p>

Нови Сад, 08.12.2022.

1. др Бојана Иконић, редовни професор,
председник комисије
2. др Оскар Бера, ванредни професор,
ментор, члан комисије
3. др Јелена Павличевић, редовни
професор, члан комисије
4. др Предраг Којић, доцент, члан комисије
5. др Никола Никачевић, редовни професор,
члан комисије