



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



**Петар С. Ђекић**

**АНАЛИЗА УТИЦАЈА РЕЦИКЛИРАНОГ  
ГУМЕНОГ ПРАХА НА СВОЈСТВА И  
СТРУКТУРУ ГУМЕНИХ СМЕША**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2017.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



**Petar S. Djekić**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF  
RECYCLED RUBBER POWDER ON THE  
PROPERTIES AND STRUCTURE OF RUBBER  
COMPOUNDS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2017.

## Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Др Горан Раденковић, ванредни професор Универзитет у Нишу, Машински факултет
Наслов:	Анализа утицаја рециклираног гуменог праха на својства и структуру гумених смеша
Резиме:	<p>Искоришћењем отпада као извора сировина, осим што се смањује загађење, штеде се и природни и енергетски ресурси. Због тога се данас велики напори улажу у тражењу могућности да се што веће количине отпадног материјала искористе за производњу нових материјала. Гума, за чију производњу се троше велики број природних ресурса, настаје поступком вулканизације, реакцијом између каучука, сумпора и других ингредијената. Производи од гуме су многобројни и користе се готово у свим гранама индустрије и домаћинства. Након престанка употребе, јавља се проблем њиховог збрињавања, а један од начина решавања проблема отпадне гуме је рециклажа. До сада су развијене различите методе рециклаже: уситњавање и производња рециклираног гуменог праха, девулканизација, регенерација и добијања хемикалија из гуме.</p> <p>Велики број истраживања у области примене рециклираног гуменог праха је спроведен на различитим типовима гумених смеша. Заједнички закључак ових истраживања је да се до 7 % рециклираног гуменог праха у гуменој смеши може користити у производњи ауто-гума, а да не дође до значајних промена карактеристика. Због тога је у овој докторској дисертацији спроведено истраживање са циљем испитивања могућности повећања удела рециклираног гуменог праха у гуменој смеши, а да не при том не дође до битне промене одређене групе статичких и динамичких својстава гуме. У ту сврху извршена је механичко-хемијска модификација честица рециклираног гуменог праха који је затим примењен као пунило у NR/SBR смешама. Извршена је анализа утицаја немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха на својства гумених смеша. Испитивана су статичка и динамичка својства одређених типова гумених смеша, упоређена су својства гумених смеша без и са истим уделом немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха и праћена је њихова промена. Као резултат истраживања утврђен је оптимални удео немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха у гуменој смеши при коме не долази до битне промене својстава гуме. На основу добијених резултата, дате су смернице за примену немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха у одређеним типовима комерцијалних смеша.</p>
Научна област:	Техничко-технолошке науке
Научна дисциплина:	Наука о материјалима, инжењерство материјала
Кључне речи:	Гума, рециклирани гумени прах, својства материјала, механичко-хемијска модификација
УДК:	665.941-026.771:628.477]:678.47(043.3)
CERIF класификација:	T 150 Технологија материјала T 390 Технологија полимера, биополимера
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr Goran Radenković, assistant professor University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering
Title:	Analysis of the influence of recycled rubber powder on the properties and structure of rubber compounds
Abstract:	<p>Utilization of waste as a source of raw materials, contribute to pollution reduction and saving the natural and energy resources. Therefore, today the great efforts are invested in seeking opportunities to use the larger quantities of waste materials for the production of new product. Rubber, whose production requires the large number of natural resources, is result of vulcanization processes, the reaction between the rubber, sulfur and other ingredients. Rubber products are numerous and used in almost all industries and households. At the end of life cycle, there is a problem of their disposal, and one way of solving that problem is rubber recycling. So far, various methods of rubber recycling have been developed: production of recycled rubber powder, devulcanization, regeneration, and production chemicals from rubber.</p> <p>A large number of research in the field of application of recycled rubber powder on various types of rubber blends was carried out. A common conclusion of these researches was that up to 7% of recycled rubber powder can be used into the rubber blends for the manufacturing of tires, without significant change in performance. Therefore, in this doctoral thesis research is conducted to examine the possibility of increasing the share of recycled rubber powder in the rubber blends, without causing a significant change in certain groups of static and dynamic rubber properties. For this purpose, mechanical-chemical modification of the recycled rubber powder which is applied as a filler in the NR / SBR mixtures is made. The analysis of impact of the unmodified and modified recycled rubber powder in rubber blends properties is done. Testing of static and dynamic properties of certain types of rubber blends, a comparative study of the properties of the rubber composition without and with the same proportion and unmodified and modified recycled rubber powder is performed and their changes is followed. As a result of the research, the optimal proportion of the unmodified and modified recycled rubber powder into the rubber blends, at which there is no substantial change in the properties of rubber, is determined. Based on these results, guidance for the application of an unmodified and a modified recycled rubber powder in certain types of commercial mixture is provided.</p>
Scientific Field:	Engineering Sciences and Technology
Scientific Discipline:	Materials Science, Materials Engineering
Key Words:	Rubber,
UDC:	665.941-026.771:628.477]:678.47(043.3)
CERIF Classification:	T 150 Materials technology T 390 Polymers technolgy, biopolymers
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND



## ***Захвалност аутора***

*Желим да изразим дубоку захвалност ментору, проф. др Горану Раденковићу, на времену, стрпљењу, знању и искуству које несебично дели са мном.*

*Захваљујем се проф. др Гордани Стефановић, проф. др Иванки Поповић, проф. др Душану Стаменковићу и проф. др Милану Банићу на сардњи и корисним саветима значајним за израду ове докторске дисертације.*

*Захвалност дугујем проф. др Petros Samaras и његовом тиму са Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki на помоћи у реализацији ове докторске дисертације.*

*Захваљујем се колегама са Високе техничке школе у Нишу др Биљани Милутиновић, др Младену Томићу и Ненаду Стојковићу на професионалној помоћи, пријатељским саветима и конструктивној критици.*

*Неизмерно се захваљујем оцу Стојадину, мајци Смиљи и брату Чедомиру на љубави, подршци, разумевању и вери у мене свих ових година.*

*Захваљујем се својој супрузи Јелени што дели дане са мном.*

*У Нишу, јуна 2017.*





## САДРЖАЈ

<b>САДРЖАЈ</b> .....	<b>I</b>
<b>1 УВОД</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1 ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3 СТРУКТУРА ДОКТОРСКОГ РАДА</b> .....	<b>11</b>
<b>2 ГУМА КАО ТЕХНИЧКИ МАТЕРИЈАЛ</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ</b> .....	<b>13</b>
2.1.1 Полимери–макромолекули .....	14
2.1.2 Полимерizacionи процеси .....	15
<b>2.2 ГУМЕНА СМЕША</b> .....	<b>18</b>
2.2.1 Каучуци.....	19
2.2.2 Активатори вулканизације.....	27
2.2.3 Средства против старења–антидеграданти .....	27
2.2.4 Пунила .....	28
2.2.5 Омекшивачи и пластификатори .....	37
2.2.6 Убрзивачи вулканизације.....	38
2.2.7 Вулканизација (умрежавање).....	40
<b>2.3 ПРОИЗВОДИ ОД ГУМЕ</b> .....	<b>42</b>
2.3.1 Ауто-гуме.....	42
2.3.2 Гумене транспортне траке.....	45
2.3.3 Гумена црева .....	46
2.3.4 Остала гумена техничка роба .....	48
<b>2.4 РЕЦИКЛАЖА ПРОИЗВОДА ОД ГУМЕ</b> .....	<b>48</b>
2.4.1 Методе уситњавања отпадне гуме амбијенталним поступком .....	50
2.4.2 Методе уситњавања отпадне гуме криогеним поступком .....	51
2.4.3 Методе уситњавања отпадне гуме мокрым поступком .....	52



<b>3</b>	<b>ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕ РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНО ПРАХА .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b>	<b>ПРИМЕНА НЕМОДИФИКОВАНОГ РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНОГ ПРАХА У ГУМИ .....</b>	<b>56</b>
<b>3.2</b>	<b>ПРИМЕНА МОДИФИКОВАНОГ РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНОГ ПРАХА У ГУМИ ..</b>	<b>61</b>
<b>4</b>	<b>ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1</b>	<b>ИСПИТИВАЊЕ СВОЈСТВА РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНОГ ПРАХА .....</b>	<b>67</b>
4.1.1	Основна својства рециклираног гуменог праха .....	67
4.1.2	Одређивање састава рециклираног гуменог праха применом термогравиметријске анализе .....	67
4.1.3	Одређивање специфичне површине честице рециклираног гуменог праха .....	69
<b>4.2</b>	<b>ПРИПРЕМА УЗОРАКА.....</b>	<b>70</b>
4.2.1	Рецептуре и израда смеша.....	70
4.2.2	Израда узорака и епрувета .....	77
<b>4.3</b>	<b>ОДРЕЂИВАЊЕ СВОЈСТАВА СМЕШЕ.....</b>	<b>78</b>
4.3.1	Испитивање тока вулканизације на вулкаметру .....	78
<b>4.4</b>	<b>ОДРЕЂИВАЊЕ СТАТИЧКИХ И ДИНАМИЧКИХ СВОЈСТАВА ГУМЕ.....</b>	<b>80</b>
4.4.1	Одређивање статичких својстава гуме.....	80
4.4.2	Испитивање динамичких својстава гуме .....	89
4.4.3	Испитивање гуме вештачким старењем .....	92
4.4.4	Испитивање постојаности гуме при ниским температурама.....	93
<b>4.5</b>	<b>ИСПИТИВАЊЕ МИКРОСТРУКТУРЕ ЧЕСТИЦЕ РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНОГ ПРАХА И ГУМЕ .....</b>	<b>94</b>
4.5.1	Испитивање изгледа, облика и структуре честице .....	94
4.5.2	Испитивање микроструктуре површине гуме после лома.....	95
<b>5</b>	<b>РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА .....</b>	<b>96</b>
<b>5.1</b>	<b>СВОЈСТВА ЧЕСТИЦЕ ГУМЕНОГ ПРАХА .....</b>	<b>96</b>
<b>5.2</b>	<b>СВОЈСТВА СМЕША .....</b>	<b>98</b>
5.2.1	Реолошка својства смеша.....	98
<b>5.3</b>	<b>СТАТИЧКА СВОЈСТВА ГУМЕ СА РЕЦИКЛИРАНИМ ГУМЕНИМ ПРАХОМ .....</b>	<b>100</b>





5.3.1	Својства гуме на бази природног каучука при различитом режиму умешавања немодификованог рециклираног гуменог праха.....	100
5.3.2	Својства гуме на бази природног каучука при различитој модификацији гуменог праха.....	102
5.3.3	Својства гуме на бази природног и природног/синтетичког каучука са различитим уделом немодификованог и модификованог гуменог праха .....	105
5.3.4	Трајна деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине.....	112
5.3.5	Испитивања промене статичких својстава гуме вештачким старењем .....	113
<b>5.4</b>	<b>ДИНАМИЧКА СВОЈСТВА ГУМЕ СА РЕЦИКЛИРАНИМ ГУМЕНИМ ПРАХОМ... 114</b>	
5.4.1	Динамичка својства гуме на бази природног каучука при различитој модификацији гуменог праха .....	114
5.4.2	Динамичка својства гуме на бази природног и природног/синтетичког каучука са немодификованим и модификованим гуменим прахом.....	116
5.4.3	Испитивање промене динамичких својстава гуме вештачким старењем.....	122
5.4.4	Постојаност испитиваних узорака од гуме на бази природног и природног/синтетичког каучука при ниским температурама.....	122
<b>5.5</b>	<b>МИКРОСТРУКТУРЕ ЧЕСТИЦЕ И ЛОМА..... 123</b>	
5.5.1	Изглед модификоване гумене честице.....	123
5.5.2	Изглед микроструктуре гуме на бази природног каучука .....	124
5.5.3	Изглед микроструктуре гуме на бази природног и синтетичког каучука .....	126
<b>6</b>	<b>АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА..... 128</b>	
<b>6.1</b>	<b>СВОЈСТВА ЧЕСТИЦА ГУМЕНОГ ПРАХА .....</b>	<b>128</b>
<b>6.2</b>	<b>СВОЈСТВА СМЕША .....</b>	<b>129</b>
<b>6.3</b>	<b>МОДИФИКАЦИЈА РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНОГ ПРАХА .....</b>	<b>130</b>
<b>6.4</b>	<b>СТАТИЧКА СВОЈСТВА ГУМЕ СА РЕЦИКЛИРАНИМ ГУМЕНИМ ПРАХОМ .....</b>	<b>131</b>
6.4.1	Тврдоћа гуме .....	131
6.4.2	Затезна својства.....	133
6.4.3	Отпорност према цепању гуме .....	138
6.4.4	Трајна деформација сабијањем на одређену висину .....	141
6.4.5	Отпорност према хабању .....	142
6.4.6	Трајна деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине.....	144
<b>6.5</b>	<b>ДИНАМИЧКА СВОЈСТВА ГУМЕ СА РЕЦИКЛИРАНИМ ГУМЕНИМ ПРАХОМ... 147</b>	
6.5.1	Одбојна еластичност.....	147
6.5.2	Еластичност по Yertzley .....	148
6.5.3	Хистерезис по Yertzley .....	150
6.5.4	Ефективни динамички модул .....	151
6.5.5	Апсорбована енергија удара .....	153
<b>6.6</b>	<b>МИКРОСТРУКТУРА УЗОРАКА ГУМЕ НА БАЗИ ПРИРОДНОГ И ПРИРОДНО/СИНТЕТИЧКОГ КАУЧУКА СА ГУМЕНИМ ПРАХОМ..... 155</b>	



---

<b>7</b>	<b>ЗАКЉУЧАК .....</b>	<b>162</b>
<b>8</b>	<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>167</b>
<b>9</b>	<b>ПОПИС СЛИКА.....</b>	<b>175</b>
<b>10</b>	<b>ПОПИС ТАБЕЛА.....</b>	<b>180</b>
<b>11</b>	<b>БИОГРАФИЈА АУТОРА.....</b>	<b>183</b>



## СПИСАК НАЈЧЕШЋЕ КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

### Латинични симболи

A	mm <sup>2</sup>	почетни попречни пресек епрувете
A <sub>m</sub>	m <sup>2</sup>	површина попречног пресека једног молекула абсорбента
C	mm	стварна дебљина епрувете, заокружена на 0,1 mm
D	m	дебљина епрувете
E <sub>b</sub>	%	прекидно издужење
F	N	сила
G <sub>o</sub>	mg	маса епрувете пре хабања
G <sub>1</sub>	mg	маса епрувете после хабања
H <sub>z</sub>	mm <sup>3</sup>	хабање гуме
h <sub>ok</sub>	mm	одскочна висина клатна
h <sub>p</sub>	mm	почетна висина падања
h <sub>0e</sub>	mm	висина епрувете пре сабијања
h <sub>1</sub>	mm	висина примењеног раздвајача, тј. висина сабијене епрувете
h <sub>2</sub>	mm	висина епрувете после сабијања
K		корекциони фактор
L	mm	растојање мерних линија у моменту кидања
L <sub>0</sub>	mm	почетно растојање мерних линија
L <sub>1</sub>	mm	растојање између мерних линија после повратне еластичности
L <sub>s</sub>	mm	називна дужина епрувете у затегнутом стању
M <sub>L</sub>	Nm	минимални обртни момент
M <sub>H</sub>	Nm	максимални обртни момент
M <sub>100</sub>	MPa	модул еластичности при издужењу од 100 % мерне дужине
N <sub>o</sub>		Авогадров број
S	m <sup>2</sup> /g	специфична површина честице



$T_S$	MPa	затезна чврстоћа
$T_{dk}$	%	трајна деформација сабијањем на одређену висину
$T_D$	%	трајне деформације при константном издужењу од 100%
$t_{s1}$	min	време када обртни момент порасте за једну јединицу изнад $M_I$
$t_{c90}$	min	време када обртни момент достигне 90% од максималног обртног момента
$V_m$	mol/g	експериментална вредност монослоја абсорбента
$E_Y$	%	еластичност по Yertzley
$E_H$	%	хистерезис по Yertzley
$K_C$	MPa	ефективни динамички модул
$E_C$	J/m <sup>3</sup>	апсорбована енергија удара
$I$	Nm <sup>2</sup>	укупни момент инерције клата
$F$	Hz	учесталост осциловања епрувете
$I_B$	Nm <sup>2</sup>	момент инерције самог клатна
$I_F$	Nm <sup>2</sup>	момент инерције са по једном стандардном масом на месту F
$I_G$	Nm <sup>2</sup>	момент инерције са по једном стандардном масом на месту G
$I_H$	Nm <sup>2</sup>	момент инерције са по једном стандардном масом на месту H
$n_F$		број стандардних маса на месту F
$n_H$		број стандардних маса на месту H
$n_G$		број стандардних маса на месту G

### Грчки симболи

$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	густина испитиване гуме
$H$	%	одбојна еластичност
$\theta_a$	mg	оштрина абразива
$T$	kN/m	отпор према цепању

### Скраћенице

BR	полибутадиенски каучук
CR	хлоропернски каучук



EMSBR	емулзионо полимеризовани стирен-бутадиен каучук
EPDM	етилен-пропилен-дијенски каучук
FEF	брзоекструзиона чађ
GPF	чађ опште намене
NAF	високоабразивна чађ
HDPE	полиетилен велике густине
IR	полиизопренски каучук
ISAF	средње абразивна чађ
LDPE	полипропилен мале густине
МГП	модификовани гумени прах
NR	природни каучук
NBR	нитрил-бутадијенски каучук
НМГП	немодификовани гумени прах
OENR	уљем пуњени NR каучук
OESBR	уљем пуњени стирен-бутадиен каучук
PET	полиетилен-терефталат
phr	стоти део укупне количине каучука/еластомера
PP	полипропилен
РГП	рециклирани гумени прах
SBR	стирен-бутадиен каучук
SAF	суперабразивна чађ
SEM	скенирајући електронски микроскоп
TGA	термогравиметријска анализа
EV	Efficient Vulcanizing



## 1 УВОД

### 1.1 Предмет истраживања

У данашње време, са све интензивнијим развојем технологије и индустрије, као један од највећих проблема препознаје се загађење животне средине, тј. стварање све веће количине отпада, смањење животног простора, природних и енергетских ресурса. Један од начина да се ови проблеми реше је и искоришћавање отпада као извора сировина и енергије. Данас се улажу велики напори у тражењу могућности да се што веће количине отпадног материјала искористе за производњу нових материјала и производа, чиме се штеде природни и енергетски ресурси.

Гума, у чији састав улази велики број природних ресурса, настаје поступком вулканизације, неповратном хемијском реакцијом између каучука, сумпора и других ингредијената при чему долази до тродимензионалног умрежавања полимерних ланаца. Смеша (сирова, гумена, невулканизирана) представља смешу каучука (природног (NR), синтетичког (SBR) и осталих врста каучука), средстава за активацију, убрзавање и вулканизацију, активних и неактивних пунила, омекшивача и специјалних додатака.

Постоји много производа од гуме који се користе у готово свим гранама индустрије и свакодневном животу (ауто-гуме, транспортне траке, гумена црева, гумена техничка роба, обућа итд.). Најзаступљенији производ је ауто-гума. Годишње се у свету произведе нешто више од 1 милијарде ауто-гума при чему 60% чине путничке, 30% теретне и аутобуске, а остатак су ауто-гуме за разне грађевинске и пољопривредне машине, авионе, итд. [1], а само у Србији се произведе 132.195 t разних гумених производа [2]. Просечна ауто-гума за путничка возила има тежину око 8 kg, од тога 1,2 kg природног каучука; 2,3 kg синтетичког каучука; 2,4 kg разних адитива и 2,1 kg синтетичког платна и челичног језгра [3].

Ауто-гума због велике заступљености, релативно кратког периода употребе (век ауто-гуме за путничка возила је 5-6 година [4]) и великих димензија (1 t ауто-гума за



путничка возила заузима најмање  $6 \text{ m}^3$  животног простора[5]) након престанка употребе, представља велики проблем.

У почетку је проблем отпадне гуме решаван депоновањем, али због потребе за великом површином дугом временском периоду (период распада отпадне гуме у просеку је 80 – 100 година), могућности појаве пожара, и значајног загађења животне средине, од овог концепта се одустало. Како је синтетички каучук дериват нафте, решење проблема отпадне гуме даље је тражено у њеном искоришћењу као извора енергије. Међутим, спаљивањем отпадне гуме загађује се животна средина и умањује се могућност да буде коришћена као извор сировина. Због тога је решење проблема велике количине отпадне гуме пронађено у њеном рециклирању. У ту сврху, до сада су развијене различите методе рециклаже отпадне гуме: уситњавање-производња рециклираног гуменог праха, девулканизација, регенерација и поступак добијања хемикалија. Без обзира на велики број метода за рециклажу отпадне гуме, који су до сада развијени у свету, још увек постоји проблем налажења могућности веће примене рециклираног гуменог праха (РГП) у производњи нових производа, због негативног утицаја који РГП има на својства производа од гуме.

До сада је изведен велики број научних и комерцијалних истраживања у области примене РГП, као пунила у:

- гуми,
- различитим полимерним материјалима (PP, HDPE, LDPE, PET) и
- различитим грађевинским материјалима (бетон, малтер, асфат, разни типови испуне итд.).

Највећи број истраживања заснивао се на примени различитог удела РГП у гумама са различитим типовима каучука (природног и разних типова синтетичког каучука) и праћењу утицаја на физичко-механичка својства гуме. Истраживан је такође и утицај разних типова РГП, као и величине честица на својства смеша и гуме. Заједнички закључак свих ових истраживања је да се до 5% РГП може користити у производњи ауто-гума а да не дође до значајних промена механичких својстава гуме, (отпорности на хабање и контактнoг трења, које је важно при убрзавању и успоравању [6]. Такође је уочено да са повећањем удела РГП долази до пада прекидно-еластичних својстава, јер не долази до стварања јачих веза између честица РГП и каучука/еластомера. У новије време



се, у циљу повећања удела РГП приступа модификацији површинског слоја честице и саме честице РГП.

Проучавањем актуелних истраживања у свету и код нас закључено је да утицај модификованог РГП на статичка и динамичка својства и структуру гуме, као и његове примене у разним типовима гуменије није довољно истражен, па је то представљало мотив за истраживање у оквиру ове докторске дисертације. Овим испитивањем је утврђен утицај немодификованог и модификованог РГП на својства гуме.

## 1.2 Циљ истраживања

Општи циљ овог истраживања је одређивање максималног удела немодификованог и модификованог РГП, при коме не долази до битне промене одређене групе статичких и динамичких својстава смеше и гуме.

Посебни циљеви ове докторске дисертације били су:

- утврђивање физичких и хемијских својстава, структуре и облика честица немодификованог и модификованог РГП,
- испитивање утицаја удела немодификованог и модификованог РГП на својства смеше (реолошка својства, брзина вулканизације, итд.),
- дефинисање методе модификације честица РГП која даје најбољи ојачавајући ефекат,
- испитивање статичких својстава гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП пре и после старења (тврдоћа, затезна својства, трајна деформација при затезању и сабијању, отпорност на угаоно цепање, отпорност на хабање, отпорност према дејствуниских температурама, итд.),
- испитивање динамичких својстава гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП пре и после старења (одбојна еластичност, еластичност по Yertzley, динамички хистерезис по Yertzley, ефективни динамички модул, апсорбована енергија удара) и





- испитивање структуре гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха (величина честице, агломерација честица, структура, итд.).

### 1.3 Структура докторског рада

Поред уводног поглавља (поглавље 1), овај рад се састоји из две целине које су подељене у поглавља.

Прва целина, се састоји од два поглавља:

- поглавље 2 – *Гума као технички материјал и*
- поглавље 3 – *Преглед досадашњих истраживања.*

Наведена поглавља представљају теоријска разматрања неопходна за разумевање проблематике полимерних материјала и гуме, ингредијената гумених смеша и њихових својстава.

У другом поглављу описане су основне карактеристике полимерних материјала, представљена су основна својства гуме и дат је преглед и карактеристике најчешће коришћених врста каучука и ингредијената, као и њихова утицај на својства гуме, а посебно ингредијената који су коришћени у смешама развијеним за потребе овог истраживања.

У трећем поглављу приказан је преглед досадашњих истраживања примене РГП у гуми. Преглед истраживања је подељен на групу истраживања која су испитивала примену немодификованог РГП и на групу истраживања која су испитивала примену модификованог РГП у гуми.

Друга целина посвећена је изведеном експерименталном истраживању и добијеним резултатима и састоји се из три поглавља:

- поглавље 4 – *Опис експерименталног истраживања,*
- поглавље 5 – *Резултати експерименталног истраживања и*
- поглавље 6 – *Анализа експерименталних резултата.*

У четвртном поглављу приказане су коришћене методе испитивања статичких и динамичких својства, стандарди који описују методе испитивања, методе



кондиционирања узорака пре испитивања, епрувете, уређаји и опрема на којима су вршена испитивања, затим поступаксамог мерења и на крају обрада измерених вредности. Такође су описане примењене методе испитивања улазних сировина од који је израђена смеша, режима умешавања и испитивања смеше, као и поступка вулканизације и модификације РГП.

У петом поглављу приказани су резултати мерења статичких и динамичких својстава гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП, својстава честица и смеша. Такође су представљени резултати испитивања структуре честице и гуме.

У шестом поглављу извршена је анализа измерених вредности. Упоредно су приказана својства гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП, анализиран је тренд промене испитаних својстава и дато је тумачење резултата, као и разлози утврђених промена својстава. На основу измерених својстава изведени су закључци о оптималном уделу РГП, при коме не долази до битне промене одређене групе статичких и динамичких својстава гуме.

У последњем поглављу су наведени закључци до којих је аутор дошао током анализе резултата, као и правци даљег истраживања.



## 2 ГУМА КАО ТЕХНИЧКИ МАТЕРИЈАЛ

По свом саставу, гума је изузетно сложен материјал чије су основне карактеристике велике еластичне деформације. Према стандарду BS 3558-1:1997 гума се дефинише као „макро-молекуларни материјал, који има или коме се могу приписати својства брзог враћања на собној температури у облик који му је нагло промењен дејством спољних сила. Применом топлоте и умереног притиска неможе се лако преобликовати у нови стабилни облик“ [7].

Како гума има полимерну основу (каучук), сврстава се у групу полимерних материјала. Међутим постоје, такође полимерни материјали који имају својства слична гуми, али немају умрежену структуру, загревањем ови материјали постају термопластични и због тога се називају термопластичне гуме.

Гума је материјал који се добија поступком вулканизације гумене смеше. Поред полимерне основе каучука или еластомера, гумена смеша садржи и различите врсте ингредијената. Одговарајућим уделом каучука и ингредијената, а такође и њиховом модификацијом, добијају се жељена физичко-механичка својства гуме, па је за анализу и разумевање ових својстава, њихово побољшање и оптимизацију неопходно познавати састав гумене смеше, карактеристике каучука и свих ингредијената, као и сам механизам вулканизације.

### 2.1 Полимерни материјали

У природи се појављује велики број полимерних материјала животињског (вуна, кожа, свила) и биљног порекла (целуозна влакна, памук, каучук и смоле). Систематски рад на испитивању састава и структуре природних полимерних материјала почео је крајем XIX века, подстакнут тежњом да се побољшају њихова својства или произведу замене за ове материјале. Као резултат ових истраживања, 1839. године из каучука је вулканизацијом произведена гума 1909. године добијене су фенол-формалдехидне смоле у виду праха које су под утицајем притиска и температуре преведене у бакелит,



авећ 1910. године успешно је синтетизовано више полимера сличних каучуку из хемијских једињења добијених из нафте и угља.

Због своје разноликости, полимерни материјали се деле према различитим критеријумима. Према пореклу деле се на природне и вештачке. Према хемијском саставу се деле на органске, неогранске и подгрупе настале комбиновањем органских и неорганских полимера, а према начину добијања на адicione и кондензационе.

Сви полимерни материјали деле се према степену умрежености на:

- пластомере (неумрежене),
- еластомере (растресито умрежене, еластичне),
- дуромере (густо умрежене, тврде).

Према облику ком се појављују на тржишту деле се на :

- пластику,
- гуму и
- синтетичке тканине.

### 2.1.1 Полимери–макромолекули

Молекули код којих је група атома (мономера) међусобно повезана јаком хемијском везом називају се полимери. Мономери су генерално прости органски молекули који садрже двоструке везе или две функционалне групе које омогућују да се један мономерни молекул дода другом више пута, градећи при томе полимерни молекул. На пример, под утицајем топлоте и светлости, у присуству хемијских агенаса, двострука веза у молекулу етилена постаје активна, пуцањем ствара реактивни центар на једном од угљеникови хатома, који у присуству других молекула етилена реагује, раскидајући двоструку везу и поново стварајући реактивни центар за самододавање мономера етилена при чему долази до ланчане реакције. Као резултат добија се полимерни материјал познат под називом полиетилен. Полимеризација етилена приказана је на слици 2.1 [8].



Сл. 2.1 Полимеризација полиетилена

Процес трансформације мономерних молекула у макромолекул, односно полимерни молекул, назива се полимеризација. Полимерни молекул састоји се одпонављајућих јединица – мера. У табели 2.1 приказани су мономери који се користе при синтези полимера каучука [8, 9, 10].

Табела 2.1 Мономери који се користе приликом синтезе каучука

Мономери	Полимери (каучуци)
чисти угљоводоници	етилен, пропилен, бутадијен, изобутилен, стирен, изопрен, норбонен итд.
халогени угљоводоници	хлоропрен, ди-хлоро-бутадијен, винил-инденфлорид, тетрафлуоро-етилен, трифлуоро-етилен итд.
мономери са функционалним групама	естер акрилне киселине, акрил-нитрил, винил-ацетат, перфлуоро-винил-етер, хлоро-винил ацетат итд.

Минимална дужина ланца полимера или број мера у ланцу нису тачно дефинисани и нису услов да се такво хемијско једињење назове макромолекулом, већ је неопходно да полимер има велику молекулску масу и да гради ланчану структуру.

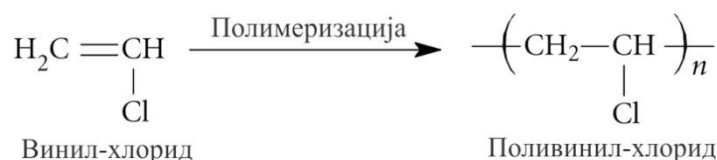
### 2.1.2 Полимеризациони процеси

Постоје два основна механизма полимеризације: адициони и кондезациони. Основна разлика између ова два процеса је у томе што код адиционе полимеризације настаје нови производ без нуспроизвода, док се код кондензационе, поред новог производа издвајају и нуспроизводи мале молекулске тежине (нпр.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$  итд.).



### 2.1.2.1 Адициона полимеризација

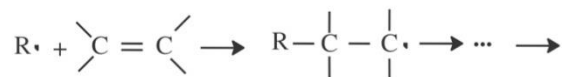
Полимер добијен адиционом полимеризацијом настаје сукцесивним додавањем незасићене мономерне јединице активном центру започетог ланца, па се она често назива и ланчана полимеризација. Пример адиционе полимеризације је полимеризација винил-хлорида приказана на слици 2.2.



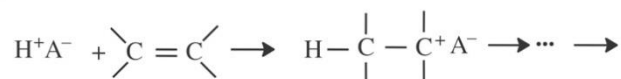
Сл. 2.2 Полимеризација винил-хлорида

Адициону полимеризацију карактерише додавање мономерне јединице полимерном молекулу, који тако расте. За време одвијања ланчане реакције свака реакција зависи од претходне, јер ствара реакцијски центар за реакцију са мономерном јединицом која се додаје. Приликом настајања, адицијом молекула на растући полимерни ланац настаје слободни радикал, реактант за следећу реакцију. Ланчану реакцију карактеришу три фазе: иницирање реакције, раст ланца и завршетак раста ланца. Активација или иницирање реакције доводи до раскида двоструких везау мономерном молекулу и може да започне деловањем топлоте, светлости и/или коришћењем иницијатора (слободних радикала, катјона, анјона и координаторних катализатора) и спајања са мономером у ланцу. Начини иницирања реакције приказани су на слици 2.3. У ланчаној реакцији може се јавити и четврта фаза, пренос ланца, који је комбинација завршетка раста ланца и иницирање реакције.

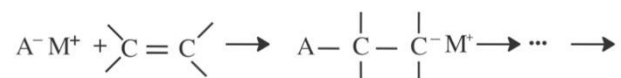
Слободни радикали:



Катјони:



Анјони:



Координаторни катализатори:

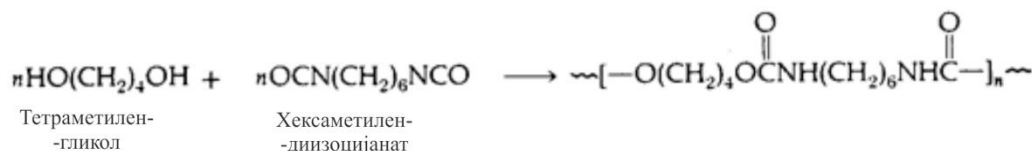


Сл. 2.3 Начини иницирања реакције при адиционој полимеризацији

### 2.1.2.2 Кондензациона полимеризација

Кондензациона или постепена полимеризација се одвија постепеном реакцијом између функционалних група реактаната. Реакција се одвија од мономера до димера, тримера, тетрамера, пентамера и тако до финалног полимерног молекула. Реакције између производа полимеризације (димер, тример итд.) и мономера као и између самих производа су са статистичком дистрибуцијом. При овим реакцијама производи задржавају функционалне групе за даљу реакцију [8, 10].

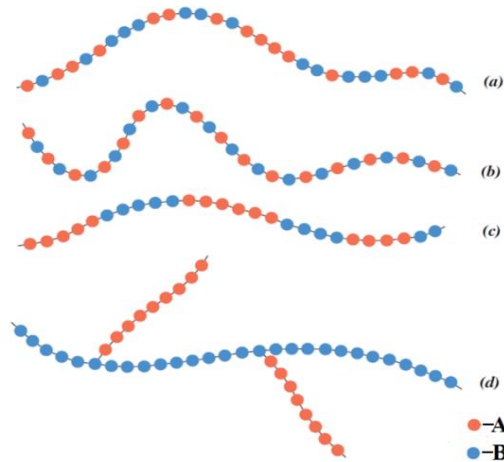
Полимеризација полиуретана је пример кондензационе полимеризационе реакције, чији је механизам приказан на слици 2.4.



Сл. 2.4 Полимеризација полиуретана

### 2.1.2.3 Кополимеризација

Када у процесу полимеризације учествује само једна врста мономера, ради се о хомополимерима. Међутим, полимери могу да се састоје и од више врста мономера. Овакве полимере називамо кополимерима, а такву полимеризацију – кополимеризација. Зависно од употребљених мономера и методе синтетизовања, разликује се више типова кополимера (слика 2.5). Кополимер са релативном статистичком дистрибуцијом различитих мера у структури назива се статистички кополимери приказан је на слици 2.5а [11], где А и Б представљају различите мере.



Сл. 2.5 Изглед различитих кополимерних ланаца



Пример хомополимера је природни каучук, а кополимера је стирен-бутадиенски каучук. Када у полимеризационом процесу учествују три различита мономера добијени полимер назива се терполимером. Најчешће коришћен терполимер је етилен-пропилендиенски каучук (EPDM) [10, 12].

## 2.2 Гумена смеша

Да би се произвела гума, каучук и/или еластомер се мора измешати са ингредијентима према дефинисаној тежинској пропорцији и након тога вулканизирати. Гумена смеша (невулканизирана смеша или сирова смеша), у даљем тексту смеша, припрема се на основу одговарајуће рецептуре, која садржи све саставне елементе смеше и редослед мешања каучука и ингредијената. Када се ингредијенти мешају са каучуком или еластомером чине хомогену смешу.

Саставни делови смеше и редослед мешања је следећи:

1. Каучуци и/или еластомери,
2. Активатори вулканизације,
3. Антиоксиданти,
4. Пунила,
5. Омекшивачи и пластификатори,
6. Убрзивачи вулканизације,
7. Средства за вулканизацију,
8. Успоривачи вулканизације (ретардери) и
9. Ингредијенти специјалне намене
  - Боје и средства за регулисање мириса,
  - Средства за заштиту од микроорганизама и бактерија,
  - Средства за надимање (надимачи),
  - Средства за повећањетермостабилности,
  - Средства против горења, успоривачи горења,
  - Помоћна средства итд.

У даљем тексту биће детаљније објашњене карактеристике најчешће коришћених врста каучука и ингредијената, а посебно оних који ће бити коришћени у смешама развијеним за потребе овог истраживања.



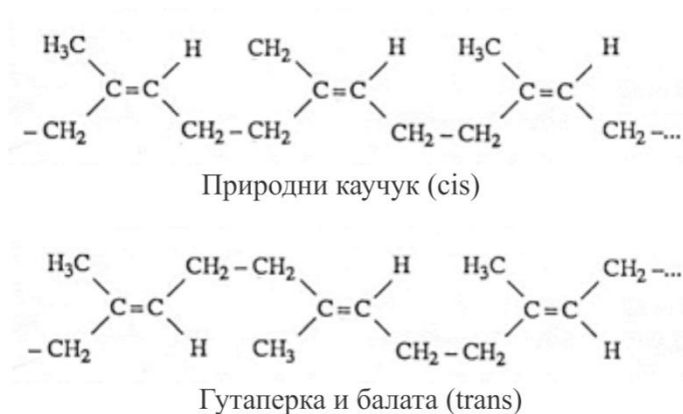
## 2.2.1 Каучуци

Каучук је неумрежени полимер способан да се умрежи. Физичко-механичка и специјална својства гуме углавном одређује тип каучука. Према DIN ISO 1629 номенклатури разликују се две групе каучука:

- каучуци за производе широке намене (ауто-гуме, транспортне траке, црева, итд.). У ову групу спадају природни каучук (*Natural rubber-NR*) и синтетички каучуци (*Polyisoprene rubber-IR*, *Polybutadiene rubber-BR* и *Styrene-butadiene rubber-SBR*).
- каучуци специјалне намене (нпр. каучук од кога се израђују производи са добрим електропроводљивим својством [12]).

### 2.2.1.1 Природни каучук

По свом хемијском саставу природни каучук (NR) је незасићени полимерни угљоводоник изопренског низа, молекулске формуле  $(C_5H_8)_n$ . У макромолекулу NR каучука може бити и до 5000 изопренских јединица. Молекулска маса NR каучука креће се од 300.000 до 400.000 јединица. *Harrie* је први у потпуности дефинисао природни каучук као 1,4 *cis* полиизопрен који настаје полимеризацијом изопрена (2-метил, 1,3-бутадијена). NR каучук добијен од биљке *Hevea brasiliensis* је структурни изомер полиизопрена и има претежно *cis* конфигурацију, док каучук добијен од биљке гутаперка или балата има *trans* конфигурацију полиизопрена, што је приказано формулама на слици 2.6 [13].



Сл. 2.6 Структурална формула *cis* и *trans* NR каучука



NR каучук садржи око 94% угљоводоника и 6% примеса: протеини, шећер, масне киселине и природни антиоксиданти који активирају процес вулканизације. На физичка и хемијска својства каучука значајно утиче присуство примеса и степен умрежења полимерних ланаца. Складиштењем природног каучука на нижим температурама почиње процес кристализације, односно долази до повећања крутости каучука. Да би се кристализовани каучук могао прерађивати мора се загрејати у температурном опсегу од 40 °C до 50 °C. Температура при којој нестаје последњи кристал назива се температура топљења ( $T_m$ ), која се креће од 28 °C до 30 °C. Степен кристализације је максималан на -24 °C, док на температури од -72 °C, која је позната и као прелазна температура каучука ( $T_g$ ), он прелази у стакласто стање.

#### 2.2.1.1.1 Добијање природног каучука

Природни каучук се добија из латекса. Свеж латекс је бела маса слична млеку које садржи честице каучука. То је комплексан колоидни систем који се састоји из две фазе:

- течне – серума, дисперзионог средства и
- чврсте – колоидне честице каучука у каучуковом млеку.

Хемијски састав свежег латекса приказан је у табели 2.2.

Табела 2.2 Хемијски састав свежег латекса

Састав	Удео(%)
Каучук	30 – 40
Протеини	1,0 - 1,5
Смоле	1,0 – 3,0
Минерали	0,7 – 0,9
Угљенихидрати	0,8 – 1,0
Вода	55 – 60

Поступак прераде латекса састоји се из низа сукцесивних корака где се сакупљени латекс најпре цеди, а затим му се додаје мравља киселина као коагулант. Даљом прерадом се издвајају вишак коагуланта и вода, након чега се каучук уситњава, суши, израђују се плоче и пакује.



### 2.2.1.1.2 Врсте и класе природног каучука

Према Међународним стандардима квалитета и паковања природног каучука (Зелена књига) [14], NR каучук произведен искључиво од латекса из дрвета *Hevea brasiliensis*, разврстан је у 35 стандардних међународних класа, груписаних у осам врста. Термин „врста“ односи се на начин добијања каучука, док се термин „класа“ односи на различите квалитете у оквиру исте врсте. Према овим стандардима, разликују се следеће врсте NR каучука, од којих свака има своје подкласе [13, 15]:

- Ребрасте димљене плоче – листови – калем.
- Бела и светла крепа.
- Згужвани каучук.
- Смеђа крепа.
- Танка смеђа крепа додатно ваљана.
- Дебела крепа ћилибарне боје.
- Крепа од отпадака заједно са кором од дрвета.
- Чиста димљена крепа.

Такође, NR каучуци добијени из *Hevea brasiliensis*, су стандардом ISO 2000-TSR:1964 класификовани на основу земље порекла и примеса. Основа за израду ове спецификације је стандард Малезије, а остале земље произвођачи израдиле су своје стандарде ускладу са стандардом ISO 2000-TSR:1964 [16]. У табели 2.3 приказани су стандарди за класификацију каучука зависно од земаља порекла.

Табела 2.3 Стандарди за класификацију каучука зависно од земаља порекла

Ознака стандарда	Земља
SMR	Малезија
SIR	Индонезија
SLR	Шри Ланка
NSR	Нигерија
TTR (STR)	Тајланд
NAT	Обала Слоноваче
LIB	Либерија
CAM	Камерун
GAB	Габон
CHA	Гана
SPR	Филипини
ISNR	Индија



Стандард ISO 2000-TSR:1964 допуњен је спецификацијом ISO 2000:1988, према којој се уводе ознаке TSR CV, где је CV ознака која указује да овај каучук има константни вискозитет. TSR L, где је L ознака за светле смеше. Бројчане ознаке 5, 10, 20 и 50 означавају присуство нечистоће у стотом делу % (табела 2.4) [17].

Табела 2.4 Техничке карактеристике каучука према ISO 2000

Особина	Разред					
	TSR CV	TSR L	TRS 5	TSR 10	TSR 20	TSR 50
Нечистоће (max, %)	0,05	0,05	0,05	0,1	0,2	0,5
Пепео (max, %)	0,6	0,6	0,5	0,75	1	1,5
Азот (max, %)	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6
Испарљива једињења (max, %)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Почетак пластичности(min)		30	30	30	30	30
Индекс задржавања пластичности (min)	60	60	60	50	40	30
Боја		6				
Вискозитет (по Mooney)	60±5					

### 2.2.1.1.3 Својства гуме на бази природног каучука

Физичка својства NR-гуме (гуме на бази NR каучука) зависе од:

- степена и врсте умрежења.
- типа и количине пунила,
- степена дисперзије пунила и присуства пластификатора.

Механичка својства NR-гуме дефинишу се на основу њених затезних својстава, отпорности према цепању и отпорности на замарање. NR каучук у поређењу са синтетичким каучуцима даје гуме већу затезну чврстоћу без додатака ојачавајућих пунила, зато што у току оптерећења на затезање, кристалише и повећава му се затезна чврстоћа. Затезна чврстоћа непуњене NR-гуме је око 30 МПа и она је неколико пута већа у односу на непуњене смеше каучука који не кристалишу (SBR, BR, итд).

Ојачавајући ефекат пунила на прекидну чврстоћу гуме на бази NR каучука није изражен као код каучука који не кристалишу. Додавањем ојачавајућих пунила побољшава се отпорност према цепању. NR-гуме имају знатно слабију отпорност према хабању у односу на гуме које у себи имају SBR и BR каучуке. Отпорност на клизање



зависи од вискоеластичних својстава каучука и има важну улогу у изради газећег слоја ауто-гуме. Висока еластичност NR каучука има за последицу нижу отпорност на клизање у односу на SBR и BR каучук при температури од 0°C. Отпорност на клизање при влажним условима на температури од 0°C, може се побољшати додавањем одговарајућих уља у смешу. Гума на бази OENR је такође добра као и уљем пуњени OESBR при влажним условима, док је OESBR бољи у случају залеђеног коловоза [15].

Раст пукотина и понашање каучукових смеша при замарању су блиско повезани. NR-гумасе може знатно више издужити у односу на некрystalизујуће каучуке. Учесталост деформације има врло мало утицаја на отпорност према замарању. Отпорност на стварање и раст пукотина се може побољшати избором одговарајућег пунила. Издужење добро вулканизованих и непуњене NR-гуме је врло велико и може достићи вредност до 900%. Добра отпорност на савијање и замор у комбинацији са високом еластичношћу чине NR каучук погодним за израду производа који су подвргнути цикличном оптерећењу.

Поред великог издужења NR каучук поседује мало пузање и низак напон релаксације. Пузање, релаксација и трајна деформација при притиску су важна својства гумених опруга. Као незасићени полимер NR је подложен деградацији под дејством кисеоника, озона, топлоте и хемикалија. Да би се побољшала ова својства користе се одговарајући антидеграданти. Промене које се дешавају за време деградације каучука укључују: прекид ланаца, умрежење ланаца и увођење нових хемијских група. NR каучук није отпоран на уља, бубри у ароматичним, алифатичним и халогеним угљоводонцима. Отпоран је на многе органске хемикалије, али не и на оксидационе киселине, има ограничену отпорност на минералне киселине. Отпоран је на органске течности као што су алкохоли мале молекулске тежине.

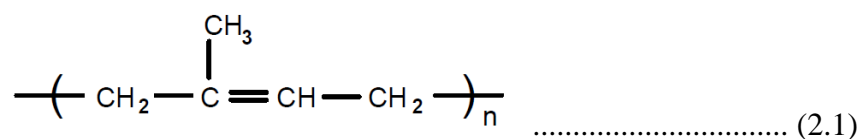
NR каучук се може умрежити коришћењем сумпора, донатора сумпора, пероксида, изоцијанатном вулканизацијом, радијацијом али најчешће се користи умрежавање сумпором и донаторима сумпора. Сумпорна вулканизација NR каучука захтева већи удео сумпора а мањи удео убрзивача у односу на вулканизацију синтетичких каучука. Стандардни конвенционални систем садржи сумпор од 2 до 3 phr и удео убрзивача од 0,2 до 1 phr.



NR каучук се може превести у крут производ са одличном отпорношћу према хемикалијама ако се у процесу вулканизације користи више од 30 phg сумпора. Овакав производ се назива ебонит.

### 2.2.1.2 Полиизопренски каучук

Полиизопренски каучук (IR) спада у групу синтетизованих природних каучука. Овај синтетички каучук има исту емпиријску формулу као NR, такође има и исту *cis* структуру као NR. Његова понављајућа јединица приказана је структурном формулом 2.1 [18].



IR каучук поседује високу прекидну чврстоћу непуњене смеше, високу еластичност, добру отпорност према цепању на повишеним температурама. У односу на NR каучук више је хомоген и поседује светлију боју. С обзиром на уску тежинску дистрибуцију показује мању тенденцију да кристалише код истезања, тј. затезна чврстоћа и отпорност према цепању је мања у односу на NR каучук.

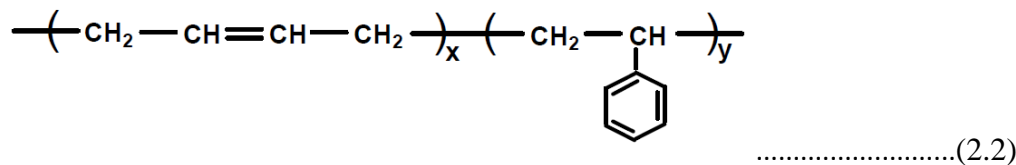
Генерално IR каучук, понаша се слично NR каучуку за време прераде и такође се мора заштити од негативног утицаја кисеоника, озона и UV зрачења због присуства двоструких веза у главном ланцу. Није отпоран на ароматичне, алифатичне и халогене угљоводонике. Отпоран је на већину неорганских хемикалија, али не и на оксидационе киселине, има ограничену отпорност на минералне киселине и није погодан за коришћење са органским течностима, осим алкохола мале молекулске тежине (метил, етил, пропил). Због одсуства примеса (које су иначе присутне у NR каучуку) у смешу се додаје више стеаринске киселине за активацију вулканизације и око 10% више убрзивача за исту брзину вулканизације при истој количини сумпора. Вулканизира се истим системима као и NR каучук.

### 2.2.1.3 Стирен-бутадијен каучук

Највише коришћени синтетички каучук је стирен-бутадијен каучук (SBR), полимер стирена и бутадијена. Интезивно коришћење SBR каучука је почело за време Другог светског рата због отежаног снабдевања природним каучуком. Производи се полимеризацијом стирена и бутадијена у емулзији или раствору. SBR каучук добијен из



емулзије и раствора садржи око 23% стирена. Понављајућа јединица SBR каучука приказана је структурном формулом 2.2 [18].



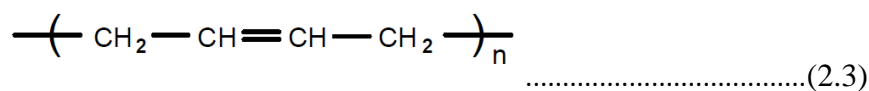
У зависности од температуре полимеризације, емулзиона полимеризација одвија се на температури 50 °C или 5 °C. У емулзионом полимеризационом производу, мономери су насумице поређани и каучук носи ознаку EMSBR. SBR каучук полимеризован на нижој температури има боља својства у односу на онај који је полимеризован на вишој температури, поседује већу еластичност и бољу отпорност на хабање. Код SBR каучука добијених из раствора, мономери могу бити насумице поређани, у блоку или калемљени. SBR каучук добијен из раствора има добру еластичност, отпорност на хабање, мање загревање при динамичком оптерећењу и мањи отпор котрљања.

SBR каучук је почео да се користи за многе производе, као замена за NR каучуке, иако захтева знатно већу количину пунила да би се постигла задовољавајућа прекидна чврстоћа, отпорност према цепању и дужи експлоатациони век. Он такође показује значајно нижу еластичност од NR каучука. За време деформације савијањем, развија се виша температура (већи хистерезис), па му се ограничава коришћење у танким пресецима теретних ауто-гума (бочница). Како SBR каучук поседује добру отпорност на хабање и високи хистерезис који утиче на повећање мокрог налегања гуме при котрљању, то га чини идеалним за израду газећег слоја зимске услове. Није отпоран на ароматичне, алифатичне и халогене угљоводонике. Хемијска отпорност SBR каучука је иста као и NR каучука. SBR каучук има бољу отпорност на старење при повишеним температурама и поседује бољу отпорност на засецање и раст пукотина у односу на NR каучук. Због присуства двоструких веза у главном ланцу неопходна је заштита од дејства кисеоника, озона и UV зрачења. Постоје типови SBR каучука који су пуњени уљима и чађем, како би се избегло њихово касније додавање при мешању смеше. Углавном се користе типови обогаћени уљима од 15, 30 и 50 phr и носе ознаку OESBR.



SBR каучук се може вулканизирати сумпором, системима са донаторима сумпора и пероксидима. Сумпорна вулканизација захтева мање сумпора у односу на NR смешу (1,5 до 2%) али и мало више убрзивача да би се постигла иста брзина вулканизације.

Полибутадијенски каучук (BR) производи се полимеризацијом 1,3 полибутадијена у раствору и емулзији, применом различитих типова катализатора *Ziegler-Natta*. 1,3 полибутадијен може да полимеризује у три изомерна облика: 1,4 адицијом у 1,4 *cis* и 1,4 *trans* и 1,2 адицијом са висећим винилним групама. Мешавина ових изомера у једном ланцу даје различите карактеристике BR каучуку. Његова понављајућа јединица приказана је структурном формулом 2.3 [18].



1,4 *cis* структура у ланцу даје најповољнија својства. Високи садржај 1,4 *cis* структуре даје гуми на бази BR каучука високу савитљивост на ниским температурама. Такође, даје одличну еластичност и добру отпорност на хабање. Висока еластичност има за последицу лоше понашање на мокром коловозу, па се због тога BR не може користити самостално у смешама за израду газећег слоја. Смањивање садржаја 1,4 *cis* у молекулском ланцу, а повећавање садржаја 1,4 *trans* и 1,2 винила негативно утиче на понашање при ниским температурама у делу еластичности и отпорности на хабање производа.

Полимеризација полибутадијена одвија се у уском интервалу молекулске дистрибуције која отежава прерадивост у миксерима, двоваљцима и екструдерима. Због присуства двоструких веза неопходна је заштита од кисеоника, озона и UV зрачења. Није отпоран на ароматичне, алифатичне и халогене угљоводонике. Хемијска отпорност је иста као и код SBR каучука. Отпорност на повишеним температурама је већа него код NR каучука аиста као код SBR каучука. BR каучуксе такође може вулканизирати сумпором, системима са донатором сумпора и пероксидима. Мешавине које садрже BR каучук дају оптималне карактеристике привисоком садржајупунила и уља. У смешама за израду газећег слоја ауто-гума користи се у комбинацији са NR и SBR каучуком [7].





## 2.2.2 Активатори вулканизације

Активатори вулканизације су хемијска једињења која се користе за повећање брзине вулканизације активирајући убрзиваче. За активацију убрзивача код сумпорне вулканизације незасићених каучука, користе се оксиди метала (ZnO, PbO, MgO). Најчешће коришћен је цинк-оксид (ZnO) у комбинацији са стеаринском киселином.

### 2.2.2.1 Цинк-оксид

ZnO има различиту улогу у технологији прераде каучука. То је бели прашкасти материјал величине честице од 0,8 до 2,0  $\mu\text{m}$ . Код сумпорне вулканизације користи се као активатор и пигмент, а пошто поседује и добру топлотну проводљивост, има примену код производа отпорних на загревање, а може се користити и као пунило за побољшање еластичних својстава. Код каучука који садрже халогене (хлоро-пренски каучук, бром-бутилни и хлоро-бутилни каучук) или карбоксилне групе (карбоксилни SBR и NBR), ZnO се користи и као вулканизационо средство. Активност ZnO зависи од величине и специфичне површине честица [18].

### 2.2.2.2 Стеаринска киселина

Стеаринска киселина у каучуковим смешама врши истовремено неколико функција: омекшивач, диспергатор и активатор. Технички стеарин ( $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ ) представља 90% масе стеаринске киселине и смеше палметинске и олеинске киселине са тачком топљења од 49 °C до 52 °C.

## 2.2.3 Средства против старења–антидеграданти

Да би се продужио век трајања гумених производа врло је важно да се гума заштити од негативног дејства кисеоника, озона, топлоте, UV зрачења и замарања присавијању. Незасићене структуре дијенских угљоводоничних каучука (NR, IR, BR, SBR и NBR) подложне су процесу деградације, односно старења. Хемикалије које успоравају процес деградације називају се антидеграданти и у њих спадају антиоксиданси и антиозонанти.

Антиоксиданси су хемикалије које успоравају ефекат дејства кисеоника до одређене температуре и одређене количине топлотне енергије. Потребна енергија може



да долази од топлоте, *UV* зрачења и деформације. Оксидациона деградација полимера је процес који се дешава у присуству слободних радикала. Овај процес назива се аутооксидација. У употреби су фенолни, ароматични, аминок и хидропероксидно разграђујући антиоксиданси [17].

Антиозонатни су хемикалије које успоравају дејство озона. Под дејством озона раскидају се двоструке везе код полимерних ланаца на површини производа, што се испољава у виду настанка пукотина које су управне на правац деформације и које временом расту. У употреби су антиозонанти на бази парафин-тоулена.

Ради заштите гуме од деградације додају се парафини и микрокристални воскови. Воскови мигрирају на површину гуме стварајући заштитни филм којиспречава дејство озона. Код цикличних деформација истезањем, сабијањем и увијањем, овај филм пуца остављајући гуму незаштићену на дејство кисеоника и озона. Парафински микрокристални воскови се користе само за заштиту производа од гуме који су под дејством статичког оптерећења.

Антидеграданти штите гуму до температуре 120°C. За спречавање деградације преко ове температуре неопходно је у смеси користити други тип каучука и система за умрежавање. Пероксидни вулканизациони систем даје С-С умрежавање и има највећу енергију везе. Моносулфидно умрежење има већу енергију везе С-S у односу на полисулфидну везу (С-S-S-S-C).

За заштиту гуме од дејства топлоте, најпогоднији су системи са већим уделом убрзивача и мањим уделом сумпора познати као семи *EV* системи. Овакав систем даје бољу топлотну заштиту од конвенционалног система вулканизације.

#### 2.2.4 Пунила

Пунила су ингредијенти који се додају каучуку са циљем да побољшају физичко-механичка својства, прерадљивост и смање цену смеше по јединици масе или запремине [13, 9]. У употреби је велики број различитих врста пунила, која се на основу ојачавајућег дејства и величине честица деле на (табела 2.5) [19]:

- неојачавајућа пунила,
- полуојачавајућа и
- ојачавајућа.



Табела 2.5 Подела пунила према ојачавајућем дејству

Својство пунила	Величина честице	Супстанца
Неојачавајуће	<5000 nm	Баријум-сулфат Магнезијум-силикат Калцијум-карбонат (креда)
	< 1000 nm	Калцијум-карбонат Меки каолин Тврди каолин
Полуојачавајуће	50 – 500 nm	Калцијум-карбонат (таложни) Алуминијум-силикат (таложни) Калцијум-силикат (таложни) Чађи: N990, N765, N550
Ојачавајуће	<50 nm	Таложни силикати Пиролитички силикати Чађи: N330, N220

Пунила се такође могу поделити и према активности честица на активна и неактивна пунила. Активна пунила побољшавају физичко-механичка својства гуме, док неактивна пунила служе за смањење цене смеше. Између активних и неактивних својстава пунила нема оштре границе, па се у литератури може пронаћи и термин полуактивна пунила (неке врсте чађи). Пунила се на основу боје деле на црна и бела, а према пореклу на органска и неорганска. У органска пунила спада чађ, док у неорганска пунила спадају  $\text{SiO}_2$ , силикати, све врсте каолина и креде. Као пунило се све чешће користи и рециклирани гумени прах, али његов утицај и примена, као и оптимална количина која се може додавати још увек нису у потпуности истражени.

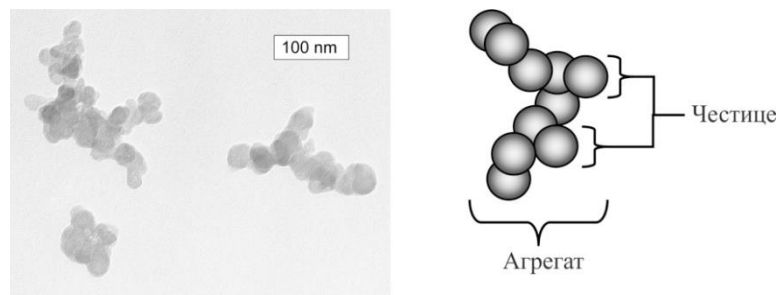
Понашање пунила зависи од врсте каучука коме се додаје. Код каучука који кристалишу (NR, IR, CR), пунила немају велики ојачавајући ефекат, за разлику од каучука који некристалишу (SBR, BR, NBR), где активна пунила показују већи ојачавајући ефекат. Активна пунила, позитивно утичу на прекидну чврстоћу, напон при истезању, отпорност на цепање, отпорност на хабање, а негативно на издужење при кидању, отпорност при савијању и повећање хистерезиса.

Својства која дефинишу пунила су:

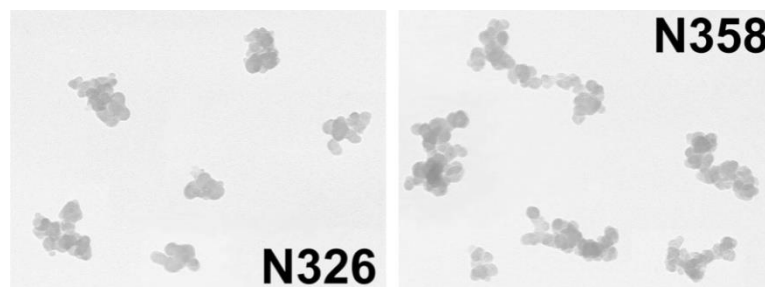
- величина и структура честице,
- специфична површина и облик честице и
- површинска активност.

Када је величина честице пунила знатно већа од растојања два полимерна ланца ствара се површина која је напрегнута, што доводи до кидања полимерних ланаца при напрезању савијањем и истезањем. Пунила величине честице од 1 до 10  $\mu\text{m}$  примарно се користи за снижење цене смеше и побољшање прерадљивости смеша, јер немају битан утицај на физичко-механичка својства смеша. Полуојачавајућа пунила величине честица од 0,1 до 1  $\mu\text{m}$  повећавају модул еластичности гума. Пунила величине честице од 0,01 до 0,1  $\mu\text{m}$  имају највећи ојачавајући ефекат[17].

У зависности од технолошког поступка добијања пунила, елементарне честице пунила могу да граде агрегате и агломерате (чађ,  $\text{SiO}_2$ , таложна силикатна пунила). Агрегат је дискретни сирови колоидни ентитет сједињених елементарних честица који је приказан на слици 2.7 [17], док је агломерат група физички везаних и замршених агрегата. На основу Ферет-дијаметарске методе агрегати се деле на мале (до 100  $\mu\text{m}$ ) и велике (преко 100). Такође, агрегати се могу поделити и на ниско структуралне и високо структуралне (слика 2.8) [17, 20].



Сл. 2.7 Агрегат који граде честице чађи



Сл. 2.8 Ниско и високоструктурални агрегати

Специфична површина представља укупну површину честице која се налази у јединици масе пунила ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) и супротно је сразмерна величини честице [13, 10]. Пунило мора да оствари директан контакт са ланцима молекула каучука да би се остварио ефекат



ојачања. Пунила која имају већу специфичну површину могу са каучуком да остваре већу контактну површину, чиме се повећава ојачавајући потенцијал.

Облик честице, који може бити сферичан, плjosнат и игличаст је, такође, важна карактеристика пунила. Честице чађи и таложног аморфног  $\text{SiO}_2$  су сферичног облика, док су њихови агрегати анизотропни и значајно мањи него честице каолина. Специфична површина чађи креће се од 6 до  $250 \text{ m}^2/\text{g}$ . Таложни силикати имају специфичну површину од 125 до  $200 \text{ m}^2/\text{g}$ , док тврди каолини имају специфичну површину од 20 до  $25 \text{ m}^2/\text{g}$  [17].

Специфична површинска активност зависи од хемијског састава пунила. Поред хемијске компатибилности пунила и каучука, неопходно је да на површини честице пунила постоје активни центри за везивање са каучуком. Пунила могу да имају велику специфичну површину и да буду високо структурална, али да имају релативно мали ојачавајући ефекат, због тога што поседују малу специфичну површинску активност. Честице чађи на својој површини поседују органско функционалне групе које имају велики афинитет између пунила и каучука.

Бела (неорганска) пунила, за разлику од црних пунила, поседују мањи афинитет према каучуцима, јер имају мању специфичну површинску активност. Смањена површинска активност у новије време се повећава третирањем, односно модификацијом површине честице пунила одређеним поступцима. Каолин,  $\text{SiO}_2$  и силикати на својој површини имају групе које могу да хидролизују у силаноле ( $-\text{SiOH}$ ). Ове силанолне групе понашају се као киселине ( $\text{SiO}^-\text{H}^+$ ) и хемијски су активне. За модификацију се користе силан куплунг агенти који реагују са силанолном групом стварајући чврсту везу, при чему на другом крају ланца поседују функционалну групу која се за време процеса вулканизације веже за каучук. Овако везане групе утичу на ојачавајућа својства гуме.

#### 2.2.4.1 Чађ

Чађ је први пут употребљена као пунило 1904. године када је *Mote* открио да делује као активно пунило [15, 19]. Квалитет и врсте чађи зависе од процеса производње и врсте сировине за добијање чађи. Постоји неколико подела чађи, а једна од њих је према утицају пећне чађи на абразију: најјаче абразивна (SAF), средње абразивна (ISAF) и абразивна (HAF). Према брзини екструдирања смеше, пећне чађи се деле на:



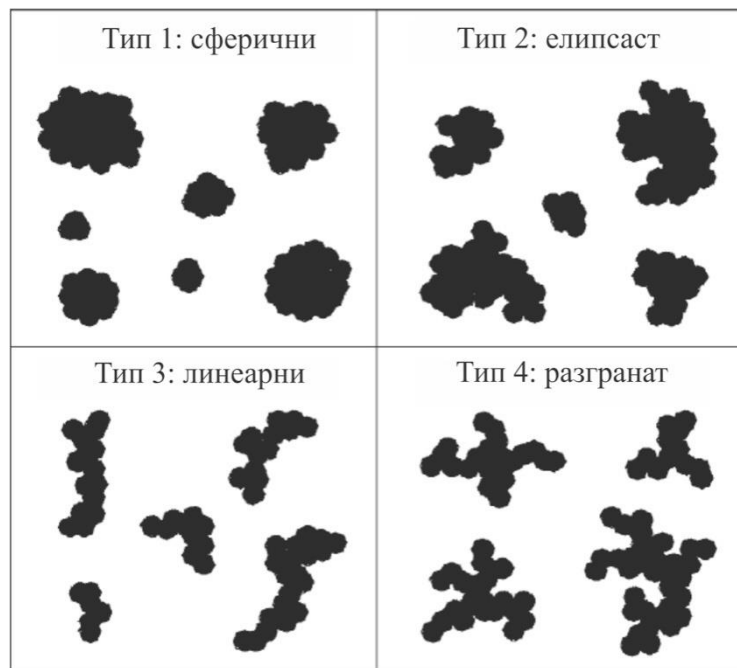
брзоекструзионе (FEF) и чађи опште намене (GPF). У табели 2.6 приказана је подела чађи која је извршена на основу стандарда ASTM D-1765 [18].

Табела 2.6 Типови чађи према ASTM D-1765 стандарду

ASTM класификација	Индустријски назив	ASTM класификација	Индустријски назив
N110	SAF	N347	HAF-HS
N220	ISAF	N351	
N234	ISAF-HS	N375	
N242	ISAF-HS	N550	FEF
N285		N650	GPF-HS
N299		N765	SRF-HS
N327	HAF-LS	N770	SRF
N339	HAF-HS	N787	SRF-HM

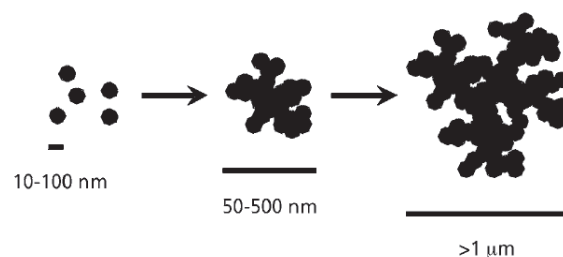
Чађ је материјал састављен од елементарног угљеника чије су честице елиптичног облика, колоидне величине сједињене у агрегат и добија се непотпуним сагоревањем или термичком декомпозицијом угљоводоника (ASTM D-3053). Пречници честице чађи могу бити мањи од 20 nm, док код неких типова пећних чађимогу бити до неколико стотина nm (термичке чађи). Нискоструктурни агрегати чађи могу имати до 30 честица, док високоструктурни и до 200 честица. Вискоструктурни агрегати имају велику непопуњену слободну запремину у којој полимерни ланци каучука могу бити заробљени, чиме се повећава ефективна запремина чађи.

Агрегати чађи могу се, према облику, разврстати у 4 категорије: сверичне, елипсасте, линеарне, разгранате (слика 2.9) [21].



Сл. 2.9 Појавни облици агрегата чађи

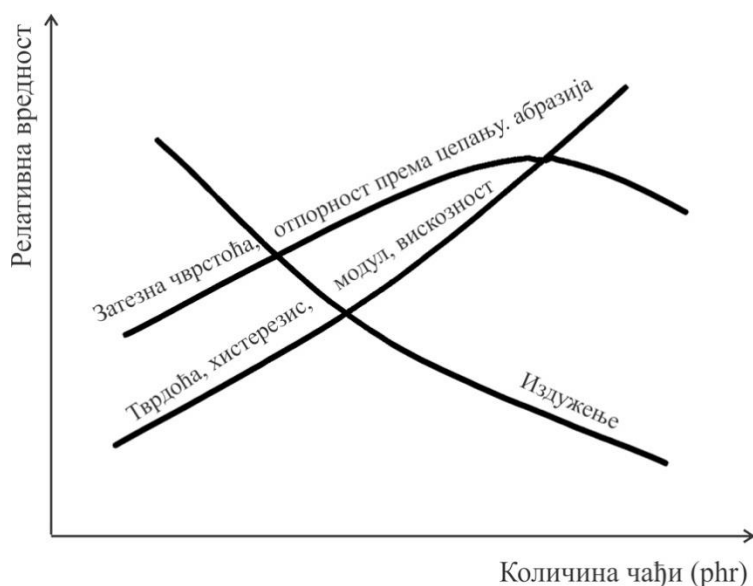
Најфиније честице чађи називају се примарне честице. Структура примарних честица чађи налази се између аморфног и кристалног материјала, паракристалне структуре сачињене од паралелних графитних слојева међусобно повезаних и састоји се од угљеника са малим уделом водоника и кисеоника у виду функционалних група. Функционалне групе су примарно концентрисане на ивицама графитног кристала на површини саме честице [15]. На слици 2.10 приказана је примарна честица чађи свечичног облика сједињена у агрегат, снимљена на *ТЕМ* [17].



Сл. 2.10 Примарна честица, агрегат и агломерат чађи

Функционалне групе чађи укључују карбоксилну, фенолну, кинон, лакто и водоничну групу. Функционалне групе играју главну улогу при интеракцији између чађи и полимерних ланаца [15].

Удео чађи у смеси значајно утиче на њене карактеристике. Утицај количине чађи на својства смеша и гуме приказан је на слици 2.11 [17].



Сл. 2.11 Утицај удела чађи на својства смеша и гуме

#### 2.2.4.2 Бела пунила

Бела пунила су добила име на основу своје боје, а у литератури се такође могу наћи и под називом беле чађи. Као и чађи, бела пунила деле се на ојачавајућа, полуојачавајућа и неојачавајућа, у зависности од хемијског састава, величине и облика честице. Нека бела пунила дају гуми посебна својства: отпорност на дејство топлоте, отпорност према UV зрачењу, електропробојност, незапаљивост итд.

Сва бела пунила могу се поделити на следеће групе:

- каолини,
- пунила на бази  $\text{SiO}_2$
- силикатна пунила
- креде
- специјална пунила.

Она такође могу бити немодификована и модификована. Немодификована бела пунила, су углавном неактивна или полуактивна и добијају се директном прерадом природних сировина минерала (млевењем, сушењем и калцинирање).

##### 2.2.4.2.1 Каолини

Каолини се добијају прерадом природног хидратисаног алуминијум-силиката ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Они могу бити меки, тврди, калцификовани и модификовани. Меки



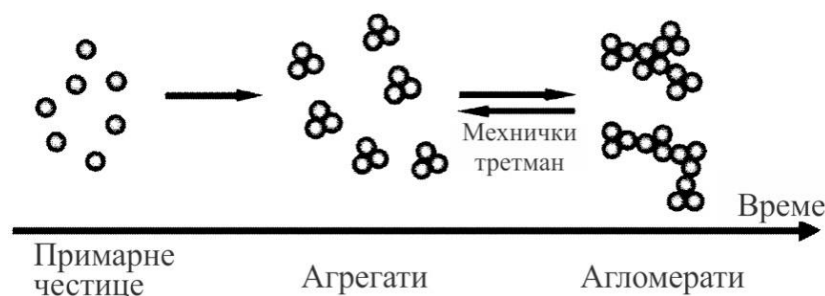
каолини, углавном имају добру прерадљивост, мањи модул еластичности, прекидну јачину и отпорност на хабање у односу на тврде каолине. Калцификовани каолини су тврди каолини код којих је уклоњена везана и апсорбована вода загревањем. Користе се за производе који у поступку производње и употребе не треба да садрже влагу. Ради повећања активности честице и ојачавајућег ефекта може да се површина модификује силанима. Каолини третирани силаном дају смешама низак вискозитет, већи модул, већу затезну чврстоћу и већу отпорност према сабијању у односу на немодификоване каолине.

#### 2.2.4.2.2 Пунила на бази силицијум-диоксида

Својства пунила на бази силицијум-диоксида ( $\text{SiO}_2$ ) зависе од начина добијања. Поступци за добијање  $\text{SiO}_2$  су: млевење из природног минерала, таложење из натријум силиката и минералне киселине и пиролитичким поступком.

$\text{SiO}_2$  који се добија из природног минерала млевењем, примењује се као јефтино термоотпорно пунило.

Приликом добијања  $\text{SiO}_2$  таложним поступком, у таложнику се интензивно меша натријум-силикат и минерале киселине ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  или  $\text{HCl}$ ). За производњу силиката такође се користе и водени раствори одговарајућих соли као замена за киселине. У току реакције прво се стварају примарне честице величине неколико нанометара, број честица расте временом, након чега се примарне честице везом  $\text{Si-O-Si}$  спајају стварајући агрегате који могу да порасту до пречника од неколико стотина nm [22]. На крају се врши механичко уситњавање добијеног  $\text{SiO}_2$ . Поступак стварања примарних честица, агрегата и агломерата приказан је на слици 2.12 [17].



Сл. 2.12 Примарна честица, агрегат и агломерат  $\text{SiO}_2$

Број силанолних група које сеналазе на површини честице креће се од  $4,6$  до  $10 \pm \text{ОН група}/\text{nm}^2$ . Ове групе су центри за реакцију са алкил-силан куплунг агентом која



поред реакције са SiOH групом за време вулканизације реагује и са полимерним ланцем, што гуми даје боља механичка својства (повећање жилавости, отпорности на хабање итд.) [21].

SiO<sub>2</sub> се добија пиролитичким сагоревањем SiCl<sub>4</sub> у присуству водене паре. Овако добијено пунило садржи мање од 1,5 % везане воде.

SiO<sub>2</sub> упочетку се користио само за израду производа у боји за обућарску индустрију, због тога што првенствено повећава отпорност на цепање и хабање. Процес производње SiO<sub>2</sub> таложним поступком се стално усавршавао, па је он, почео да се користи у комбинацији са чађима у смешама за ауто-гуме, транспотрне траке, цеви итд.

#### **2.2.4.2.3 Силикатна пунила**

Силикатна пунила се добијају таложним поступком и имају мале примарне честице. Ова пунила спадају у групу полуактивних пунила, која у већим количинама повећавају еластичност гуме. У употреби су натријум-алуминијум-силикат, калијум-алуминијум-силикат, кадмијум-алуминијум-силикат, итд.

#### **2.2.4.2.4 Креда**

Креда (CaCO<sub>3</sub>) је најраспрострањеније бело пунило. Добија се млевењем из кречњака, калцита и мрамора, а честице су јој зрнастог облика и различите величине. Спада у групу неактивних пунила и користи се ради смањења цене смеше. Највише се примењује за пуњење у белим и обојеним гумама.

#### **2.2.4.2.5 Специјална бела пунила**

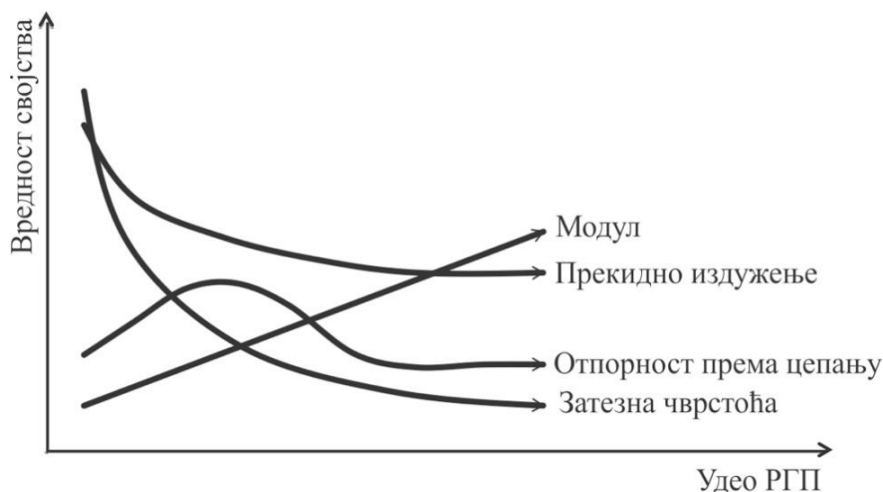
У специјална бела пунила спадају баријум-сулфат, калцијум-сулфат, магнезијум-карбонат, титан-диоксид и цинк-оксид који се користи за избељивање гумених смеша,.

#### **2.2.4.3 Рециклирани гумени прах**

РГП се добија уситњавањем отпадне гуме различитим поступцима. Карактеристике РГП зависе од начина његовог добијања. Начини добијања и карактеристике РГП биће детаљније објашњени у поглављу 2.4.

На основу досадашњих истраживања о примени немодификованог рециклираног гуменог праха (НМГП), закључено је да удео НМГПу смеси значајно утиче на њене

карактеристике: са повећањем удела НМГПу смеси опадају прекидно издужење, отпорност према цепању и затезна чврстоћа, а расте модул еластичности. Утицај удела НМГП на својства смеша и гуме приказан је на слици 2.13 [23].



Сл. 2.13 Утицај удела немодификованог рециклираног гуменог праха на својства смеша и гуме

У новије време, чине се напори да се различитим поступцима модификације, НМГП доведе у такво стање да се понаша као активно пунило, чиме би се омогућило повећање његовог удела у гуми без значајне промене жељених својстава. До сада су развијени различити поступци модификације НМГП: механички, хемијски и физички [24].

У литератури се може наћи мали број истраживања која испитују утицај удела модификованог рециклираног гуменог праха (МГП) на својствасмеша и гуме и због тога ће у наставку ове дисертације бити описано истраживање и представљени добијени резултати испитивања различитих метода МГП и утицаја удела МГП на својства смеша и гуме.

### 2.2.5 Омекшивачи и пластификатори

Омекшивачи и пластификатори олакшавају прерадљивост смеше, чинећи невулканизоване смеше пластичним, олакшавају дисперзију прашкастих хемикалија и смањују повећањетемпературе за време процеса мешања и прераде услед унутрашњег трења. Такође побољшавају разливање смеше у алату приликом поступка вулканизације. Смањују тврдоћу гуме, а у неким случајевима побољшавају савитљивост на ниским



температурама. У ову групу спадају масне киселине, биљна уља, минерална уља, естри итд. [18, 25].

### 2.2.6 Убрзивачи вулканизације

Када се вулканизације врши само са сумпором, процес вулканизације је дуготрајан (време вулканизације 4 сата при температури од 200 °С) па је такав вид вулканизације економски неисплатљив. Данас се користе хемикалије које заједно са сумпором и активаторима убрзавају процес вулканизације при нижим температурама и побољшавају физичко-механичка својства гуме. Убрзивачи вулканизације се могу се поделити према хемијском саставу (од спорих до врло брзих), што је приказано у табели 2.7 [17].

Табела 2.7. Подела убрзивача према хемијском саставу

Класа	Брзина	Скраћени назив
Алдехид-амин	Спори	
Гуаниди	Средње брзи	DPG, DOTG
Тиазоли	Полубрзи	MBT, MBTS
Сулфен-амиди	Брзи са одложеним дејством	CBS, MBBS, MBS, DCBS
Дитио-фосфати	Брзи	ZBPD
Тиурами	Врло брзи	TMDT, TMTM, TETD
Дитио-карбамиди	Врло брзи	ZDMC, ZDBC

Подела убрзивача према функционалности на примарне и секундарне приказана је у табели 2.8 [17].

Табела 2.8 Подела убрзивача према функционалности

Тип	Хемијски састав	Скраћеница
Примарни	Тиазоли	MBT
		MBTS
	Сулфен-амиди	CBS
		TBBS
		MBS
		DCBS
Сулфен-имиди	TBSI	
Секундарни	Гуаниди	DPG
		DOTG



Наставак табеле 2.8

Тип	Хемијски састав	Скраћеница
	Тиурами	TMDT
		TMTM
		TETD
Дитио-карбамиди		ZDMC
		ZDBC
Дитио-фосфати		ZBPD

Од односа сумпор–убрзивач директно зависе физико-механичке карактеристике гуме и век трајања производа. Конвенционални вулканизациони систем садржи од 2 до 3 phr елементарног сумпора и 0,5 до 1 phr убрзивача. Овај систем има више атома сумпора у једној вези (полисулфидна веза). Ефикасни вулканизациони (*EV*) систем садржи врло мало елементарног сумпора или га уопште не садржи, већ сумпор добија преко убрзивача, који се додаје у количини 3 phr, и донатора сумпора. Код ових система, веза која спаја два суседна полимерна ланца има само један атом сумпора (моносулфидна веза). Овако умрежена гума отпорна је на дејство повишених температура и има већи хистерезис, па је стога непогодна за динамичке оптерећене производе. Поред ова два система вулканизације постоји и полу ефикасни (*SEMI EV*) систем који садржи 1,5 phr сумпора и преко 1 phr убрзивача. Код умрежавања овим системом, стварају се моносулфидне и дисулфидне везе. Такође се користи као компромис између конвенционалног и *EV* система са циљем постизања жељених својстава гуме. Гума са полисулфидном везом има бољу еластичност у односу на моносулфидну везу. Полисулфидни систем при напрезању савијањем ствара мањи напон, што за последицу има дужи век трајања код цикличних оптерећења. Веза S-S је мање термоотпорна у односу на C-S везу [25]. У табели 2.9 [12] је приказана јачина везе код умрежавања сумпором.

Табела 2.9 Јачина везе при сумпорној вулканизацији

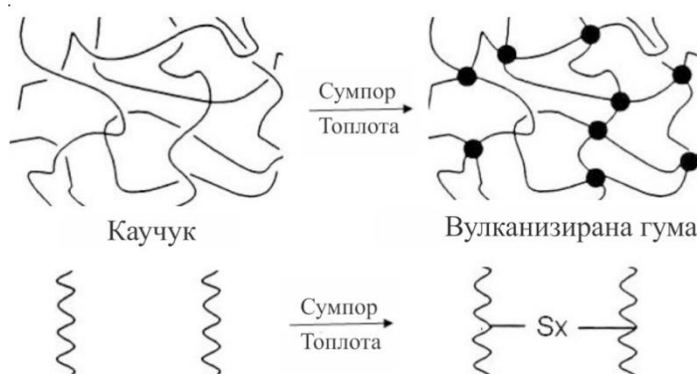
Врста везе	$-S_x-$ ( $x > 2$ )	C-S-S-C	C-S-C	C-C
Јачина везе (kJ/mol)	< 268	268	285	352

Пораст стабилности

## 2.2.7 Вулканизација (умрежавање)

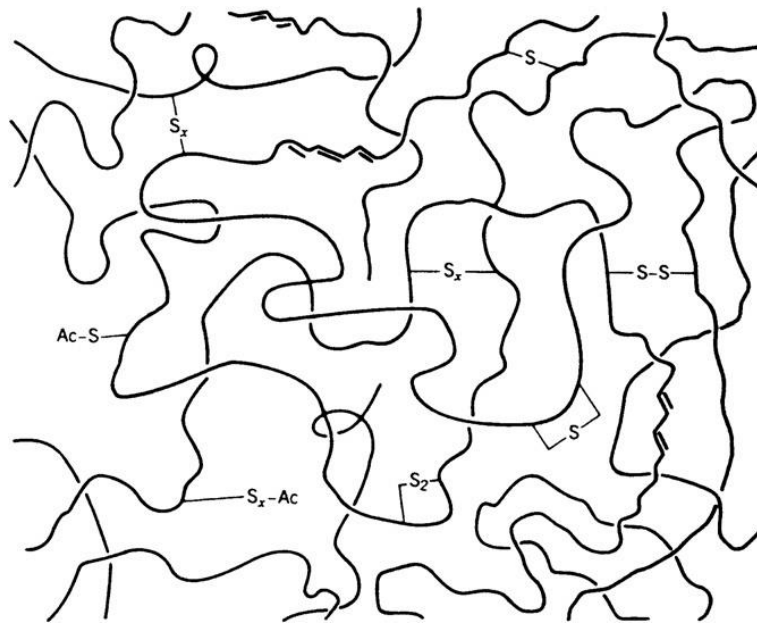
Вулканизација је хемијски процес при коме се врши умрежавање полимера припремади каучука. *Goodyear* и *Hancock* први су открили да се својства природног каучука мењају приликом загревања са сумпором, тако да он постаје знатно отпорнији на дејство повишене и снижене температуре и на раствараче. Тек 1920. године *Staudinger* уводи појам макромолекула и од тада се сумпорна реакција умрежавања стално побољшава применом убрзивача, активатора и успоривача са циљем побољшања прерадљивости и карактеристика гуме [26]. Поступак сумпорне вулканизације је комплексан и још увек није у потпуности објашњен, а такође, постоји много непознаница о утицају различитих адитива у каучуковим смешама [13].

Приликом вулканизације каучук се третира хемикалијама ради смањења пластичности и осетљивости на повишене и снижене температуре, као и ради постизања одговарајуће димензоне стабилности, еластичности, тврдоће итд. Овим хемијским процесом се замршени дугачки ланци молекула преводе у тродимензионалну еластичну мрежу хемијским спајањем молекула на различитим тачкама дуж два ланца. Процес вулканизације сумпором приказан је на слици 2.14, где су линијама представљени полимерни ланци а кружићима места умрежења [17].



Сл. 2.14Поступак вулканизације сумпором

За време процеса вулканизације, долази до стварања различитих хемијских веза, односно попречног спајања молекулских ланаца. На слици 2.15 приказани су типови веза код умреженог NR каучука [8, 22].



Сл. 2.15 Типови веза код сумпорног умрежавања NR каучука

Хемикалије које реагују са активним центрима у полимерима и врше умрежавање између ланаца називају се средства за вулканизацију или вулканизациони агенти [17]. Вулканизационе системе чине активатори, убрзивачи и средства за вулканизацију. У зависности од врсте каучука у употреби је сумпорни и несумпорни вулканизациони систем.

### 2.2.7.1 Сумпор и донатори сумпора

Сумпор је најчешће коришћено средство за умрежавање и користи се код каучука који у полимерном ланцу имају двоструке везе (незасићени каучуци). При процесу вулканизације, NR, SBR, BR каучука велики број неискоришћених двоструких веза у ланцу представља потенцијално место за негативан утицај кисеоника, озона и топлоте. За умрежавање гуме користи се сумпор чији се молекул састоји од осам атома повезаних у осмочлани прстен. Раскидање  $S_8$  прстена постиже се на температури од око  $140^\circ\text{C}$  [13].

Поред елементарног сумпора користе се и донатори сумпора с циљем делимичне или потпуне замене елементарног сумпора ради стварања моносулфидних веза, чиме се побољшава топлотна отпорност гуме. Донатори сумпора се користе при вулканизацији гуме од које се производе ауто-гуме, транспортне траке, гуменас црева итд.

### 2.2.7.2 Несумпорни умреживачи

Несумпорни умреживачи користе се за умрежавање засићених каучука и израду специјалних производа. Најчешће се користе пероксиди (органски пероксид), разне врсте смола (фенолне смоле), оксиди метала (MgO, ZnO), изоцијанати и уретани. Код пероксидне вулканизације формира се веза између два угљеникова атома који припадају различитим полимерним ланцима (слика 2.16). Пероксидном вулканизацијом могу се вулканизирати засићени и незасићени каучуци, за разлику до сумпорне вулканизације којом се могу вулканизирати само незасићени каучуци[17].



Сл. 2.16 Процес пероксидне вулканизације

## 2.3 Производи од гуме

Скоро у свим гранама индустрије користе се различити производи од гуме, а најзаступљенији су следећи:

- Ауто-гуме,
- Гумене транспортне траке,
- Гумена црева и
- Остала техничка роба од гуме.

### 2.3.1 Ауто-гуме

Као се већина РГП добија рециклажом ауто-гума зато је неопходно познавати састав и тип ауто-гуме јер од њега директно зависе својства РГП. Ауто-гума се састоји од носећег скелета (каркаса), газећег слоја (протектора), бочница и стопала са жичаним обручима. Попречни пресек ауто-гуме приказан је на слици 2. 17 [17].





Сл. 2.17 Попречни пресек ауто-гуме

Уколико се код монтаже не користи унутрашња гума, онда се на површини унутрашње стране ауто-гуме код производње додаје заптивни слој и на наплатак уграђује вентил. Према намени ауто-гуме се деле на:

- Ауто-гуме за путничка и полутеретна возила,
- Ауто-гуме за теретна возила и аутобусе,
- Ауто-гуме за пољопривредне машине,
- Ауто-гуме за грађевинске машине и
- Ауто-гуме за авионе.

Ауто-гума је композитни производ на бази гуме која је ојачана текстилним ичеличним кордом као и жицом. У зависности од намене, разликује се више врста смеша у ауто-гуми:

- Адхезивне смеше за гумирање армирајућих материјала (синтетичке тканине, корд платна, челични корд и жице).
- Протекторске смеше за израду газеће површине.
- Смеше за израду бочница за заштиту костура ауто-гуме(постављају се на бокове гуме од газећег слоја до пете).
- Смеше за израду заптивног слоја (код ауто-гума *tubulless* конструкција).

У састав смеша од којих се производе аутогуме, углавном улазе следећи састојци:

1. Каучуци (NR, IR, SBR, BR и халобутили).



2. Пунила (чађ, SiO<sub>2</sub>, креда и каолин).
3. Средства за заштиту од старења: антиоксиданси, антиозонанти и воскови.
4. Средства за вулканизацију: активатори, убрзивачи, сумпор или пероксид.
5. Специјалне врсте ингредијената: омекшивачи и пластификатори, смоле за конфекцијску лепљивост, диспергатори и хомогенизатори, успоривачи и средства за адхезију синтетичких материјала и челичног корда.

У табели 2.10 приказани су примери рецептура протекторских смеша, а у табели 2.11 примери рецептура за израду бочница и адхезионог слоја теретне ауто-гуме.

Табела 2.10 Рецептуре протекторских смеша теретне ауто-гуме

Смеша 1	phr	Смеша 2	phr
NR	50	NR	100
Полибурадиен	25	N220	50
SBR	25	Пептизер	0,25
N220	65	Парафински восак	1
Пептизер	0,25	Микрокристални восак	2
Парафински восак	1	Парафинско уље	3
Микрокристални восак	2	TMQ	1
Парафинско уље	10	Стеаринска киселина	2
TMQ	1	ZnO	5
7 PPD	2,5	TBBS	1
Стеаринска киселина	2	S	1
ZnO	5	DPG	0,25
TBBS	1,25	Успоривач	0,2
S	1		
DPG	0,3		
Успоривач	0,25		

Табела 2.11 Рецептуре смеша за израду бочница и адхезионог слоја теретне ауто-гуме

Смеша за израду бочница	phr	Адхезивна смеша	phr
NR	60	NR	65
BR	40	BR	35
N330	48	N660	60
Пептизер	0,15	Пептизер	0,25
Парафински восак	1	Парафински восак	1
Микрокристални восак	2	Микрокристални восак	1

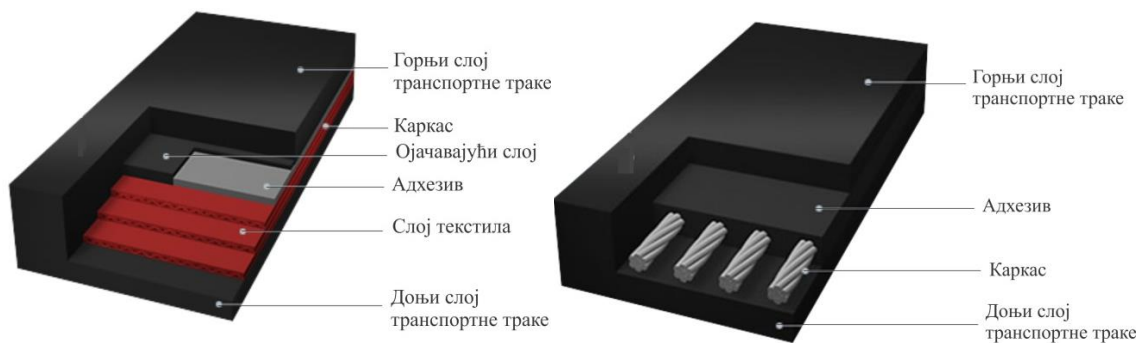
Наставак табеле 2.11.

Смеша за израду бочница	phr	Адхезивна смеша	phr
TMQ	1,5	TMQ	1
7 PPD	3,5	6PPD	2,5
Стеаринска киселина	2	Стеаринска киселина	2
ZnO	3	ZnO	3
TBBS	0,95	DCBS	0,90
S	1,25	S	4,5
Успоривач	0,15	Успоривач	0,25

Код нових типова ауто-гума у рецептурама за смеша за израду газећег слоја уведен је додаток  $\text{SiO}_2$  плус силан-куплунг агент, да би се смањио отпор при котрљању, унутрашњи хистерезис и побољшало налегање по клизавом и мокром коловозу на ниским температурама.

### 2.3.2 Гумене транспортне траке

По заступљености, гумене транспортне траке се налазе одмах иза ауто-гума. Костур гуменетранспортне траке чине синтетичке тканине, синтетички корд и челична ужад. Када се носећи костур формира од синтетичких тканина и корда, реч је о гуменим транспортним тракама са текстилним умецима. Најчешће су у употреби синтетичке тканине на бази полиестера (*PES*), полиамида (*PA*), кевлара (*D*), а ређе памучне тканине (*B*) и рајонске тканине. Када се носећи костур формира од челичних сајли, реч је о гуменим транспортним тракама са челичним ужади. Попречни пресек оба типа транспортних трака приказан је на слици 2. 18.



Сл. 2.18 Попречник пресек транспортних трака са текстилним умецима и челичним сајлама



Смеше за израду транспортних трака, у зависности од типа и врсте трака деле се на:

1. адхезивне смеше за гумирање текстила и челичних сајли.
2. смеше за израду горње (радне) и доње (нерадне) облоге.

За транспортне траке опште намене, где се незахтева отпорност на уља, топлоту, запаљивост и самогасивост, користе се исти ингредијенти као и код ауто-гуме. Пример рецептура за израду радне облоге и адхезивне смеше приказан је у табели 2.12.

Табела 2.12 Рецептуре радне облоге и адхезивне смеше

Радна облога НХ	phr	Адхезиона смеша	phr
SMR-20	50	SMR-20	60
SBR 1500	34	SBR 1500	40
BR cis	16	Stearin	2
N-220	46, 2	ZnO	5
ZnO	5	Aromatsko ulje	5
Stearin	1,5	N 550	30
Parafin	1,7	TQM	1
Naftolen	3,5	4010 Na	0,5
4010 Na	1,0	Vulkacit CZ	0,8
TMQ	1,1	S	2,5
S	1, 20		
Sulfasan R	0,5		
Vulkacit MOZ	1,2		
PVI	0,13		

### 2.3.3 Гумена црева

Гумена црева су флексибилне цеви за пренос флуида и растреситих материјала. Постоје два основна типа гумених црева: потисна црева за транспорт са над притиском и усисна црева за транспорт са под притиском. Цеви се састоје из три основна дела: гумене унутрашње облоге, армирајућих елемената и гумене спољне облоге. У армирајуће елементе спадају текстил, корд, нити за оплетање и жица за израду спирале. Попречни пресек гуменог црева приказан је на слици 2. 19.



Сл. 2.19 Попречни пресек гуменог црева

Смеше за израду гумених цеви деле се на:

1. адхезивне смеше за гумирање армирајућих делова,
2. смеше за израду унутрашње облоге,
3. смеше за израду спољне облоге,
4. смеше за поуну између спирала у конструкцији цеви (у случају када се користи спирала од челичне жице).

За гумене цеви опште намене, где се не захтева отпорност на уља, топлоту, хемикалије и абразиве, користе се исти ингредијенти као и код ауто-гуме, али је рецептура другачија па су физичко-механичка својства далеко слабија у односу на ауто-гуме и транспортне траке. Пример рецептуре за израду облоге цеви приказан је у табели 2. 13.

Табела 2.13 Облога за цев отпорна на абразију

Облога цеви	phr
SKS 30 ARKM 15	70,0
SMR-20	38,5
ZnO	5,0
Stearin	2,0
Parafin	1,0
Naftolen	6,1
Bronov katran	4
N-330	44,2
N-760	20,0
Flektol	0,5



Наставак табеле 2.13.

Облога цеви	phr
4010 Na	1,0
Vulkacit CZ	1,2
S	2,5

#### 2.3.4 Остала гумена техничка роба

У ову групу спадају сви остали производи од гуме:

- плочасти материјал за облагање подова различите намене,
- плочасти материјал за израду заптивних елемената и мембрана,
- све врсте ремења (пљоснати, клинасти и назубљени),
- осовински заптивачи и манжетне,
- еластични и амортизујући држачи,
- гумена обућа, ђонове, делови за поправку обуће,
- гуме за белу технику,
- гумени делови за ауто индустрију,

Ови производи се израђују од различитих врста каучука (NR, SBR, BR, EPDM, флуор итд.) и ингредијената зависно од намене. Физичко-механичка својства ових производа су далеко нижа у односу на ауто гуме и транспортне траке.

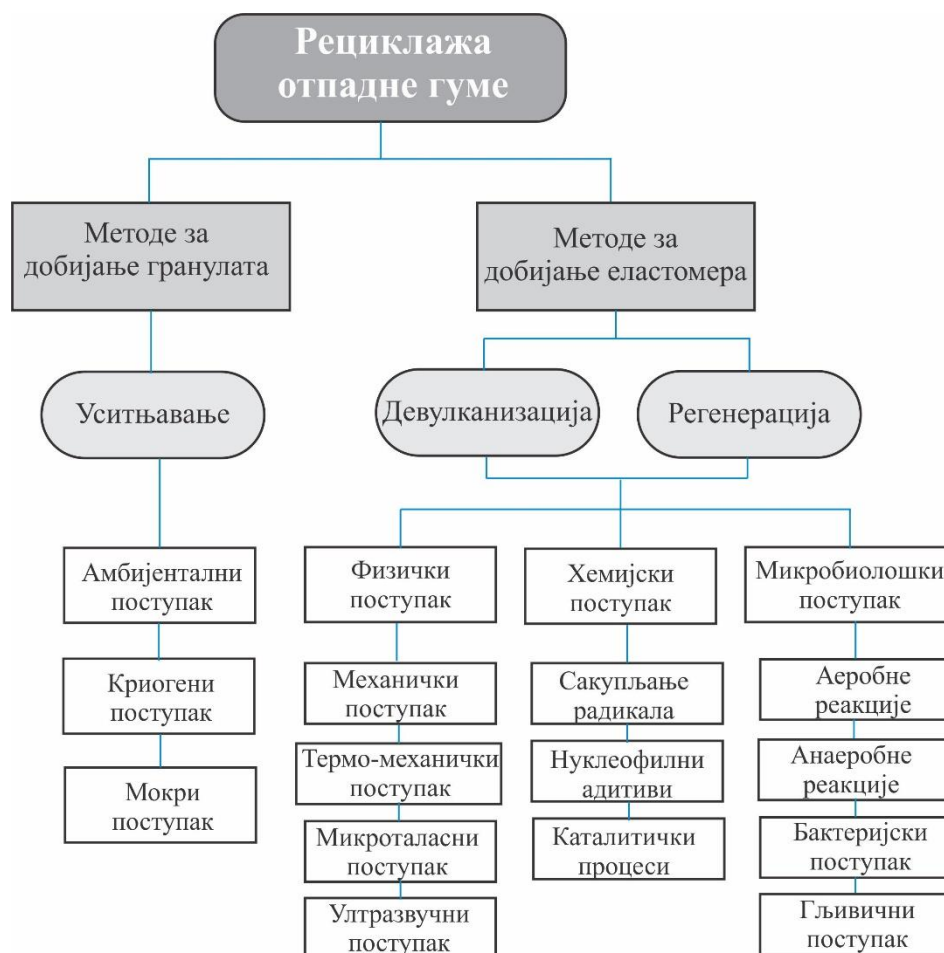
#### 2.4 Рециклажа производа од гуме

Сви третмани отпадних гума могу се класификовати у три основне категорије [23]:

- третмани којима се отпадна гума искоришћава за добијање сировина – различите методе рециклаже,
- третмани којима се отпадна гума искоришћава за добијање енергије и сировина – пиролиза,
- третмани којима се отпадна гума искоришћава за добијање енергије – инсинерација.

Када је у питању рециклажа отпадне гуме, до сада су у свету развијене различите методе које се могу поделити у две основне групе (слика 2.20) [22, 27]:

- методе рециклаже којима се добија гранулат (уситњавање)
- методе рециклаже којима се добија еластомер (девулканизација и регенерација).



Сл. 2.20 Подела третмана рециклаже отпадне гуме

Уситњавање је метода за добијање гранулата механичким поступком (сечењем, дробљењем, мљењем), при чему се добијају честице димензија и мање од 10  $\mu\text{m}$ .

Регенерација је метода за добијање еластомера при чему се механичким, хемијским или биолошким поступком раскидају С–С везе с циљем смањења молекулске масе и постизања пластичности.

Девулканизација је, такође метода за добијање еластомера, али при чему се механичким, хемијским или биолошким поступком раскидају S–S и S–C везе с циљем разарања умрежене структуре формиране приликом процеса вулканизације и постизања пластичности [23].

У даљем тексту детаљније ће бити објашњене методе рециклаже отпадне гуме којима се добија гранулат, с обзиром да је у овом истраживању коришћен гумени прах добијен уситњавањем.

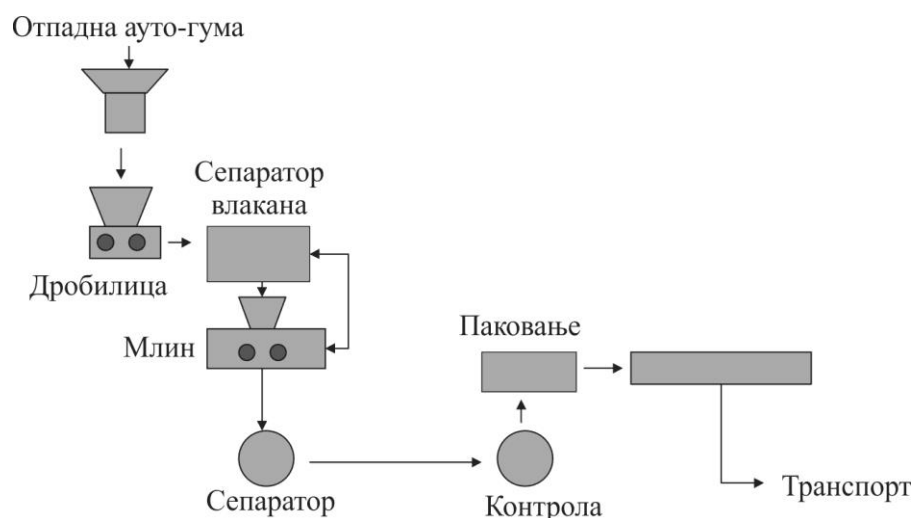
Због сличног састава гуме и конструкције производа (гума, платно и метални елементи), за добијање гранулата од отпадних ауто-гума, транспортних трака и гумених цева примењују се исте методе.

Поступак уситњавања отпадне гуме састоји се од неколико фаза:

- прва фаза, сечење на комаде димензија до 50 mm,
- друга фаза, дробљење са величином честица до 1 mm и
- трећа фаза, млевење са циљем даљег смањења величине честице и добијање гуменог праха димензије честица испод 1 mm.

#### 2.4.1 Методе уситњавања отпадне гуме амбијенталним поступком

Уситњавање отпадне гуме амбијенталним поступком се одвија на радној температури мањој од 100°C, чиме се обезбеђује хомогеност структуре и стабилност процеса. Радна температура се постиже унутрашњим трењем у дробилицама и млиновима. На слици 2.21 приказана је шема процеса уситњавања отпадне гуме амбијенталним поступком.



Сл. 2.21 Шема процеса уситњавања отпадне гуме амбијенталним поступком

Због разлике у величини челичног језгра код ауто-гума за теретна возила, аутобусе и пољопривредне машине (где челична жица има пречник и до 8 mm) ауто-гуме се



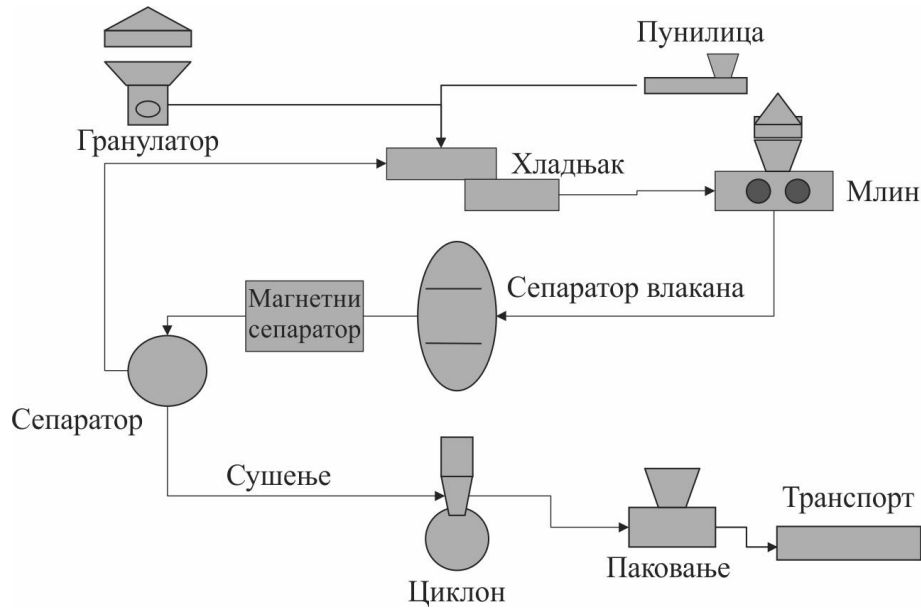


претходно морају сећи по дужини како би се челичне нити могле уклонити, а затим сећи на димензије до 50 mm. Тако припремљена отпадна гума се убацује у дробилицу са озубљеним ваљцима на вратилима која се okreћу у супротним смеровима и ситни на комаде попречног пресека од око 4x5 mm. Да би се постигла жељена величина комада поступак се некад мора понављати више пута. Затим се у дробилици са уздужним озубљењем на ваљцима који се okreћу у супротном смеру, врши дробљење на мање честице. Након овог процеса, помоћу магнетног сепаратора се одстрањују металне делови, а помоћу ваздушних сепаратора текстил и ситна прашина. Последња фаза уситњавања је фино млевање на тражену величину честице од 0,1 до 5 mm [24, 27].

Честице добијене овом методом обично имају ужу расподелу величина честица од методе уситњавања криогеним поступком, али имају сложенији морфологију и самим тим већу специфичну површину (слика 2.23а). Ова релативно сложена морфологија површине и већа специфична површина се сматрају одговорним за боље карактеристике везивања који се постижу се овако уситњеном честицом.

#### **2.4.2 Методе уситњавања отпадне гуме криогеним поступком**

Уситњавање отпадне гуме криогеним поступком одвија се на температурама и до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тј. на температури која је за неколико степени нижа од температуре прелаза у стакласто стање гуме. Услед хлађења гума постаје крта тако да долази до њеног кртог лома и лако се одваја од текстилних и металних делова. У првој фази отпадна гума се сече на веће комаде до 50 mm, а затим се хлади до одговарајуће температуре и дроби. Као медијум за хлађење се најчешће користи азот. Хлађење се може извести на неколико начина: директно на покретној траци, у екструдеру, у тунелу или у кади са течним азотом. Индиректно хлађење се врши преко измењивача топлоте. Течни азот може се убризгавати у млин пре и за време процеса дробљења. За даље уситњавање примењују се различите врсте млинова: ударни или млиновиса чекићима. Уситњавање честица гуме је проузроковано интеракцијом између самих честица гуме, као и услед контакта са различитим деловима опреме за дробљење. Пречник честица која се може постићи је од 400 до 600  $\mu\text{m}$ . На излазу из млина гранулат пролази кроз систем сита (сепарација) где се честице већих димензија поново враћају у процес дробљења, а остале честице се суше. Шема система за уситњавање отпадне гуме криогеним поступком приказан је на слици 2. 22 [24, 27].



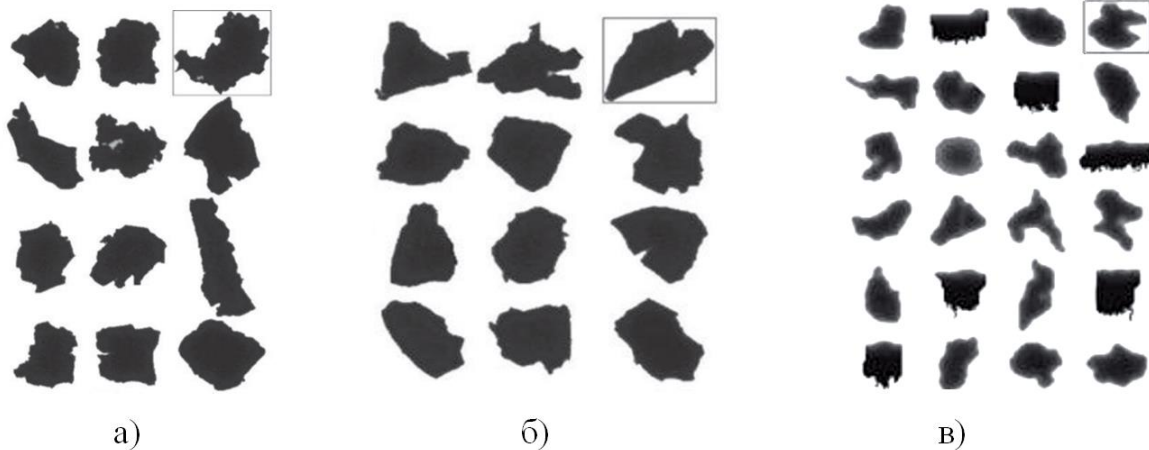
Сл. 2.22 Шема процеса уситњавања отпадне гуме криогеним поступком

Овом методом добија се прах веће чистоће и могу се добити честице мањих димензија, али које имају већи садржај влаге (12 – 15 %) (28). Честице добијене уситњавањем криогеним поступком (слика 2. 23б) имају релативно глатку површину и оштре ивице, а тиме и мању специфичну површину од честица произведених уситњавањем амбијенталним поступком. Оваква неразуђена површина утиче на то да честице имају мању специфичну површину. Честице добијене овом методом имају ширу расподелу величина честица. Криогеним поступком могу се уситњавати производи од гумекао и невулканизирана гума.

### 2.4.3 Методе уситњавања отпадне гуме мокрим поступком

Уситњавање отпадне гуме мокрим поступком се најчешће примењује за уситњавање отпадне гуме великих димензија, као што су аутогуме за теретна возила, аутобусе, пољопривредне и грађевинске машине. Методе уситњавања амбијенталним или криогеним поступком захтевају веома масивне млинове, који троше огромне количине енергије. Примена методе уситњавања отпадне гуме мокрим поступком искључује потребу примене прве фазе уситњавања – сечење на крупне комаде димензија до 50 mm. Ова метода подразумева третирање целих комада отпадне гуме воденим млазом под високим притиском преко 2.000 bara. Једна од главних предности ове методе је селективно одвајање честица гуме од метала и текстила [28].

Гумени прах добијен овом методом је високог степена чистоће, а добијају се честице мањих димензија и од 200  $\mu\text{m}$ . Овако добијене честице имају сложенију морфологију од честица добијених уситњавањем амбијенталним поступком, а самим тим и већу специфичну површину (слика 2.23в), што резултира бољим карактеристикама везивања који се постижу овако уситњеном честицом.





Сл. 2.23 Изглед честице добијен различитим поступцима уситњавања:

а) амбијенталним; б) криогеним; в) мокрим

До сада су продукти рециклаже отпадне гуме добијени уситњавањем нашли примену у различитим областима, што је приказано у табели 2.14 [5].

Табела 2.14 Примена продуката рециклаже отпадне гуме уситњавањем

Облик и величина честице	Метод прераде отпадне гуме	Примена
 300-50 mm	Комади добијени сечењем отпадних пнеуматика.	Лаке испуне за основе путева, насипи, дренаже, толотна изолација у путевима и зградама, звучне рампе итд.
 50-10 mm	Комади добијени сечењем отпадних пнеуматика.	Лаке испуне у грађевинарству, дренаже, изградња плочника, грађење и облагање депонија, потпорни стубови мостова итд.



Наставак табеле 2.14.

Облик и величина честице	Метод прераде отпадне гуме	Примена
 6,0-4,0 mm	Гумени гранулат добијен дробљењем	Заштитне баријере поред пута, пружни прелази, лежећи полицајци, дилатационе разделнице, подне плоче за изолацију итд.
 4,0-2,0mm	Гумени гранулат добијен дробљењем	Гумене еластичне подлоге, гумене подлоге против вибрација, антистрес подлоге за дечија игралишта, поклопци за канализацију итд.
 2,0-1,0 mm	Гумени гранулат добијен дробљењем	Спортске подлоге, замена за вештачку траву, облоге у стајама, лежећи полицајци, стубићи на аутопуту, стубићи за паркирање итд.
 1,0-0,01mm	Гумени прах добијен млевењем и просејавањем фракција	Ђоновии за обућу, заптивне плоче, гумена црева, амортизери, точкови за косилице, канте за смеће, колица, заптивне масе, дурупласти итд.



### 3 ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕ РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНОГ ПРАХА

За 170 година примене рециклираног гуменог праха испитивањем његовог утицаја на својства различитих материјала бавио се велики број истраживача. Велики број ових истраживања није публикован с обзиром да се значајна истраживања врше у комерцијалне сврхе са циљем уштеде у производњи разних типова производа. И поред дугогодишње примене још увек није пронађен производ у коме би се РГП користио у значајним количинама. Истражује се његова даља примена и усавршавање поступака за добијање регенерата и девулканизата [29, 30, 31]. Такође, испитује се и могућност синтеровања РГП под утицајем високе температуре и великог притиска [32, 33, 34]. Поред тога што се још увек испитује додавање РГП гуми, истовремено се испитује и могућност додавања у друге полимерне материјале (*PP*, *HDPE*, *LDPE*, *PET*, итд.) [35, 36, 37, 38], као и у различите грађевинске материјале (малтере, бетоне, асфалу, звучним баријерама, итд.) [39, 40, 41, 42]. Такође се истражује утицај на својства полимерних смола (*EP*, *PU*, итд.) [43, 44],

Међутим, највећи број истраживања врши се у испитивању примене РГП у различитим врстама гуме, јер су полимерне основе РГП и гуме најкомпатабилније. Досадашњим истраживањима утврђено је да са повећањем удела РГП (РГП добијен из ауто-гуме) долази до пада чврстоће и издужења, отпора према цепању, отпорности према хабању, док тврдоћа и модул еластичности расту јер не долази до стварања хемијских веза између честица РГП и каучука/еластомера. У новије време се, у циљу повећања удела РГП приступа модификацији површинског слоја честице и саме честице РГП. Модификација се врши са циљем остављања хемијске везе између честица РГП и каучука.



### 3.1 Примена немодификованог рециклираног гуменог праха у гуми

Први покушаји примене рециклираног гуменог праха потичу из 1853. године када је *Charles Goodyear*, дошао на идеју да у гумену смешу дода рециклирани гумени прах, што је и патентирао исте године [45] и то уједно представља почетак процеса који данас познајемо као рециклажно млевење отпадне гуме [46]. Убрзо затим, већ 1858. године *Hall* долази до открића да млевена вулканизирана гума на бази природног каучука која је третирана воденом паром у трајању од 48 сати, може поново да се користи. Међутим, недостатак овог поступка је у томе што је сировина за рециклажу била обућа која је садржала значајну количину текстила [22].

У периоду до открића радијалног пнеуматика шездесетих година 19. века врло мало је истраживано у погледу примене РГП. Разлог лежи у томе што се од отпадне ауто-гуме производио регенерат који је служио за израду дијагоналне ауто-гуме (за гумирање текстилних делова). Значајан помак представља развој првих система за млевење отпадних ауто-гума [47]. Убрзо затим почела су прва испитивања која су се бавила додавањем ултра финог рециклираног гуменог праха добијеног амбијенталним млевењем пречника мањег од 0,03 mm у NR и SBR-гуму [48]. Вршена су испитивања до 50 phr и утврђено да је утицај гуменог праха занемарљив на својства смеша. Убрзо затим, [49] РГП добијен механичким поступком додаје се у NR-гуму и прати промена својстава. На основу овог истраживања закључено је да са повећањем удела РГП опадају својства гуме.

Истраживачи предвођени *Burford* по први пут уводе и испитивање честице РГП на електронском микроскопу [50]. Уз помоћ фотографија са *SEM* уочавају да је површина зрна код криогеног поступка глатка и са равним ивицама и такође показује да су ивице равне на местима лома. За разлику од криогеног поступка, код амбијенталног поступка зрна су храпава и жбунастог облика. Мерењем су утврдили да су честице код криогеног поступка униформе и мање од 100 μm, док код амбијенталног поступка су веће од 250 μm и различитих облика.

Убрзо затим *Burford* и остали [51] почињу са испитивањем утицаја рециклираног гуменог праха, код непуњене и пуњене BR-гуме, који је добијен амбијенталним поступком, величине честица 1 mm са уделом од 5 до 25 phr, при чему су уочили да при уделу од 5 phr не долази ни до каквих промена затезних својстава. Такође су уочили да



при 25 phr РГП долази до значајног пада затезних својства. Испитивањем структуре материјала помоћу *SEM* уочили су да са порастом удела РГП долази до повећања хрупавости на месту лома као последице кидања зрна рециклираног материјала из матрице каучука.

Испитиван је такође и утицај РГП добијеног брушењем гумених узорака, величине честице од 400 до 500 $\mu$ m, на својства NR-гуме, при чему је утврђено да се честице РГП лепо диспергују у каучуковој матрици, али да долази до пада механичких својстава са повећањем удела РГП [52].

Истраживан је утицај РГП добијеног криогеним поступком при уделу од 30 до 60 phr на својства NR-гуме. Уочено је да са порастом удела РГП долази до пада свих својстава NR-гуме[53].

Како отпадна гума још увек није била препозната као сировина за рециклирање *Fesus* је експериментисао са S BR-гумом, у коју је додавао РГП добијен механичким уситњавањем гумених узорака на бази каучука посебне намене NBR и EPDM, који имају најширу примену. Утврдио је да је оптимални удео 30 phr за EPDM-а а да не дође до значајнијег пада механичких својстава [54].

Група аутора испитивала је утицај РГП од *polynorbornen* гуме на својства NR и BR-гума при максимално уделу од 40 phr РГП. Утврдили су да када је у питању BR-гума која има релативно слабе механичке карактеристике, повећање удела није имало утицаја на затезна својства, за разлику од NR-гуме где је дошло до значајног пада затезних својстава [55].

*Klupper* и сарадници [56] су спровели опсежно истраживање о могућности примене рециклираног гуменог праха добијеног од газећег слоја камионске ауто-гуме код NR и NBR-гума. Испитивали су разне механичке карактеристике (затезна својства, статичку и динамичку отпорност према цепању, компресиони сет, бубрење). Код CR-гуме додавали су РГП добијен амбијенталним поступком и уочили су да са порастом удела упадљиво опада прекидна чврстоћа док се прекидно издужење незнатно мења. Код удела од 60 phr сила при цепању се врло мало повећала док се отпорност према деформисању сабијањем значајно поправила. Код NR-гуме која је припремљена на исти начин као и CR-гума, уочен је приметан пад затезне чврстоће са порастом удела рециклираног гумено праха док прекидно издужење незнатно опада. Код 60 phr РГП долази до



значајног пада отпорности на цепање и отпорности према деформацији сабијањем. Код NBR-гуме уочен је сличан пад својстава: затезне чврстоће и прекидног издужења као и код NR-гуме. Међутим, код удела од 60 phr РГП долази до упадљивог пада отпорности на сабијање и отпорности на цепање.

*Baranwal* и сарадници испитивали су утицај РГП који је добијен механичким путем из CR-гуме која служи за црева у истоименој смеси. Они су утврдили да се време почетка вулканизације смањује са повећањем удела рециклираног гумено праха. Такође су утврдили да са додавањем РГП опадају следећа својства: прекидна чврстоћа, прекидно издужење и динамичка својства која. Такође су утврдили да повећања удела није имало никаквог утицаја на тврдоћу, отпорност према сабијању, отпорност према старењу и понашању на ниским температурама [57].

Испитивањем својстава SBR и EPDM-гуме у коју је додаван РГП добијен криогеним поступком од матичних смеша, при различитим уделима и величинама честица, утврђено је да долази до значајног пада свих својстава, а посебно затезне чврстоће и прекидног издужења при величини честице од 0,42 mm и уделу од 15 phr. Величина честице до 0,42 mm нема битнији утицај на промену својстава. Исти случај био и код EPDM-гуме, али је удео овога пута износио 20 phr [58].

Године 1999. *Jin Kuk Kim* је вршио испитивање жилавости лома NR, NBR, SBR, NR/NBR и NR/SBR-гума пуњених рециклираним гуменим прахом, пречника честица од 1 до 2 mm, добијеног амбијенталним поступком од газећег слоја ауто-гуме за теретна возила. Поред жилавости лома проучавао је промену затезна чврстоће, прекидног издужења и отпорности на цепање. Као и већ горе поменути аутори уочио је да долази до пада свих својстава. Такође је, испитивајући лом под оптичким микроскопом, уочио да почетак лома епрувете настаје око честица рециклираног гуменог праха [59].

Група истраживача на челу са *Naskar* такође су испитивали утицај величине честица и удела на својства гуме. Они су у NR-гуму додали РГП добијен амбијенталним поступком из отпадне ауто-гуме. Утврдили су да са смањењем величине честице, са 300  $\mu\text{m}$  на 150  $\mu\text{m}$ , при истом уделу рециклираног гуменог праха, долази до мањег пада испитиваних својстава [60].

*Jacob P. Ceni* са различитим ауторима је у радовима испитивао понашање гуме са различитим типовима РГП [61, 62, 63]. Употребљавао је гумени прах који је добијен од





матичне NR и EPDM-гуме амбијенталним, криогеним и абразивним поступком. У оквиру својих истраживања мењао је величину честице као и удео рециклираног гуменог праха. Код примене рециклираног праха на бази EPDM у EPDM-гуми, рециклирани прах је добијен амбијенталним поступком млевења при величини честице мање од 50  $\mu\text{m}$ , уочио је да се сва својства: затезна чврстоћа, прекидно издужење, отпорност према цепању и хистерезис расту. Тврдоћа као и трајна деформација при издужењу од 100 % остају константна, док отпорност при хабању незнатно опада. Такође су рађена и морфолошка испитивања на SEM. Код примене рециклиране честице од гуме на бази NR, која је добијена амбијенталним поступком, величина честице при уделу од 50 phr није имала значајан утицај на статичка својства. Према *Jacob* величина честице не утиче битно ни на динамичка својства већ је са порастом удела дошло до наглог пада својства. И у овом случају су рађена и морфолошка испитивања на SEM. У случају SBR-гуме каучука без обзира на величину честице долази до значајног пада испитиваних својстава при уделу од 50 phr EPDM рециклираног праха. Такође су рађена и морфолошка испитивања за све типове гума на SEM [64].

*Ghosh* са сарадницима је испитивао примену рециклираног гуменог праха добијеног абразијом испитне гуме. У гуму на бази силикона је додавао 30 односно 60 phr и пратио промену својстава. Утврдио је да већ са уделом од 30 phr својства гуме значајно опадају. У случају гуме на бази флуор-каучука утврђено је да при максималном уделу РГП долази до врло мале промене својстава [65].

Група истраживача на челу са *Ismail* испитивала је утицај амбијенталног РГП на својства NR-гуме и поредила његов утицај са утицајем калцијум-карбоната и чађи при уделу до 50 phr. Утврдили су да са додавањем РГП долази до скраћења времена почетка и краја вулканизације. Утврдили су да са повећањем удела до 10 phr долази до пораста затезне чврстоће, док са даљи порастом удела РГП долази до пада овог својства. Такође су утврдили да повећање удела РГП има слаб утицај на следећа својства: тврдоћу, модул при издужењу од 100 и 200%, прекидно издужење и одбојну еластичност. Закључили су и то да се РГП може користити као јефтинија замена од калцијум-карбоната [66]. *Ismail* је у својим даљим истраживањима вршио испитивање различитог удела РГП, при константној величини честице од 250 до 500  $\mu\text{m}$ , на својства NP-гуме. Такође је испитивао, и утицај РГП на својства смесе и структуру узорака. Закључио је да са порастом удела долази до пада затезне чврстоће и прекидног издужења али и до



повећања модула и тврдоће. Закључио је и да са повећањем удела РГП долази до повећања брзине и скраћивања времена вулканизације [67, 68]. Своја даља истраживања је усмерио ка замени удела чађи уделом РГП и испитивању утицаја на својства NR-гуме. Утврдио је да са смањењем удела чађи и порастуом удела РГП долази до пада затезних својстава (затезне чврстоће и прекидног издужења) и отпорности на замарање, али и пораста модула при издужењу од 100 и 300%. Испитивањем структуре лома утврдио је да са порастом удела РГП површина лома је све храпавија за разлику од површине узорка без РГП која је равна и глатка [69].

Испитивање утицаја амбијенталног РГП на својства NR и SBR-гуме испитивао је *Seung-Cheol Han* са сарадницима [70]. У гуму су додавали 10 phr, 30 phr и 50 phr РГП различите гранулације, и пратили промену својстава, али и утицај РГП на структуру лома. Утврдили су да са повећањем удела РГП и величине честице од 600  $\mu\text{m}$  долази до значајног пада испитиваних затезних својстава, као и отпорности на замарање. Утврђено је да повећање удела има врло мали утицај на тврдоћу гуме. Такође су утврдили да пораст пукотине опада са смањењем величине честице али да значајно расте са порастом удела РГП.

*Shuyan Li* са сарадницима [71] је испитивао утицај удела до 50 phr, амбијенталног РГП на својства NR-гуме. Истраживао је утицај РГП на реолошка и механичка својства гуме при чему је закључио да затезна својства, отпорност према цепању и отпорност према хабању опадају са порастом удела РГП. Такође је закључио да вредности обртних момената при мешању опадају а да се време вулканизације скраћује.

*Ravichandran* са сарадницима је вршио испитивање утицаја РГП и отпадне коже на својства непуњене NR -гуме, при уделу од 100 до 600 phr. Закључак је био да са додавањем РГП долази до побољшања својстава гуме у односу на примену отпадне коже као пунила. Испитивањем на електронском микроскопу, утврдио је да са порастом удела РГП долази до повећања храпавости и разубуђености површине лома [72].

*Kim* са сарадницима је испитивао утицај удела РГП, добијеног хладним поступком, и величине честица на својства NR -гуме. Утврдио је да са порастом удела до 50 phr РГП долази да пада затезних својстава и отпорности према цепању, док пораст удела има незнатан утицај на тврдоћу гуме. Утврдио је и да са порастом удела долази до повећања брзине вулканизације и скраћивања времена почетка и краја вулканизације [73].



*Baeta* и сарадници су испитивали утицај примене РГП, на бази SBR-гуме добијеног из отпада при производњи обуће, у NBR-гуми. Они су утврдили да са повећањем удела РГП долази до побољшања механичких својстава гуме, као и да постоји економска оправданост примене РГП [74].

Могућност примене РГП различите гранулације, добијеног из NBR-гуме, код SBR-гуме испитивала је група истраживача начелу са *Zulkepli*. Дошли су до закључка да са повећањем удела РГП долази до пада својстава. Такође су утврдили да са смањењем величине пречника честица при истом уделу РГП долази до побољшања својстава гуме [75].

Ђекић са сарадником је испитивао утицај различитог удела РГП на својства NR - гуме. Они су тврдили да са повећањем удела до 5 phr долази до повећања тврдоће, побољшања отпорности на хабање, отпорности према сабијању и трајном издужењу. Такође су утврдили да са даљим порастом удела РГП долази до значајног пада свих својстава. Такође су утврдили да динамички модул еластичности као и степен пригушења расте са порастом удела РГП [76]. Ђекић са сарадницима испитивао је и утицај удела амбијенталног РГП на својства NR/SBR-гуме. Утврдио је да са повећањем удела до 40 phr РГП долази до пада тврдоће, затезних својстава и угаоног цепања, али и до побољшања отпорности на хабање и отпорности према дејству деформација (сабијањем и истезањем). Испитивао је изглед микроструктуре на оптичком микроскопу и утврдио да са повећањем удела долази до повећања храпавости преломне површине [77].

*Formela* са сарадницима је испитивао утицај удела РГП на својства BR-гуме. Вршена је промена удела РГП од 10 до 90 phr и праћена је промена својстава и утицаја удела РГП на облик и структуру лома. Утврђено је да са порастом удела РГП долази до пада затезних својстава и одбојне еластичности, док повећање удела РГП има незнатан утицај на промену тврдоће гуме [78].

### **3.2 Примена модификованог рециклираног гуменог праха у гуми**

Неки истраживачи су уочили да се са модификацијом честица РГП добијају боља својства гуме. Они су развијали методе модификације, а једна од њих јесте и примена



*Surcrums*. Додавањем овог средства РГП добијеног од газећег слоја теретне ауто-гуме постиже се повећање затезне чврстоће на 12 МПа, и прекидног издужења на 200% [79].

Модификацију РГП хлором радила је група истраживача и утврдила да се његовом применом у SBR-гуми за производњу обуће добијају задовољавајућа механичка својства и цене производа [80].

Група аутора је проучавала модификацију честице РГП и његову примену код NR и NBR-гуме. Модификација је вршена посебном хемикалијом под називом *Struktol*, уочено је да се својства побољшавају код NBR-гуме док код NR-гуме није дошло до никаквог појачања у односу на немодификовани РГП [81].

Могућност модификације РГП добијеног криогеним поступком и његове применом код SBR-гуме испитивали су *Amash* и сарадници. Они су вршили калемљење честица РГП, маленским анхидридом и силан-куплунг агентом, на полимерне ланце SBR-гуме. Утврдили су да са повећањем удела до 30 phr не долази до битног пада својстава гуме [82].

Група аутора предвођена *Ismail* вршила је модификацију РГП двокомпонентним омекшивачем и пратила његов утицај на својства и структуру NR-гуме. Они су утврдили да са порастом удела средства за модификацију долази до побољшања својства гуме [83].

РГП који је модификован, са 30% водоник-пероксидом и азотном киселином различите концентрације (10%, 20%, 30%, и 60%), додаван је у NR-гуму и праћене су промене својстава за различите модификације у односу на немодификовани РГП. Утврђено је да се овим поступком побољшавају затезна својства и отпорност према старењу, и да најбољи резултат даје 20% азотна киселина као и 30% водоник-пероксид [84].

Могућност примене *m-phenyl bismaleimide* (BMI) и UV зрачења као средства за модификацију РГП код NR-гуме испитивала је група истраживача [85]. Утврдили су да се додавањем 5 phr BMI на укупну количину гуме и РГП, добија најбољи ефекат. У случајевима када је неопходно веће прекидно издужење у поступак модификације треба укључити и UV зрачење.

Група истраживача испитивала је утицај модификације применом *trimethylolpropane triacrylate* (TMPTA) и електричног пражњења на својства SBR-гуме.



Упоредјивали су утицај немодификовано и модификованог РГП при уделу од 5 до 50 phr на својства гуме. Утврдили су да са порастом удела оба типа РГП долази да пада затезних својстава, повећања неправилности структуре узорка и повећања тврдоће [86].

Истраживачи начелу са *Li* вршили су модификацију РГП применом *Thiobacillus ferrooxidans*. Утврдили су да применом ове методе долази до раскидања сумпорних веза на површини гуменог праха. Анализиран је утицај овако модификованог РГП на статичка и динамичка својства као и на структуру NR-гуме. Утврдили су да овим поступком модификације долази да побољшања статичких и динамичких својства NR-гуме [87].

Увидом у досадашња истраживања у овој области у свету и код нас закључено је да утицај модификованог РГП на својства гуме, и његове примене у разним типовима гуме није довољно истражен, па је то управо представљало мотив за истраживање у оквиру ове докторске дисертације.

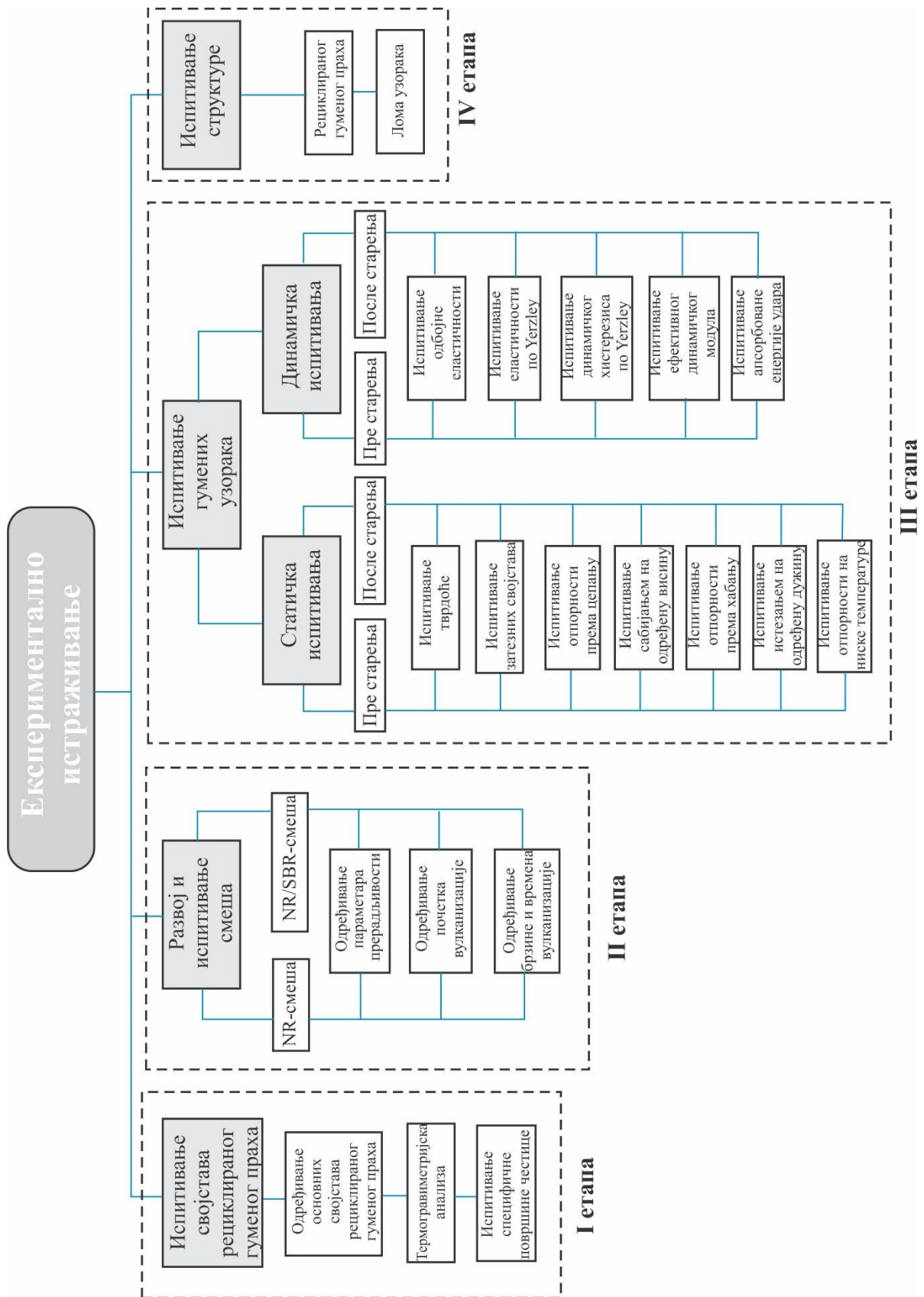


## 4 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

Познавање својстава материјала (физичких, механичких и хемијских) је важно из неколико разлога. Пре свега, због технолошког поступка израде производа, контроле квалитета, разумевања структурних промена које се дешавају за време његовог испитивања и употребе, као и анализе отказа. Испитавање гуме и производа од гуме је сложено и може се посматрати са два становишта. Прво, са становишта механичких својстава и других својстава гуме, а друго, са становишта понашања гуме и производа од гуме у условима коришћења, при чему испитивања треба да буду што сличнија наведеним условима.

Већина метода које се користе за испитивање гуме и производа од гуме су стандардизоване међународним и домаћим стандардима (EN, BS, ISO, ASTM и SRPS). У овим стандардима прописане су методе кондиционирања узорака пре испитивања, израда епрувета, поступак испитивања и на крају обрада резултата.

Како би се унапредили стари и развили нови производи од гуме неопходно је извршити анализу понашања производа у условима експлоатације, испитати утицај ингредијената, режима умешавања, параметара вулканизације, и других утицајних параметара на својства гумених производа. Сва ова испитивања треба да обезбеде да се израде производи одговарајућих физичко-хемијско-механичких својстава. Експериментално истраживање које је изведено у овој докторској дисертацији одвијало се у неколико етапа. Етапе експерименталног истраживања шематски су приказане на слици 4. 1.



Сл. 4.1 Шема експерименталног истраживања



Прву етапу истраживања представљало је испитивање рециклираног гуменог праха: хемијски састав, изглед, облик, специфична површина, структура и величина честица.

Друга етапа истраживања је обухватила методе модификације РГП и израду смеша на основу својстава РГП. У оквиру ове етапе такође су дефинисани и режими умешавања смеша. Испитивана су реолошка својства смеша: почетак, време и брзина вулканизације.

Следећу етапу истраживања представљало је испитивање механичких својстава гуме (статичких и динамичких).

Испитивана су следећа статичка својства гуме [88]:

- основна својства:
  - тврдоћа,
  - затезна својства,
  - трајне деформације при одређеном константном издужењу и
  - трајне деформације сабијањем на одређену висину
- додатна својства:
  - отпорност према цепању,
  - отпорност према хабању,
  - испитивање вештачким старењем,
  - испитивање постојаности гуме при ниским температурама.

Испитивана су следећа динамичка својства:

- одбојна еластичност,
- еластичност по Yertzley,
- динамички хистерезис по Yertzley,
- ефективни динамички модул и
- апсорбована енергија удара.

Последњу етапу истраживања представљало је испитивање микроструктуре прекида епрувета испитиваних затезањем.





## 4.1 Испитивање својства рециклираног гуменог праха

Познавање својстава РГП је веома битно, јер она директно утичу на својства гуме у коју се додаје.

За потребе овог истраживања разматрана су следећа својства РГП:

- порекло и поступак добијања,
- величина и облик честице,
- хемијски састав и врсте каучука (еластомера),
- систем вулканзације и
- специфична површина честице.

Обим испитивања је шири од обима прописаног стандардом ASTM D5603 [89], јер њиме нису обухваћена својства, као што су: поступак добијања, порекло, хемијски састав, специфична површина и облик честице итд. која већина аутора сматра значајним за дефинисање РГП [91].

### 4.1.1 Основна својства рециклираног гуменог праха

Према подацима компаније „ECO-RECYCLING“ из Новог Сада од које је набављен, РГП је добијен амбијенталним поступком из газећег слоја теретне ауто-гуме величине честица од 0,500 до 0,01 mm не старијег од годину дана. Количина присутних металних и синтетичких влакана у РГП је мања од 0,5%.

### 4.1.2 Одређивање састава рециклираног гуменог праха применом термогравиметријске анализе

Термогравиметријска анализа (ТГА) спада у посебну групу термичких анализа којом се одређује састав и удео компонената у неком материјалу. ТГА узорака од гуме најчешће се користи за одређивање саставних компонената гуме као што су: количина и врста уља, врста каучука (еластомера), количина и врста чађи, као и врста и удео неорганских пунила [90].

Принцип рада ТГА се заснива на мерењу промене масе узорка са порастом температуре. До промене масе узорка може доћи услед хемијске реакције тј. услед делимичног распадања које узрокује пораст температуре или услед физичких промена као што је испаравање или сублимација [91, 92]

Опис мерења: Термогравиметријска анализа РГП у овом истраживању изведена је у лабораторију *Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki*, у складу са стандардом ASTM D6370, на уређају (*TGA Q50, TA instruments*) који је приказан на слици 4.2 [93].



Сл. 4.2 Уређај за термогравиметријску анализу

Узорак РГП чија је маса претходно измерена постављен је у уређај, а затим је уређај убачен азот брзином од  $60 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Температура у уређају се одржавала на  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  у трајању од 2 минута, како би се уређај калибрисао. Након тога је узорак загреван до  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  (температура испод границе распада полимера) брзином од  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  у минути и та температура је одржавана 15 минута, како би испарило уље. Температура је даље повећана до  $625 \text{ }^\circ\text{C}$  брзином од  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  у минути, да би се извршило пиролитичко разлагање полимера. Када је постигнута ова температура, искључен је довод азота и почело је убацивање кисеоника брзином од  $60 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Са доводом кисеоника, истовремено је започето и загревање до температуре од  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  брзином од  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  у минути с циљем издвајања пунила. Када је постигнута одговарајућа температура, започето је хлађење до собне температуре. Као резултат континуалног мерења масе узорка, добијена је термогравиметријска крива са које се читавају одговарајуће компоненте.

### 4.1.3 Одређивање специфичне површине честице рециклираног гуменог праха

Специфична површина чврстог материјала је површина по јединици масе ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) и може се одредити на више начина. Класичном методом одређује се капацитет монослоја адсорбованих молекула познате површине на површини пунила, а специфична површина се израчунава на основу једначина 4. 1:

$$S = N_0 \cdot V_m \cdot A_m \dots \dots \dots (4.1)$$

где је:  $S$ -специфична површина ( $\text{m}^2/\text{g}$ );  $V_m$ – експериментална вредност монослоја апсорбента ( $\text{mol/g}$ );  $A_m$ -површина попречног пресека једног молекула апсорбента ( $\text{m}^2$ );  $N_0$  – Авогадров број.

**Опис мерења:** Испитивање специфичне површине честица изведено је у лабораторију *Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki*, према стандарду ISO DP 4652-2, 2 по *Brunauer, Emmettu* и *Teller (BET)* метода) из адсорпционо-десорпционих изотерми течног азота на уређају приказаном на слици 4. 3, (*Surfer, Thermo Scientific, USA*) [94].



Сл. 4.3 Уређај за одређивање специфичне површине честице

Криве изотерме адсорпције трансформишу се у *BET*-координате. Како је површина молекума азота  $0,162 \text{ nm}^2$ , прорачун специфичне површине искључује микропоре у које немогу да продру молекули азота. Капацитет монослоја је дефинисан као количина адсорбованог гаса потребног за потпуно попуњавање једног слоја молекула на површини узорка.



У подручју релативног притиска апсорбата од 0,05 до 0,3 МРа графички приказ једначине  $\frac{p}{v \cdot (p_0 - p)} = f \cdot \frac{p}{p_0}$  показује правац чији одсечак на у оси износи  $\frac{1}{v_m \cdot c}$ , док је нагиб праве  $\frac{c-1}{v_m \cdot c}$ . На основу ових подата израчунава се капацитет монослоја  $V_m$ . Одакле се специфична површина израчунавана на основу једначине 4.2:

$$S = \frac{V_m}{m} \cdot N_0 \cdot A_m \cdot 10^{-20} \dots \dots \dots (4. 2)$$

где је: S- специфична површина ( $m^2/g$ );  $V_m$  - експериментална вредност монослоја абсорбента ( $mol/g$ );  $A_m$  - површина попречног пресека једног молекула апсорбента  $N_2$  ( $m^2$ );  $N_0$  – Авогадров број;  $m$  – маса узорка (g)

## 4.2 Припрема узорака

Својства производа од гуме могу се постићи различитим комбинацијама каучука и ингредијената. Одговарајућим избором састава смеше (каучука, система за вулканизацију и пунила) добија се оптимални производ. Поред одговарајуће рецептуре врло важно је познавање режима и времена умешавања, као и параметара вулканизације. У зависности од момента додавања пунила смеси, зависе својства гуме тј. својства која ће доћи до изражаја. Параметри прерадљивости и вулканизације дају податке о дужини трајања поступка вулканизације, при задатој температури, при чему се одбијају најбоља физичко-механичко-хемијска својства гуме. Такође, на основу њих се може утврдити да ли су у смешу додати сви ингредијенти смеше.

### 4.2.1 Рецептуре и израда смеша

Приликом развоја смеша мора се строго водити рачуна о компатибилности свих делова смеше. Зато је приликом развоја смеше у коју ће се одавати РГП, врло важно познавање хемијског састав РГП. Како РГП садржи NR и SBR каучук, при чему је удео NR каучука већи од удела SBR каучука, за потребе ове докторске дисертације развијене су две основне смеше: прва, на бази NR каучука и друга, која представља комбинацију NR и SBR каучука (у односу 80:20). Такође је вођено рачуна и о томе даје NR каучук најмасовније употребљаван каучук, као и да од укупне количине употребљеног синтетичког каучука у светској производњи, 60% отпада на SBR каучук, тако да се развијене смеше могу користити у комерцијалне сврхе. У овом поглављу биће приказане рецептуре смеша без и са различитим уделима немодификованог рециклираног гуменог



праха (НМГП) и модификованог рециклираног гуменог праха (МГП) (3 phr, 5 phr, 10 phr, 20 phr, 30 phr, 50 phr), режими умешавања и параметри вулканизације. Такође ће бити описани поступци модификације РГП.

#### 4.2.1.1 Смеша на бази природног каучука са немодификованим гуменим прахом

ТГА анализом је утврђено да честице РГП садрже NR и SBR каучук, и сумпор. Просејавањем, РГП честице су сведене на опсег од 0,5 до 0,25 mm, с обзиром да је минимални зазор двоваљка на коме је вршена модификација честице и мешање смеше, 0,2mm.

На основу својстава НМГП дефинисана су два типа гума (NR и NR/SBR) код којих је истраживан утицај рециклираног гуменог праха при уделу од 3 phr, 5 phr, 10 phr, 20 phr, 30 phr и 50 phr. За испитивање утицаја РГП на својства и структуру NR-гуме одабрана је стандардна рецептура за умешавање и испитивање црног пунила (чађи) код NR -гуме у коју су додавани различити удели РГП [95].

Како у литератури нема прецизних података о режиму мешања РГП, а у циљу испитивања утицаја редоследа мешања на својства смеше, израђено је пет типова смеша. Смеша А (нула смеша) без РГП и четири смеше (Б, Ц, Д и Е смеша) код којих је РГП додат у различитом моментумешања, при истом уделу од 20 phr. Рецептуре ових смеша приказане су у табели 4. 1.

Табела 4.1 Рецептуре смеша при различитим режимима умешавања

Сировине	Ознака смеше и гуме		
	А (phr)	Б, Ц, Д (phr)	Е (phr)
NR	100	100	100
ZnO	5	5	5
Стеарин	2	2	2
N330	40	40	40
CBS	1	1	1
S	1,75	1,75	1,75
НМГП	0	20	20
Диспергатор DS			0,3

Код смеше Б, НМГП је додат после чађи, код смеше Ц, НМГП је додат после  $ZnO$  и стеарина, док је код смеше Д, НМГП додат после мастицирања каучука. И на крају код смеше Е, додат је заједно са диспергатором након поступка мастицирања и израде траке.

Мешање смеша извршено је на двоваљку следећих техничких карактеристика: димензије ваљака  $230 \times 500$  mm, броја обртаја  $17 \text{ min}^{-1}$  и  $20 \text{ min}^{-1}$ , минималног зазора 0,2 mm и снаге мотора 13,5 kW приказаног на слици 4. 4



Сл. 4.4 Двоваљак за умешавање смеша

Мешање смеша извршено је према стандарду SRPS.G.C1.072:1984 [96]. Прво је мешана А смеша. Мешање смеше почело је мастицирањем каучука. Исечени комади каучука, величине  $50 \times 50 \times 50$  mm пропуштени се два пута кроз двоваљак при зазору од 0,3 mm. Затим је зазор између ваљака повећан на 1,5 mm и формирана је трака. Када је формирана глатка и равна трака зазор је повећан на 1,9 mm. Поступак мастицирања и формирања траке трајао је четири минута, након чега суравномерно додати  $ZnO$  и стеарин при мешању на ваљцима. Овај поступак је трајао три минута. Затим је додата чађ, равномерно целом дужином ваљака: када је додата једна половина чађи, зазор је повећан на 2,2 mm и додата преостала количина чађи, која је мешана док није добијена равна и глатка трака. Ова операција трајала је 10 минута. Даље су додати убрзивач и сумпор (ова операција трајала је три минута). Након овог поступка, смеша је скинута са двоваљка и зазор је смањен на 0,8 mm и настављено је пропуштање смеше кроз ваљке у трајању од три минута. Након истека трећег минута, зазор је повећан на 3,5 mm и извршено је извлачење смеше. Укупно време мешања износило је 24 минута при константној температури ваљака од  $70^\circ\text{C}$ .

Смеша Б мешана је по претходно описаном поступку, осим што је НМГП додат после чађи и смеша је тако мешана четири минута. Након тога су додати убрзивач и



сумпор и поновљен је поступак као и код смеше А. Укупно време мешања износило је 28 минута.

Смеша Ц мешана је такође по истом принципу, али је НМГП додат након ZnO и стеарина. Након додавања НМГП, смеша је мешана четири минута и настављено је даље мешање сировина као и код смеше А. Укупно време умешавања износило је 28 минута.

При мешању смеше Д, НМГП је додат након поступка мастицирања и израде траке. Време мешања НМГП трајало је четири минута. Мешање осталих сировина вршено је као и код претходно описаних смеша. Укупно време мешања износило је 28 минута.

Смеша Е је мешана тако што је НМГП заједно са диспергатором DS додат након поступка мастицирања и израде траке. Овај поступак мешања је трајао око 10 минута. Мешање осталих сировина вршено је по устаљеној процедури, и укупно време мешања износило је 34 минута.

Све смеше за потребе ове докторске дисертације након умешавања остављане су да „одмарају“ 24 часа на собној температури, након чега су из њих вулканизирани узорци и епрувете.

Када је установљен оптимални режим умешавања (на основу испитивања тврдоће, затезне чврстоће и отпорности према цепњу), смеша Ц, израђене су смеше код којих је мењан удео НМГП (3 phr, 5 phr, 10 phr, 20 phr, 30 phr, 50 phr). Рецептуре ових смеша приказане су у табели 4.2.

Табела 4.2 Рецептуре смеша са различитим уделом НМГП

Назив смеше и гуме							
Сировине	А (phr)	3НМГП (phr)	5 НМГП (phr)	10НМГП (phr)	20НМГП (phr)	30НМГП (phr)	50НМГП (phr)
<b>NR</b>	100	100	100	100	100	100	100
<b>ZnO</b>	5	5	5	5	5	5	5
<b>Стеарин</b>	2	2	2	2	2	2	2
<b>N330</b>	40	40	40	40	40	40	40
<b>CBS</b>	1	1	1	1	1	1	1
<b>S</b>	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
<b>РГП</b>	0	3	5	10	20	30	50



#### 4.2.1.2 Смеша на бази природног и синтетичког каучука са немодификованим гуменим прахом

Како РГП у себи садржи већи проценат NR у односу на SBR, израђена је и смеша која у себи садржи 80 phr NR-каучука и 20 phr SBR-каучука. Рецептūra смеше без РГП је приказана у табели 4.3 и носи ознаку А1.

Табела 4.3 Рецептуре NR/SBR смеше са различитим уделом НМГП

Назив смеше и гуме			
Сировине	A1 (phr)	20/1 НМГП (phr)	30/1 НМГП (phr)
NR	80	80	80
SBR	20	20	20
ZnO	5	5	5
Стеарин	2	2	2
N330	40	40	40
CBS	1	1	1
S	1,75	1,75	1,75
РГП	0	20	30

Поступак мешања смеше А1 је идентичан поступку мешања смеше А, само што је прво мастициран NR-каучук, па је онда додат SBR-каучук. За потребе овог истраживања у NR/SBR смеси вариран је удео НМГП (20 phr и 30 phr) који је додаван у смешу после чађи. Рецептуре ових смеша приказане су у табели 4.3.

#### 4.2.1.3 Смеша на бази природног каучука са модификованим гуменим прахом

Поступак израде смеша са МГП заснован је на примени предсмеше. Предсмеша се добија мешањемдела каучука са одређеним ингредијентима, када технологија мешања недозвољава истовремено мешање свих ингредијената. МГП је одмах након модификације додат у мастицирани каучук. Касније се предсмеша меша са осталом количином каучука уз додавање ингредијената по претходно описаном поступку и рецепттурама.





Први поступак модификације (M1) извршен је на следећи начин: 500 g РГП помешано је са смешом дисулфида (60 дела TDTM и 40 дела CLD, тежине 14,5 g) и пропуштан кроз двоваљак, температуре 70 °C, при зазору од 0, 2 mm и уз додавање 50 g уља (моторно уље 15W/40, Модрича. БиХ). Овај поступак пропуштања кроз ваљке је трајао 15 минута. Након модификације додата је количина од 500 g NR-каучука и настављен поступак мешања у трајању од пет минута. Од предсмеше узета је одговарајућа количина која у себи садржи удео од 20 phr РГП. Након тога се одмах приступило изради смеше, при чему је прво мешан каучук и предсмеша у трајању од шест минута, а онда су додати остали ингредијенти као по претходно описаном поступку. Рецептуре смеша су приказане у табели 4.4

Табела 4.4 Рецептурса смеша са различитим типовима МГП

Назив смеше и гуме	
Сировине	M1, M2, M3 (phr)
NR	100
ZnO	5
Стеарин	2
N330	40
CBS	1
S	1,75
МГП	20

Други поступак модификације (M2) је идентичан поступку модификације M1, једина разлика је томе што је мешавина дисулфида замењана одговарајућом количином CLD (16,4 g) и време пропуштања кроз ваљке трајало је 18 минута. Рецептурса ове смеше приказан је у табели 4.4.

Трећи поступак модификације (M3) заснивао се на томе да је РГП измешан заједно са течним изопренским каучуком (*LIR 50, Kuraray Co.Ltd., Elastomer Company*, Јапан) при уделу од 20 phr. За то време мешана је смеша А и у њу је додата цела количина РГП и LIR 50 после чађи. Мешање овако модификованог РГП трајало је шест минута, након чега су додати остали ингредијенти.



Са циљем тачнијег одређивања поступка модификације на својства NR-гуме израђена је и смеша са 30 phr МГП1 за сва три поступка модификације. Рецептуре ових ових смеша приказане су у табели 4.5.

Табела 4.5 Рецептуре смеша са 30 phr РГП за различите врсте модификације

Назив смеше и гуме	
Сировине	М1-30, М2-30, М3-30 (phr)
NR	100
ZnO	5
Стеарин	2
N330	40
CBS	1
S	1,75
РГП	30

Када је установљен оптимални метод модификације (поступак модификације М1), испитивањем тврдоће, затезних својстава чврстоће, отпорности према цепању, хабњу и сабијању, овако припремљених гума приступљено је изради смеша код којих је вариран удео МГП1 (3 phr, 5 phr, 10 phr, 20 phr, 30 phr, 50 phr). Рецептуре ових смеша приказане су у табели 4.6.

Табела 4.6 Рецептуре смеша са различитим уделом МГП1

Назив смеше и гуме							
Сировине	A (phr)	3МГП1 (phr)	5 МГП1 (phr)	10 МГП1 (phr)	20 МГП1 (phr)	30 МГП1 (phr)	50 МГП1 (phr)
NR	100	100	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
Стеарин	2	2	2	2	2	2	2
N330	40	40	40	40	40	40	40
CBS	1	1	1	1	1	1	1
S	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
МГП1	0	3	5	10	20	30	50



#### 4.2.1.4 Смеша на бази природног и синтетичког каучука са модификованим гуменим прахом

За потребе овог истраживања у NR/SBR смешу додаван је удео од 20 phr и 30 phr МГП1. Поступак модификације и мешања је идентичан као и код примене МГП1 у NR-смеси. Рецептуре овако добијених смеша приказане су у табели 4.7.

Табела 4.7 Рецептуре NR/SBRсмеше са различитим уделом МГП1

Назив смеше и гуме		
Сировине	20/1 МГП1 (phr)	30/1 МГП1 (phr)
NR	80	80
SBR	20	20
ZnO	5	5
Стеарин	2	2
N330	40	40
CBS	1	1
S	1,75	1,75
МГП1	20	30

#### 4.2.2 Израда узорака и епрувета

Након што су смеше „одмарале“ у трајању од 24 часа приступљено је изради узорака и епрувета. Израда узорака изведена је у занатској радионици у Сремцици, Београд. За потребе овог истраживања сви узорци вулканизирани су на гумарској преси (50t, Братство, Универзал, Бања Лука, БиХ) следећих карактеристика: величина етаже 400x400 mm, снаге грејача 8 x 600W, и максималне притиснесиле 500 kN, која је приказана на слици 4.5.



Сл. 4.5 Преса за вулканизацију узорака

Параметри вулканизације узорака и епрувета приказани су у табели 4.8.

Табела 4.8 Параметри вулканизације

	Типузорка		
	Плочаца 150x175x2 mm	Епрувета Ø 45x6 mm	Епрувета Ø 29x12,5 mm
Време (min)	10	15	25
Температура (°C)	155	155	155
Пуњење алата (g)	60	15	25

### 4.3 Одређивање својстава смеше

Познавање реолошких својстава каучука и гуме је веома важно, јер она пресудно утичу на мешање смеша, а такође и на успешност обликовања полупроизвода. За оцену способности каучука и смеша да се пластично деформишу, није довољно познавати само пластичност, него и отпорност неумреженог каучука према деловању спољних сила, способност деформисања под дејством силе сабијања и способност да се повратно еластично деформише. Избор метода за испитивање реолошких особина није велики, а најпоузданија је праћење тока вулканизације на вулкаметру (реометру).

#### 4.3.1 Испитивање тока вулканизације на вулкаметру

**Опис мерења:** У овом истраживању испитивање тока вулканизације изведено је према стандарду SRPS. G.S2.118: 1984 на вулкаметру са осцилирајућим диском [97].

Мерење тока вулканизације изведено је у лабораторијама предузећа Д.О.О Заптивни елементи - Прва Петолетка-Трстеник, и А.Д. Тигар, Ауто-гума, Пирот на уређају *Monsanto* реометар 100S (слика 4.6а) који мери обртни моменат коме се супротставља смеша на задатој температури. Узорци испитиване смеше (слика 4.6б), који су исечени из плоче, запремине до  $8 \text{ cm}^3$ , постављени су у херметичкој комори за испитивање и испитивани на унапред дефинисаној температури ( $155 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $176 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

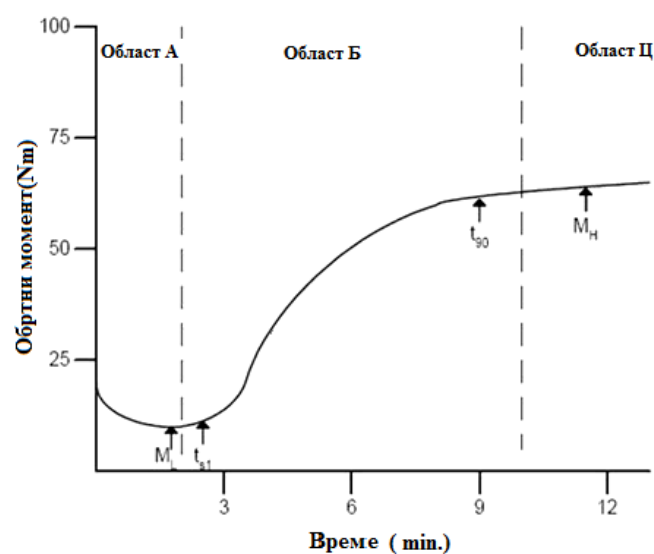


(а)

(б)

Сл. 4.6 Изглед уређаја *Monsanto* реометар а) и узорака испитивање б)

На основу мерења обртног момента и времена прати се ток вулканизације, слика 4.7.



Сл. 4.7 Типична крива вулканизације



На слици се разликују следећи карактеристичне вредности:

$M_L$  – Минимални обртни момент;

$M_H$  – Максимални обртни момента;

$t_{s1}$  – време у минутима када обртни момент порасте за 1 (dNm) изнад  $M_L$ ;

$t_{c90}$  - време у минутима када обртни момент достигне 90% од максималног обртног момента ( $M_L + 0,9 * (M_H - M_L)$ );

На дијаграму се, такође уочавају три области:

Област А – даје информације о вискозитету смеше и периоду њеног течења-  
“разливања“;

Област В - даје информације о брзини вулканизације;

Област С - даје информације о платоу вулканизације.

#### 4.4 Одређивање статичких и динамичких својстава гуме

Методe које се користе за испитивање гуме и производа од гуме су стандардизоване међународним и домаћим стандардима (EN, BS, ISO, ASTM и SRPS). Стандарди се могу поделити у две велике групе: прву групу чине стандарди у којима су дефинисане методе за испитивање статичких својстава гуме и другу групу чине стандарди у којима су дефинисане методе за испитивање динамичких својстава гуме и производа од гуме. У пракси се за опис неког производа врло често користе само статичка својства као што су тврдоћа, затезна чврстоћа, прекидно издужење и трајна деформација истезањем и сабијањем итд.

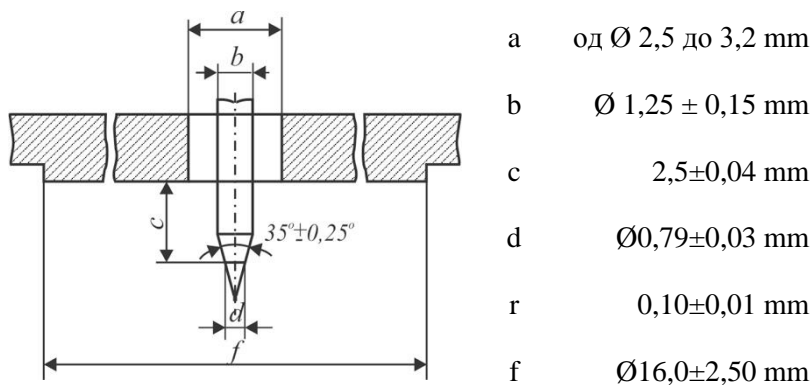
##### 4.4.1 Одређивање статичких својстава гуме

У овом поглављу биће описане методе испитивања тврдоће, затезних својстава, трајна деформација истезањем и сабијањем, отпорности према цепању и хабању гуме на бази NR и NR/SBR каучука без и са различитим уделом НМГП и МГП (3 phr, 5 phr, 10 phr, 20 phr, 30 phr, 50 phr) пре и после старења на ваздуху у трајању од 72 часа на температури од 70 °C.

#### 4.4.1.1 Одређивање тврдоће узорака

Тврдоћа гуме спада у прво и основно својство којим се дефинишу сви узорци и производи од гуме. Мерење тврдоће гуме дефинисано је великим бројем различитих стандарда DIN 53505, BS 903; ISO 7619, ASTM D1415 и SRPS G. S2. 125.

**Опис мерења:** У овом истраживању, тврдоћа гуме је одређивана по стандарду SRPS G. S2. 125 [98]. За мерење тврдоће употребљен је *Shore* тврдомер тип А који је приказан на слици 4.8.



Сл. 4.8 Тврдомер Тип А

За мерење нису испресоване посебне епрувете, већ је мерење извршено на плочама 115x175x2 mm тако што су наслагане једна на другу. Кондиционирање је трајало 24 часа на температури 20 °C. Након тога су узорци посути талком а затим је извршено по 5 мерења по типу смеше. Очитавање тврдоће је вршено 3 $\pm$ 1 s од момента почетка мерења због високо-еластичне карактеристике гуме.

#### 4.4.1.2 Одређивање затезних својстава гуме

Затезна својства гуме, поред тврдоће, спадају у најважнија својства којим се описује гума. Методе за одређивање затезних својстава дефинисане су такође различитим стандардима: ISO 37, ASTM D - 412 или SRPS G. S2.127. Сви ови стандарди описују сличан поступак испитивања. Испитивање затезних својстава у фабричким условима служе за брзу проверу технологије умешања и вулканизације. У случају лошег мешања или вулканизације приликом испитивања долази до огромног истезања које прати изостанак кидања епрувете или врло мало истезање са минималном прекидном јачином [99, 100].



**Опис мерења:** Испитивање затезне чврстоће, прекидног издужења и модула 100% у овом истраживању изведено је у ЛИПС лабораторији, Машинског факултета у Нишу према стандарду SRPS.G.S2.127:1985 [101]. Стандард прописује да се затезна својства одређују тако што се епрувета растеже у машини за испитивање истезањем при константној брзини раздвајања чељусту. За време истезања врши се регистровање силе и издужења, у зависности од испитивања идо самог прекида.

Затезна чврстоћаза епрувете облика тракасе израчунава се на основу једначина 4.3:

$$T_S = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \dots \dots \dots (4. 3)$$

где је: F - сила (N); A - почетни попречни пресек епрувете (mm<sup>2</sup>)

Прекидно издужење за епрувете облика трака израчунава се на основу једначине 4.4:

$$E_b = \frac{L-L_0}{L_0} \cdot 100 \dots \dots \dots (4. 4)$$

где је: L - размак између мерних линија у моменту кидања (mm); L<sub>0</sub> - почетни размак мерних линија (mm).

Модул M% (напрезање при одређеном издужењу) одређује се при издужењу од 100 %, 200 %, 300 % итд. мерног дела, а израчунава на основу једначина 4. 5:

$$M_{\%} = \frac{f}{A} \text{ (MPa)} \dots \dots \dots (4. 5)$$

где је: f- сила при одређеном издужењу (N); A - почетни попречни пресек епрувете (mm<sup>2</sup>).

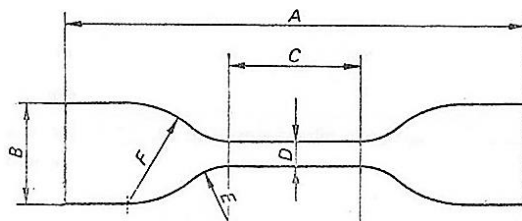
За потребе овог истраживања кориштењена је епрувета тип 2 чији је облик приказан на слици 4.9, а димензије су приказане у табели 4.9.

Табела 4.9 Димензије резног алата

Димензије	Тип 2 (mm)
А-укупна дужина(најмање)	75
В-ширина крајева	12,5±1
С-дужина суженог паралелног дела	25±1
Д-ширина суженог паралелног дела	4±0, 1
Е-мали полупречник	8±1,0
Ф-велики полупречник	12,5±1.0

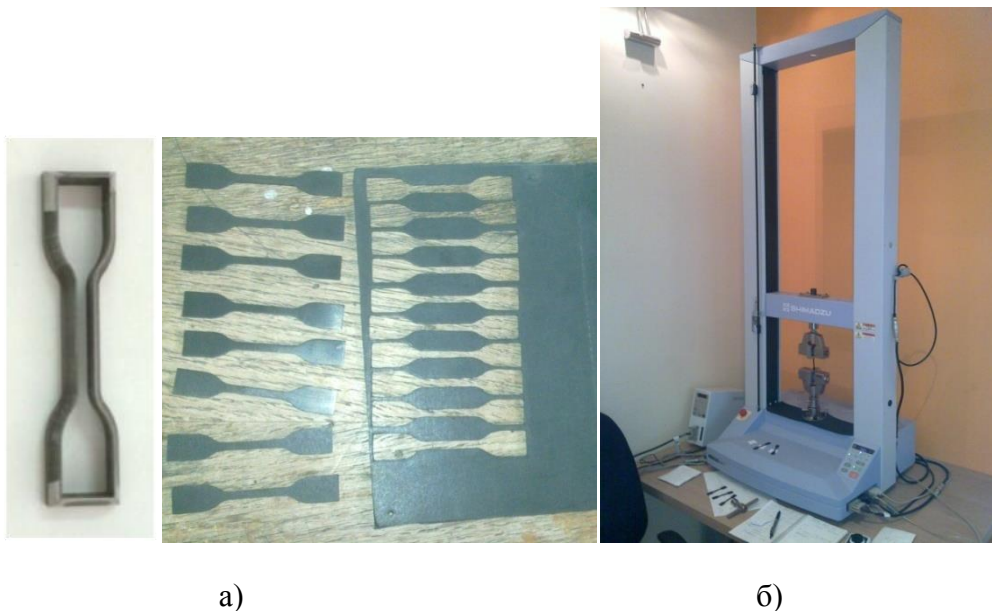


Облик епрувете приказан је на слици 4. 9.



Сл. 4.9 Звонаста епрувета

Овај тип епрувета даје прецизније податке у односу на остале типове епрувета. Такође, код примене мањих епрувета се лакше уочавају дефекти у структури због малог попречног пресека у односу на веће епрувете. Епрувете су исецане из плоче 115x175x2 mm уз помоћ резног алата приказаног на слици 4.10а.



Сл. 4.10 Изглед епрувета и резног алата (а) и изглед мерног места за испитивање  
затезних својстава (б)

Након исецања, епрувете су кондициониране на температури лабораторије у трајању од 24 часа, а затим испитиване. Епрувете су испитиване на кидалици (*AGS-X-10 kN, SHIMADZU, САД*) слика 4.10б. Испитивано је по три узорка од сваког типа гуме. На основу добијених резултата, помоћу претходно наведених једначина, израчуна су затезна својства. Брзина раздвајања чељусти износила је 100 mm/min.

#### 4.4.1.3 Одређивање отпора према цепању гуме

Отпор према цепању гуме (структурна чврстоћа или јачина при цепању) је врло важност својство производа од гуме и увек се заједно са њим, одређује и отпорност према хабању. Помоћу ових параметара се објашњава способност гуме да се одупре расту напрслине и даљем разарању. Такође, и ово својство се дефинише различитим стандардима: ISO 34-1, ASTM D 624 и SPRS G. S2. 735 који се међусобно разликују по облику епрувете [99, 100].

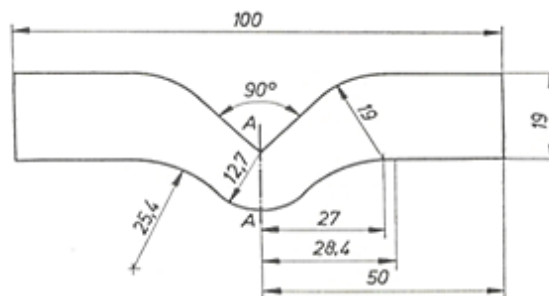
Испитивање отпора према цепању гуме у овом истраживању изведено је у ЛИПС лабораторији, Машинског факултета у Нишу према стандарду SPRS G. S2. 735: 1986 [102]. Према овом стандарду, отпор према цепању гуме је параметар отпорности према разарању (цепању) при истезању, у условима концентрације напона на узорку. Отпор према цепању, односно даљем цепању, је однос силе цепања и дебљине епрувете. Отпор према цепању  $\tau$  израчунава се према једначини 4.6:

$$\tau = \frac{F}{d} \left( \frac{kN}{m} \right) \dots \dots \dots (4. 6)$$

где је: F - највећа сила при цепању (N), d - дебљина епрувете (m).

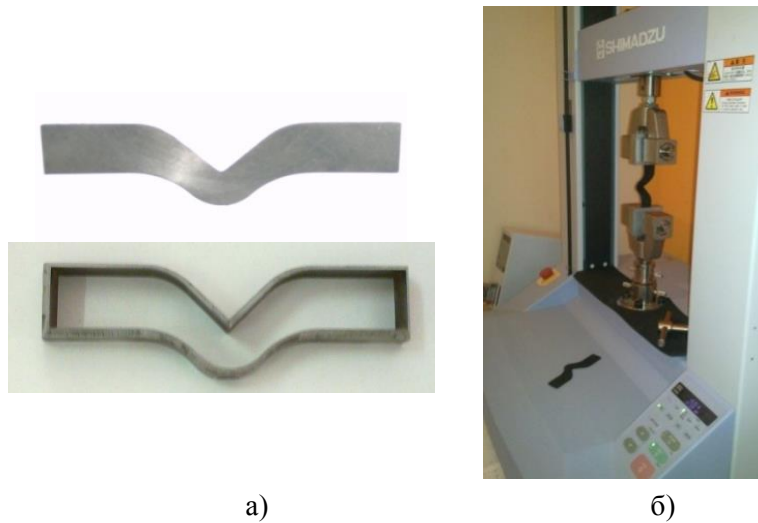
Као отпор према цепању узима се аритметичка средња вредност отпора од најмање три епрувете. Стандард прописује два типа епрувета: тип А и тип Б.

**Опис мерења:** За потребе овог истраживања одабрана је епрувета тип А чије су димензије приказане на слици 4.11. Пре исецања епрувета узорци су одлежати после вулканизације три дана на температури од 20 °С.



Сл. 4.11 Епрувета (тип А) за испитивање отпора према цепању гуме

По три епрувете исечене су из плоче димензија 115x175x2 mm у два управна правца. Изглед резног алата и епрувете приказан је на слици 4.12а. Након исецања епрувете су пре испитивања кондициониране 24 часа на температури лабораторије.



Сл. 4.12 Изглед резног алата са епруветом тип А (а) и мерног места за испитивање (б),

За ово испитивање коришћена је универзална машина за испитивање затезањем (AGS-X-10 kN, SHIMADZU, САД), приказан на слици 4. 12б. Брзина померања чељусти износила је 500 mm/min.

#### 4.4.1.4 Одређивање трајне деформације сабијањем на одређену висину

Одређивање трајне деформације је важан податак за оцењивање пластично-еластичних својства гумених заптивача, гумених подметача, амортизера и одбојника.

У оквиру оведисертације, испитивање трајне деформације сабијањем изведено је у лабораторији за машинске материјале Машинског факултета у Нишу, према стандарду SRPS G. С2. 130: 1984 [103]. Величина трајне деформације сабијањем на одређену висину је процентуално смањење висине испитане епрувете после сабијања на висину 25% од почетне висине, при одређеним условима испитивања (време, температура, околина итд.).

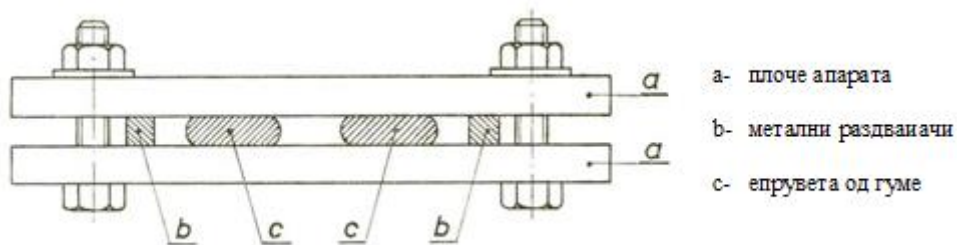
Трајна деформација сабијањем на одређену висину  $T_{dk}$  израчунава се на основу једначине 4. 7:

$$T_{dk} = \frac{h_{0e} - h_2}{h_{0e} - h_1} \cdot 100 (\%) \dots \dots \dots (4. 7)$$

где је:  $h_{0e}$  - висина епрувете пре сабијања (mm);  $h_1$  - висина примењеног раздвајача, тј. висина сабијене епрувете (mm);  $h_2$  - висина епрувете после сабијања (mm);

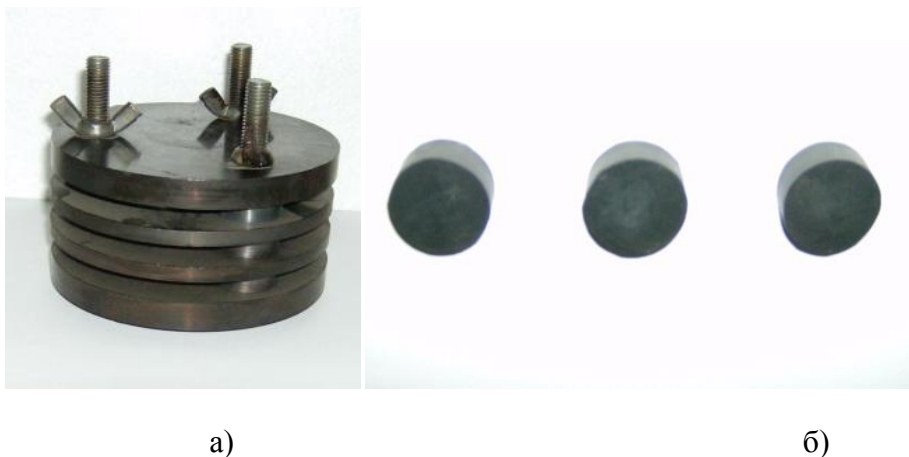
Према стандарду, зависно од материјала који се испитује, примењују се велике (пречника  $29 \pm 0.5$  mm и висине  $12 \pm 0.5$  mm) и мале епрувете (пречника  $13 \pm 0.5$  mm и

висине  $6 \pm 0.2$  mm). После кондиционирања епрувете се постављају у уређај приказан на слици 4.13, а затим сабијају на одређену висину уз коришћење граничника до одговарајуће висине.



Сл. 4.13 Уређај за испитивање сабијањем

**Опис мерења:** У складу са претходно описаним поступком велике епрувете пречника  $29 \pm 0.5$  mm и висине  $12,5 \pm 0.2$  mm (слика 4.14б) постављене су у уређај за испитивање (слика 4.14а) и затим стављене у сушару загрејану на температуру од  $70 \pm 1$  °C у трајању од 168 часова. Атмосфера у сушари је био ваздух. Након 30 минута од растерећења епрувета извршено је мерење димензија епрувета, а затим је применом једначине 4.7 је израчуната трајна деформација сабијањем на одређену висину.



Сл. 4.14 Уређај за сабијање (а) и епрувете за испитивање (б)

#### 4.4.1.5 Испитивање отпорности према хабању

Основно својство које дефинише отпорност према трошењу гуме јесте отпорност према хабању. Хабање или отпорност према хабању дефинише се као губитак у запремини, настао брушењем узорака прописаним абразивом. Стандарди ISO 4649 и SRPS G.S2.301: 1964 који дефинишу испитивање овог својства, засновани су на различитим методама, а најчешће се примењују метода по Schopper и по Du Pont.

Основна разлика ових метода је у облику и димензији узорка који се испитује и уређаја за испитивање [51, 100, 99].

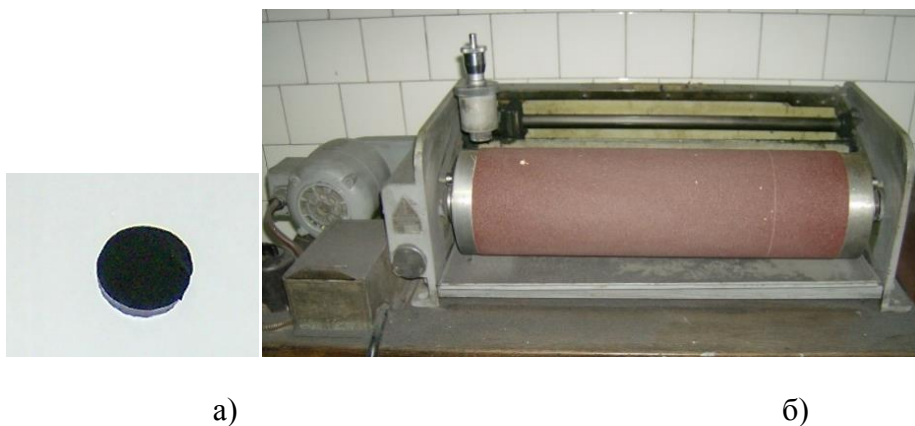
**Опис мерења:** Испитивање отпорности према хабању узорака у овом истраживању, изведено је у лабораторији Фабрике заштитних средстава – ФЗС, Trayal корпорација, Крушевац према стандарду SRPS G.S2.301: 1964 [104]. Овај стандард прописује испитивање отпорности према хабању природне или синтетичке гуме по *Schopper* методи.

Хабање гуме  $H_z$  израчунава на основу једначине 4.8:

$$H_z = \frac{(G_0 - G_1) \cdot 200}{\rho \cdot \theta a} \text{ (mm}^3\text{)} \dots \dots \dots (4.8)$$

где је:  $G_0$ - маса епрувете пре хабања (mg);  $G_1$  - маса епрувете после хабања (mg);  $\rho$  - густина испитиване гуме (g/cm<sup>3</sup>);  $\theta a$  - оштрина абразива (mg).

Из испресованих плочица димензије  $\varnothing 45 \times 6$  mm, које су кондициониране у складу са стандардом, исечене су епрувете цилиндричног облика пречника  $d = 16 \pm 0.2$  mm и дебљине 6 mm при чему је вођено рачуна да чеоне површине буду управне на осу епрувете. Епрувета припремљена за испитивање приказан је на слици 4. 18a.



Сл. 4.15 Епрувета (а) и уређај за испитивање хабањем (б)

Епрувете су кондициониране 12 h на температури 21°C, анакон тога је измерена маса сваке епрувете. Затим су епрувете подвргнуте хабању под оптерећењем од 1 kg на дужини пута од 40 m, на уређају приказаном на слици 4.15a. Као абразивно средство коришћен је брусни папир сас илицијум-карбидом, финоће N<sup>0</sup>60. Након завршетка хабања, поново је измерена маса епрувета и применом једначине 4.11 извршено је израчунавање хабања гуме.

#### 4.4.1.6 Одређивање трајне деформације при константном издужењу од 100%

Циљ ове врсте испитивања је оцена пластично-еластична особина гумених узорака. Овај метод испитивања је нашао широку примену код ауто-гума, заптивки, амортизера, одбојника итд. Такође ово својствосе доводи у везу и са степеном вулканизације, па се као и испитивање затезних својстава може користити за проверу степена вулканизације [51, 99].

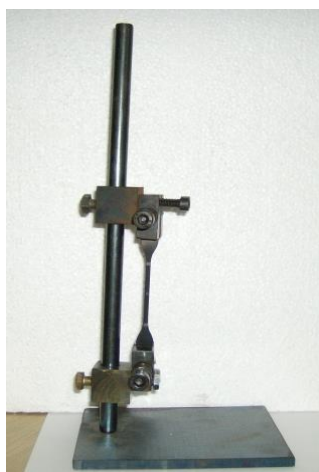
Испитивање овог својства изведено је у лабораторији за машинске материјале Машинског факултета у Нишу, према стандарду ISO37 тип 1 [105].

Трајна деформација  $T_D$  се израчунава према једначини 4.9:

$$T_D = \frac{L_1 - L_0}{L_S - L_0} \cdot 100 (\%) \dots \dots \dots (4.9)$$

где је:  $L_0$ –мерна дужина(mm) пре испитивања;  $L_1$ –мерна дужина после растерећења (mm);  $L_S$  - називна дужина у затегнутом стању (mm).

**Опис мерења:** У складу са стандардом ISO 37 тип 1, из испресованих табли димензија 115x175x2 mm, исечене су по три звонасте епрувете типа 2 за сваки тип гуме, након чега су на епруветама обележене мерне дужине. Овако припремљене епрувете су постављене у уређај (слика 4.16), истегнуте за 100% од мерне дужине и постављене у ваздушну сушару у атмосфери ваздуха 24 часа на температури од 70 °С.



Сл. 4.16 Уређај за истезање епрувета

Уређај са епруветом је након истека наведеног времена извучен из сушаре и охлађен до собне температуре. Епрувета је затим извађена из уређаја и стављена на



равну подлогу. После истека 30 минута од растерећења измерена је мерна дужина и израчуната је трајна деформација према једначини 4.12.

#### 4.4.2 Испитивање динамичких својстава гуме

Динамичка својства гуме су веома важна за описивање одређених производа од гуме као што су гумене опруге, амортизери, пригушнице итд. Међутим, за описивање својстава ових производа чешће се користе њихова статичка својства, због сложености испитивања динамичких својстава. Под појмом ”динамичко испитивање гуме” подразумева се испитивање узорака под дејство цикличних или ударних оптерећења на основу којих се израчунавају напонско-деформациона стања. Према неким ауторима у ову групу испитивања не спадају испитивања замарањем [100].

##### 4.4.2.1 Испитивање одбојне еластичности

За описивање еластичних својстава гуме при брзим једнократним деформацијама, често се користи испитивање одбојне еластичности. Ово својство најбоље описује могућност гуме да апсорбује удар. Постоје две методе испитивања: по *Schober* и по *Lurke*.

**Опис мерења:** У оквиру спроведеног истраживања за одређивање овог својства коришћен је стандард SRPS G.S2. 131 који дефинише испитивање по *Schober* [106]. Ово испитивање изведено је у лабораторији Фабрике заштитних средстава – ФЗС, Трајал корпорација, Крушевац. Према овом стандарду, својство одбојне еластичности дефинише се односом рада, којим се клатно враћа после деформације ударом и рада утрошеног на ту деформацију, што је бројно једнако односу висине одскока клатна, које слободно пада на испитивани узорак гуме и висине његовог падања.

Одбојна еластичност  $\eta$  се израчунава на основу једначине 4.10:

$$\eta = \frac{h_{ok}}{h_p} \cdot 100 (\%) \dots \dots \dots (4. 10)$$

где је:  $h_{ok}$  - одскочна висина клатна послечетвртог, петог и шестог удара чекића (mm);  $h_p$  - почетна висина (mm).

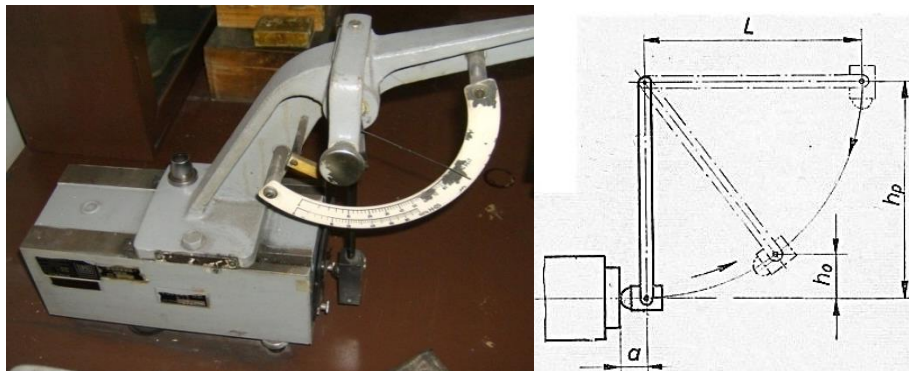
Испитивање се спроводи на најмање три епрувете које се кондиционирају на собној температури. Вредност за висину одскока клатна узима се као средња вредност четвртог, петог и шестог удара чекића клатна епрувете, јер се клатно пушта да пада шест пута из

почетног положаја на причвршћену епрувету. Из прочитаних резултата израчунава се аритметичка средња вредност. Ако епрувета одступа од називне дебљине највише за 1 mm, резултат треба помножити корекционим фактором који је приказан једначином 4.11:

$$K = \frac{11}{C+5}, \dots \dots \dots (4.11)$$

где је: C - стварна дебљина епрувете (mm), заокружена на 0,1 mm.

У складу са претходно описаним, израђене су по три епрувете пречника 45 mm дебљине 6 mm за сваки тип гуме. Након мерења дебљине, епрувете су постављене у уређај приказан на слици 4.17 и изведено је мерење. На основу измерених вредности, израчуната је одбојна еластичност узорак применом једначине 4.11.



Сл. 4.17 *Shob*-ово клатно

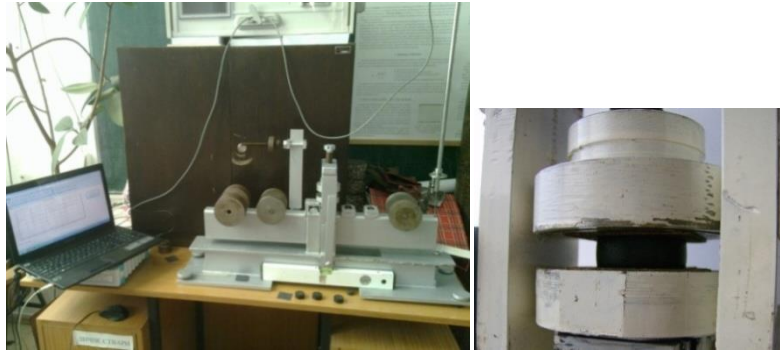
#### 4.4.2.2 Испитивање динамичких својстава по *Yerzley* методи

За описивање динамичких својстава гуме при брзим краткотрајним деформацијама, често се користе испитивање динамичких својстава по *Yerzley* методи. Овом методом најчешће се одређују хистерзис по *Yerzley* (пригушење услед унутрашњег трења у гуми) и апсорбована енергија удар (максимална енергија коју узорак може да апсорбује при удару).

**Опис мерења:** Испитивање динамичких својстава узорак у овом истраживању изведено је у лабораторији за машинске материјале Машинског факултета у Нишу према стандарду ASTM D945-92 [107]. По три цилиндрична узорка ( $\varnothing 29 \times 12$  mm), сваког типа гуме, пре и после старења, испитивана су на *Yerzley* механичком осцилографу који је приказан на слици 4.18а. Мерно место се састојало од *Yerzley* механичког осцилографа (у даљем тексту клатно), сопственог момента инерције без тегова  $0,2813 \text{ Nm}^2$ , на који је



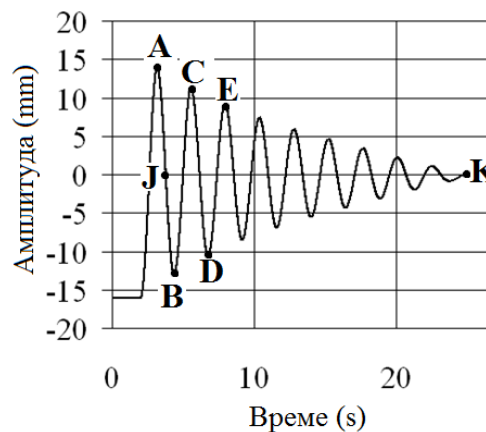
постављен сензор пута WK 200 mm (HBM, Немачка), уређаја за аквизицију података Spider 8 (*Hottinger Baldwin Messtechnik*, Немачка), и програма за обраду података *Catman Easy AP* при чему је брзина бележења мерних вредности износила 50 Hz.



а)б)

Сл. 4.18 Yertzley механички осцилограф(а) и мерно место са епруветом (б)

У уређај је постављена епрувета (слика 4.18б), са брусним папиром гранулације 360, лицем окренут према епрувети. Затим је епрувета додавањем тегова сабијена за 20% од почетне висине и клатно је изведено из равнотежног положаја. Као резултат мерења добија се крива која је приказана на слици 4.19.



Сл. 4.19 Крива мерења са карактеристичним тачкама

Еластичност по Yertzley израчунава на основу једначине 4.12:

$$E_Y = \left( \frac{CD}{BC} - \frac{DE}{CD} \right) \cdot 50 (\%) \dots \dots \dots (4. 12)$$

где је: BC - вертикално растојање у милиметрима при првом циклусу пригушења;  
CD – вертикално растојање у милиметрима при другом циклусу пригушења; DE –  
вертикално растојање у трећем циклусу пригушења.



Хистерезис по Yerzley израчунава на основу једначине 4. 13:

$$H_Y = 100 - E_Y (\%) \dots \dots \dots (4.13)$$

Ефективни динамички модул израчунава се по једначини 4.14:

$$K_C = 0,996 \cdot I \cdot f^2 \text{ (MPa)} \dots \dots \dots (4. 14)$$

где је:  $I$  - укупни момент инерције клата ( $\text{Nm}^2$ ),  $f$  - учесталост осциловања епрувете (Hz)

Укупни момент инерције клатна израчунава се према једначини 4.15:

$$I = (I_B + I_F \cdot (n_F + n_h) + I_G \cdot n_G) \dots \dots \dots (4. 15)$$

где је:  $I_B$ - момент инерције самог клатна ( $\text{Nm}^2$ );  $I_F$ - момент инерције са по једном стандардном масом на местима F и H ( $\text{Nm}^2$ );  $I_G$  - момент инерције са по једном стандардном масом на месту G ( $\text{Nm}^2$ );  $n_F$ - број маса на месту F;  $n_H$  - број маса на месту H;  $n_G$  - број маса на месту G.

Апсорбован енергија удара израчунава се по једначини 4. 16:

$$E_C = 0,8 \cdot (n_F + 0,5 \cdot n_G - n_H) \cdot (AB) \cdot 10^3 \text{ (J/m}^3) \dots \dots (4. 16)$$

где је:  $n_F$ - број маса на месту F;  $n_H$  - број маса на месту H;  $n_G$  - број маса на месту G, AB - растојање у милиметрима при првом циклусу пригушења.

#### 4.4.3 Испитивање гуме вештачким старењем

Постојаност механичких својстава гуме при излагању повишеним температурама ,говори о топлотној постојаности гуме. Топлотна постојаност испитује се при повишеним температурама (изнад 70 °C) у ваздуху, води, уљима, као и агресивним течностима према стандарду SRPS G.S2.126: 1986 [108]. Добијене вредности механичких својстава после излагања повишеним температурама, упоређују се са резултатима испитивања пре излагања. Уобичајене температуре испитивања су од 70±1 °C; 85±1 °C; 100±1 °C; 125±2 °C; 150±2 °C; 170±2 °C; 200±2 °C; 250 ±3 °C; 275±3 °C до 300±3 °C[109].

Отпорност према повишеним температурама се врло често комбинује са још неким факторима и та врста испитивања се назива старење. Под испитивањем старењем сматра



се неповратна промена својстава гуме под дејством топлоте, светлости, кисеоника, ваздуха, озона и агресивних хемикалија. Старење се увећава уколико је гума истовремено изложена и деловању механичких оптерећења.

Старењем се одређује промена својства гуме у кратком временском периоду, као замена за промене које настају при употреби у току дугог временског периода, са циљем утврђивања приближног века трајања. Испитују се затезна чврстоћа, релативно издужење при кидању, тврдоћа итд., а добијени резултати се упоређују са резултатима ових својстава добијеним пре старења.

Испитивања се спроводе на стандардним епруветама. Излагање повишеним температурама се врши у сушарама и пећима које поседују могућност регулације температуре и протока ваздуха. Промена тврдоће израчунава се на основу једначине 4.17:

$$X_a - X_0 \dots \dots \dots (4.17)$$

где је:  $X_0$  – вредност пре излагања повишеним температурама, а  $X_a$  – вредност добијена после излагања повишеним температурама.

Код осталих механичких својстава гуме (затезна чврстоћа, издужење при кидању, модул еластичности) израчунава се пад својстава (губитак) на основу једначине 4. 18:

$$\frac{X_a - X_0}{X_0} \cdot 100 (\%) \dots \dots \dots (4.18)$$

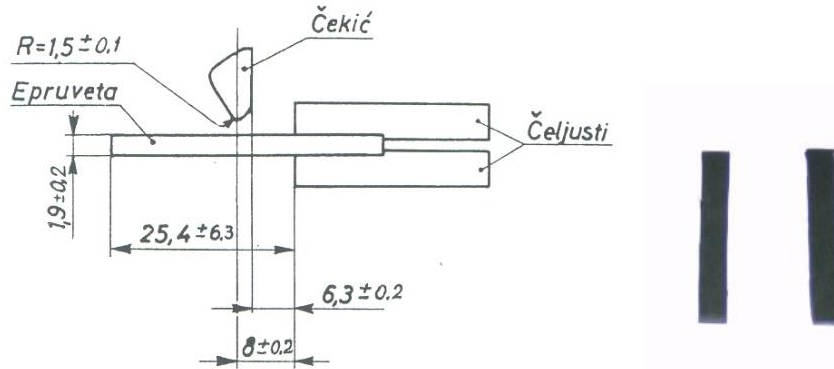
где је:  $X_0$  - вредност својства пре излагања повишеним температурама;  $X_a$  - вредност својства добијена после излагања повишеним температурама.

**Опис мерења:** У складу са поступком дефинисаним стандардом извршено је вештачко старење узорака за испитивање тврдоће, затезних својстава, отпорности према цепању гуме, отпорност према хабању и динамичких својстава на температури од 70°C у трајању од три дана, након чега су испитана наведена својства према претходно описаним поступцима испитивања.

#### 4.4.4 Испитивање постојаности гуме при ниским температурама

Отпорност према дејству ниске температуре (кртост) је способност гуме да задржи своја еластична својства при негативним утицајима ниских температура. Отпорност се сагледава преко промене тврдоће, флексибилности и тачке кртости односно температуре

лома. Тачка кртости је максимална негативна температура при којој се испитивани узорак гуме разара или формира прскотину, под дејством ударне силе (слика 4.17).



а)б)

Сл. 4.20 Шема уређаја за проверу кртости (а) и епрувета (б)

Флексибилност на ниским температурама се проверава савијањем епрувете преко облице одређеног пречника. Уколико дође до појаве напрелина или појаве рисева гума је неотпорна на тој температури.

**Опис мерења:** Испитивање је спроведено према стандарду ISO 812 [110]. На основу описаног поступка, извршено је испитивање отпорности гуме према дејству ниских температура. По три епрувете (50x6x2 mm), од сваког типа гуме (слика 4.20 б), су исечене из испресованих табли 115x175x2 mm. Након тога, епрувете су излагане дејству ниске температуре од -30 °C у трајању од 30 минута, а затим су брзо постављене у уређај за испитивање и испитиване.

## 4.5 Испитивање микроструктуре честице рециклираног гуменог праха и гуме

### 4.5.1 Испитивање изгледа, облика и структуре честице

У оквиру овог истраживања поступак испитивања је спроведен снимањем узорка на скенинг електронском микроскопу - SEM, слика 4.21а, (SEM JSM 5300, JOEL, Јапан) у лабораторији за електронску микроскопију, Медицинског факултета, Универзитета у Нишу



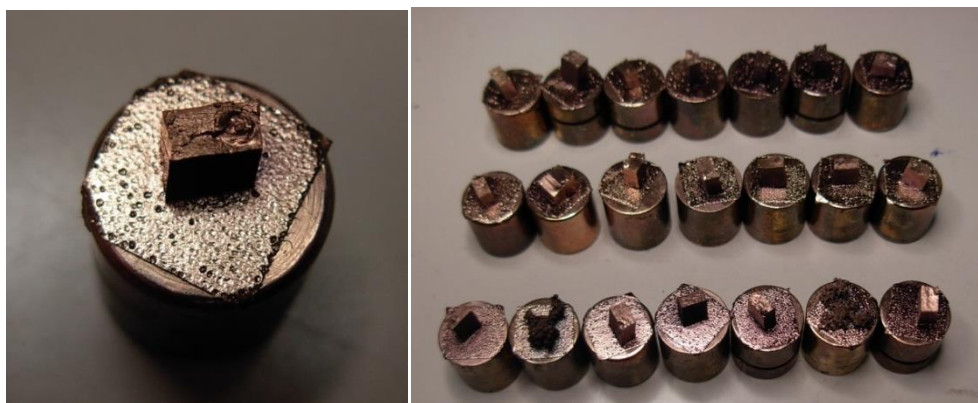
а)б)

Сл. 4.21 Електронски микроскоп (а) и напарени узорци (б)

Снимање је изведено на следећи начин: врло танак слој честица је нанет на равну и чисту површину, при чему је вођено рачуна да на површину буде нанет само један слој честица. Затим је благо притиснут делом носача на којем се налазила лепљива трака. Носач је затим стављен у уређај за напаривање и напараван 30 мин. Изглед напарених узорака приказан је на слици 4.21б.

#### 4.5.2 Испитивање микроструктуре површине гуме после лома

За испитивање микроструктуре површине гуме после прекида, део епрувете је залепљен на носач и узорци су такође напарени у трајању од 30 мин. (слика 4.22)



Сл. 4.22 Узорци припремљени и напарени за испитивање на електронском микроскопу

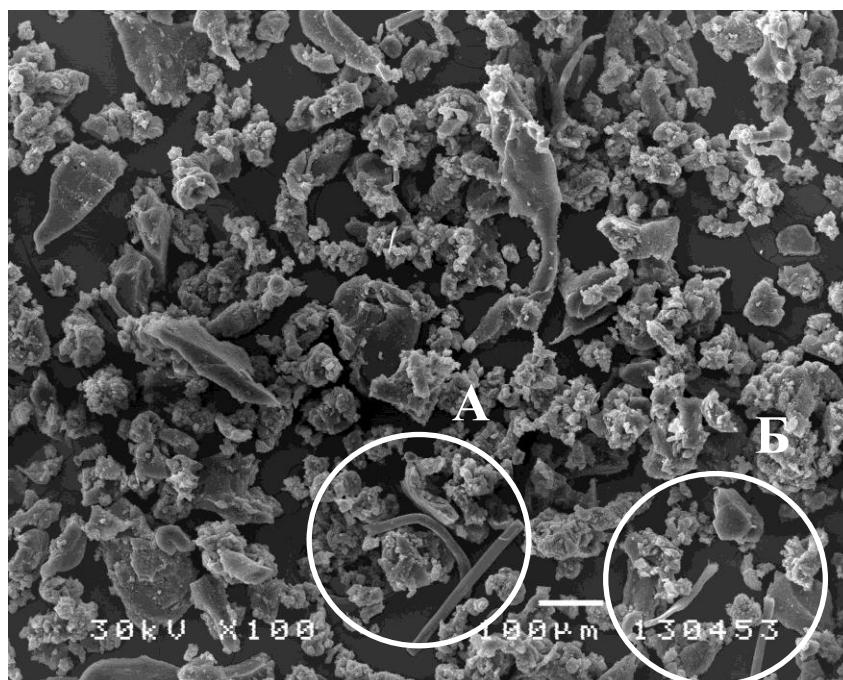
Након напаривања снимљена је површина узорка и карактеристични детаљи.

## 5 РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

У овом поглављу приказани су резултати до којих се дошло експерименталним истраживањем. Резултати испитивања статичких и динамичких својстава приказани су табеларно, док су резултати испитивања структуре лома приказани фотографијама на којима је дато увећање и размера. Овако добијеним резултатима могуће је утврдити промену својстава гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП.

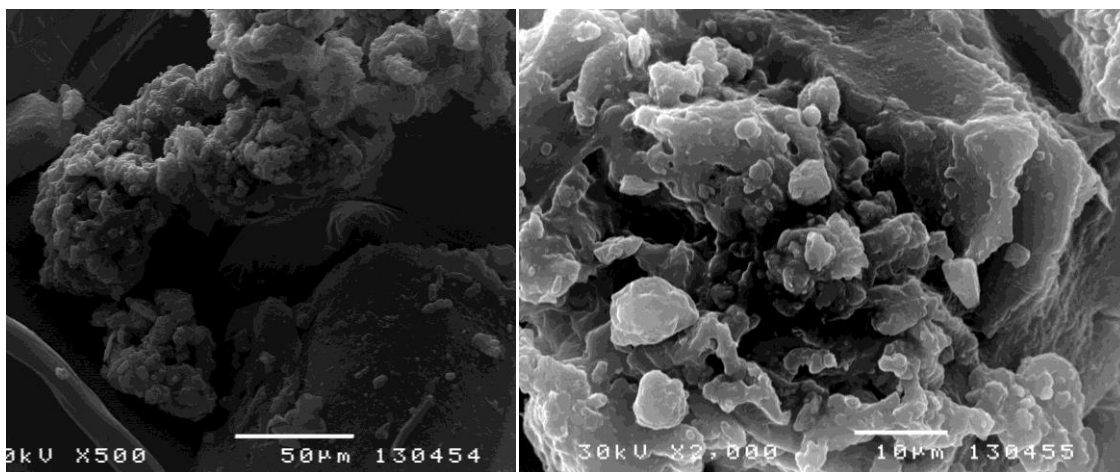
### 5.1 Својства честице гуменог праха

Изглед узорка РГП снимљеног на електронском микроскопу, набављен од компаније „ECO-RECYCLING“, према поступку који је описан у потпоглављу 4.5.1 приказан је на слици 5. 1. Осим гуменог праха, ЕДС анализом су откривена челична влакна (област А) и синтетичка влакна (област Б). На основу снимка утврђено је да се величина честица гуменог праха кретала од неколико дестина микрометара до неколико стотина микрометара.



Сл. 5.1 Изглед РГП снимљеног на микроскопу

Изглед и површна једне карактеристичне честице РГП приказан је на слици 5.2а. при чему је на слици 5.2.б приказан детаљ са површине честице при увећању од 2000.



а)

б)

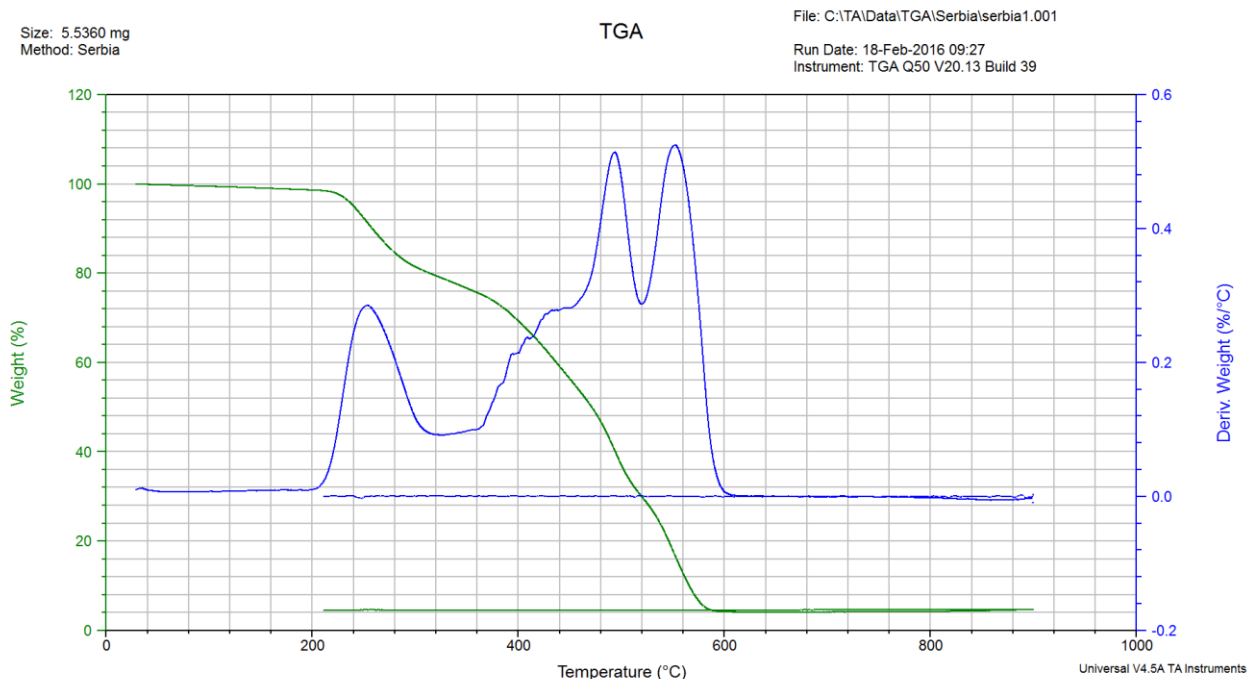
Сл. 5.2 Изглед карактеристичне честице РГП (а) и детаљ њене површине (б)

Хемијски састав узорака, добијен испитивањем на EDS (Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany), урађен је у лабораторију *Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki* и приказан је у табели 5.1.

Табела 5.1 Хемијски састав РГП

Елемент	Масени удео(%)
Угљеник	69,43227
Сумпор	1,039988
Натријум	1,894618
Алуминијум	0,676236
Кисеоник	26,95489
Сума	99,998

Термогравиметријска анализа извршена је према поступку који је описан у потпоглављу 4.1.2. Као резултат ТГА добија се крива која је приказан на слици 5.3.



Сл. 5.3 ТГА гуменог узорка

Специфична површина узорка РГП израчуната је *BET* методом која је описана у потпоглављу 4.1.3 и износи  $6 \text{ m}^2/\text{g}$ .

## 5.2 Својства смеша

### 5.2.1 Реолошка својства смеша

#### 5.2.1.1 Реолошка својства гуме на бази природног каучука

Мерење реолошких својстава смеше А, затим смеше са 20 phr НМГП и 20 phr МГП1 описано је у потпоглављу 4.3.1. Поступак испитивања имао је следеће параметре: време 15 мин, мерна скала са 100 подеока, арк 1 и температура 155 °С. Измерене вредности приказане су у табели 5.2.

Табела 5.2 Реолошка својства NR-гуме при температуру до 155 °С

Тип смеше	$M_I$ (dNm)	$M_H$ (dNm)	$t_{s1}$ (min)	$t_{c90}$ (min)
А	2	33	2,4	6
20 phr НМГП	5	35	1,5	4
20 phr МГП1	3	35	0,75	1,87





Мерење реолошких својстава смеша описано је у потпоглављу 4.3.1, поступак испитивања имао је следеће параметре: време 6 мин, мерна скала 100 јединица, арк 1 и температура 176 °С, добијене вредности приказане се у табели 5.3.

Табела 5.3 Реолошка својства NR-гуме при температуру до 176 °С

Удео (phr)	Тип смеше	$M_L$ (Nm)	$M_H$ (Nm)	$t_{s1}$ (min)	$t_{c90}$ (min)
0	A	0,92	3,81	1,12	2,15
3	НГП	0,72	3,11	1,23	2,23
	МГП1	0,84	3,48	1,00	1,73
5	НГП	0,72	2,69	1,32	2,48
	МГП1	0,8	3,26	0,82	1,50
10	НГП	0,82	3,01	0,93	1,85
	МГП1	0,83	3,52	0,73	1,25
20	НГП	1,11	3,81	0,78	2,00
	МГП1	1,19	4,17	0,57	1,03
	МГП2	1,08	3,53	0,88	1,93
	МГП3	1,11	3,43	0,90	2,12
30	НГП	1,08	3,17	0,82	2,05
	МГП1	0,96	4,28	0,5	0,88
	МГП2	1,2	3,02	0,92	1,67
	МГП3	1,03	2,84	1,05	2,17
50	НГП	1,11	2,74	0,85	2,03
	МГП1	1,21	4,11	0,5	0,88

#### 5.2.1.2 Реолошка својства гуме на бази природног и синтетичког каучука

Мерење реолошких својстава смеша описано је у потпоглављу 4.3.1. Прво су испитане смеше А1 и смеше са 20 phr НМГП и 20 phr МГП1. Поступак испитивања имао је следеће параметре: време 15 мин, мерна скала са 100 јединица (dNm), арк 1 и температура 155 °С. Измерене вредности приказане су у табели 5.4.



Табела 5.4 Реолошка својства NR/SBR-гуме при температури до 155 °С.

Тип смеше	$M_I$ (dNm)	$M_H$ (dNm)	$t_{s1}$ (min)	$t_{c90}$ (min)
A1	4	32	3,1	5
20 phr НМГП	6	31	2,13	6,62
20 phr МГП1	6	41	1,1	2,4

Мерење реолошких својстава смеша отисано је у потпоглављу 4.3.1. Поступак испитивања има је следеће параметре: време 6 мин, мерна скала 100 јединица (Nm), арк 1 и температура 176 °С добијене вредности приказане се у табели 5.5.

Табела 5.5 Реолошка својства NR/SBR-гуме при температуру до 176 °С.

Удео (phr)	Тип смеше	$M_I$ (Nm)	$M_H$ (Nm)	$t_{s1}$ (min)	$t_{c90}$ (min)
0	A1	0,98	3,27	1,53	2,87
20	НГП	1,11	3,03	1,03	2,48
	МГП1	1,27	4,38	0,62	1,07
30	НГП	1,25	2,89	0,93	2,23
	МГП1	1,14	4,09	0,57	0,93

### 5.3 Статичка својства гуме са рециклираним гуменим прахом

#### 5.3.1 Својства гуме на бази природног каучука при различитом режиму умешавања немодификованог рециклираног гуменог праха

У овом поглављу приказани су резултати испитивања тврдоће, затезне чврстоће и отопра према цепању гуме на бази NR каучука без и са 20 phr НМГП за различите режиме умешавања (гума А - без НМГП; гума Б - НМГП додат после чађи; гума Ц - НМГП додат након стеарина и ZnO; гума Д - НМГП додат после мастицирања каучука и гума Е – НМГП заједно са диспергатором додат после мстицирања каучука).

##### 5.3.1.1 Тврдоћа гуме

Мерење тврдоће узорак описано је у потпоглављу 4.4.1.1. Измерене и средње вредности тврдоћа гумених узорак приказане су у табели 5.6.



Табела 5.6 Тврдоћа гумених узорака за различите режиме умешавања.

	Тип гуме									
	А		Б		Ц		Д		Е	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
Тврдоћа гуме (ShA)	56-57	<b>57</b>	57-58	<b>58</b>	56-57	<b>57</b>	56-58	<b>58</b>	54-56	<b>56</b>

### 5.3.1.2 Затезна својства

Одређивање затезне чврстоће гуме описана је у потпоглављу 4.4.1.2. Израчунате средње вредности затезне чврстоће узорака за различите режиме умешавања приказане су у табели 5.7.

Табела 5.7 Затезна чврстоћа гуме за различите режиме умешавања

	Тип гуме									
	А		Б		Ц		Д		Е	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
Затезна чврстоћа Ts (MPa)	22,8-23,5	<b>23, 2</b>	17,5-18,2	<b>18,0</b>	17,1-17,7	<b>17,5</b>	17,1-17,5	<b>17,3</b>	16,9-17,3	<b>17,2</b>

### 5.3.1.3 Отпор према цепању гуме

Одређивање отпора према цепању описано је у потпоглављу 4.4.1.3. Средње вредности отпора према цепању гуме израчунате на основу мерења узорака за различите режиме умешавања приказане су у табели 5.8.



Табела 5.8 Отпор према цепању гуме за различите режиме умешавање

	Тип гуме									
	А		Б		Ц		Д		Е	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>Отпор према цепању <math>\tau</math> (KN/m)</b>	118.0-118.8	<b>118.4</b>	56.1-56.9	<b>56.5</b>	52.9-53.3	<b>53.1</b>	52.5-53.1	<b>52.8</b>	52.7-53.1	<b>52.9</b>

### 5.3.2 Својства гуме на бази природног каучука при различитој модификацији гуменог праха

У овом поглављу су приказани резултати испитивања статичких својстава NR-гуме за различите поступке модификације РГП при уделу од 20 phr и 30 phr (гума М1-модификација РГП извршена *TDTM* и *CLD* ; гума М2 – модификација РГП изведена *CLD*, гума М3 – модификација изведена *LIR-50*, хемикалије додаване уз мешање на двоваљку).

#### 5.3.2.1 Тврдоћа гуме

Мерење тврдоће гуме описано је у потпоглављу 4.4.1.1. Средња вредност измерене тврдоћа гумених узорака приказана је у табели 5.9.

Табела 5.9 Тврдоћа гумених узорака за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А (ShA)		М1 (ShA)		М2 (ShA)		М3 (ShA)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	56-57	<b>57</b>	-	-	-	-	-	-
<b>20</b>	-	-	59-60	<b>60</b>	58-59	<b>59</b>	54-55	<b>54</b>
<b>30</b>	-	-	62-63	<b>62</b>	59-61	<b>60</b>	55-56	<b>56</b>



### 5.3.2.2 Затезна својства

Одређивање затезне чврстоће епрувета урађено је према поступку који је описан у потпоглављу 4.4.1.2. Израчунате средње вредности затезне чврстоће узорак за различите режиме умешавања приказане су у табели 5.10.

Табела 5.10 Затезна чврстоћа узорак за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А T <sub>S</sub> (MPa)		M1 T <sub>S</sub> (MPa)		M2 T <sub>S</sub> (MPa)		M3 T <sub>S</sub> (MPa)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	22,9-23,4	<b>23,2</b>	-	-	-	-	-	-
<b>20</b>	-	-	19,4-19,7	<b>19,5</b>	18,9-19,3	<b>19,1</b>	18,4-18,7	<b>18,5</b>
<b>30</b>	-	-	17,4-17,6	<b>17,5</b>	17,0-17,2	<b>17,1</b>	15,8-16,2	<b>16,0</b>

Одређивање прекидног издужења узорак урађено је према поступку који је описан у потпоглављу 4.4.1.2. Израчунате средње вредности прекидног издужења узорак за различите режиме умешавања приказане су у табели 5.11.

Табела 5.11 Прекидно издужење узорак за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А E <sub>b</sub> (%)		M1 E <sub>b</sub> (%)		M2 E <sub>b</sub> (%)		M3 E <sub>b</sub> (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	439,0-442,8	<b>440,9</b>	-	-	-	-	-	-
<b>20</b>	-	-	375,2-377,0	<b>376,1</b>	425,4-427,4	<b>426,2</b>	421,0-426,2	<b>423,6</b>
<b>30</b>	-	-	354,5-357,4	<b>355,9</b>	406,0-409,5	<b>407,8</b>	402,6-408,0	<b>405,3</b>

### 5.3.2.3 Отпор према цепању гуме

Одређивање отпора према цепању гумених узорак извршено је према поступку који је описан у потпоглављу 4.4.1.3. Средње вредности отпора према цепању гуме израчунате на основу мерења код узорак за различите режиме умешавања приказане су у табели 5.12.



Табела 5.12 Отпор према цепању гуме за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А $\tau$ (N/mm)		M1 $\tau$ (KN/mm)		M2 $\tau$ (KN/mm)		M3 $\tau$ (KN/mm)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	115,8-121,0	<b>118.5</b>						
<b>20</b>			60,8-63,0	<b>61.9</b>	59,2-64,2	<b>61.7</b>	58,7-64,1	<b>61.4</b>
<b>30</b>			47,2-51,6	<b>49.9</b>	44,1-52,6	<b>48.5</b>	45,5-49,9	<b>47.7</b>

#### 5.3.2.4 Трајна деформација сабијањем на 25% од почетне висне

Одређивање трајне деформације сабијањем на 25% почетне висине епрувете описано је у потпоглављу 4.4.1.4. Средње вредности трајне деформација израчунате су на основу мерења и приказане су у табели 5.13, при чему је висина граничника износила 9,3 mm.

Табела 5.13 Трајна деформација сабијањем узорака за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А $T_{dk}$ (%)		M1 $T_{dk}$ (%)		M2 $T_{dk}$ (%)		M3 $T_{dk}$ (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	20,3-20,8	<b>20,5</b>						
<b>20</b>			11,9-14,9	<b>13,4</b>	24,0-29,4	<b>26,7</b>	26,4-28,6	<b>27,5</b>
<b>30</b>			11,1-12,7	<b>11,9</b>	26,1-27,4	<b>27,3</b>	28,0-29,7	<b>28,9</b>

#### 5.3.2.5 Отпорност према хабању

Одређивање отпорности према хабању описано је у потпоглављу 4.4.1.5. Израчунате средње вредности отпорности према хабању приказане су у табели 5.14.



Табела 5.14 Хабање узорака од NR-гуме

Удео РГП (phr)	А H <sub>z</sub> (mm <sup>3</sup> )		M1 H <sub>z</sub> (mm <sup>3</sup> )		M2 H <sub>z</sub> (mm <sup>3</sup> )		M3 H <sub>z</sub> (mm <sup>3</sup> )	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	119,7-120,3	<b>120</b>						
<b>20</b>			114,8-115,2	<b>115</b>	137,6-138,4	<b>138</b>	139,7-140,2	<b>140</b>
<b>30</b>			112,5-113,5	<b>112</b>	143,7-144,2	<b>144</b>	146,8-147,3	<b>147</b>

### 5.3.3 Својства гуме на бази природног и природног/синтетичког каучука са различитим уделом немодификованог и модификованог гуменог праха

У овом поглављу су приказани резултати испитивања статичких својстава NR и NR/SBR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 (модификација РГП изведена мешањем на двоваљку у додавање *TDTM* и *CLD*). НМГП је додат после црног пунила (чађи).

#### 5.3.3.1 Тврдоћа гуме

Мерење тврдоће узорака описано је у потпоглављу 4.4.1.1. Испитивани су узорци пре и после старења на температури од 70°C у трајању од 72 сата. Средња вредност измерене тврдоћа узорака од NR-гуме, пре и после старења, приказана је у табели 5.15.

Табела 5.15 Тврдћа гумених узорака од NR-гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП (ShA)		МГП1 (ShA)		НМГП (ShA)		МГП1 (ShA)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	56-57	<b>57</b>		/		<b>58</b>		/
<b>3</b>	56-57	<b>57</b>	57-58	<b>58</b>	56-58	<b>58</b>	57-58	<b>58</b>
<b>5</b>	56-57	<b>57</b>	57-58	<b>58</b>	57-89	<b>59</b>	58-59	<b>59</b>
<b>10</b>	56-58	<b>58</b>	58-59	<b>58</b>	58-59	<b>59</b>	59-60	<b>59</b>
<b>20</b>	57-59	<b>58</b>	59-60	<b>60</b>	59-60	<b>59</b>	60-61	<b>61</b>
<b>30</b>	58-59	<b>59</b>	61-63	<b>62</b>	59-60	<b>60</b>	63-64	<b>64</b>
<b>50</b>	59-61	<b>60</b>	66-67	<b>67</b>	60-62	<b>61</b>	67-69	<b>68</b>



Средња вредност измерене тврдоћа гумених узорака NR/SBR-гуме, пре и после старења, приказана је у табели 5.16.

Табела 5.16 Тврдоћа гумених узорака од NR/SBR-гуме

Удео РГП (phr)	НМГП (ShA)		МГП1 (ShA)		НМГП (ShA)		МГП1 (ShA)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	52-53	<b>53</b>		/	53-54	<b>53</b>		/
<b>20</b>	57-58	<b>58</b>	62-63	<b>62</b>	57-59	<b>58</b>	62-63	<b>62</b>
<b>30</b>	63-64	<b>64</b>	65-66	<b>65</b>	64-66	<b>65</b>	65-66	<b>66</b>

### 5.3.3.2 Затезна својства

Одређивање затезне чврстоће узорака описано је у потпоглављу 4.4.1.2. Израчунате средње вредности затезне чврстоће NR-гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.17.

Табела 5.17 Затезна чврстоћа узорака од NR-гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП Ts (MPa)		МГП1 Ts (MPa)		НМГП Ts (MPa)		МГП1 Ts (MPa)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	22,9-23,5	<b>23.2</b>		/	21,8-23,6	<b>22,7</b>		/
<b>3</b>	20,7-21,5	<b>21.1</b>	20,9-23,3	<b>22.1</b>	19,3-21,9	<b>20,5</b>	20,1-21,1	<b>21,2</b>
<b>5</b>	19,0-20,6	<b>19.8</b>	20,0-21,4	<b>20.7</b>	18,8-20,0	<b>19,4</b>	18,7-21,5	<b>20,1</b>
<b>10</b>	18,1-19,5	<b>18.8</b>	18,8-20,7	<b>19.8</b>	17,1-18,9	<b>18,0</b>	18,6-20,2	<b>19,4</b>
<b>20</b>	17,2-18,8	<b>18.0</b>	19,1-19,9	<b>19.5</b>	16,7-18,5	<b>17,6</b>	18,1-19,3	<b>18,7</b>
<b>30</b>	15,5-17,1	<b>16.3</b>	16,4-18,5	<b>17.5</b>	15,3-16,3	<b>15,8</b>	16,2-17,6	<b>16,9</b>
<b>50</b>	11,1-16,5	<b>13.8</b>	13,3-17,3	<b>15.3</b>	12,7-13,7	<b>13,2</b>	14,6-15,2	<b>14.9</b>

Израчунате средње вредности затезне чврстоће код NR/SBR -гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.18.





Табела 5.18 Затезна чврстоћа узорака од NR/SBR -гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП Ts (MPa)		МГП1 Ts (MPa)		НМГП Ts (MPa)		МГП1 Ts (MPa)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	24,5-25,5	<b>25,0</b>		/	23,1-25,0	<b>24,1</b>		/
<b>20</b>	20,9-21,8	<b>20,9</b>	20,7-22,3	<b>21,5</b>	19,8-20,5	<b>20,3</b>	19,8-21	<b>20,4</b>
<b>30</b>	17,7-19,3	<b>18,5</b>	21,4-23,6	<b>22,5</b>	17,7-18,5	<b>18,1</b>	21,3-22,9	<b>22,1</b>

Одређивање прекидног издужења описано је у потпоглављу 4.4.1.2. Израчунате средње вредности прекидног издужења NR-гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.19.

Табела 5.19 Прекидно издужење узорака од NR-гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП Еб (%)		МГП1 Еб (%)		НМГП Еб (%)		МГП1 Еб (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	418,8-462,9	<b>440,9</b>		/	419,1-436,1	<b>427,6</b>		/
<b>3</b>	382,2-422,0	<b>398,2</b>	415,9-424,4	<b>420,2</b>	374,6-397,6	<b>386,2</b>	395,5-411,7	<b>403,6</b>
<b>5</b>	372,1-395,1	<b>383,6</b>	401,4-416,7	<b>408,6</b>	368,4-391,2	<b>379,8</b>	380,5-404,1	<b>392,3</b>
<b>10</b>	345,2-405,2	<b>375,2</b>	383,3-425,7	<b>403,5</b>	352,8-359,9	<b>356,4</b>	383,4-415,4	<b>399,4</b>
<b>20</b>	344,5-365,8	<b>355,2</b>	361,0-398,7	<b>376,1</b>	337,6-358,5	<b>348,1</b>	339,4-382,8	<b>361,1</b>
<b>30</b>	338,1-381,9	<b>345,0</b>	345,2-363,0	<b>355,9</b>	311,3-351,1	<b>331,2</b>	331,4-359,0	<b>345,2</b>
<b>50</b>	320,5-347,3	<b>333,9</b>	267,0-283,6	<b>275,3</b>	310,8-343,6	<b>327,2</b>	245,6-288,4	<b>267,0</b>

Израчунате средње вредности прекидног издужења код NR/SBR -гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.20.



Табела 5.20 Прекидно издужење узорака од NR/SBR -гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП Eb (%)		МГП1 Eb (%)		НМГП Eb (%)		МГП1 Eb (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	528,7-558,3	<b>542,0</b>		/	520,0-526,2	<b>523,1</b>		/
<b>20</b>	425,7-452,1	<b>438,9</b>	347,8-376,8	<b>362,3</b>	425,8-434,1	<b>430,1</b>	330,3-372,5	<b>351,4</b>
<b>30</b>	382,7-441,8	<b>420,8</b>	435,8-453,6	<b>444,7</b>	400,1-412,1	<b>406,1</b>	407,7-437,1	<b>424,4</b>

Одређивање вредности модула 100 (напрезање при издужењу од 100% мерног дела епрувете) описано је у потпоглављу 4.4.1.2. Израчунате средње вредности модула 100 NR-гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.21.

Табела 5.21 Вредности модула 100 епрувета од NR-гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП M <sub>100</sub> (MPa)		МГП1 M <sub>100</sub> (MPa)		НМГП M <sub>100</sub> (MPa)		МГП1 M <sub>100</sub> (MPa)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	3,9-4,1	<b>4,0</b>			3,8-4,0	<b>3,9</b>		
<b>3</b>	2,4-2,8	<b>2,6</b>	2,6-2,8	<b>2,7</b>	2,4-2,6	<b>2,5</b>	2,5-2,7	<b>2,6</b>
<b>5</b>	2,4-2,6	<b>2,5</b>	2,8-3,0	<b>2,8</b>	2,3-2,5	<b>2,4</b>	2,6-2,8	<b>2,7</b>
<b>10</b>	2,3-2,5	<b>2,4</b>	2,7-2,9	<b>2,8</b>	2,3-2,5	<b>2,4</b>	2,5-2,7	<b>2,6</b>
<b>20</b>	2,6-3	<b>2,8</b>	3,4-3,6	<b>3,5</b>	2,6-2,7	<b>2,7</b>	3,3-3,5	<b>3,4</b>
<b>30</b>	2,6-2,8	<b>2,7</b>	3,7-3,9	<b>3,8</b>	2,5-2,7	<b>2,6</b>	3,5-3,7	<b>3,6</b>
<b>50</b>	2,2-2,4	<b>2,3</b>	4,0-4,1	<b>4,1</b>	2,1-2,2	<b>2,2</b>	3,9-4,1	<b>4</b>

Израчунате средње вредности модула 100 епрувете од NR/SBR -гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.22.



Табела 5.22 Вредности модула 100 епрувета од NR/SBR -гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП M <sub>100</sub> (МПа)		МГП1 M <sub>100</sub> (МПа)		НМГП M <sub>100</sub> (МПа)		МГП1 M <sub>100</sub> (МПа)	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	2,2-2,4	<b>2,3</b>			2,2-2,4	<b>2,3</b>		
<b>20</b>	2,3-2,5	<b>2,4</b>	2,4-2,6	<b>2,5</b>	2,3-2,5	<b>2,4</b>	2,3-2,5	<b>2,4</b>
<b>30</b>	2,3-2,5	<b>2,4</b>	2,7-2,9	<b>2,8</b>	2,2-2,4	<b>2,3</b>	2,7-2,9	<b>2,8</b>

### 5.3.3.3 Отпор према цепању гуме

Одређивање отпор према цепању гумених узорача описано је у потпоглављу 4.4.1.3. Израчунате средње вредности отпора према цепању NR-гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.23.

Табела 5.23 Отпор према цепању узорача од NR-гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП τ (N/mm)		МГП1 τ (N/mm)		НМГП τ (N/mm)		МГП1 τ (N/mm)	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	113,7-123,1	<b>118,4</b>			111,9-123,7	<b>117,8</b>		
<b>3</b>	59,3-62,9	<b>61,1</b>	80,8-89,2	<b>85,0</b>	56,9-61,7	<b>59,3</b>	80,0-85,0	<b>82,5</b>
<b>5</b>	57,4-62,2	<b>59,8</b>	81,2-88,0	<b>84,6</b>	56,4-61,0	<b>58,1</b>	79,1-85,7	<b>82,4</b>
<b>10</b>	56,9-61,7	<b>59,3</b>	78,5-83,3	<b>80,9</b>	54,0-58,6	<b>56,3</b>	74,2-78,8	<b>76,5</b>
<b>20</b>	53,6-59,2	<b>56,4</b>	59,1-64,4	<b>61,9</b>	54,1-57,5	<b>55,8</b>	56,4-61,2	<b>58,8</b>
<b>30</b>	35,5-38,4	<b>36,6</b>	47,1-52,1	<b>49,6</b>	34,1-36,9	<b>35,5</b>	44,7-48,5	<b>46,6</b>
<b>50</b>	29,6-32,0	<b>30,8</b>	36,8-40,4	<b>38,8</b>	28,6-31,0	<b>29,8</b>	26,6-39,9	<b>38,0</b>

Израчунате средње вредности отпора према цепању NR/SBR-гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.24.



Табела 5.24 Отпор према цепању узорака од NR/SBR -гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП $\tau$ (N/mm)		МГП1 $\tau$ (N/mm)		НМГП $\tau$ (N/mm)		МГП1 $\tau$ (N/mm)	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	84,5-92,0	<b>88,5</b>		/	79,9-86,5	<b>83,2</b>		/
<b>20</b>	77,8-84,2	<b>81,0</b>	82,5-87,6	<b>85,1</b>	74,6-82,4	<b>78,5</b>	75,2-81,4	<b>78,3</b>
<b>30</b>	46,1-50,9	<b>48,5</b>	55,2-59,8	<b>57,5</b>	45,6-49,9	<b>47,5</b>	45,3-49,1	<b>47,2</b>

#### 5.3.3.4 Трајна деформација сабијањем на 25% од почетне висне

Одређивање трајне деформације сабијањем на 25% почетне висине описано је у потпоглављу 4.4.1.4. Средње вредности трајне деформација сабијањем на 25% од почетне висне код NR-гуме, израчунате на основу мерења приказане су у табели 5.25, при чему је висина граничника износила 9,3 mm.

Табела 5.25 Трајна деформација сабијањем код NR-гуме

Удео РГП (phr)	НМГП $T_{dk}$ (%)		МГП1 $T_{dk}$ (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	22,2-24,0	<b>23,1</b>		/
<b>3</b>	22,0-24,4	<b>23,2</b>	21,0-22,8	<b>21,9</b>
<b>5</b>	24,1-26,1	<b>25,1</b>	18,6-20,6	<b>19,6</b>
<b>10</b>	25,6-27,8	<b>26,7</b>	17,8-19,3	<b>18,6</b>
<b>20</b>	18,4-20,0	<b>19,2</b>	12,5-13,5	<b>13,0</b>
<b>30</b>	24,4-27,0	<b>25,7</b>	11,3-12,5	<b>11,9</b>
<b>50</b>	27,2-28,8	<b>28,0</b>	14,4-15,6	<b>15,0</b>

Средње вредности трајне деформација сабијањем на 25% од почетне висине код NR/SBR-гуме, израчунате на основу мерења приказане су у табели 5.26, при чему је висина граничника износила 9,3 mm.



Табела 5.26 Трајна деформација сабијањем код NR/SBR-гуме

Удео РГП (phr)	НМГП T <sub>dk</sub> (%)		МГП1 T <sub>dk</sub> (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	21,9-23,7	<b>22,8</b>		/
<b>20</b>	28,5-30,9	<b>29,7</b>	17,2-18,6	<b>17,9</b>
<b>30</b>	27,0-28,6	<b>27,8</b>	11,9-12,9	<b>12,4</b>

### 5.3.3.5 Отпорност према хабању

Одређивање отпорности према хабању описано је у потпоглављу 4.4.1.5. Израчунате средње вредности хабања код NR-гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.27.

Табела 5.27 Хабање узорака од NR-гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП Hz(mm <sup>3</sup> )		МГП1 Hz(mm <sup>3</sup> )		НМГП Hz(mm <sup>3</sup> )		МГП1 Hz(mm <sup>3</sup> )	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	115-125	<b>120</b>		/	114-126	<b>120</b>		/
<b>3</b>	120-132	<b>126</b>	115-125	<b>120</b>	112-132	<b>126</b>	114-126	<b>120</b>
<b>5</b>	126-135	<b>131</b>	114-124	<b>119</b>	127-135	<b>131</b>	114-124	<b>119</b>
<b>10</b>	136-144	<b>140</b>	111-123	<b>117</b>	136-144	<b>140</b>	111-123	<b>117</b>
<b>20</b>	142-152	<b>148</b>	110-120	<b>115</b>	142-152	<b>148</b>	110-120	<b>115</b>
<b>30</b>	149-161	<b>155</b>	107-116	<b>112</b>	150-160	<b>155</b>	107-116	<b>112</b>
<b>50</b>	164-182	<b>173</b>	104-114	<b>109</b>	168-178	<b>173</b>	105-113	<b>109</b>

Израчунате средње вредности отпора према хабања код NR/SBR -гуме на основу мерења, пре и после старења приказане су у табели 5.28.



Табела 5.28 Хабање узорака од NR/SBR -гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП Hz(mm <sup>3</sup> )		МГП1 Hz(mm <sup>3</sup> )		НМГП Hz(mm <sup>3</sup> )		МГП1 Hz(mm <sup>3</sup> )	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	105-113	<b>109</b>		/	104-114	<b>109</b>		/
<b>20</b>	130-140	<b>135</b>	101-111	<b>106</b>	131-139	<b>135</b>	102-110	<b>106</b>
<b>30</b>	137-149	<b>143</b>	98-106	<b>102</b>	137-149	<b>143</b>	98-106	<b>102</b>

#### 5.3.4 Трајна деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине

Одређивање трајне деформације истезањем за 100% мерне дужине описано је у потпоглављу 4.4.1.6. Средње вредности трајне деформација истезањем за 100% мерне дужине код NR-гуме, израчунате на основу мерења приказане су у табели 5.29.

Табела 5.29 Трајна деформација истезањем узорака од NR-гуме

Удео РГП (phr)	НМГП T <sub>D</sub> (%)		МГП1 T <sub>D</sub> (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	14,6-16,0	<b>15.2</b>	14,6-16,0	<b>15.2</b>
<b>3</b>	15,6-16,8	<b>16.2</b>	15,0-16,2	<b>15.6</b>
<b>5</b>	15,2-16,8	<b>16.0</b>	12,7-13,7	<b>13.2</b>
<b>10</b>	12,4-13,7	<b>13.0</b>	0,97-10,3	<b>10.0</b>
<b>20</b>	11,7-12,7	<b>12.2</b>	7,9-8,4	<b>8.2</b>
<b>30</b>	10,6-11,4	<b>11.0</b>	8,9-9,7	<b>9.3</b>
<b>50</b>	20,0-21,6	<b>20.8</b>	12,9-14,3	<b>13.6</b>

Средње вредности трајне деформација истезањем за 100% мерне дужине код NR/SBR-гуме, израчунате на основу мерења приказане су у табели 5.30.



Табела 5.30 Трајна деформација истезањем узорака од NR/SBR -гуме

Удео РГП (phr)	НМГП Т <sub>D</sub> (%)		МГП1 Т <sub>D</sub> (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	22,9-25,3	<b>24,1</b>		
<b>20</b>	22,0-23,8	<b>22,9</b>	15,8-17,2	<b>16,5</b>
<b>30</b>	20,2-22,2	<b>21,1</b>	12,7-13,7	<b>13,2</b>

### 5.3.5 Испитивања промене статичких својстава гуме вештачким старењем

Поступак испитивања гуме вештачким старењем описан је у поглављу 4.4.3. Промене својстава гуме израчунате су на основу једначина 4.20, за промену тврдоће гуме, и 4.21 за промену свих осталих својстава гуме. У табели 5.31 приказана је промена статичких својстава NR-гуме после вештачког старења, док је у табели 5.32 приказана промена статичких својстава NR/SBR-гуме после вештачког старења.

Табела 5.31 Промена статичких својстава NR-гуме после вештачког старења

Промена статичког својства (%)	Удео НМГП (phr)							Удео МГП1 (phr)						
	0	3	5	10	20	30	50	3	5	10	20	30	50	
Тврдоћа	1	1	1	0	2	3	7	0	0	0	2	4	7	
Затезна чврстоћа	-2,2	-2,8	-2,0	-4,3	-2,2	-3,1	-4,3	-4,1	-2,9	-2,0	-4,1	-3,4	-2,6	
Прекидо издужење	-3,0	-3,0	-0,1	-5,0	-2,0	-4,0	-2,0	-4,0	-4,0	-1,0	-3,9	-3,0	-3,0	
M <sub>100</sub>	-2,5	-3,8	-4,0	0	-3,6	-3,7	-4,3	-3,7	-3,6	-7,1	-2,9	-5,3	-2,4	
Отпорност према цепању	-5,1	-2,9	-2,8	-5,1	-1,1	-3,0	-3,2	-2,9	-2,6	-5,4	-5,0	-6,0	-2,1	
Отпорност према хабању	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	



Табела 5.32 Промена статичких својстава NR/SBR-гуме после вештачког старења

Промена статичког својства (%)	Удео НМГП (phr)			Удео МГП1 (phr)	
	0	20	30	20	30
Тврдоћа	0	0	1	0	1
Затезна чврстоћа	-3,6	-2,9	-2,2	-5,1	-1,8
Прекидо издужење	-3,5	-2,0	-3,5	-3,0	-4,6
M <sub>100</sub>	0	0	-4,2	-4,0	0
Отпорност према цепању	-5,9	-3,1	-2,1	-8,0	-17,0
Отпорност према хабању	0	0	0	0	0

## 5.4 Динамичка својства гуме са рециклираним гуменим прахом

### 5.4.1 Динамичка својства гуме на бази природног каучука при различитој модификацији гуменог праха

У овом поглављу су приказани резултати испитивања динамичких својстава NR-гуме за различите поступке модификације РГП при уделу од 20 phr и 30 phr (гума М1-модификација РГП извршена *TDTM* и *CLD* ; гума М2 – модификација РГП изведена *CLD*, гума М3 – модификација изведена *LIR-50*, хемикалије додаване уз мешање на двоваљку).

#### 5.4.1.1 Одбојна еластичност

Одређивање одбојне еластичности урађено је према опису који је дат у потпоглављу 4.4.2.1. Средње вредности одбојне еластичности израчунате на основу мерења код узорака при различитој модификацији рециклираног гуменог праха приказане су у табели 5.33.

Табела. 5.33 Одбојна еластичност узорака од NR-гуме

Удео РГП (phr)	А η (%)		М1 η (%)		М2 η (%)		М3 η (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
0	39-40	40		/		/		/
20			34-36	35	35-36	36	36-37	37
30			34-35	34	35-36	35	35-36	36





### 5.4.1.2 Еластичност по Yertzley

Одређивање еластичности по Yertzley описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности еластичности по Yertzley узорака за различите врсте модификације приказане су у табели 5.34.

Табела 5.34 Еластичност по Yertzley узорака за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А E <sub>v</sub> (%)		M1 E <sub>v</sub> (%)		M2 E <sub>v</sub> (%)		M3 E <sub>v</sub> (%)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
0	78,6-81,8	<b>80,2</b>	-	-	-	-	-	-
20	-	-	69,1-74,8	<b>72</b>	69.7-72.5	<b>71,1</b>	76.3-81.0	<b>78,7</b>
30	-	-	71.3-77.3	<b>74,3</b>	67.9-72.1	<b>70</b>	72.1-73.8	<b>71</b>

### 5.4.1.3 Хистерезис по Yertzley

Одређивање хистерезиса по Yertzley описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности хистерезиса по Yertzley узорака за различите врсте модификације приказане су у табели 5.35.

Табела 5.35 Хистерезис по Yertzley узорака за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А H <sub>y</sub> (%)	M1 H <sub>y</sub> (%)	M2 H <sub>y</sub> (%)	M3 H <sub>y</sub> (%)
	средња вредност	средња вредност	средња вредност	средња вредност
0	<b>19,8</b>	-	-	-
20	-	<b>28</b>	<b>28,9</b>	<b>21,3</b>
30	-	<b>25,7</b>	<b>30</b>	<b>29</b>

### 5.4.1.4 Ефективни динамички модул

Одређивање ефективног динамичког модула описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности ефективног динамичког модула узорака за различите типове модификације приказане су у табели 5.36



Табела 5.36 Ефективни динамички модул узорака за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А К <sub>с</sub> (МПа)		М1 К <sub>с</sub> (МПа)		М2 К <sub>с</sub> (МПа)		М3 К <sub>с</sub> (МПа)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
0	2,4-2,6	2,5	-	-	-	-	-	-
20	-	-	2,9-3,1	2,98	3,5-3,6	3,55	3,5-3,6	3,55
30	-	-	3,8-4,1	3,97	2,6-2,9	2,75	3,5-3,6	3,55

#### 5.4.1.5 Апсорбована енергија удара

Одређивање апсорбоване енергије удара описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности апсорбоване енергије удара узорака за различите типове модификације приказане су у табели 5.37

Табела 5.37 Апсорбоване енергије удара узорака за различите типове модификације

Удео РГП (phr)	А Е <sub>с</sub> (J/m <sup>3</sup> )		М1 Е <sub>с</sub> (J/m <sup>3</sup> )		М2 Е <sub>с</sub> (J/m <sup>3</sup> )		М3 Е <sub>с</sub> (J/m <sup>3</sup> )	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
0	11,3-11,7	11,5	-	-	-	-	-	-
20	-	-	14,1-15,6	14,7	13-13,6	13,3	13-13,2	13,1
30	-	-	15,5-17,1	16,3	13,9-15,7	14,8	12,5-13,5	13,0

#### 5.4.2 Динамичка својства гуме на бази природног и природног/синтетичког каучука са немодификованим и модификованим гуменим прахом

У овом поглављу су приказани резултати испитивања динамичких својстава NR и NR/SBR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 (модификација РГП изведена мешањем на двоваљку у додавање *TDTM* и *CLD*). НМГП је додат после црног пунила (чађи).



#### 5.4.2.1 Одбојна еластичност

Одређивање одбојне еластичности урађено је према опису који је дат у потпоглављу 4.4.2.1. Средње вредности одбојне еластичности израчунате на основу мерења код узорака од NR-гуме пре и после старења приказане су у табели 5.38.

Табела. 5.38 Одбојна еластичност узорака од NR-гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП η (%)		МГП1 η (%)		НМГП η (%)		МГП1 η (%)	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	39-40	<b>40</b>		/	38-40	<b>38</b>		/
<b>3</b>	37-38	<b>38</b>	37-38	<b>38</b>	37-39	<b>38</b>	38-39	<b>38</b>
<b>5</b>	36-36	<b>37</b>	37-38	<b>37</b>	36-37	<b>37</b>	36-37	<b>37</b>
<b>10</b>	34-36	<b>36</b>	35-36	<b>36</b>	36-37	<b>36</b>	35-36	<b>35</b>
<b>20</b>	34-35	<b>36</b>	34-36	<b>35</b>	34-35	<b>35</b>	34-35	<b>35</b>
<b>30</b>	34-35	<b>35</b>	34-35	<b>34</b>	34-35	<b>34</b>	33-34	<b>33</b>
<b>50</b>	33-34	<b>34</b>	34-35	<b>34</b>	33-34	<b>34</b>	32-33	<b>33</b>

Средње вредности одбојне еластичности израчунате на основу мерења код узорака од NR/SBR -гуме пре и после старења приказане су у табели 5.39.

Табела 5.39 Одбојна еластичност узорака од NR/SBR -гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП η (%)		МГП1 η (%)		НМГП η (%)		МГП1 η (%)	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	36-37	<b>36</b>		/		<b>36</b>		/
<b>20</b>	35-36	<b>35</b>	34-36	<b>35</b>	34-36	<b>34</b>	34-35	<b>34</b>
<b>30</b>	33-34	<b>34</b>	33-34	<b>34</b>	34-35	<b>34</b>	33-35	<b>33</b>



### 5.4.2.2 Еластичност по Yerzley

Одређивање еластичности по Yerzley описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности еластичности по Yerzley узорака од NR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 приказане су у табели 5.40.

Табела 5.40 Еластичност по Yerzley узорака од NR-гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП E <sub>y</sub> (%)		МГП1 E <sub>y</sub> (%)		НМГП E <sub>y</sub> (%)		МГП1 E <sub>y</sub> (%)	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	78,6-81,8	<b>80,2</b>			73,9-81,7	<b>77,8</b>		
<b>3</b>	71,2-78,6	<b>74,9</b>	71,9-77,9	<b>74,9</b>	70,56-76,4	<b>73,5</b>	69,7-77,0	<b>73,4</b>
<b>5</b>	67,2-7,8	<b>70,0</b>	72,1-76,5	<b>74,3</b>	65,9-71,5	<b>68,7</b>	69,2-72,0	<b>70,6</b>
<b>10</b>	64,9-74,7	<b>69,8</b>	72-76,4	<b>74,2</b>	67,2-68,8	<b>68</b>	70,6-73,4	<b>72</b>
<b>20</b>	66,9-71,1	<b>69,0</b>	70,4-77,8	<b>74,1</b>	67,1-68,5	<b>67,8</b>	68,9-7302	<b>71,1</b>
<b>30</b>	61,9-68,5	<b>65,9</b>	70,5-73,3	<b>71,9</b>	63,2-65,8	<b>64,5</b>	65,5-73,2	<b>69,7</b>
<b>50</b>	59,6-68,6	<b>64,1</b>	64,7-72,9	<b>68,8</b>	60,2-66,5	<b>63,4</b>	63,4-70,0	<b>66,7</b>

Одређивање еластичности по Yerzley описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности еластичности по Yerzley узорака од NR/SBR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 приказане су у табели 5.41.

Табела 5.41 Еластичност по Yerzley узорака од NR/SBR-гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП E <sub>y</sub> (%)		МГП1 E <sub>y</sub> (%)		НМГП E <sub>y</sub> (%)		МГП1 E <sub>y</sub> (%)	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	68,1-72,3	<b>70,2</b>		/	65,4-70,8	<b>68,1</b>		/
<b>20</b>	66,2-71,3	<b>67,9</b>	71,1-73,9	<b>72,5</b>	65,9-68,6	<b>67,2</b>	67,5-70,3	<b>68,9</b>
<b>30</b>	63,6-67,6	<b>65,6</b>	70,5-73,3	<b>71,9</b>	59,4-65,6	<b>62,5</b>	67,0-72,4	<b>69,7</b>



### 5.4.2.3 Хистерезис по Yerzley

Одређивање хистерезиса по Yerzley описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности хистерезиса по Yerzley од NR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 приказане су у табели 5.42.

Табела 5.42 Хистерезис по Yerzley узорака од NR-гуме

	Пре старења		После старења	
	НМГП Н <sub>y</sub> (%)	МГП1 Н <sub>y</sub> (%)	НМГП Н <sub>y</sub> (%)	МГП1 Н <sub>y</sub> (%)
Удео РГП (phr)	средња вредност	средња вредност	средња вредност	средња вредност
0	19,8		22,2	
3	25,1	25,1	26,5	26,6
5	30,0	25,7	31,3	29,4
10	30,2	25,8	32	28
20	31,0	25,9	32,2	28,9
30	34,1	28,1	35,5	30,7
50	35,9	31,2	36,6	33,3

Одређивање хистерезиса по Yerzley описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности хистерезиса по Yerzley од NR/SBR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 приказане су у табели 5.45.

Табела 5.43 Хистерезис по Yerzley узорака од NR/SBR-гуме

	Пре старења		После старења	
	НМГП Н <sub>y</sub> (%)	МГП1 Н <sub>y</sub> (%)	НМГП Н <sub>y</sub> (%)	МГП1 Н <sub>y</sub> (%)
Удео РГП (phr)	средња вредност	средња вредност	средња вредност	средња вредност
0	29,8		31,9	
20	32,1	27,5	32,8	31,1
30	34,4	28,1	37,5	30,3



#### 5.4.2.4 Ефективни динамички модул

Одређивање ефективног динамичког модула описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности ефективног динамичког модула од NR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 приказане су у табели 5.44.

Табела 5.44 Ефективни динамички модул узорака од NR-гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП К <sub>c</sub> (МПа)		МГП1 К <sub>c</sub> (МПа)		НМГП К <sub>c</sub> (МПа)		МГП1 К <sub>c</sub> (МПа)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	2,4-2,6	<b>2,5</b>			2,1-2,4	<b>2,3</b>		/
<b>3</b>	2,4-2,6	<b>2,5</b>	1,2-1,8	<b>1,5</b>	2,0-2,6	<b>2,3</b>	1,1-1,5	<b>1,3</b>
<b>5</b>	3,0-3,4	<b>3,2</b>	2,6-3,0	<b>2,8</b>	2,9-3,3	<b>3,1</b>	2,7-2,9	<b>2,8</b>
<b>10</b>	2,9-3,7	<b>3,3</b>	2,8-3,2	<b>3,0</b>	3-3,4	<b>3,2</b>	2,7-2,9	<b>2,8</b>
<b>20</b>	3,8-4,2	<b>4,0</b>	2,8-3,2	<b>3,0</b>	3,3-4,1	<b>3,7</b>	2,7-3,1	<b>2,9</b>
<b>30</b>	4,0-4,6	<b>4,3</b>	3,7-4,3	<b>4,0</b>	3,8-4,2	<b>4,0</b>	3,3-3,8	<b>3,5</b>
<b>50</b>	4,4-5,0	<b>4,7</b>	4,2-4,8	<b>4,5</b>	4-4,8	<b>4,4</b>	3,8-4,2	<b>4,0</b>

Одређивање ефективног динамичког модула описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности ефективног динамичког модула од NR/SBR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 приказане су у табели 5.45.

Табела 5.45 Ефективни динамички модул узорака од NR/SBR-гуме

Удео РГП (phr)	Пре старења				После старења			
	НМГП К <sub>c</sub> (МПа)		МГП1 К <sub>c</sub> (МПа)		НМГП К <sub>c</sub> (МПа)		МГП1 К <sub>c</sub> (МПа)	
	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	3-3,2	<b>3,1</b>			2,7-3,1	<b>2,9</b>		
<b>20</b>	3,2-3,8	<b>3,5</b>	3,2-3,6	<b>3,4</b>	3,1-3,5	<b>3,3</b>	3,3-3,4	<b>3,2</b>
<b>30</b>	4,1-4,5	<b>4,3</b>	3,9-4,5	<b>4,2</b>	3,8-4,2	<b>4</b>	3,8-4	<b>3,9</b>



### 5.4.2.5 Апсорбована енергија удара

Одређивање апсорбоване енергије удара описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности апсорбоване енергије удара од NR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 приказане су у табели 5.42.

Табела 5.46 Апсорбоване енергије удара узорака од NR-гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП Е <sub>c</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )		МГП1 Е <sub>c</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )		НМГП Е <sub>c</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )		МГП1 Е <sub>c</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	11,3-11,7	<b>11,5</b>				<b>11,2</b>		/
<b>3</b>	12,2-13,0	<b>12,6</b>	12,7-12,9	<b>12,8</b>	12,0-12,6	<b>12,3</b>	12,1-12,9	<b>12,5</b>
<b>5</b>	12,3-12,9	<b>12,6</b>	13,5-13,9	<b>13,7</b>	12,1-12,3	<b>12,2</b>	13,0-13,8	<b>13,4</b>
<b>10</b>	13,0-13,6	<b>13,3</b>	14,0-14,4	<b>14,2</b>	12,6-13,2	<b>12,9</b>	13,7-14,3	<b>14</b>
<b>20</b>	13,3-13,7	<b>13,5</b>	14,4-15,0	<b>14,7</b>	13,0-13,2	<b>13,1</b>	14,1-14,7	<b>14,4</b>
<b>30</b>	13,3-14,5	<b>13,9</b>	16,0-16,6	<b>16,3</b>	13,0-13,8	<b>13,4</b>	15,5-15,9	<b>15,7</b>
<b>50</b>	15,9-16,7	<b>16,3</b>	16,1-16,5	<b>16,3</b>	15,8-16,2	<b>16,0</b>		<b>15,9</b>

Одређивање апсорбоване енергије удара описано је у потпоглављу 4.4.2.2. Израчунате средње вредности апсорбоване енергије удара од NR/SBR-гуме са различитим уделом НМГП и МГП1 приказане су у табели 5.47.

Табела 5.47 Апсорбоване енергије удара узорака од NR/SBR-гуме

	Пре старења				После старења			
	НМГП Е <sub>c</sub> (J/m <sup>3</sup> )		МГП1 Е <sub>c</sub> (J/m <sup>3</sup> )		НМГП Е <sub>c</sub> (J/m <sup>3</sup> )		МГП1 Е <sub>c</sub> (J/m <sup>3</sup> )	
Удео РГП (phr)	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност	измерено	средња вредност
<b>0</b>	11,5-1,1	<b>11,8</b>			10,8-11,2	<b>11</b>		
<b>20</b>	11,7-12,1	<b>11,9</b>	14,0-14,6	<b>14,3</b>	10,9-11,5	<b>11,2</b>	13,7-14,1	<b>13,9</b>
<b>30</b>	15,9-16,5	<b>16,2</b>	14,4-15,0	<b>14,7</b>	15,5-16,1	<b>15,8</b>	14,0-14,4	<b>14,2</b>



### 5.4.3 Испитивање промене динамичких својстава гуме вештачким старењем

Поступак испитивања гуме вештачким старењем описан је у потпоглављу 4.4.3. Промене динамичких својстава гуме израчунате су на основу једначине 4.21. У табели 5.48 приказана је промена динамичких својстава NR-гуме после вештачког старења, док је у табели 5.49 приказана промена динамичких својстава NR/SBR-гуме после вештачког старења.

Табела 5.48 Промена динамичких својстава NR-гуме после вештачког старења

Промена динамичког својства (%)	Удео НМГП (phr)							Удео МГП1 (phr)					
	0	3	5	10	20	30	50	3	5	10	20	30	50
Одбојна еластичност	-5,0	0	0	0	-2,7	-2,9	0	0	0	-2,8	0	-2,9	-2,9
Еластичност по Yertzley	-3	-1,9	-1,9	-2,6	-1,7	-2,2	-1,1	-2	-4,9	-2,9	-4	-3,1	-3,1
Хистерезис по Yertzley	+12,1	+5,6	+4,3	+6	+4,2	+4,1	+1,9	+5,9	+14,3	+8,5	+11,5	+9,3	+6,5
Ефективни динамички модул	-8	-8	-3,1	-3	-7,5	-6,9	-6,4	-13,3	0	-6,6	-3,3	-12,5	-12,5
Апсорбована енергија удара	-2,6	-2,4	-3,2	-3	-2,9	-3,6	-1,8	-2,3	-2,2	-1,4	-2	-3,7	-2,5

Табела 5.49 Промена динамичких својстава NR/SBR-гуме после вештачког старења

Промена динамичког својства (%)	Удео НМГП (phr)			Удео МГП1 (phr)	
	0	20	30	20	30
Одбојна еластичност	0	-2,9	0	-2,9	-2,9
Еластичност по Yertzley	-2,9	-1	-4,7	-4,9	-3,1
Хистерезис по Yertzley	+7,1	+2,2	+9,0	+13,1	+7,8
Ефективни динамички модул	-6,5	-5,7	-6,9	-5,8	-7,1
Апсорбована енергија удара	-6,7	-5,9	-2,5	-2,8	-3,4

### 5.4.4 Постојаност испитиваних узорака од гуме на бази природног и природног/синтетичког каучукапри ниским температурама

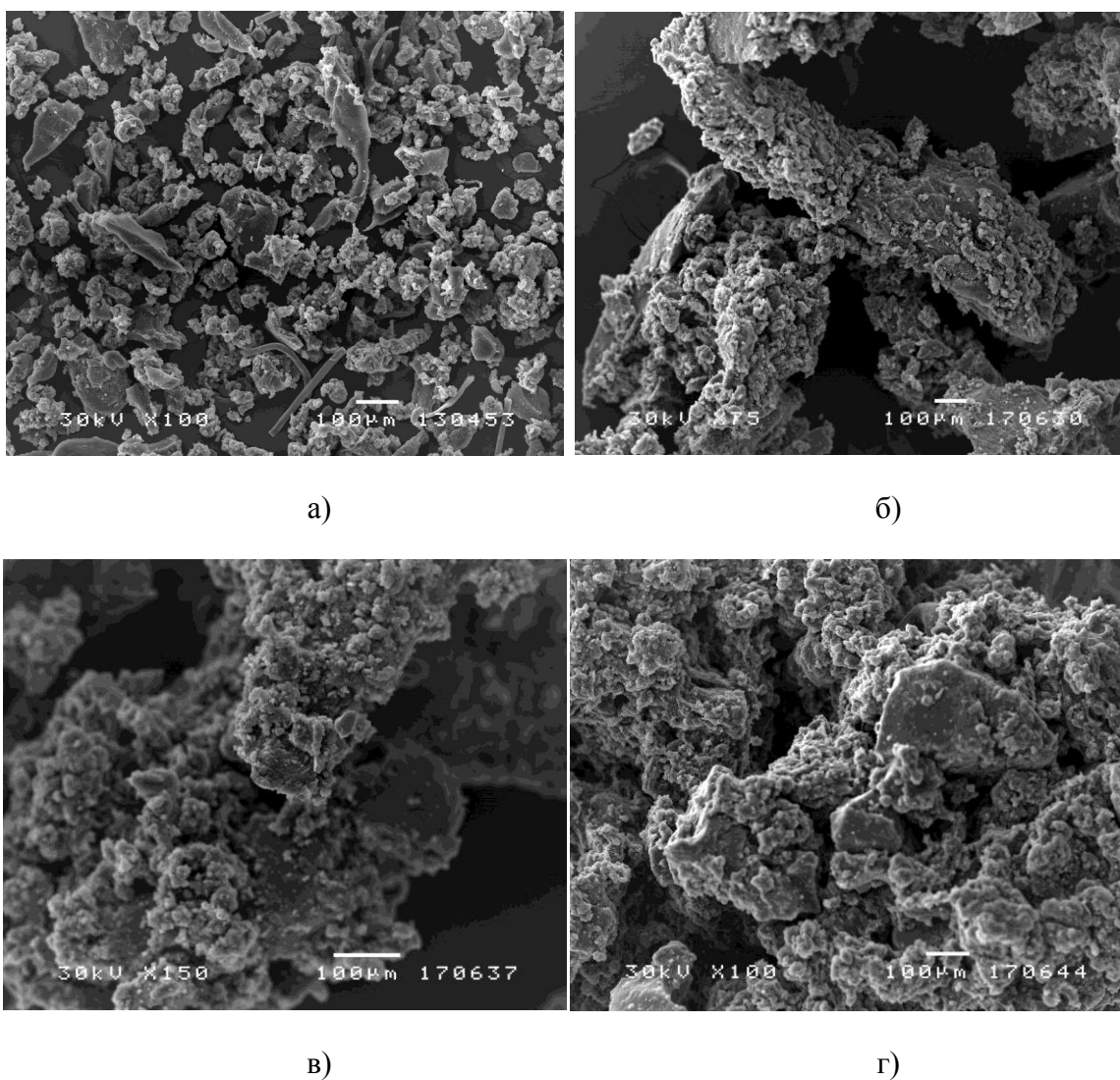
Испитивање постојаности свих узорака од гуме на ниским температурама, тј. тачке кртости и флексибилности изведено је према поступку који је описан у потпоглављу 4.4.4. Приликом испитивања узорака није дошло до појаве лома као ни прскотина на испитиваним епруветама.



## 5.5 Микроструктуре честице и лома

### 5.5.1 Изглед модификоване гумене честице

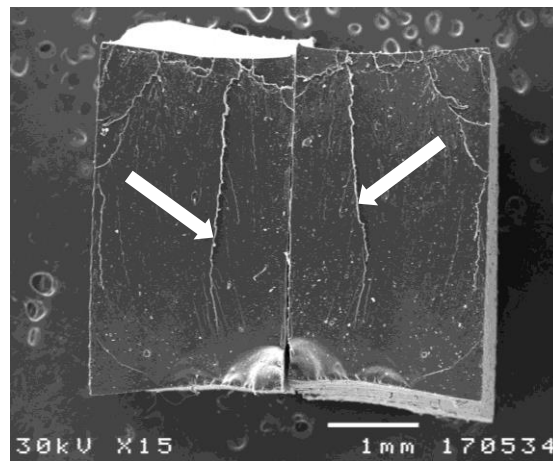
Изглед микроструктуре честице МГП1, добијене методом испитивања описаном у потпоглављу 4.5.1, у зависности времена трајања модификације (0, 5, 10 и 15 минут) приказана је на слици 5.4.



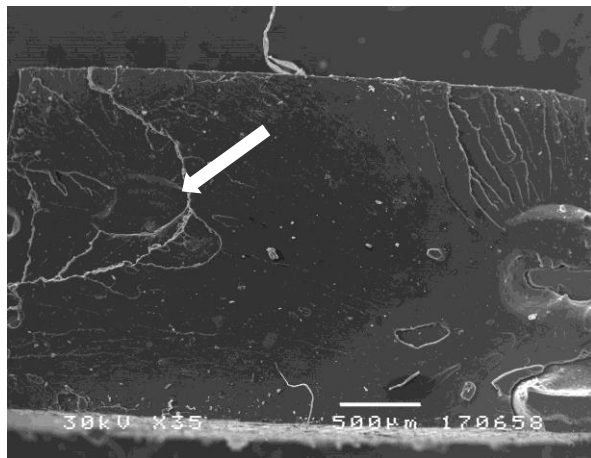
Сл. 5.4 Изглед микроструктуре честице у зависности од момента модификације: а) пре почетка модификације, б) у 5-ом минути, в) у 10-ом минути, г) у 15-ом минути

### 5.5.2 Изгледмикроструктуре гуме на бази природног каучука

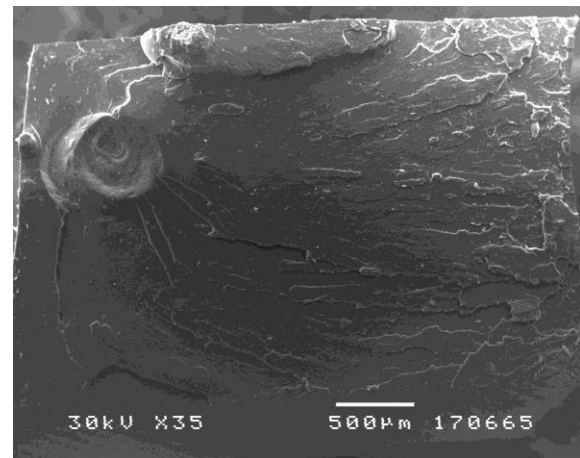
На наредним сликама приказане су микроструктуре лома епрувета од NR-гуме са различитим уделима НМГП и МГП1, док су стрелицама означене карактеристичне области.



Сл. 5.5 Изглед микроструктуре узорка гуме А

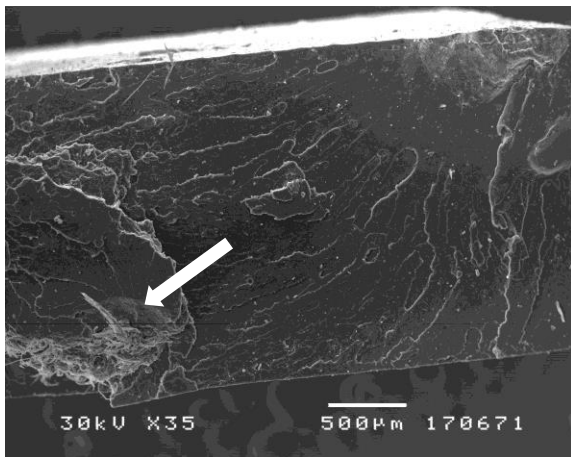


а)

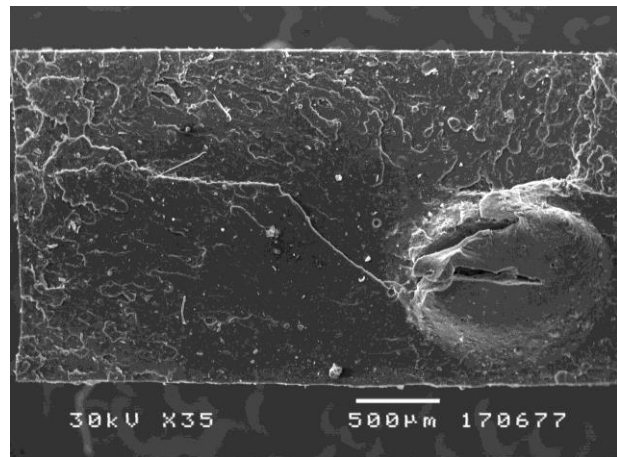


б)

Сл. 5.6 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 3 phr: а) НМГП, б) МГП1

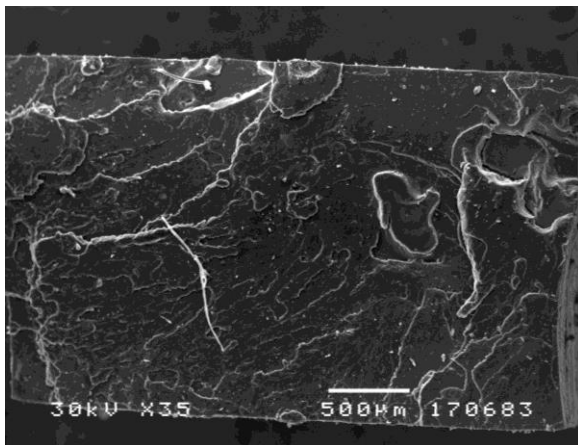


а)

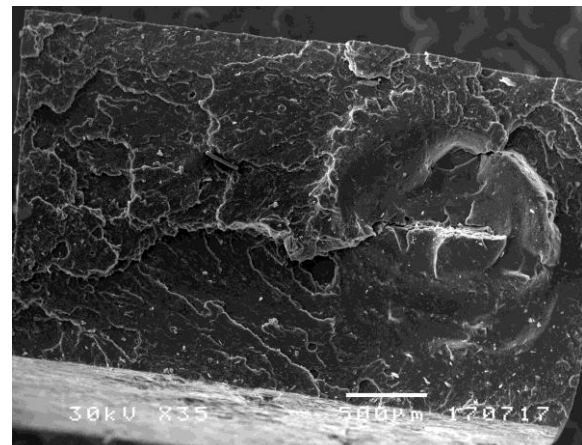


б)

Сл. 5.7 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 5 phr: а) НМГП, б) МГП1

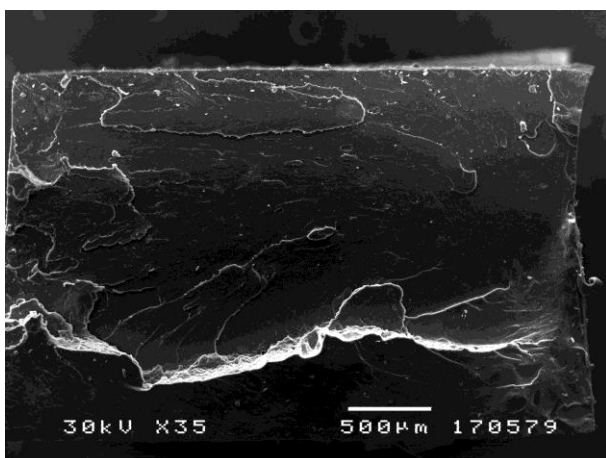


а)

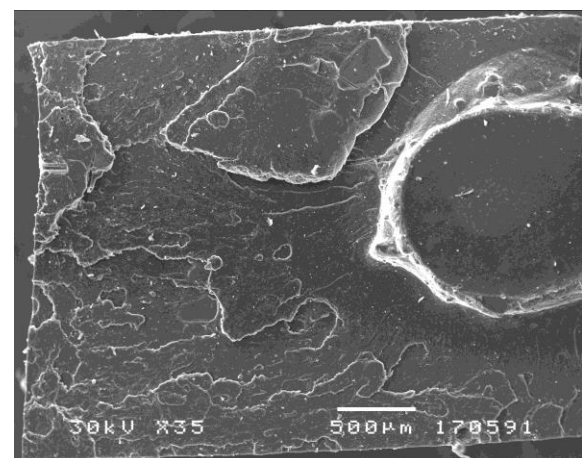


б)

Сл. 5.8 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 10 phr: а) НМГП, б) МГП1

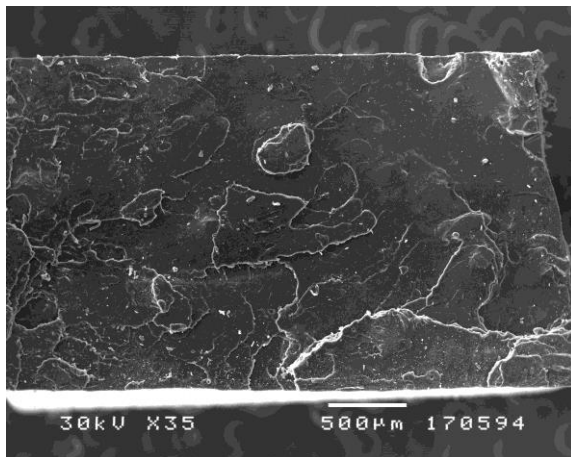


а)

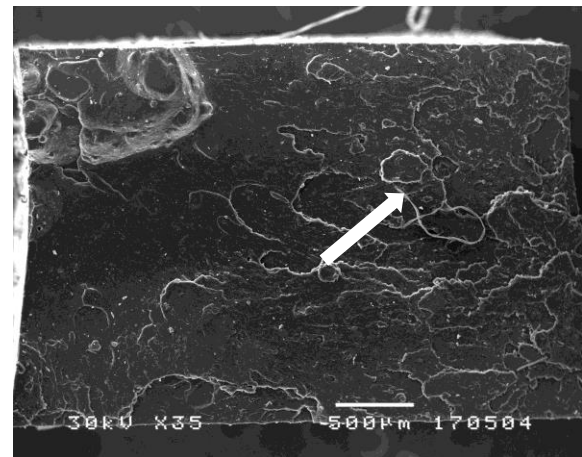


б)

Сл. 5.9 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 20 phr: а) НМГП, б) МГП1

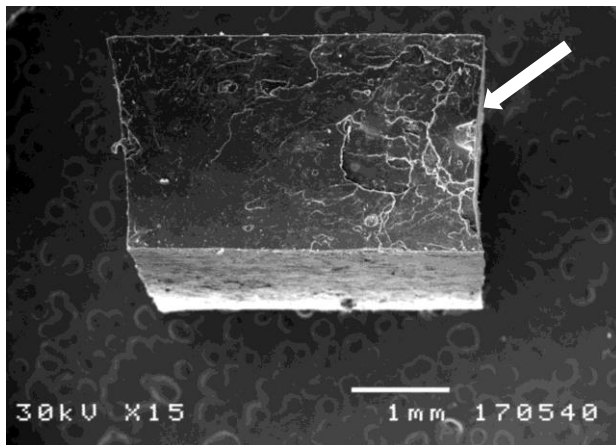


а)

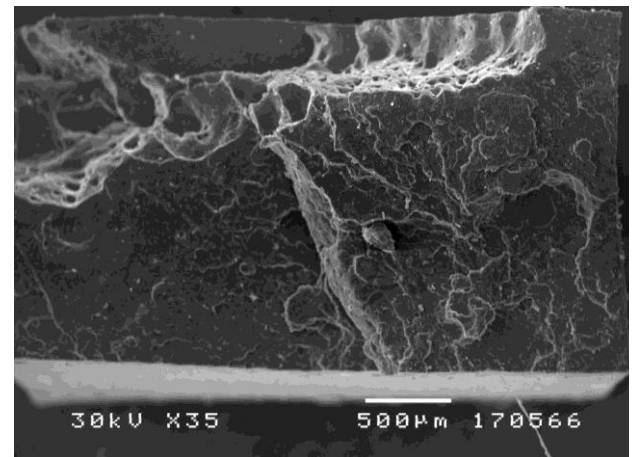


б)

Сл. 5.10 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 30 phr: а) НМГП, б) МГП1



а)

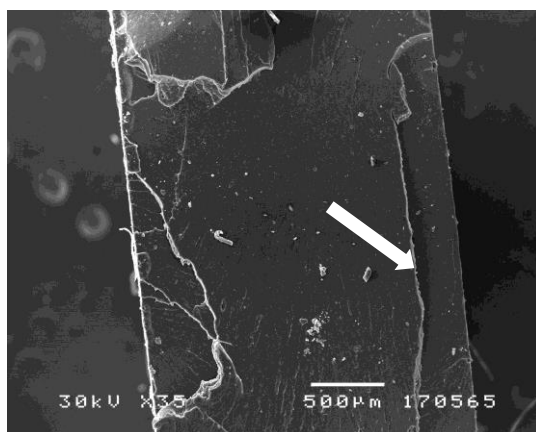


б)

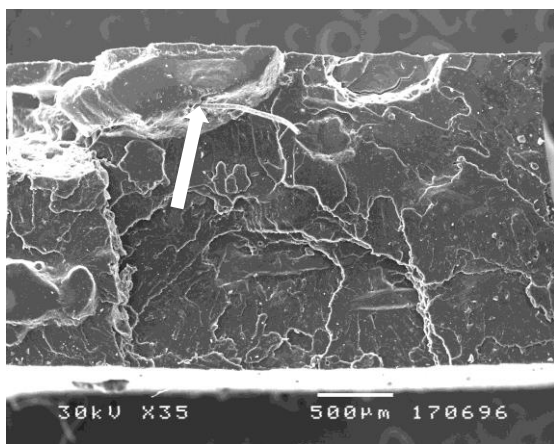
Сл. 5.11 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 50 phr: а) НМГП, б) МГП1

### 5.5.3 Изглед микроструктуре гуме на бази природног и синтетичког каучука

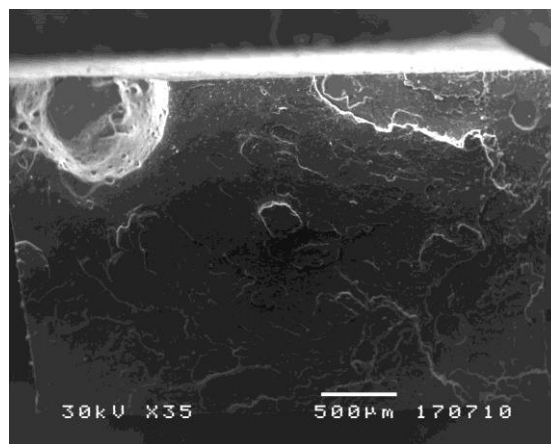
На наредним сликама приказане су микроструктуре лома епрувете од NR/SBR-гуме са различитим уделима НМГП и МГП1. На сликама су такође стрелицама означена карактеристичне тачке на микроструктури.



Сл. 5.12 Изглед узорка гуме А1

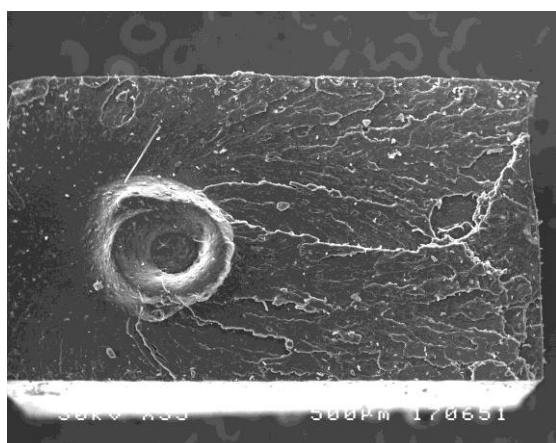


а)

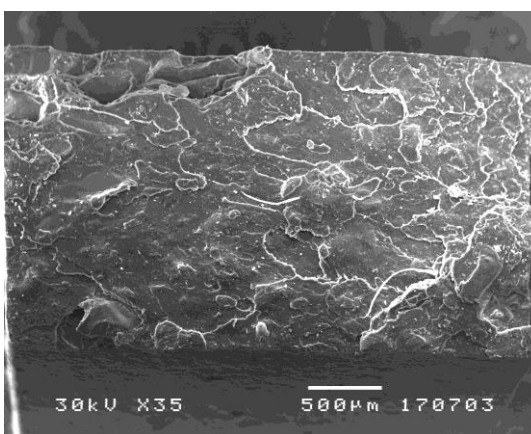


б)

Сл. 5.13 Изглед микроструктуре узорка од NR/SBR-гуме са 20 phr: а) НМПП, б) МГПИ



а)



б)

Сл. 5.14 Изглед микроструктуре узорка од NR/SBR-гуме са 30 phr: а) НМПП, б) МГПИ



## 6 АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА

Након добијања резултата експерименталног истраживања, извршена је њихова анализа са циљем утврђивања промене својстава гуме са променом удела немодификованог, као и модификованог РГП (од 0 до 50 phr), а такође и ради упоређења својстава, чиме је могуће утврдити оптимални удео РГП у гуми. У овом поглављу приказани су дијаграми промене свих измерених статичких и динамичких својстава гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП и анализиран је тренд промене ових својстава и упоређен са резултатима доступних истраживања приказаних у поглављу 3. Такође су дате претпоставке и разлози због којих долази до промене својстава до којих се дошло током овог истраживања. Анализа микроструктуре лома је изведена у циљу потврђивања добијених закључака.

### 6.1 Својства честица гуменог праха

На основу добијене ТГА анализе честице рециклираног гуменог праха, утврђено је да честице садрже NR и SBR-каучук и да су честице компатибилне са смешама које се испитују у овој докторској дисертацији, јер садрже исту полимерну основу. На основу ЕДС анализе је такође утврђено да РГП садржи сумпор, тј. да је систем умрежавања производа од које је добијен РГП сумпорни систем, и он је такође компатибилан са системом вулканизације испитиваних гума. На основу хемијске анализе такође је утврђено да је производ од кога је добијен РГП био пуњен и натријум-алуминијум-силикатом, што као последицу може имати пад отпорности на хабање [8].

На основу мерења специфичне површине РГП утврђено је да она има врло малу специфичну површину од свега  $6 \text{ m}^2/\text{g}$  што је занемарљиво малоу поређењу са чајима где специфична површина износи до  $250 \text{ m}^2/\text{g}$ . Како је РГП стар до годину дана и како је на основу хемијске анализе утврђен висок удео кисеоника, то наводи на закључак да је честица пасивизирана тј. честица непосредује никакву или врло малу површинску активност. На основу претходних теоријских разматрања у поглављу 2.2.4 може се



закључити да РГП у стању пријема једино може служити као неојачавајуће пунило и да се додаје ради снижавања цене производа што се подудра са истраживањима које су спровели *Ismail* и сарадници [67].

Анализом микроструктуре честица РГП утврђено је постојање нечистоћа тј. присуство челичних и синтетичких влакана. На основу разматрања у потпоглављу 2.2.4, где је наведено да ако ингредијент има веће димензије од растојања два полимерна ланца као што је случај са челичним и синтетичким влакнима, обавезно долази до пада затезних својстава.

## 6.2 Својства смеша

На основу резултата испитивања статичких својстава гуме (тврдоће, затезне чврстоће и отпорности према цепању), који су приказани у потпоглављима 5.3.1.1, 5.3.2.1, и 5.3.1.3 закључује се да је оптимални почетак додавања НМГП при мешању смеше, додавање после чађи. Претпоставка је да честице РГП размакну полимерне ланце причему долази до слабије интеракције између полимерних ланаца и чађи чиме се смањује ојачавајући ефекат чађи. Овака закључак је у супротности са сличним истраживањем [48] у којима су аутори утврдили да при уделу до 50 phr РГП у NR-гуми, почетак додавања РГП приликом мешања нема никаквог утицаја на својства гуме. Као потврда закључка изведеног у овом истраживању може се узети тумачење неких аутора да својства гуме дефинише пунило које се прво додаје у смешу приликом мешања, али њихово мишљење није поткрепљено експерименталним подацима [64].

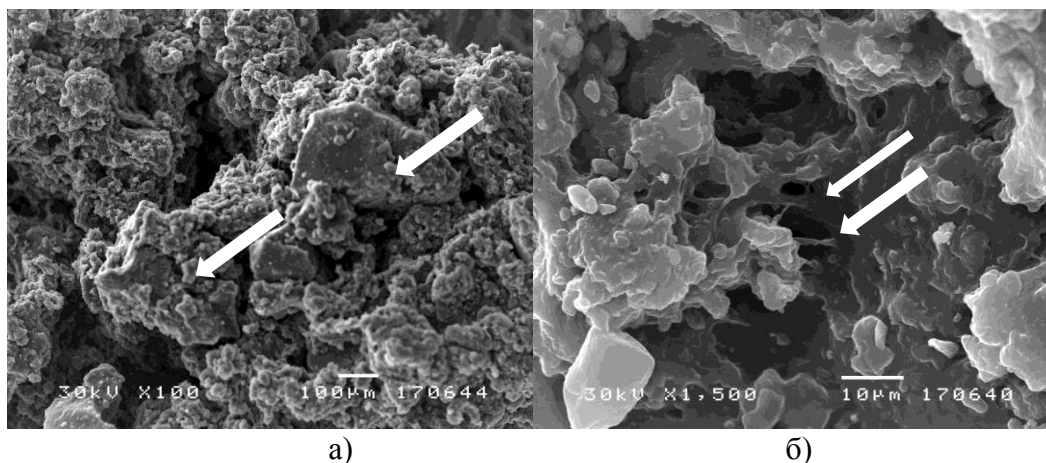
На основу реометарских крива за смешу А, 20НМГП, 20МГП1, 20-1НМГП и 20-1 МГП утврђено је оптимално време вулканизације узорка од 10 минута при температури од 155 °С. На основу практичног искуства при повећању дебљине узорка време вулканизације се продужава. Зато је време вулканизације узорка за дебљину 6 mm износило 15 минута, а за дебљину узорка од 12 mm износило 25 минута.

Врло често се у пракси време вулканизације скраћује, додавањем убрзивача али и повећањем температуре вулканизације, са циљем повећања продуктивности. Ради скраћивања времена испитивања смеша, температура вулканизације повећана је на 176 °С и у табели 5.5 приказани су параметри вулканизације за све типове смеша.

На основу резултата реолошких испитивања својстава смеша може се закључити да са повећањем удела НМГП и МГП долази до скраћивања времена почетка и краја вулканизације, и такође долази до повећања  $M_L$  и  $M_H$ . Разлог за овакву промену својстава може се објаснити чињеницом да делови сумпора из смеше у коју је додат РГП мигрирају у честице РГП, при чему долази до поновне вулканизације честица. Као последице поновне вулканизације ослобађају се делови убрзивача из РГП (убрзивача коришћених у поступку вулканизације и модификације РГП), који сада мигрирају у каучукову матрицу и са сумпором који се налази у њој убрзавају поступак вулканизације.

### 6.3 Модификација рециклираног гуменог праха

На основу приказаних резултата мерења статичких и динамичких својстава гуме, приказаних у поглављима 5.3 и 5.4 може се закључити да поступцима модификације развијеним у овом истраживању, побољшавају механичка својства гуме при истом уделу РГП у гуми у односу на својства гуме са истом уделом НМГП. Од три развијена поступака модификације, најбољи резултати се постижу применом смеше дисулфида (TDTM и CLD). Приликом третирања РГП на двоваљку при зазорумањем од пречника најмање честице РГП, долази до разарања и промене облика самих честица (слике 5.4 и 6.1). Честице МГП добијају разуђени (гроздаст) облик и на површини самих честица настају напрслине слика 6.1а (означено стрелицом). Унутар и по површини честица РГП јављају се смичуће силе приликом којих долази до пуцања не само сумпорних веза ( $S_x$ ,  $C-S-S-C$ ,  $C-S-C$ ) него и каучукове матрице слика 6.2б (означено стрелицом), тј. полимерних ланаца односно долази до пуцања угљеничних веза ( $C-C$ ).



Сл. 6.1 Изглед лома честице и промене структуре честице МГП1



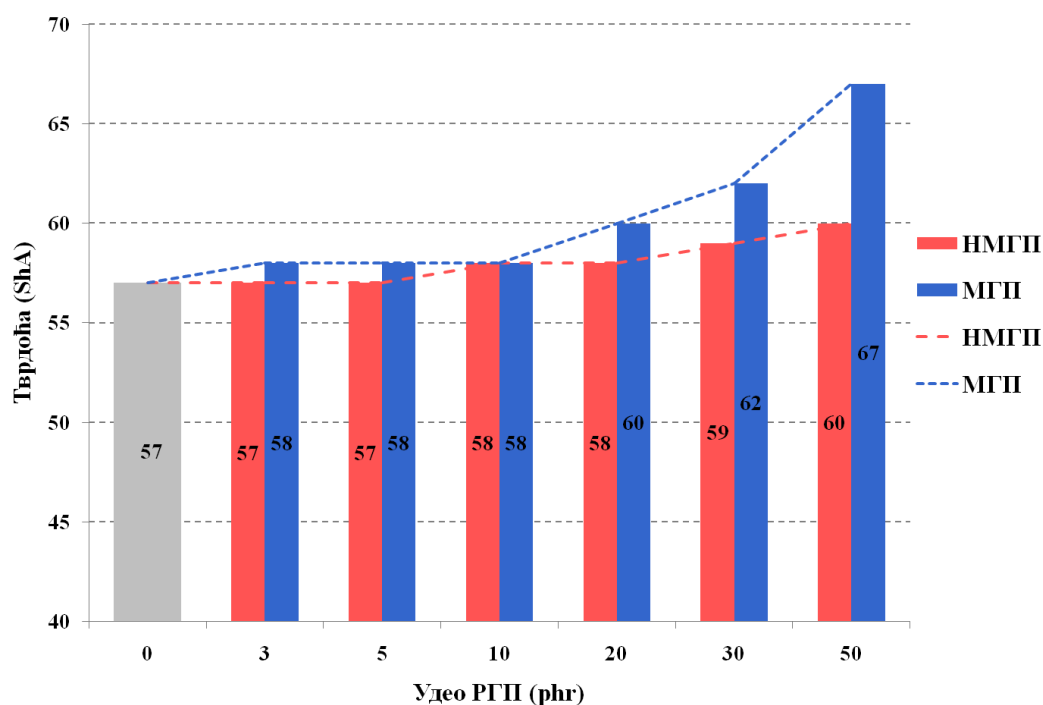


Оваквом модификацијом настају слободни радикали који имају способност да се рекомбинују. Како би се ова појава спречила, додају се дисулфиди који се приликом модификације распадају и везују настале радикале, при томе стварајући активне центре на површини честица МГП1 и омогућавају њено умрежавање и везивање са свежеом каучуковом матрицом.

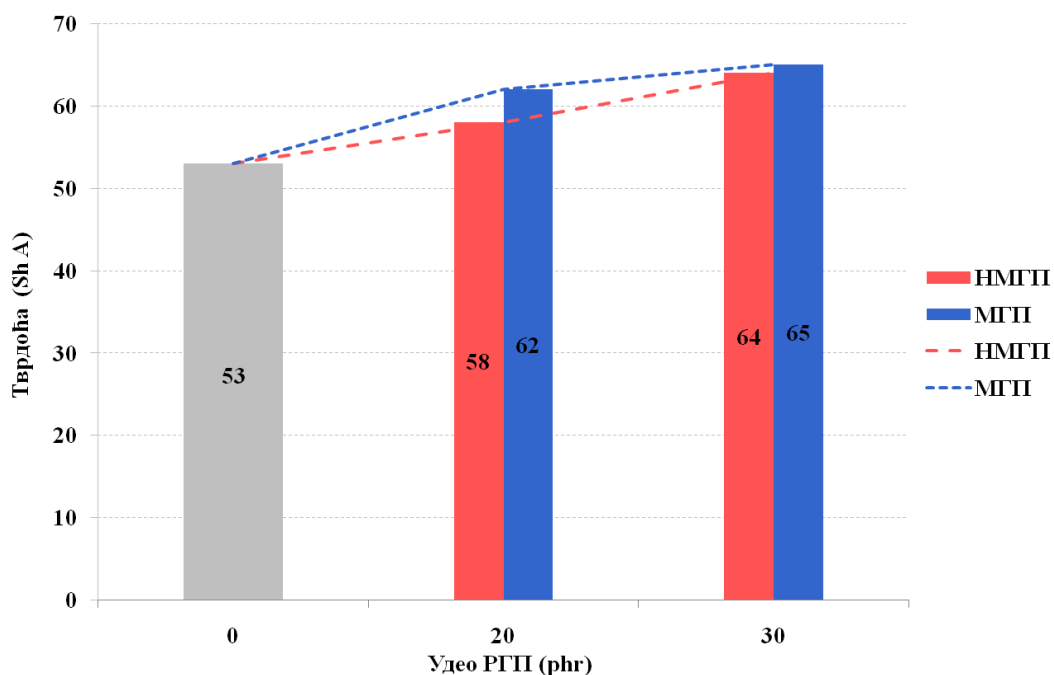
## 6.4 Статичка својства гуме са рециклираним гуменим прахом

### 6.4.1 Тврдоћа гуме

Тврдоћа узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.2, док је тврдоћа узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.3. На сликама су такође приказане и линије тренда промене тврдоће у зависности од типа и удела РГП.



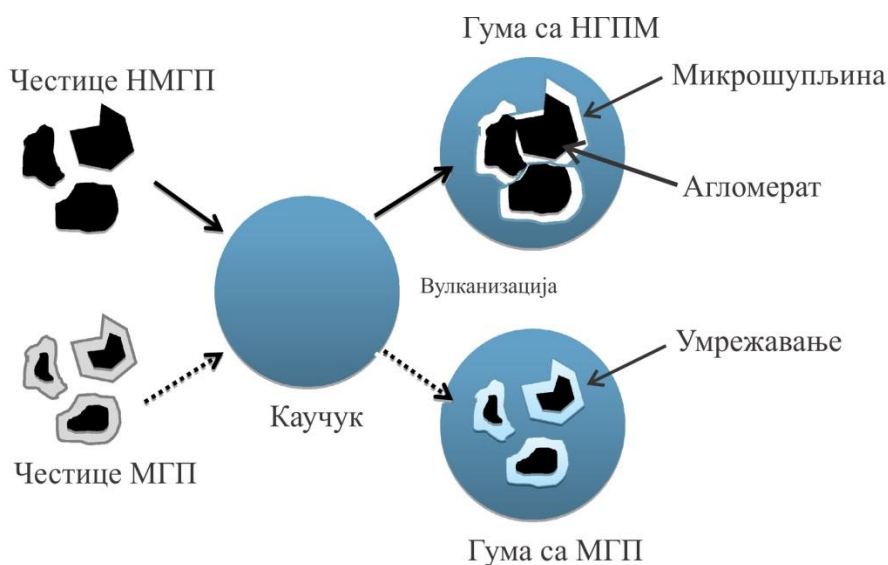
Сл. 6.2 Тврдоће узорака од NR-гуме



Сл. 6.3 Тврдоће узоака од NR/SBR-гуме

Добијени резултати у оба случаја, указују да додавањем РГП долази до повећања тврдоће, што се поклапа са резултатима које су добили истраживачи *Naskar*, *Ђекић* и *Ismail* [69, 60, 76]. Повећањем удела НМГП тврдоћа благо расте у односу на тврдоћу гуме А (гума без РГП). Максимални пораст тврдоће износи 5,3% за НМГП. За разлику од НМГП при порасту удела МГП до 10 phr долази до малог повећања тврдоће од 1,75%. Даљим повећањем удела МГП долази до значајног повећања тврдоће које износи 17,5% при уделу од 50 phr МГП у односу на тврдоћу гуме А.

С обзиром да је тврдоћа РГП већа од тврдоће гуме А очекивало би се да са порастом удела РГП дође до значајног пораста тврдоће гуме, али то се није десило. Разлог за овако мали пораст тврдоће треба тражити у чињеници да се између НМГП и каучукове матрице (полимерних ланаца) стварају врло слабе привлачне везе, па чак и микрошупљине (слика 6.4) [23], што је теоријски разматрано у поглављу 2 и поткрепљено досадашњим истраживањима (поглавље 3).



Сл. 6.4 Шематски приказ микроструктуре гуме са НМГП и МГП

Са порастом удела НМГП расте број микрошупљина чиме се материјал додатно ослабљује, па се ефекат ојачања не испољава значајно, као што би се могло очекивати.

Код примене МГП долази до значајног повећања тврдоће, разлог за ову појаву може се тражити у чињеници да је дошло до хемијске реакције (умрежења) између честица МГП и каучука, чиме се значајније испољио ојачавајући ефекат услед употребе МГП (слика 6.4). Иста законитост важи и код примене НМГП и МГП код NR/SBR-гуме.

На основу добијених резултата може се закључити да је оптимални удео РГП у оба случаја 20 phr при коме не долази до битније промене тврдоће гуме.

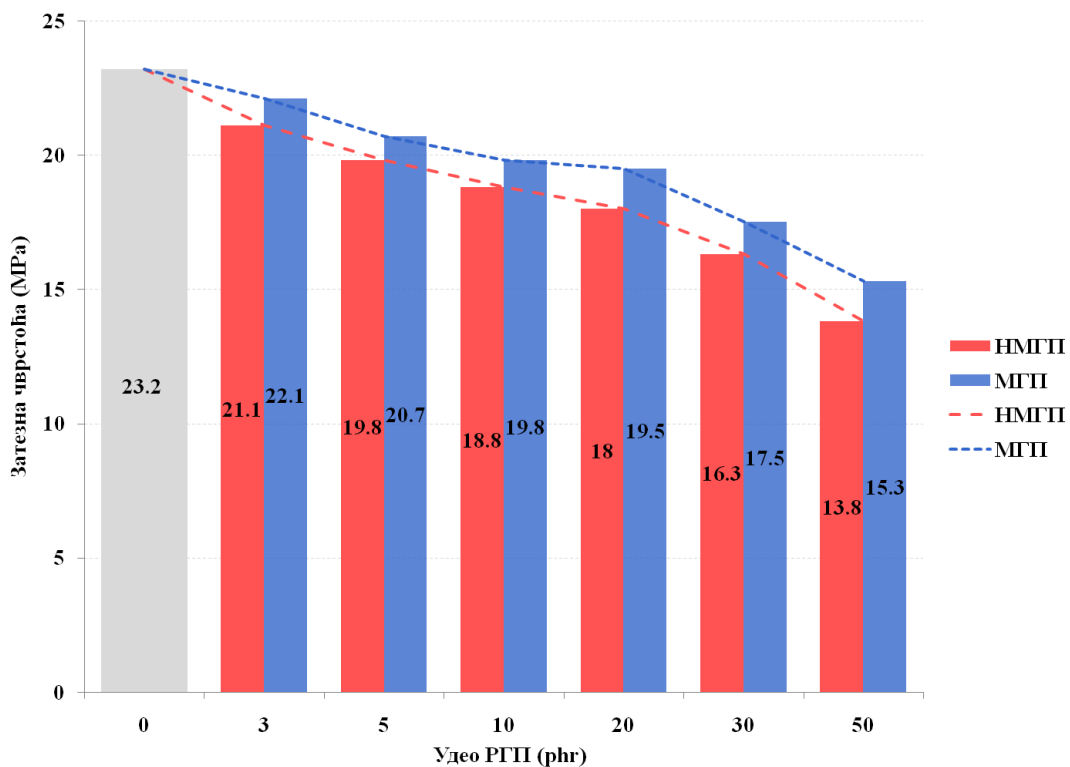
На основу резулта приказаних у потпоглављу 5.3.5 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70 °C, није имало утицај на промену тврдоће гуме.

#### 6.4.2 Затезна својства

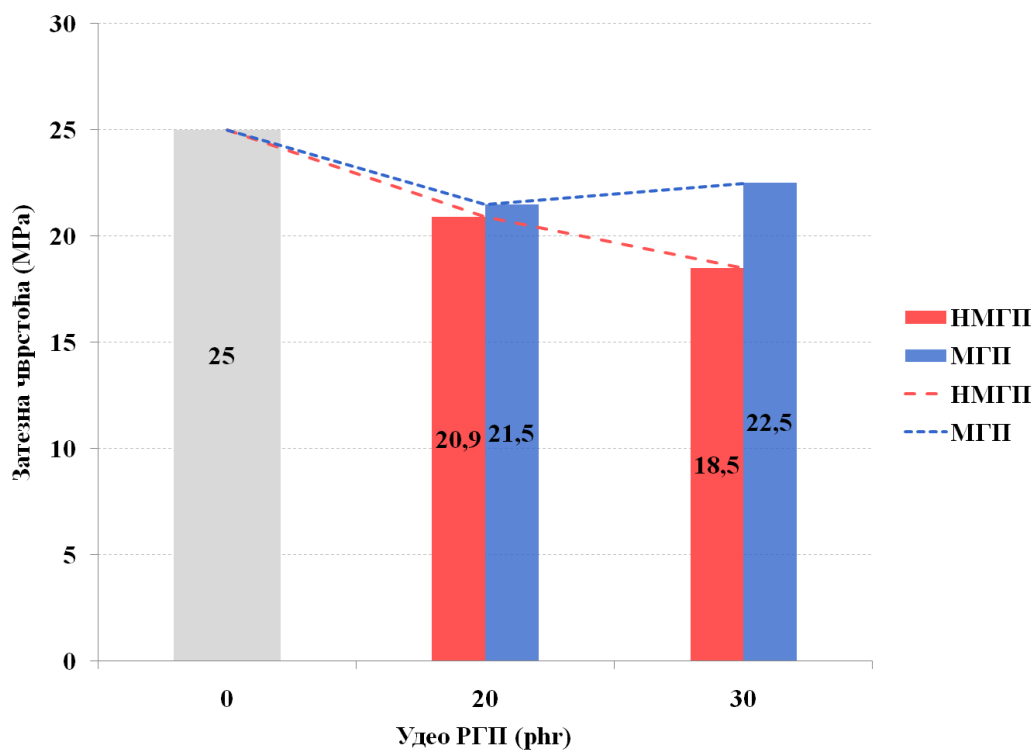
На основу добијених резултата описаних у потпоглављу 5.3.2 приказани су дијаграми затезних својстава: затезне чврстоће (слика 6.5), прекидног издужења (слика 6.7) и модула 100 (слика 6.9) узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП, док су дијаграми затезних својстава узорака од NR/SBR-гуме приказани на слици 6.6 за затезну чврстоћу, на слици 6.8 за прекидно



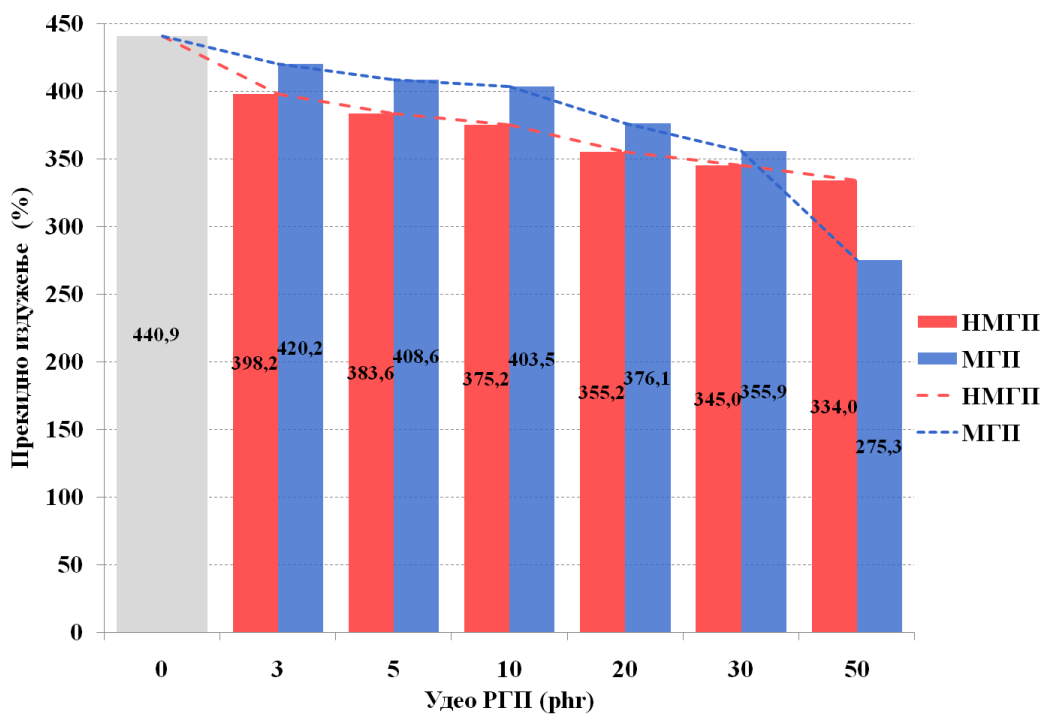
изружење и на слици 6.10 за модул 100. На сликама су такође приказане и линије тренда промене затезних својстава у зависности од типа и удела РГП.



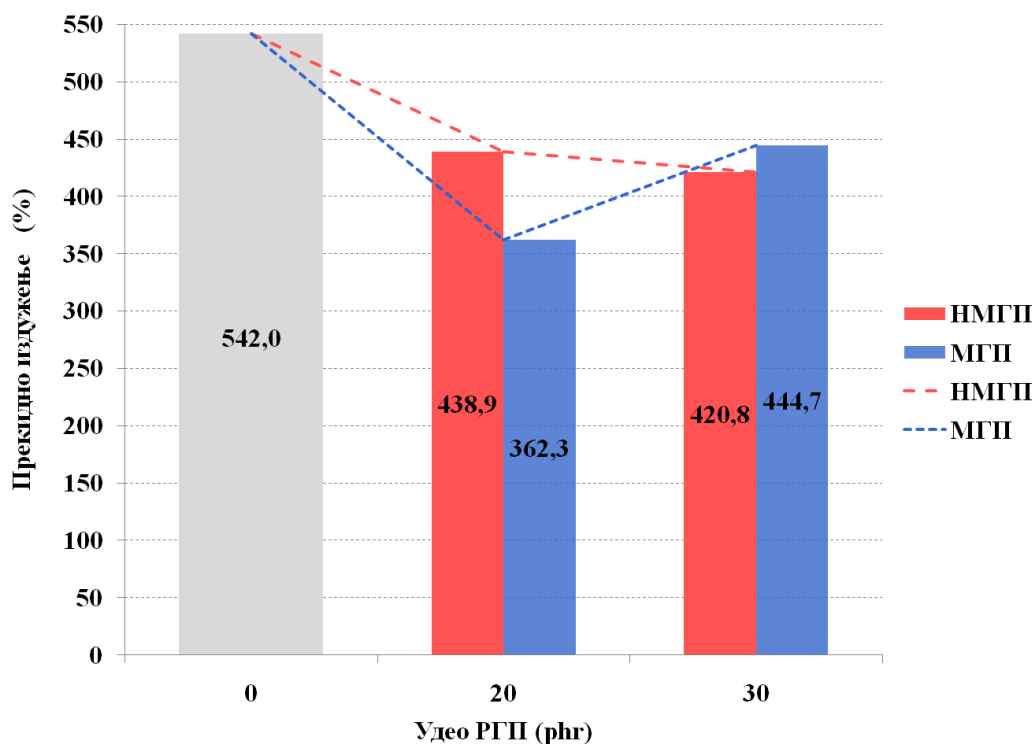
Сл. 6.5 Затезне чврстоће узорака од NR-гуме



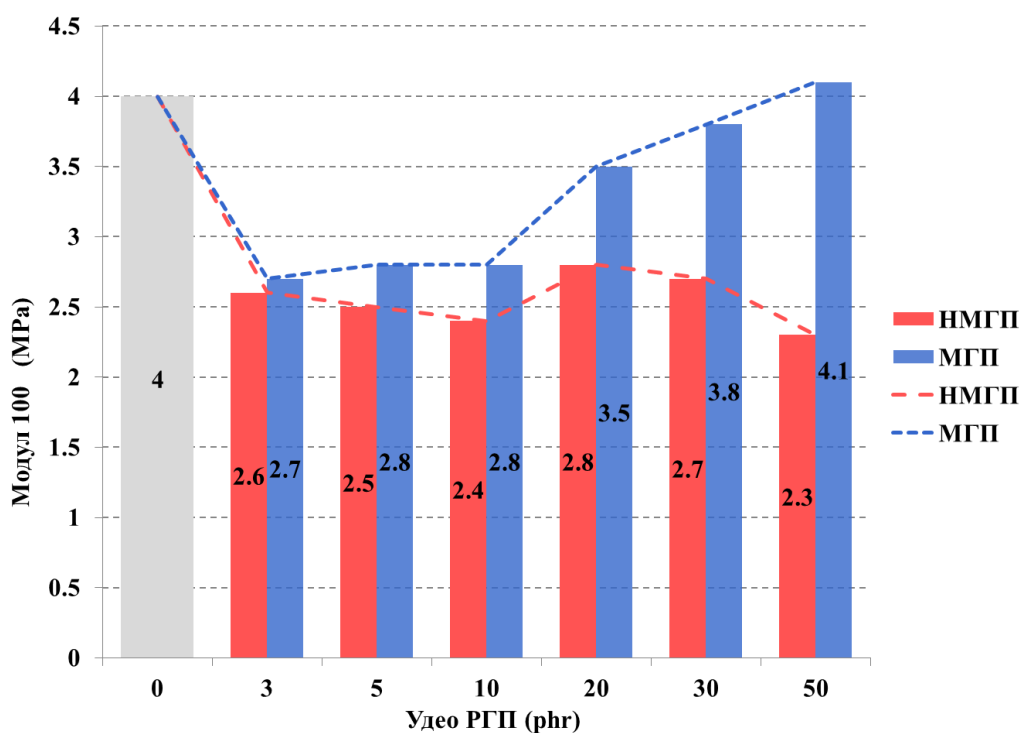
Сл. 6.6 Затезне чврстоће узорака од NR/SBR-гуме



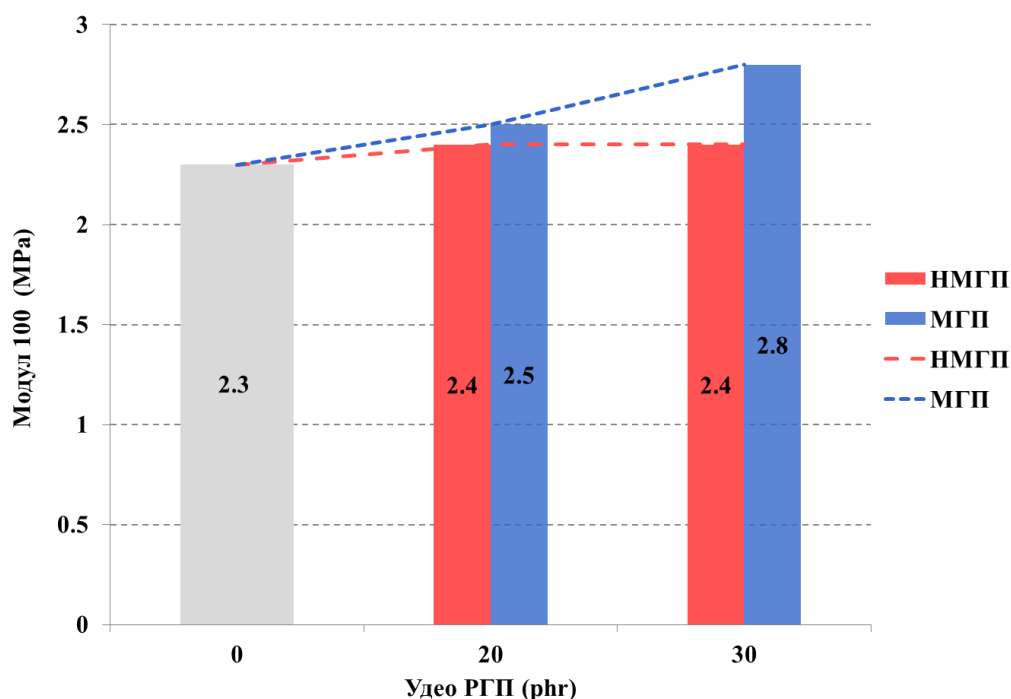
Сл. 6.7 Прекидна издужења узорака од NR-гуме



Сл. 6.8 Прекидна издужења узорака од NR/SBR-гуме боја



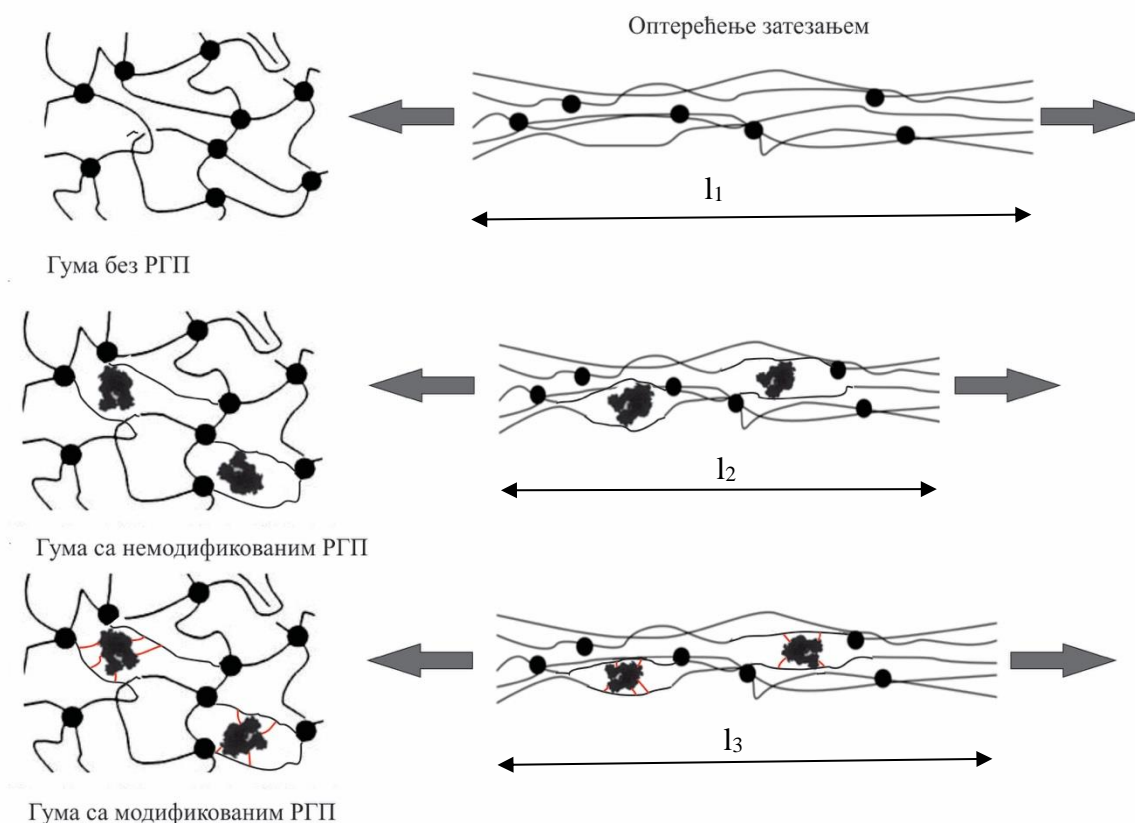
Сл. 6.9 Модули 100 узорака од NR-гуме



Сл. 6.10 Модули 100 узорака од NR/SBR-гуме

На основу добијених резултата закључује се даповећање удела РГП (немодификованог и модификованог) доводи до пада затезних чврстоће и прекидног издужења NR и NR/SBR-гуме, варирања вредности модула 100 код NR-гуме, и раста вредности модула 100 код NR/SBR-гуме. Овако добијени резултати истраживања се подударaju са већином истраживања других аутора која су описана у поглављу 3. Применом мале количине РГП од 3 phr долази до пада ових својстава за чак 5%. Максимални пад при уделу од 50 phr НМГП износи 40, 5 % , док за удео 50 phr МГП износи 34,1 %.

Разлог за овакву појаву лежи у чињеници да приликом додавања РГП у каучукову матрицу долази до локалног раздвајања и затезања полимерних ланаца по обиму честице РГП као што је речено у поглављу о пунилама. Овако постављене честице онемогућавају максимално истезање полимерних ланаца [1]. Овакво понашање илустровано је сликом 6.11 при чему је  $l_2 < l_3 < l_1$ . Као што је претходно описано, између модификоване честице РГП и полимерних ланаца стварају се хемијске везе које смањују негативан утицај честица РГП на затезну чврстоћу и прекидно издужење.



Сл. 6.11 Утицај НМГП и МГП на структуру гуме

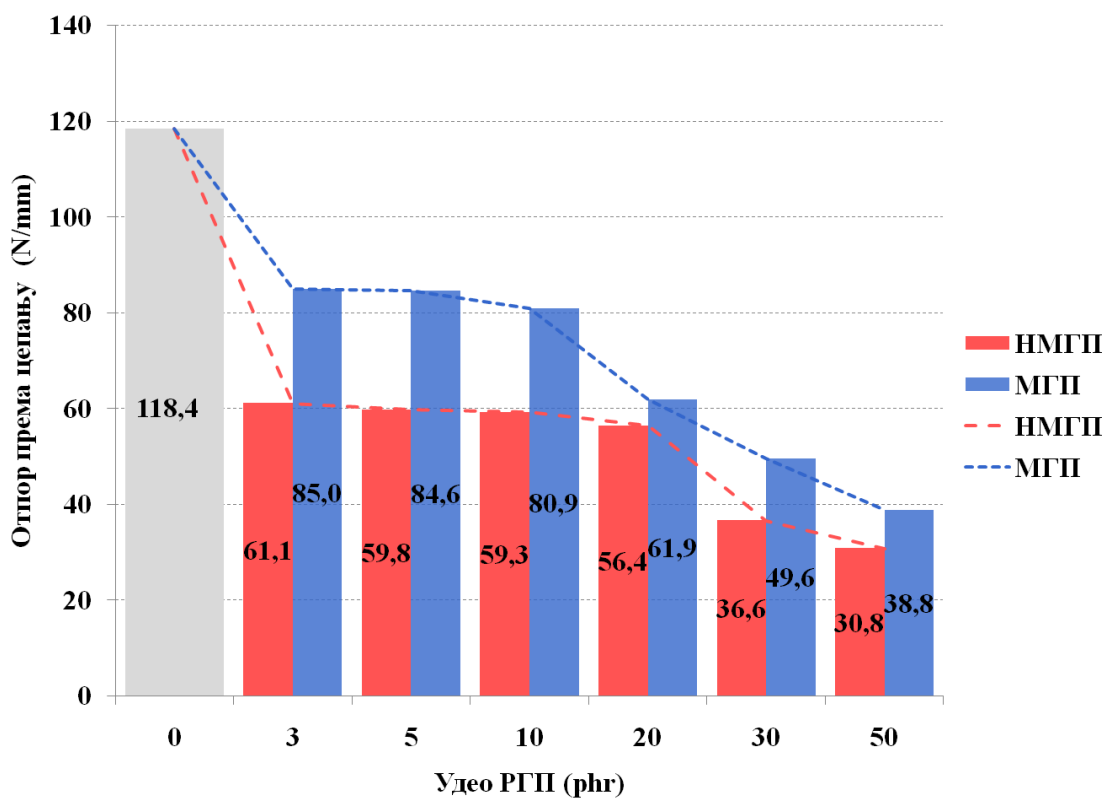
Исто понашање се примећује и код примене РГП у NR/SBR-гуме.

На основу резулта приказаних у поглављу 5.4.3 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70 °C, није имало битан утицај на промену затезних својстава гуме.

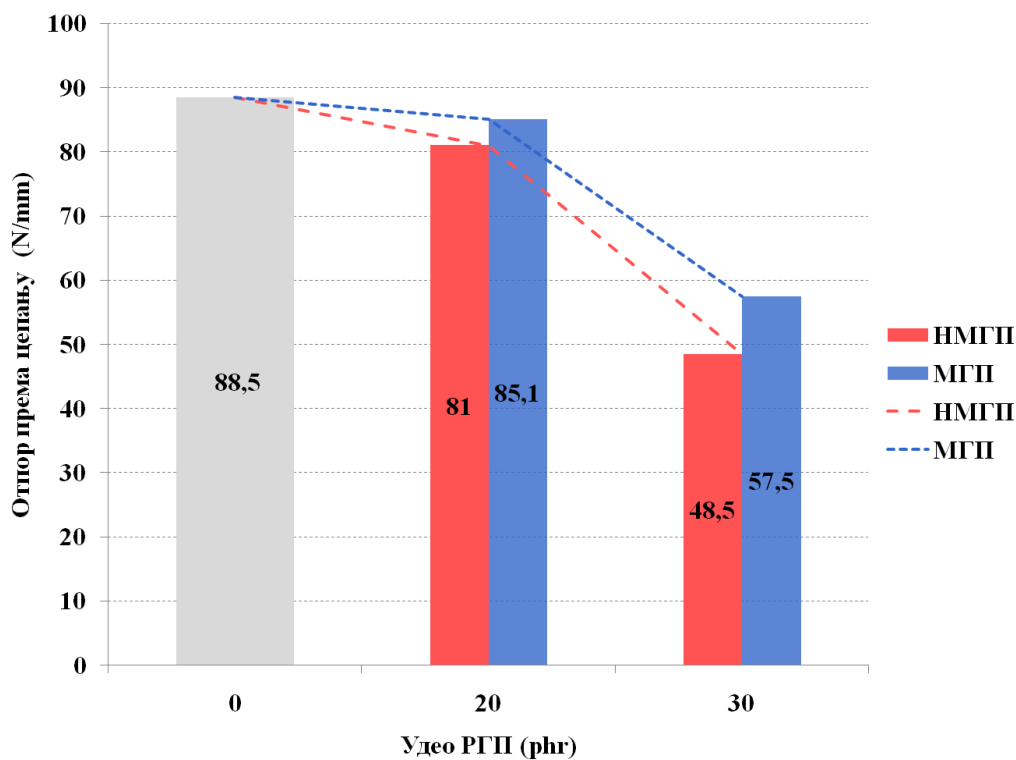
### 6.4.3 Отпорност према цепању гуме

Дијаграм отпорности према цепању узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.12, док је дијаграм отпорности према цепању узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.13. На сликама су такође приказане и линије тренда промене отпорности према цепању узорака у зависности од типа и удела РГП.





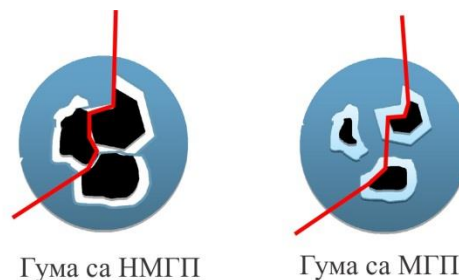
Сл. 6.12 Дијаграм отпора према цепању узорака од NR-гуме



Сл. 6.13 Дијаграм отпора према цепању узорака од NR/SBR-гуме

На основу добијених резултата закључује се да и минимална количина РГП утиче на значајан пад овог својства, без обзира да ли је РГП модификован или није. Већ при уделу од 3 phr НМГП, долази до значајног пада отпорности према цепању за 48,5%, повећањем удела до 10 phr не долази до битније промене својства у односу на 3 phr, док даљим порастом удела НМГП долази до наглог пада овог својства за 74%. Слично се догађа и код примене МГП. При уделу од 3 phr МГП долази до пада својства за 28,61 % даљим повећањем удела на 50 phr МГП отпорност према цепању се смањује за 67,2%. Иста законитост важи и код NR/SBR-гуме.

Утицаја РГП на отпор према цепању директно зависи од својстава производа од којег је добијен РГП. Вредност отпорности према цепање врло је висока за све типове гуме који се примењују код ауто-гуме, и значајно је већа од отпорности према цепању гуме А која је пуњена РГП. Због тога, се пад отпорности према цепању може објаснити чињеницом да пораст иницијалне пукотине код примене НМГП иде кроз микрошупљину између честица РГП и каучука, тј. не долази до цепања честица НМГП (слика 6.14а). За разлику од тога, код гуме са МГП, иницијална пукотина расте кроз област између честице РГП и каучука где постоје умрежења (слика 6.14б), па је зато пад овог својства мање изражен при истом уделу РГП, што се посудара са истраживањима *Yehia* и *Ismail* која су описана у поглављу 3 [29, 67, 76, 59].



Гума са НМГП

Гума са МГП

а)б)

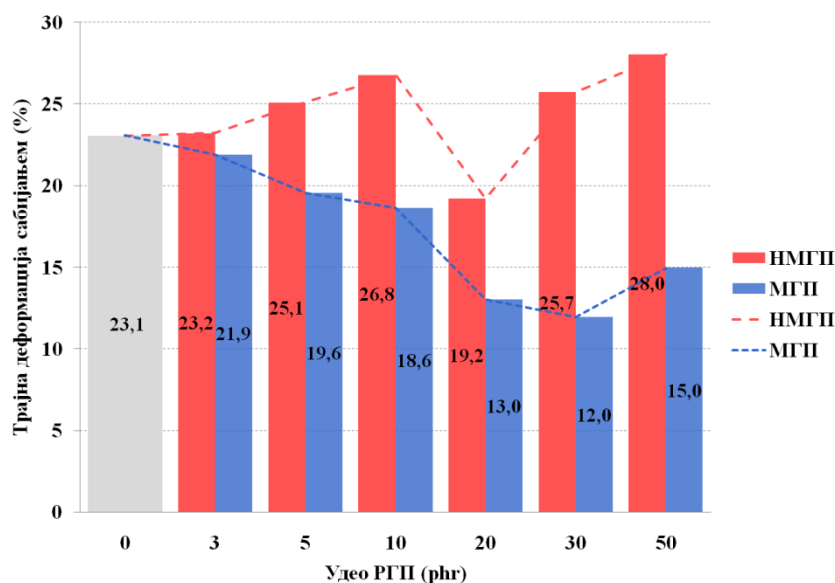
Сл. 6.14 Шематски приказ цепања гуме

На основу резулта приказаних у поглављу 5.3.5 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70 °C, није имало битан утицај на отпорност према цепању гуме.

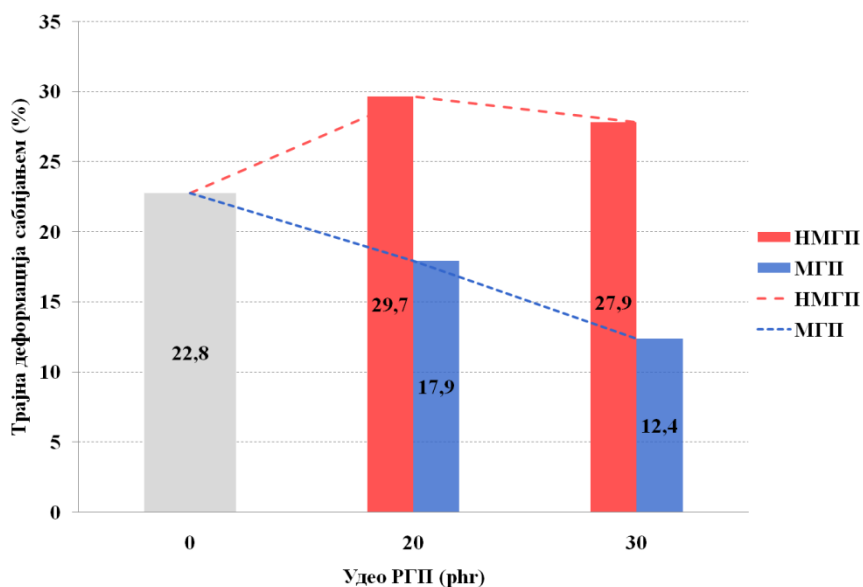


#### 6.4.4 Трајна деформација сабијањем на одређену висину

Дијаграм трајне деформације сабијањем на одређену висину узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.15, док је дијаграм промене трајне деформације сабијањем на одређену висину узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.16. На сликама су такође приказане и линије тренда промене овог својства у зависности од удела и типа РГП.



Сл. 6.15 Трајне деформације сабијањем на одређену висину узорака од NR-гуме



Сл. 6.16 Трајне деформације сабијањем на одређену висину узорака од NR/SBR-гуме



На основу добијених резултата уочава се да при уделу од 10 phr НМГП долази до пораста трајне деформације за 16%. Даљим повећањем удела до 20 phr НМГП долази до побољшања овог својства. Укупно побољшање својства при уделу од 20 phr НМГП износи 16,8%. Даљим повећањем удела НМГП долази до значајног погоршања овог својства за 20 %.

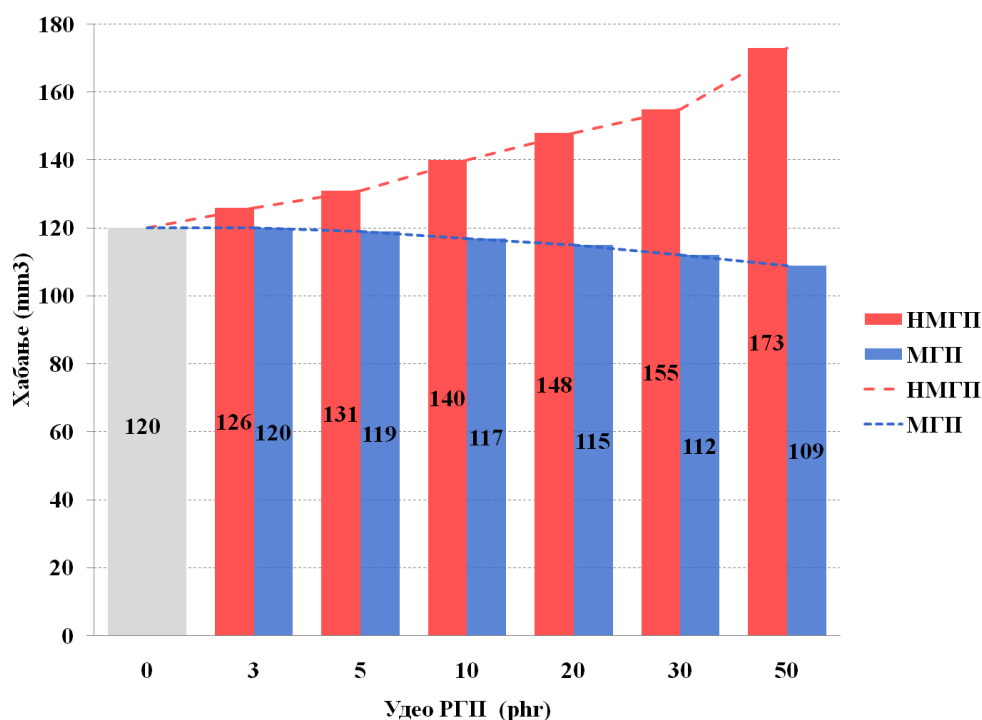
Са повећањем удела МГП долази до смањења трајне деформације сабијањем на одређену висину. Већ при уделу од 3 phr МГП долази до побољшања овог својства за 5,2%. Оптимални удео МГП за ово својство износи 30 phr, при чему је ово својство побољшано за 48,2%. Исто понашање се бележи код додавања РГП у NR/SBR-гуму, где побољшање износи 45,6 % при уделу од 30 phr МГП.

Овај ојачавајући ефекат може се објаснити истом претпоставком, да је дошло до стварања веза између честица МГП и полимерних ланаца, која је изнета у поглављу 6.2.1, јер је једно од важних својстава ауто-гума велика отпорност према деформисању.

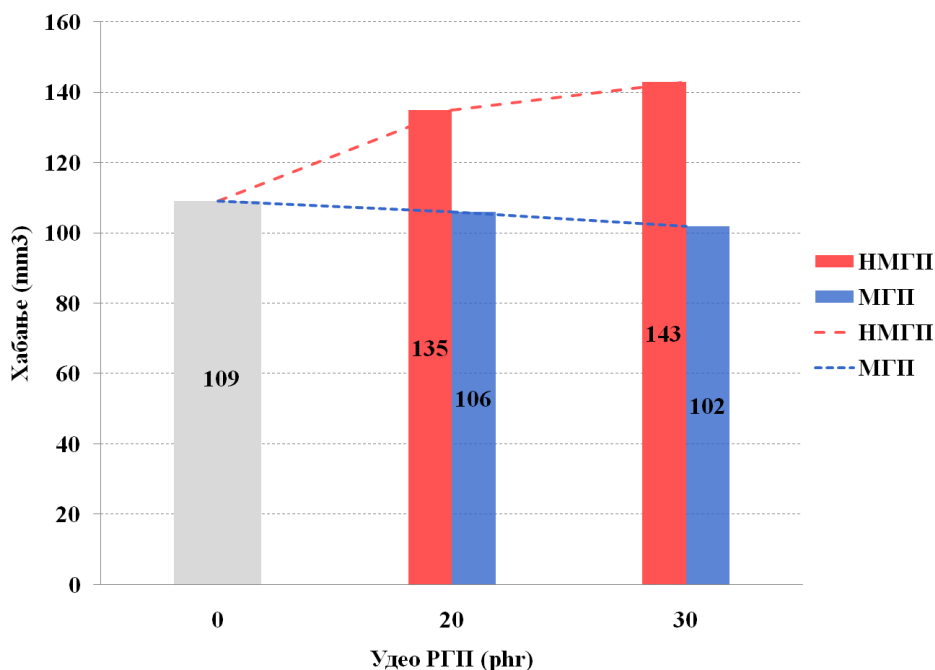
Оптимални удео МГП износи 30 phr за NR-гуму и 30 phr за NR/SBR-гуму.

#### **6.4.5 Отпорност према хабању**

Дијаграм отпорности према хабању узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.17, док је дијаграм отпорности према хабању узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.17. На сликама су такође приказане и линије промене тренда отпорности према хабању у зависности од удела и типа РГП.



Сл. 6.17 Отпорности према хабању узорака од NR-гуме



Сл. 6.18 Отпорности према хабању узорака од NR/SBR-гуме

На основу добијених резултата бележи се пад отпорности према хабању са повећањем удела НМГП од 44% при уделу од 50 phr. Међутим, приликом додавања МГП долази до побољшања отпорности према хабању за 10% при уделу од 50 phr.



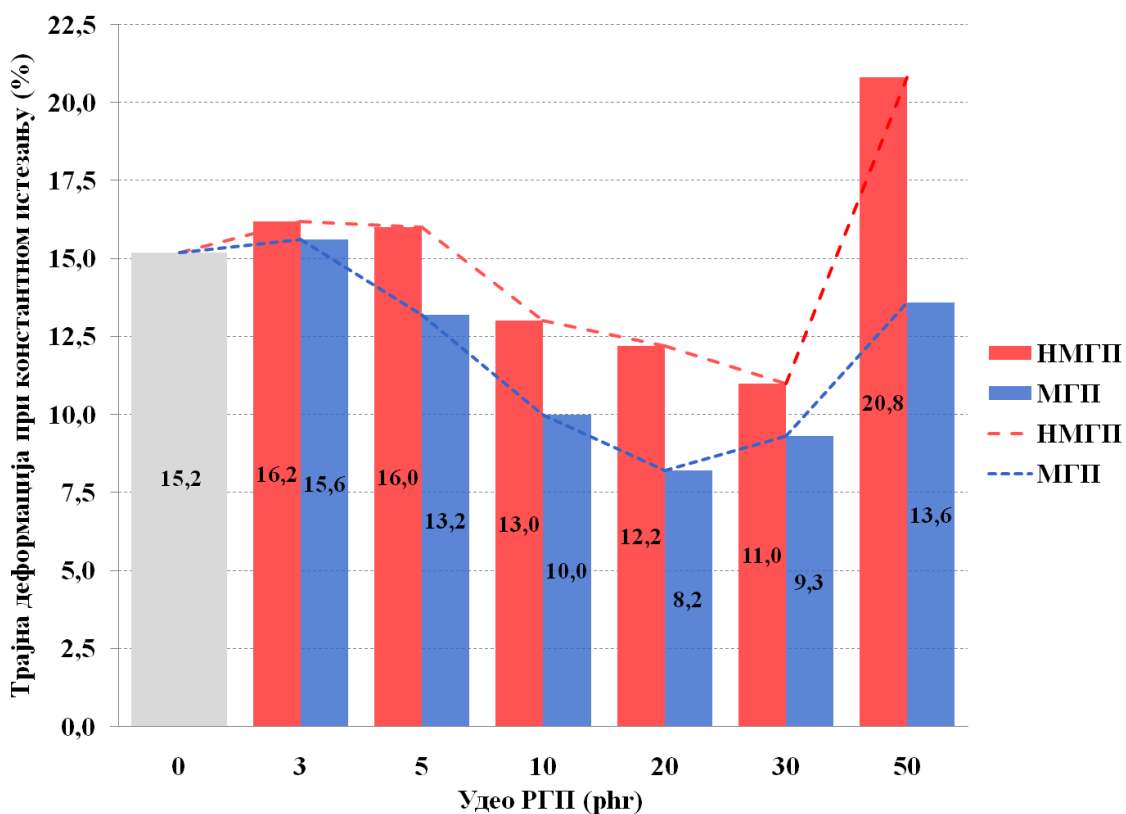
Објашњење за овакво понашање треба тражити у претпоставци да је отпорност према хабању честице РГП знатно већа у односу на смешу А (једно од најважнијих својстава газећег слоја ауто-гума је висока отпорност на хабање). Приликом хабања гуме долази до „чупања“ честица НМГП због микрошупљина и слабих веза са каучуковом матрицом. Овим се ствара иницијална пукотина за даље убрзано хабање. Супротно овоме, при додавању МГП долази до испољавања ојачавајућег ефекта због веза које се стварају између честица МГП и каучукове матрице. Ове везе су довољно јаке да не дозволе „чупање“ честица, већ је њихово хабање заједно са каучуковом матрицом. Исти тренд промене овог својства се уочава и код додавања РГП у NR/SBR-гуму. Овако понашање гуме се поклапа са сличним истраживањима [60, 67].

На основу резулта приказаних у поглављу 5.3.5 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70°C, нема никакав утицај на отпорност према хабању гуме.

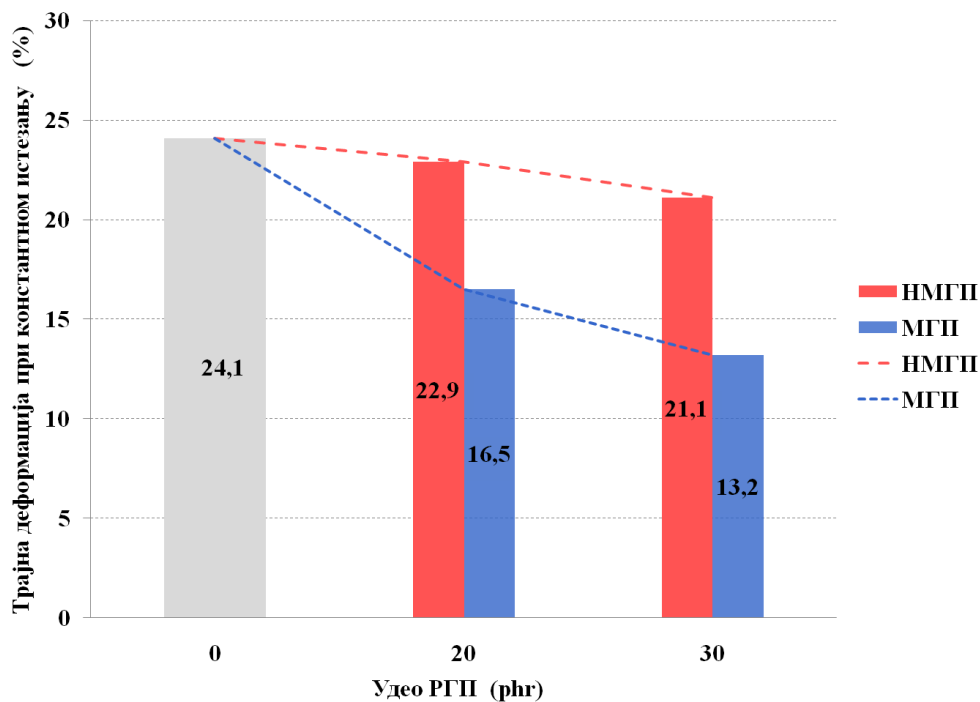
Оптимални удео МГП је 50 phr за NR-гуму и 30 phr за NR/SBR-гуму.

#### **6.4.6 Трајна деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине**

Дијаграм трајне деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.18, док је дијаграм промене трајне деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине на одређену висину узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.19. На сликама су такође приказане и линије промене тренда у зависности од типа и удела РГП.



Сл. 6.19 Трајне деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине узорака од NR-гуме



Сл. 6.20 Трајне деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине узорака од NR/SBR-гуме



На основу приказаних резултата примећује се да са порастом удела НМГП и МГП долази до побољшања овог својства до удела од 30 phr, које износи 27,4% при додавању НМГП и 39% при додавању МГП. Исто важи и при додавању РГП у NR/SBR-гуму. Овакав тренд промене својства може се објаснити ојачавајућим ефектом честица РГП у каучуковој матрици, с обзиром да гума од које је добијен РГП има бољу отпорност према трајној деформацији него смеша А. Овај ефекат је израженији применом МГП, јер се стварају јаке хемијске везе између честица МГП и полимерних ланаца.

Оптимални удео НМГП и МГП је 20 phr за NR-гуму и 30 phr за NR/SBR-гуму а да не дође до осетне промене трајне деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине узорака.

На основу резултата испитивања статичких својстава NR и NR/SBR-гуме са НМГП, уочава се да са порастом удела НМГП у гуми долази до значајног пада затезне чврстоће, прекидног издужења, модула 100, отпора према цепању и отпора према хабању. Пораст удела НМГП у NR и NR/SBR-гуме има мали утицај на тврдоћу гуме. Повећањем удела НМГП до 20 phr долази до побољшања отпорности према трајној деформацији сабијањем и истезањем, док даљим порастом удела на 50 phr долази до значајног погоршања ових својстава.

На основу резултата испитивања статичких својстава NR и NR/SBR-гуме са МГП уочава се да са порастом удела МГП у гуми долази до пада затезне чврстоће, прекидног издужења, и отпора према цепању. Пораст удела МГП у NR и NR/SBR-гуми доводи до благог пораста тврдоће. Са порастом удела до 50 phr МГП долази до значајног побољшања отпорности према хабању. Повећање удела МГП у NR и NR/SBR-гуми до 30 phr доводи до побољшања отпорности према трајној деформацији сабијањем и истезањем, даље повећање удела МГП до 50 phr, доводи до погоршања ових својстава.

Анализом статичких својстава NR и NR/SBR-гуме закључује се да оптимални удео РГП зависи од врсте производа. Код производа који не захтевају високе вредности затезних својстава, отпорности према цепању и отпорности према хабању оптимални удео НМГП је 20 phr, док код примене МГП износи чак 50 phr. Код производа код којих услови коришћења захтевају велику отпорности према хабању, велику отпорност према дејству трајне деформације сабијањем и истезањем максимални удео НМГП износи свега 10 phr, док приликом употребе МГП тај удео износи 30 phr.

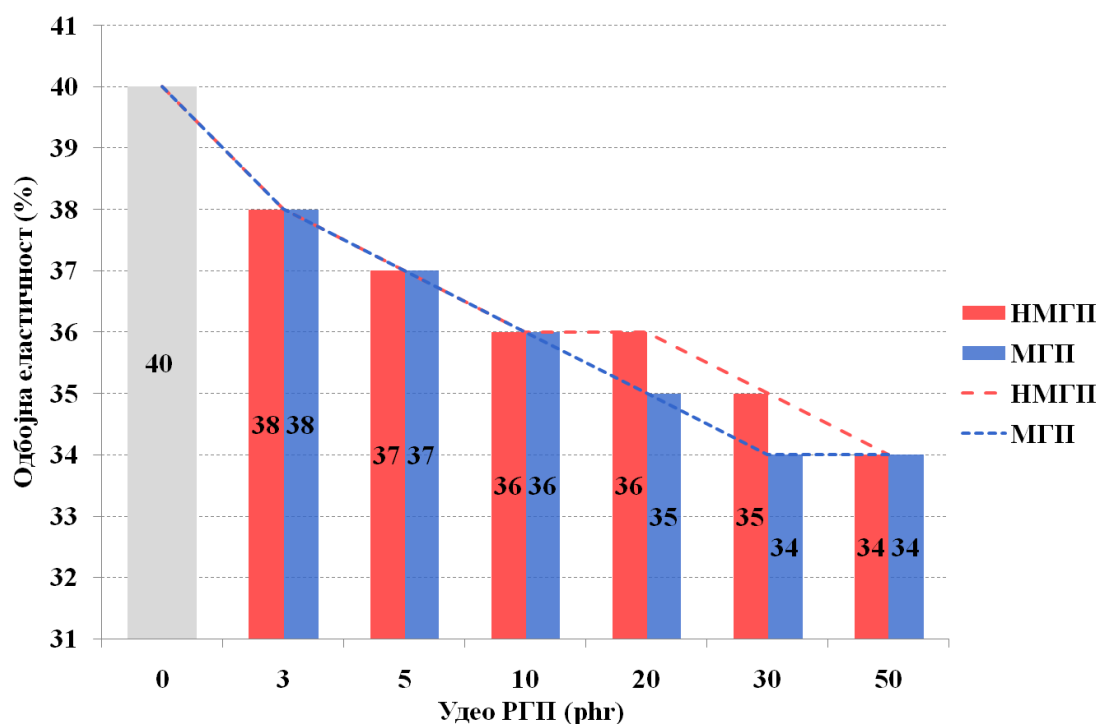




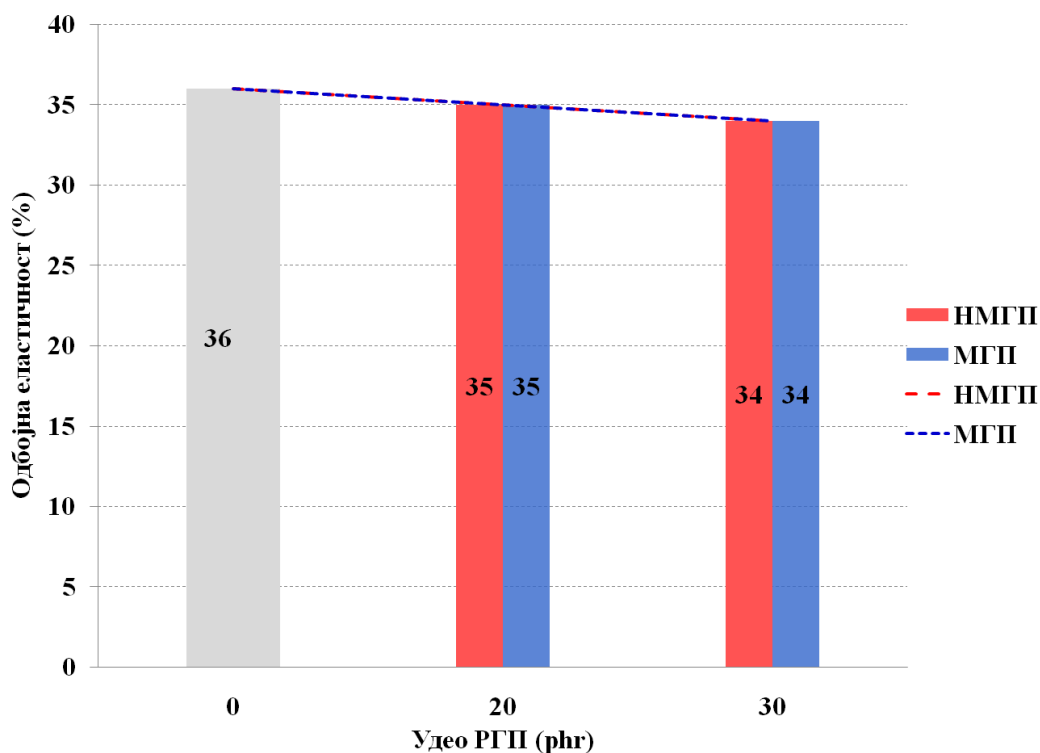
## 6.5 Динамичка својства гуме са рециклираним гуменим прахом

### 6.5.1 Одбојна еластичност

Дијаграм одбојне еластичности узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.21, док је дијаграм одбојне еластичности узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.22. На сликама су такође приказане и линије промене тренда својства у зависности од типа и удела РГП



Сл. 6.21 Дијаграм одбојне еластичности узорака од NR-гуме



Сл. 6.22 Дијаграм одбојне еластичности узорака од NR/SBR-гуме

На основу приказаних резултата уочава се да са порастом удела НМГП и МГП долази до пада одбојне еластичности. Максималан пад вредности одбојне еластичности износи 15% при уделу од 50 phr НМГП и МГП. Иста законистост важи и код примене РГП у NR/SBR-гуми.

Оваква промена својства се може објаснити доминантним својством РГП (способност ауто-гуме да што више ублажи ударна оптерећења) у односу на смешу А, које долази до изражаја након повезивања честица МГП са каучуковом матрицом. Том приликом долази до директног преношења деформација са каучука преко веза на честицу МГП, што није случај са НМГП због постојања микрошупљина.

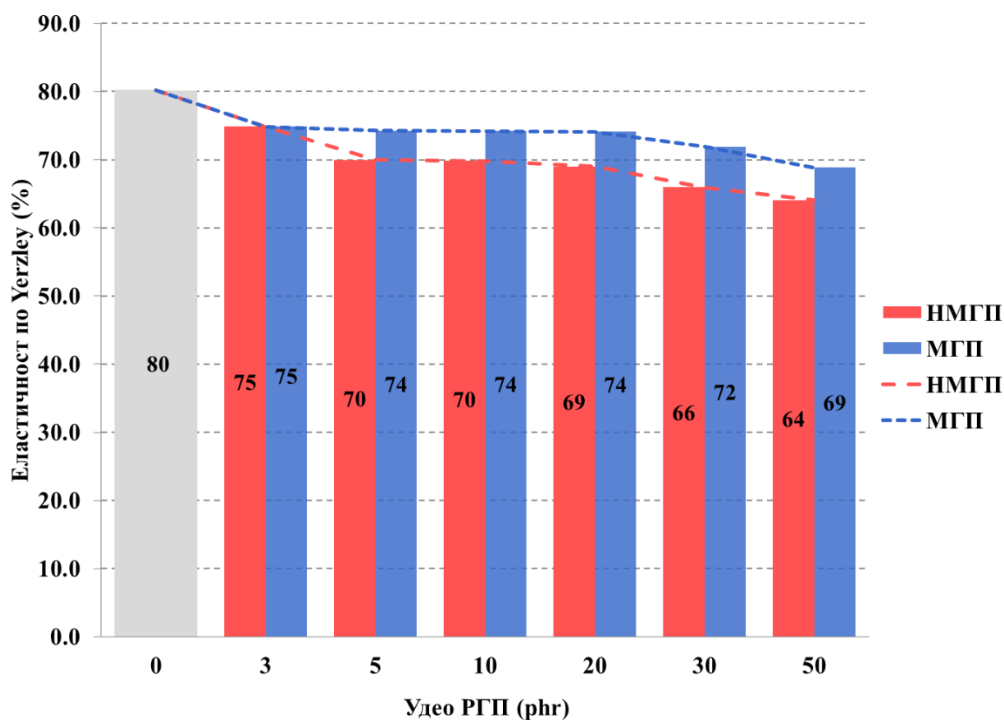
На основу резултата приказаних у поглављу 5.4.3 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70 °C, није имало утицај на одбојну еластичност узорака од гуме.

### 6.5.2 Еластичност по Yertzley

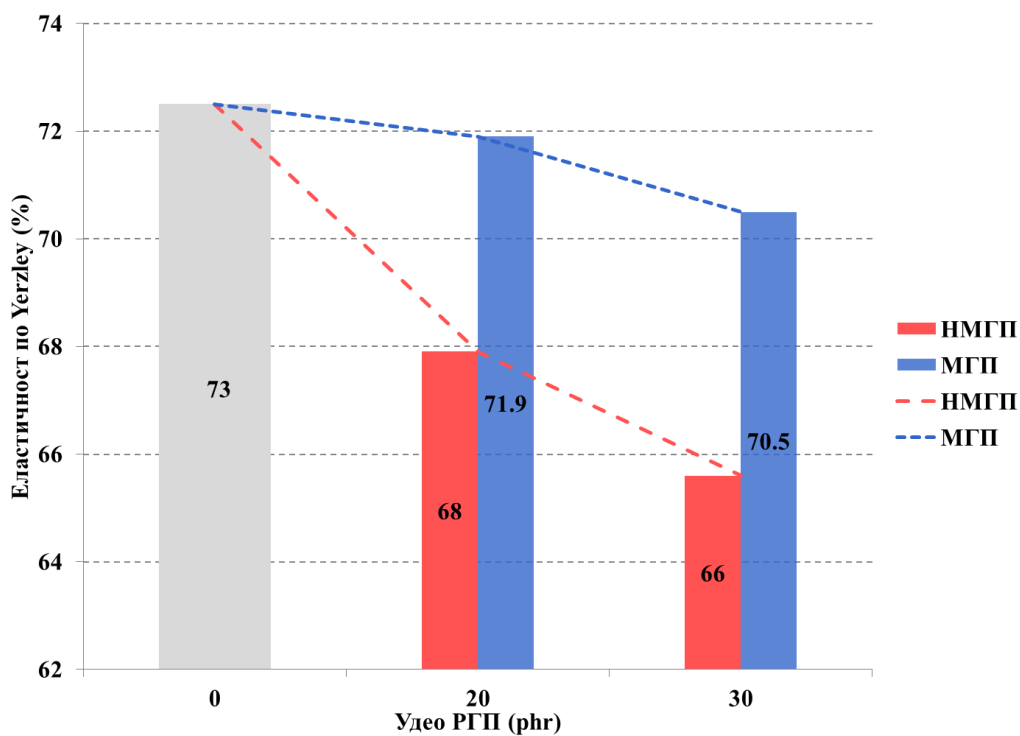
Дијаграм промене еластичности по Yertzley узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.23, док је



дијаграм промене еластичности по Yezley узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.24. На сликама су такође приказане и линије тренда промене еластичности по Yezley у зависности од типа и удела РГП.



Сл. 6.23 Дијаграм еластичности по Yezley узорака од NR-гуме



Сл. 6.24 Дијаграм еластичности по Yezley узорака од NR/SBR-гуме



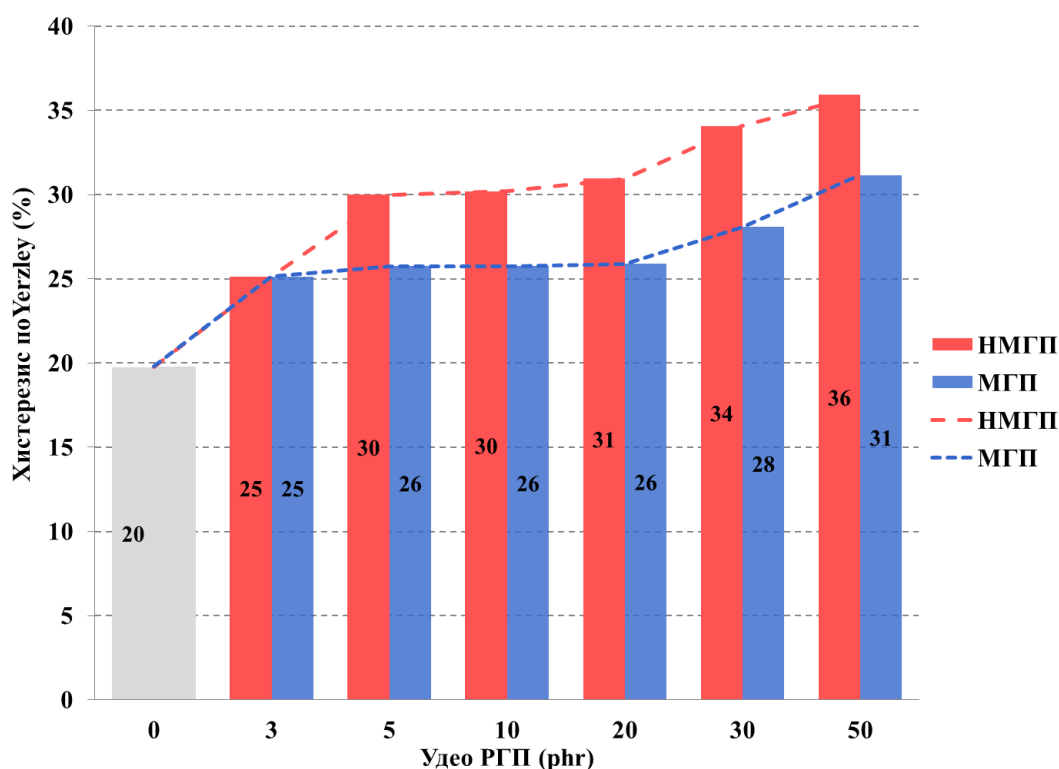
На основу приказаних резултата уочава се да са порастом удела НМГП и МГП долази до пада еластичности узорака. Највећи пад овог својства бележи се при уделу од 50 phr: 20% за НМГП и 14,2% за МГП. Иста законитост важи и при примени РГП у NR/SBR-гуми.

Оваква промена својства се може објаснити тумачењем које је дато у претходном поглављу.

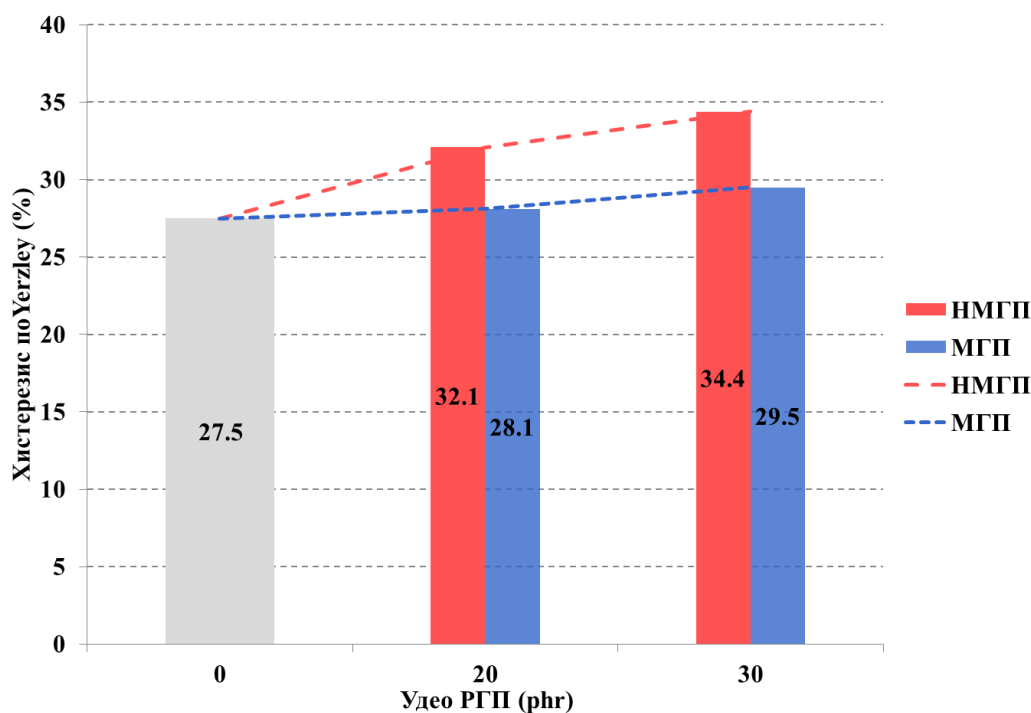
На основу резултата приказаних у поглављу 5.4.3 у табелама 5.48 и 5.49 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70 °С, је имало мали утицај на еластичност по Yertzley.

### 6.5.3 Хистерезис по Yertzley

Дијаграм хистерезиса по Yertzley узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.25, док је дијаграм хистерезиса по Yertzley узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.26. На сликама су такође приказане и линије тренда промене хистерезиса у зависности од типа и удела РГП.



Сл. 6.25 Хистерезиси по Yertzley узорака од NR-гуме



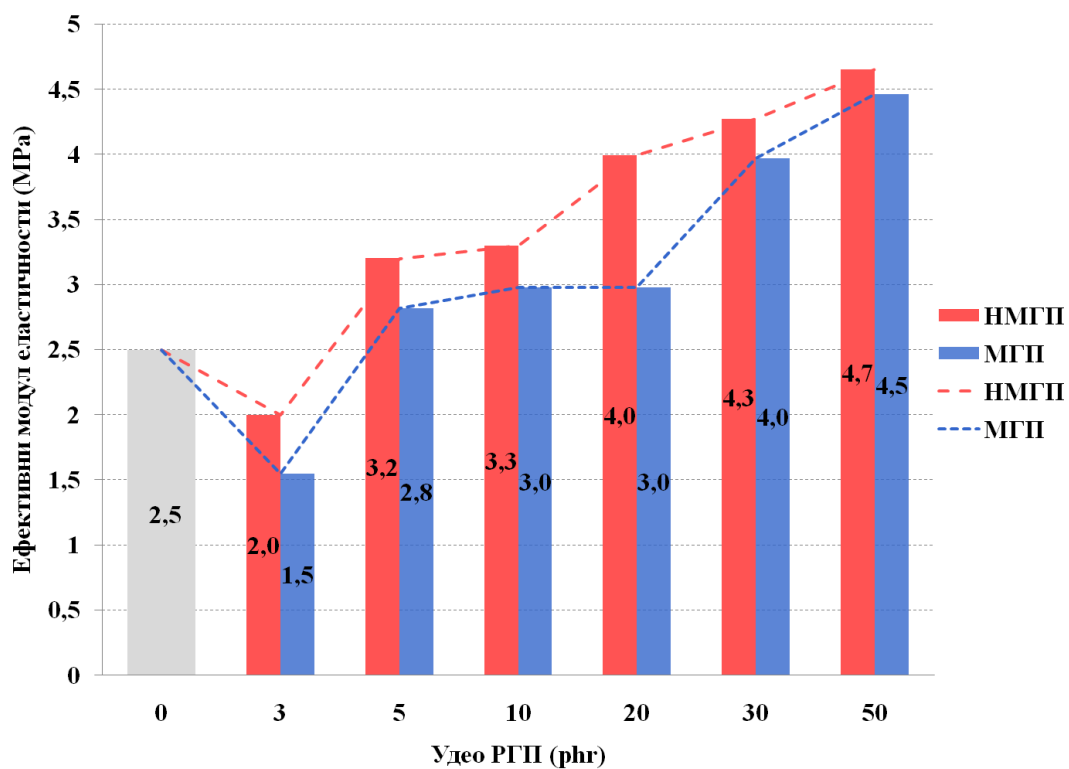
Сл. 6.26 Хистерезис по Yerzley узорака од NR/SBR-гуме

С обзиром да вредност за хистерезис по Yerzley зависи од еластичности и израчунава се на основу једначина 4.15 и 4.16, свака промена еластичности утиче на промену хистерезиса. Пошто измерене вредности за еластичност по Yerzley опадају са порастом удела РГП, то узрокује пораст хистерезиса у истом односу, што је илустровано на сликама 6.25 и 6.26.

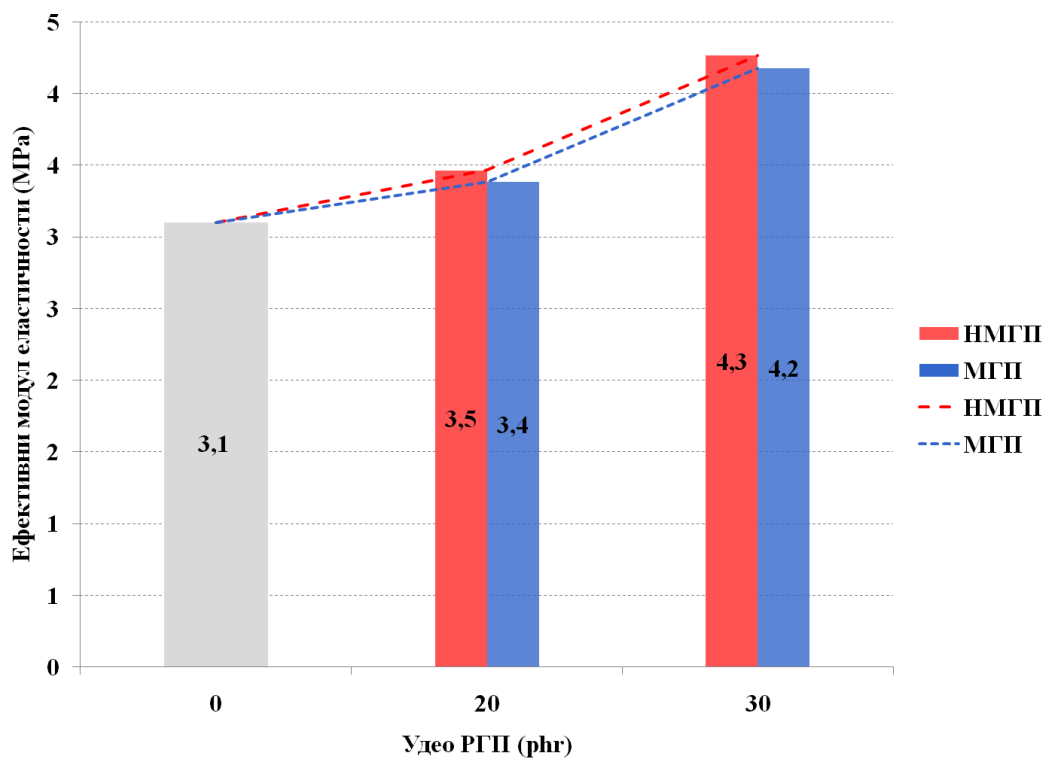
На основу резултата приказаних у поглављу 5.4.3 у табелама 5.48 и 5.49 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70 °C, је имало мали утицај на хистерезис по Yerzley.

#### 6.5.4 Ефективни динамички модул

Дијаграм ефективног динамичког модула узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.27, док је дијаграм ефективног динамичког модула узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.28. На сликама су такође приказане и линије тренда промене ефективног динамичког модула у зависности од типа и удела РГП.



Сл. 6.27 Ефективни динамички модул узорака од NR-гуме



Сл. 6.28 Ефективни динамички модул узорака од NR/SBR-гуме



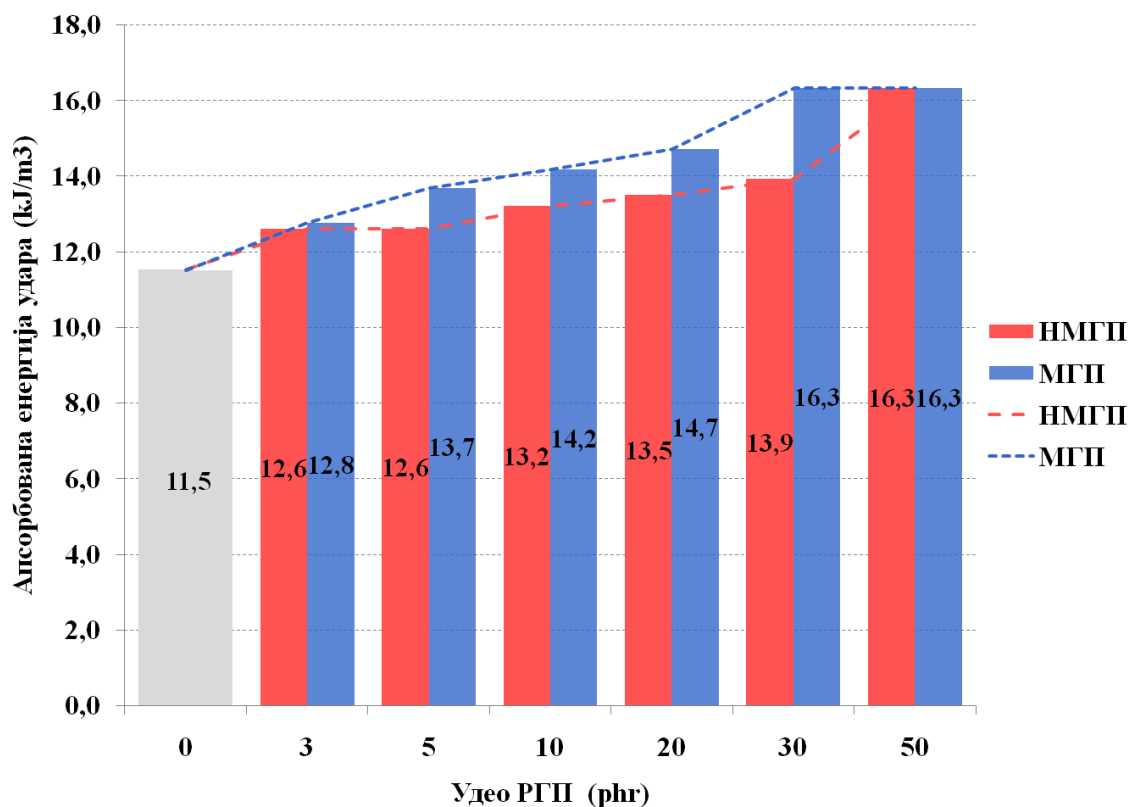
На основу приказаних резултата примећује се да са порастом удела НМГП и МГП долази до пораста динамичког модула еластичности узорака. Највећи пораст овог својства бележи се при уделу од 50 phr: 42,4% за НМГП и 36,3% за МГП. Иста законитост се уочава и при примени РГП у NR/SBR-гуми, што се поклапа са трендом промене статичког модула еластичности.

Као што је уочено у претходним поглављима да статички модул еластичности расте са порастом удела НМГП и МГП, ова појава се такође односи на пораст динамичког модула еластичности.

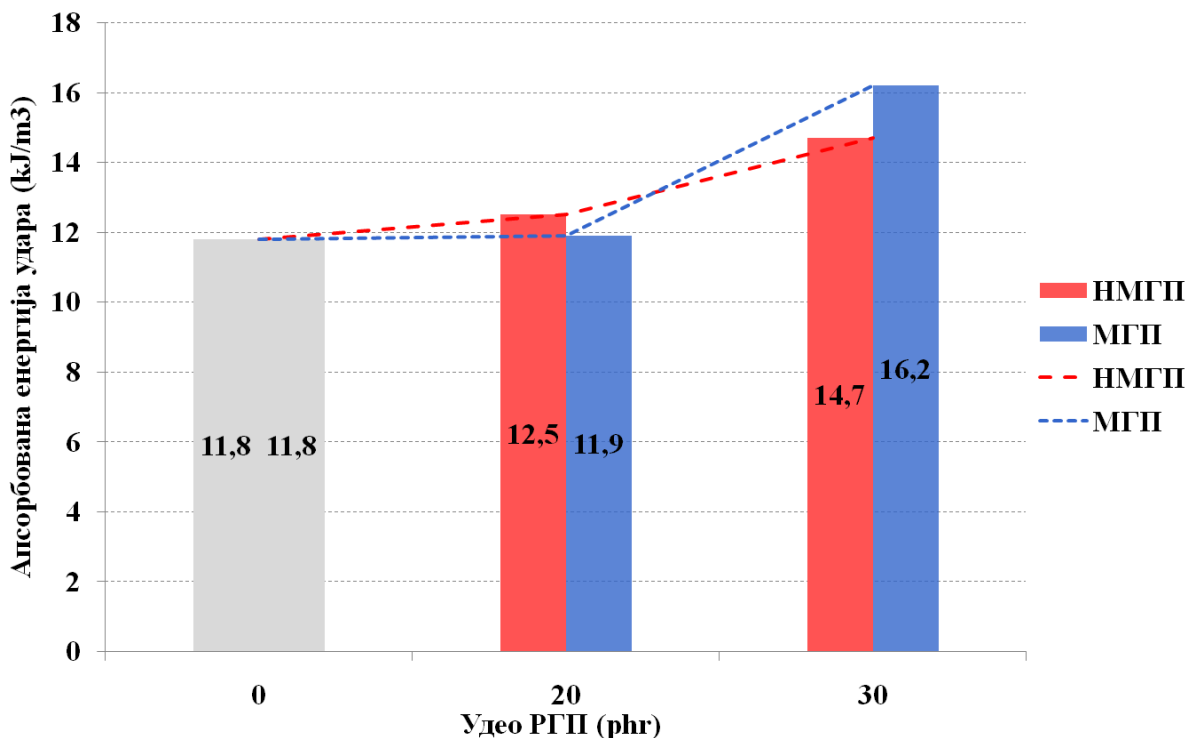
На основу резулта приказаних у поглављу 5.4.3 у табелама 5.48 и 5.49 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70 °C, је имало знатан утицај на ефективни динамички модул при чему је највећа промена износила - 13,3% за NR-гуму.

### **6.5.5 Апсорбована енергија удара**

Дијаграм апсорбоване енергије удара узорака од NR-гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП приказан је на слици 6.29, док је дијаграм промене апсорбоване енергије удара узорака од NR/SBR-гуме приказан на слици 6.30. На сликама су такође приказане линије тренда промене апсорбоване енергије удара у зависности од типа и удела РГП.



Сл. 6.29 Апсорбована енергија удара узорка од NR-гуме



Сл. 6.30 Апсорбована енергија удара узорка од NR/SBR-гуме





На основу приказаних резултата примећује се да са порастом удела НМГП и МГП долази до позитивне промене измерених вредности. Највећа позитивна промена овог својства у износу од 41,7% бележи се при уделу од 50 phr НМГП и МГП. Исти тренд се уочава и при примени РГП у NR/SBR-гуми.

Разлог за овакву промену својстава је исти као и у претходним случајевима. Анализом промена динамичких својстава може се закључити и да са порастом удела РГП до 50 phr, својства РГП преовлађују у односу на својства смеше А.

На основу резулта приказаних у поглављу 5.4.3 у табелама 5.48 и 5.49 може се закључити да вештачко старење у присуству кисеоника на температури од 70 °С, нема битан утицај на апсорбовану енергију удара.

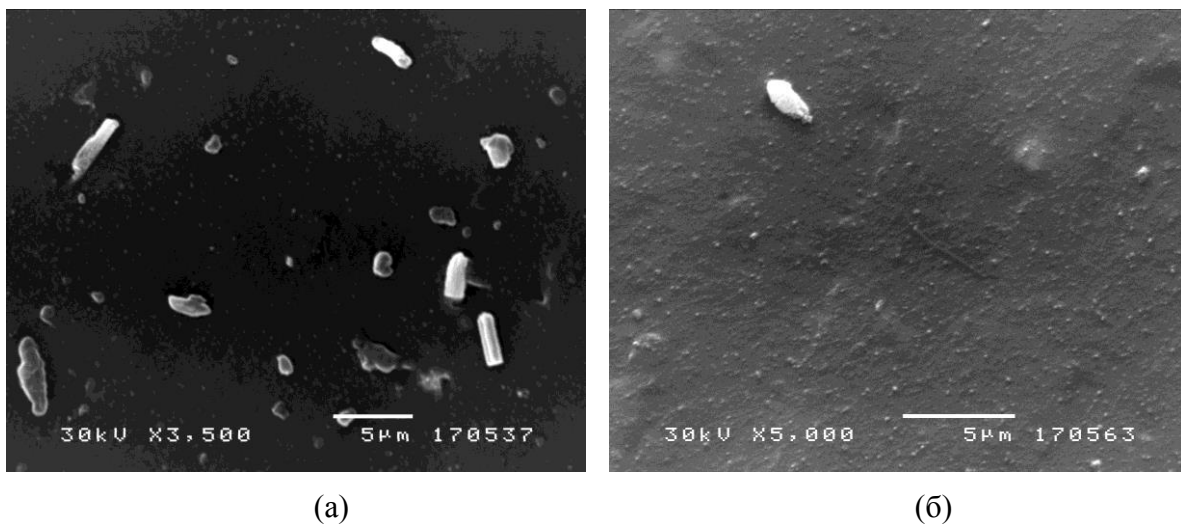
На основу резултата испитивања динамичких својстава NR и NR/SBR-гуме са НМГП уочава се да са порастом удела НМГП у гуми долази до пада одбојне еластичности и еластичности по Yertzley. Овај пад својстава мање је изражен применом МГП. Повећањем удела НМГП у NR и NR/SBR-гуми са НМГП долази до повећања хистерезиса по Yertzley, ефективног динамичког модула и апсорбоване енергије удара. Применом МГП бележи се мањи пораст хистерезиса по Yertzley и ефективног динамичког модула него при истом уделу НМГП, док је пораст апсорбоване енергије удара израженији са порастом удела МГП у односу на исти удео НМГП

Анализом динамичких својстава закључује се да оптимални удео РГП зависи од врсте производа и његових жељених карактеристика. За производе код којих је доминантно својство висок степен пригушења (амортизери, апсорбери итд.), оптимални удео МГП износи 50 phr, док за производе код којих се захтева висока еластичност (гумо-метални елементи у ауто-индустрији) треба користити до 20 phr МГП.

## **6.6 Микроструктура узорака гуме на бази природног и природно/синтетичког каучука са рециклираним гуменим прахом**

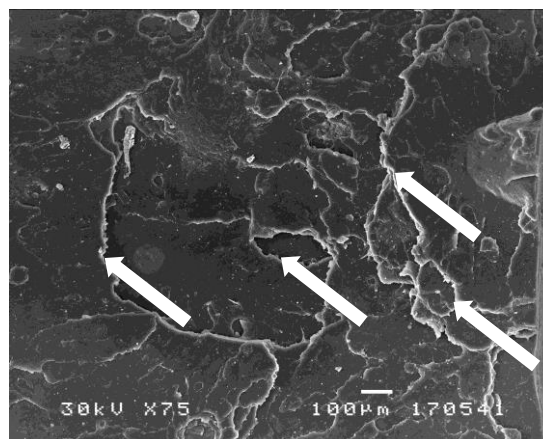
Испитивање микроструктуре узорака NR и NR/SBR-гумеса РГП изведено је ради утврђивања утицаја РГП на својства гуме као и потврђивања претпоставки негативног утицаја на затезна својства и отпорност према цепању. Испитивањем микроструктуре

узорака утврђено је да тип и удео РГП имају значајан утицај на микроструктуру NR и SBR-гуме. На основу слика микроструктуре које су приказане у потпоглављу 5.5 може се закључити да са повећањем удела РГП микроструктура узорка постаје грубља, повећава се површинска храпавост и са више праваца и равни ширења пукотине у односу на гуму без РГП, што се потпуно поклапа са истраживањима која су описана у потпоглављима 3.1 и 3.2. Површина NR-гуме (слика 6.31а) и NR/SBR- гуме (6.31б) без РГП, је равна, глатка и без неправилности у структури. Узорци без РГП имају један главни правац простирања пукотине, што се може видети на сликама 5.5 и 5.12 (означено стрелицама).



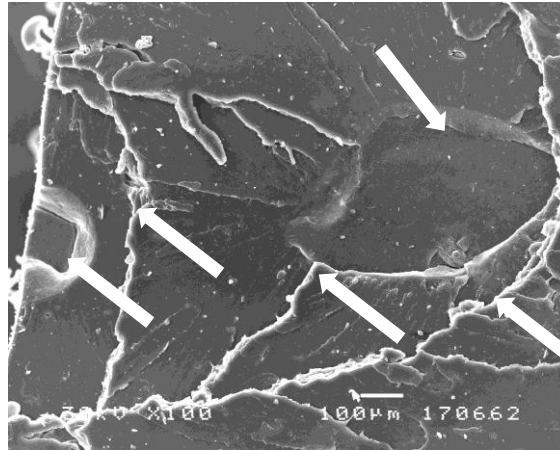
Сл. 6.31 Изглед површине узорка NR-гуме (а) и NR/SBR- гуме(б) без РГП

Код примене НМГП са повећањем удела долази до повећања броја равни у којима је дошло до пуцања епрувете. На слици 6.32 је приказан детаљ слике 5.11а (област означена стрелицом) са 50 phr НМГП на коме се види неколико нивоа раслојавања узорка при лому епрувете.



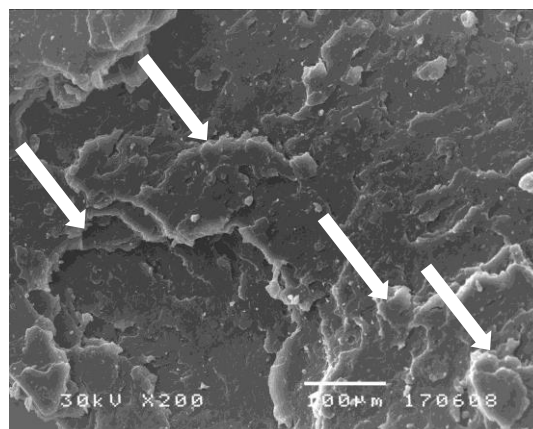
Сл. 6.32 Раслојавање епрувете са 50 phr НМГП

Овакав облик микроструктуре се може објаснити појавом кохезионог лома услед недостатка везе између РГП и каучукове матрице, где приликом истезања епрувете долази до стварања унутрашњег напона између агломерата РГП и каучукове матрице и цепања читавих области. Ова појава се најбоље види на слици 6.33 која представља део структуре површине узорка са 3 phr РГП представљене на слици 5.6а (област означена стрелицом).



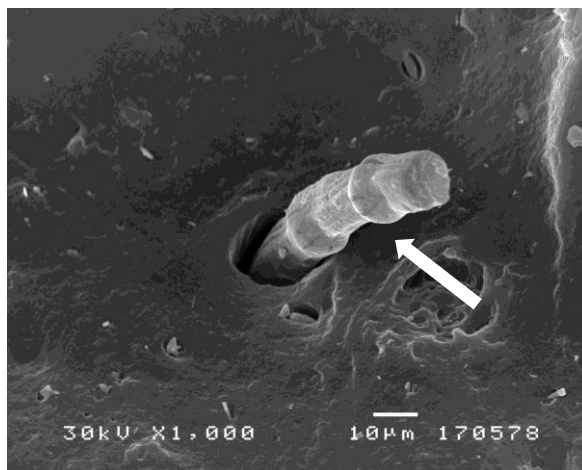
Сл. 6.33 Агломера НМПГ при уделу од 3 phr у NR-гуми

За разлику од узорака са НМПГ, површина узорака са МПГ је храпавија, разуђенија, са облијим границама лома, што је приказано на слици 6.34, а која представља детаљ слике 5.10б. (означен стрелицом). Овакав облик микроструктуре може се објаснити чињеницом да иницијална прскотина расте у области умрежења између честица МПГ и каучука где умрежени делови каучукове матрице остају са обе стране стварајући храпаву структуру.



Сл. 6.34 Изглед микроструктуре узорка са 30 phr МПГ

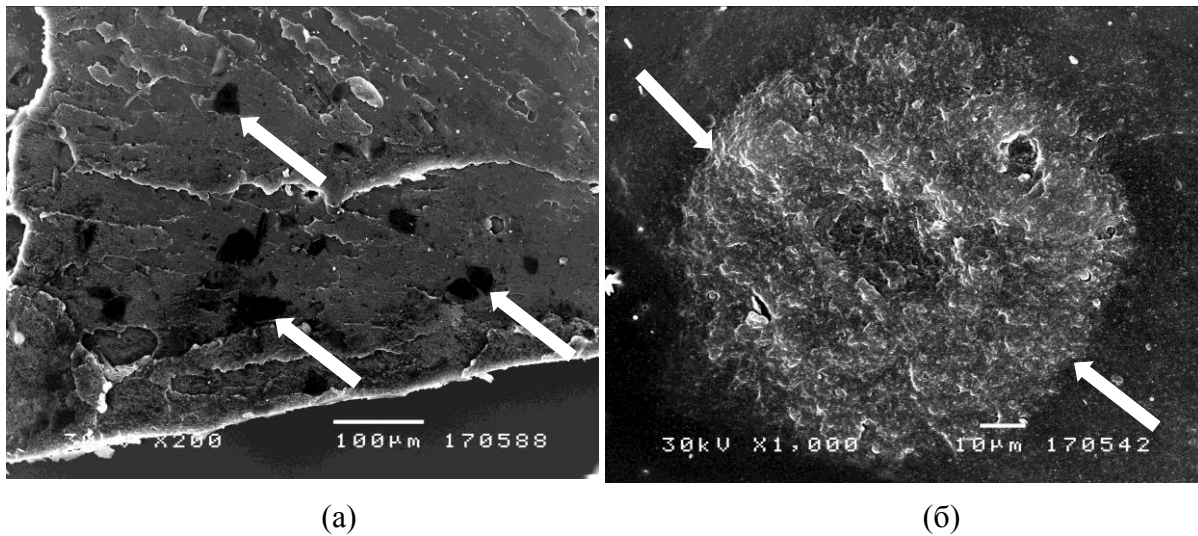
Испитивањем затезних својстава гумених узорака, уочено је да код неких епрувета долази до значајног пада затезне чврстоће и прекидног издужења и да облик површине прелома одступа од облика површине осталих епрувета. Испитивањем микроструктура ових епрувета уочене су грешке у структури као и присуство страних тела (челчних и синтетичких влакана, делова тканине, длака, итд.) које негативно утичу на хомогену структуру гуме. Грешке у структури доводе до локалног ослабљења материјала и представљају иницијатора настанка прскотине. Приликом испитивања структуре гуменог праха утврђено је да се у саставу РГП налазе и челична и синтетичка влакна. На слици 6.35 је приказано синтетичко влакно.



Сл. 6.35 Синтетичко влакно у гуми

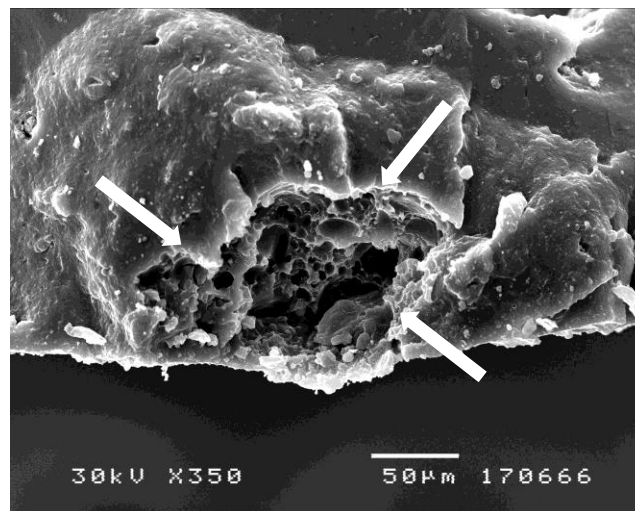
Приликом испитивања микроструктуре узорака такође су уочене и неправилности (у даљем тексту грешке) које су везане за технологију мешања и израде узорака, али и хемијских реакција које се јављају у процесу вулканизације.

Грешке у структури које се јављају приликом израде гуме су честе и оне супоследица неравномерне дисперзије ингредијената у смеси приликом поступка мешања. Анализом узорака установљено је да долази до појаве оклудоване (заробљене) чађи (слика 6.36.а) и сумпора (слика 6.36.б), тј. не долази до разградње агломерата чађи и сумпора приликом умешавања и њихове реакције са каучуковом матрицом.



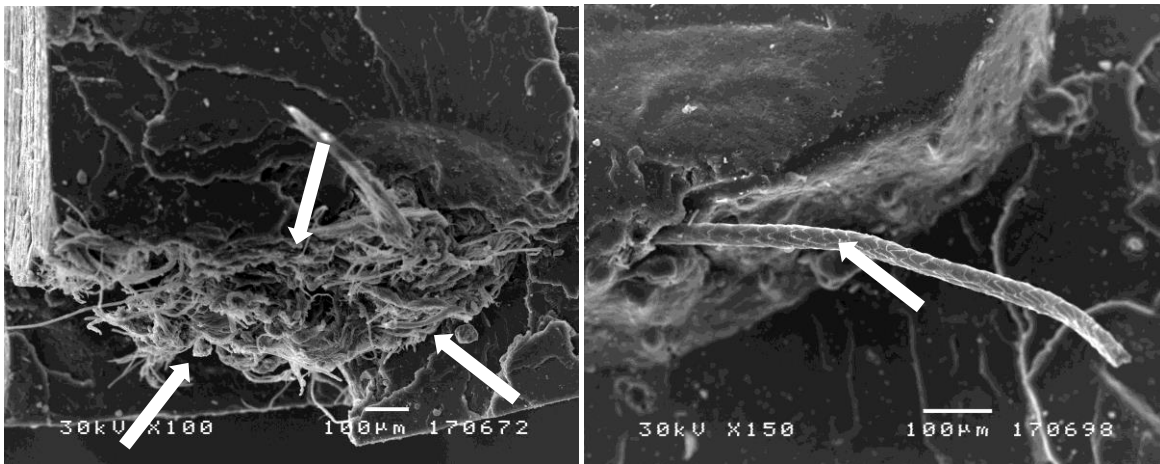
Сл. 6.36 Агломерат чађи (а) и сумпора (б) стрелице

Приликом израде гумених делова пресовањем, често се дешава да у узорку гуме буде заробљен ваздух, што је приказано на слици 6.37. Ова појава се дешава када смеша има велику брзину разливања, при чему ваздух остане заробљен у слојевима гуме.



Сл. 6.37 Пенаста структура услед заробљеног ваздуха

Приликом рада на двоваљку користи се различит прибор (лопатице, четке, итд.) којима се скупљају ингредијенти. Такође се приликом вулканизације узорака користе памучне тканине за брисање и одржавање алата. Делови ових материјала врло често заврше у гуми и имају негативан утицај на механичка својства, јер нарушавају хомогеност структуре. На слици 6.38 приказан је део памучне тканине који је пронађен у узорку 5.7а (обележено стрелицом ) и длака из четке у узорку 5.13а (обележено стрелицом).

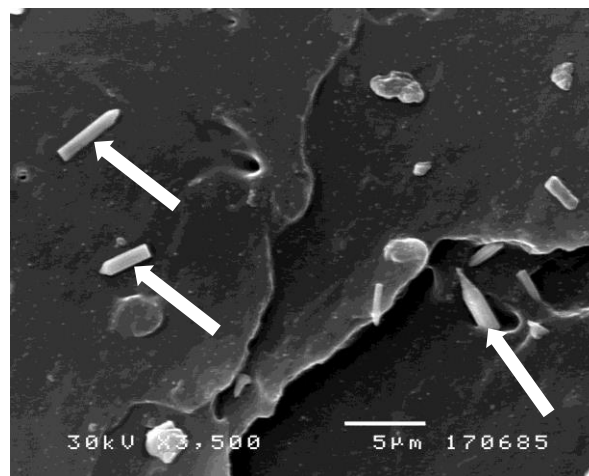


(a)

(б)

Сл. 6.38 Страна тела у гуми: део тканине (а) и длака (б)

За време процеса вулканизације одигравају се многе хемијске реакције у гуми: распадање убрзивача, активатора, поступак умрежавања, итд. Једна од хемијских реакција која се одиграва јесте и настанак цинк-суфида ( $ZnS$ ). Изглед  $ZnS$  кристала приказан је на слици 6.39.

Сл. 6.39 Присуство  $ZnS$  у гуми

Анализом структуре узорка гуме уочен је пораст броја кристала  $ZnS$  са порастом удела РПГ у гуми. Настанак овог хемијског једињења има негативан утицај на својства гуме.  $ZnS$  утиче на настанак микрогрешака микроструктуре на површини производа од гуме, као и на повећање степена запрљања алата [111]. У оквиру своје докторске дисертације *Heideman* је анализирао и настанак  $ZnS$  [112] и утврдио да код каучука као што су NR или EPDM врло често долази до настанка  $ZnS$ . С обзиром да  $ZnS$  има



негативан утицај на својства гуме, треба га смањити испод 5 phr. Ова појава се може објаснити чињеницом да Zn из РГП мигрира у каучукову матрицу и у присуству веће количине сумпора гради ZnS. Ову појаву миграције Zn је проучавао и *Guzmán* [113] који је тврдио да је могуће користити РГП као замену за ZnO.



## 7 ЗАКЉУЧАК

Поред значајних напора који се улажу за решавање проблема отпадне гуме у смислу развоја различитих третмана за искоришћавање отпадне гуме као извора сировина, још увек није нађено решење за искоришћавање већих количина РГП при производњи гума и производа од гуме. Разлог овоме лежи у негативном утицају РГП на затезна својства (затезна чврстоћа, прекидно издужење, модул еластичности и отпорност на угаоно цепање), код производа високих перформанси (ауто-гуме) који су уједно и најмасовнији производ од гуме. Због тога су данашња истраживања усмерена у два правца. Први правац је примена РГП у другим врстама материјала (разне врсте пластике, асфалт, бетон, малтер итд.), а други правац је изналажење метода модификације површине и саме честице РГП, који омогућава примену што већег удела РГП у гуми, а да то не изазове значајну промену својстава.

У циљу препознавања свих утицајних фактора на својства и структуру гуме, у првом делу докторске дисертације урађена је анализа и представљене су карактеристике најчешће коришћених врста каучука и ингредијената за израду производа од гуме. Затим је извршена модификација честице РГП различитим механичко-хемијским методама (механичким третирањем уз додвајање TDTM и CLD, CLD и LIR 50). Када је утврђен најбољи поступак модификације, развијене су смеше са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП на бази NR-каучука (3 phr, 5 phr, 10 phr, 20 phr, 30 phr и 50 phr РГП) и NR/SBR-каучука (20 phr и 30 phr РГП).

С циљем утврђивања оптималног удела немодификованог и модификованог РГП у гуми, спроведено је експериментално истраживање реолошких, статичких и динамичких својстава, као и микроструктуре гуме. Микроструктура гуме испитивана је ради објашњења утицаја честице РГП на својства гуме, као и утврђивања разлога негативне промене појединих својстава (затезна чврстоћа, прекидно издужење и отпорности на цепање). Резултати експерименталног истраживања показали су да повећање удела РГП смањује одређена статичка својства гуме (затезна чврстоћа, прекидно издужење и





отпорност према цепању), док повећава тврдоћу гуме, отпорност гуме према хабању и дејству трајне деформације сабијањем и истезањем. Када су у питању динамичка својства гуме, повећањем удела РГП побољшавју се пригушна својства и апсорбована енергије удара.

Основни резултат истраживања и научни допринос ове докторске дисертације је одређивање оптималног удела немодификованог и модификованог РГП имајући у виду очекиване карактеристике крајњег производа. Код производа од гуме код којих се у условима коришћења захтева висока отпорност према трајној деформацији, променљивом оптерећењу на притисак, хабању, као и велики степен апсорпције на удар (амортизери, пригушнице, цело-гумени точкови, носачи транспортних трака, доњи делови обуће, подне облоге) оптимални удео немодификованог РГП износи 20 phr, а модификованог РГП 30 phr, даљим повећањем удела НМГП и МГП долази до повећања тврдоће и пада свих осталих својстава. Код производа високих перформанси (ауто-гуме, транспортне траке високог квалитета), код којих услови коришћења захтевају високе вредности затезне чврстоће, прекидног издужења и отпорности према цепању, оптимални удео немодификованог и модификованог РГП је до 3phr.

Резултат и научни допринос овог истраживања су развијени нови поступци модификације РГП, са циљем остваривања хемијских веза (умрежења) између честица РГП и каучукове матрице, при којима се повећава удео РГП у гуми, а да при томе не долази до битне промене одређених статичких својстава гуме (тврдоћа, отпорност према хабању, дејству трајне деформације сабијањем и истезањем) и динамичких својстава (пригушна својства и апсорбована енергија удара). Механичко-хемијска модификација РГП на двоваљку уз додавање ТМТД, СLD, уља и константним мешањем у трајању од 15 мин, даје најмању промену својстава са повећањем удела РГП у односу на остале врсте модификација које су испитиване у овој докторској дисертацији.

Један од резултата истраживања је одређивање редоследа додавања ингредијената при мешању гуме са немодификованим РГП. Утврђено је да се најбоља механичка својства добијају када се РГП дода у смесу после црног пунила – чађи.

Утврђивање утицаја масеног удела немодификованог и модификованог РГП на процес вулканизације (прерадљивост, почетак, брзину крај вулканизације), такође је резултат овог истраживања и научни допринос. Са повећањем удела немодификованог



и модификованог РГП долази до скраћивања времена почетка вулканизације, повећања брзине вулканизације и скраћења времена завршетка вулканизације. Због ове појаве, са повећавањем удела РГП потребно је додавати успориваче вулканизације и променити врсту убрзивача вулканизације узимајући у обзир облик и димнезије производа. Такође долази до повећања минималног и смањења максималног обртног момента смеше, што захтева додавање омекшивача и уља ради лакшег мешања. Смеше са високим уделом РГП нису погодне за израду производа од гуме екструдирањем и бризгањем.

Ово истраживање као резултат је дало и утврђивање утицаја масеног удела немодификованог и модификованог РГП на статичка својства гуме. Повећањем удела РГП долази до повећања тврдоће. Али само у случају када је тврдоћа гуме од које је добијен РГП већа од тврдоће гуме у коју се додаје. Овај ефекат је израженији при примени модификованог РГП. Повећање удела немодификованог и модификованог РГП смањује затезну чврстоћу, прекидно издужење и отпорност према цепању. При примени модификованог РГП, овај утицај је мање изражен. Повећање удела модификованог РГП до 30 phr повећава се отпорност гуме према хабању, дејству трајне деформације сабијањем и истезањем.

Резултат истраживања и научни допринос такође је и утврђивање утицаја масеног удела немодификованог и модификованог РГП на динамичка својства гуме. Са повећањем удела немодификованог и модификованог РГП долази до побољшања пригушних својстава и апсорбоване енергије удара. Ова појава израженија је код примене модификованог РГП.

Испитивањем структуре гуме утврђено је да појава челичних и текстилних влакана, као и страних тела (делова тканине, длака, ваздуха) има негативан утицај на затезна својства гуме. Такође је утврђено и да негативан утицај на затезна својства има и оклудована чађ и сумпор. Овим испитивањем утврђено је да због постојања вишка Zn, јер се он налази у гуми и у честицама РГП долази до формирања ZnS. Настанак ZnS има за последицу појаву већег степена запрљања алата и микродефекта на површини производа од гуме, што такође представља научни допринос ове докторске дисертације.

Стручни допринос ове докторске дисертације је дефинисање смерница за примену немодификованог и модификованог РГП у комерцијалним смешама.



NR и NR/SBR-гуме са уделом од 30 phr НМГП и МГП1 могу се користити за израду делова црева за ваздух (душа и облога) јер су захтеване карактеристике производа: затезна чврстоћа од минимално 7 МПа и минимално прекидно издужење 250%, при чему приликом вештачког старења (три дана на 70 °С) не сме да дође до промене својстава од  $\pm 20\%$ . Такође, ова два типа гума могу се користити за израду делова цеви за транспорт индустријских вода (душа и облога) јер су захтеване карактеристике: за душу затезна чврстоћа од минимум 6 МПа и прекидно издужење 300% и за облогу затезна чврстоћа од 5,5 МПа и прекидно издужење од 250 %, при чему за оба типа цеви отпорност на хабање треба да износи 200 mm<sup>3</sup>. Ова два типа гуме могу се користити и за цеви које се користе за транспорт зрнастог материјала.

NR и NR/SBR-гуме са уделом од 30 phr НМГП и МГП1 могу се користити за израду доњих делова чизми за индустријску употребу (пресованих и конфекционираних). Тражене карактеристике ђонова су минимална затезна чврстоћа од 9 МПа, прекидно издужење од 250%. и отпорност према хабању од максимално 200 mm<sup>3</sup>. Такође ове гуме се могу користити и за израду доњих делова обуће од коже, као и за израду обућарског материјала (пета, полуђонова, ђонова и материјала за попуњу).

NR и NR/SBR-гуме са уделом од 30 phr МГП1 могу се користити за израду радне облоге транспортних трака квалитета Р и Q. Тражене карактеристике облоге су: затезна чврстоћа минимално 15 МПа и прекидно издужење минимално 350 %, при чему хабање не сме да пређе 250 mm<sup>3</sup>. Ови типови гума се могу користити и за израду амортизујућих прстенова за носеће ваљке и дискове за повратне ваљке код тракастих транспортера.

NR и NR/SBR-гуме са уделом од 50 phr НМГП и МГП1 могу се користити за израду плочастих материјала за облагање ваљака усипних кошева, бочних страница код истоварних станица на транспортерима, плоча за израду подних облога.

NR-гума са 50 phr МГП1 и NR/SBR-гума са уделом од 30 phr МГП1 може се користити за израду плоча за заптивање (са текстилним уметком и без њега), при чему су карактеристике производа: затезна чврстоћа минимално 3 МПа, прекидно издужење 200 %, тврдоћа око 65 Sh А и трајна деформација после сабијања (параметри испитивања 24 часа, 70 °С) не сме да пређе 30%.



Даља истраживања биће усмерена у неколико праваца:

- утврђивању техно-економске оправданости поступака модификације и примене модификованог РГП;
- утврђивање техно-економске оправданости смањења величине честице РГП и њене касније модификације;
- испитивање утицаја тренутка додавања модификованог РГП на својства гуме;
- испитивање могућности примене модификованог РГП код осталих типова каучука;
- испитивање могућности примене модификованог РГП при поступку производње синтерованем (под утицајем високог притиска и температуре).



## 8 ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Dick, J. S, Rader C.P.**, *Raw Materials Supply Chain for Rubber Products*. Hanser Publications, Munich, Germany, 2014.
- [2] **Mihajlović, A.** *Tržište kaučuka i proizvoda od gume u Srbiji u 2014*. Bilten IGP, 2014, стр. 65.
- [3] **Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., Balas., A.** *A review: Progress in used tyres management in the European Union*, Waste Management, 2012, стр. 1742-1751.
- [4] **James E. M., Burak E., Frederick R. E.**, *Science and Technology of Rubber (Third Edition)*, Elsevier, 2007.
- [5] **Djekić, P, Temeljkovski, D Nusev, S.**, *Izbor optimalnog procesa reciklaže otpadnih pneumatika.*, Istraživanja i projektovanja za privredu, 2010, стр. 65-72.
- [6] **M.S. Evans**, *Tyre compounding for improved performance*, Report 140, Simthers raprs tehnology Ltd., Shawbury, UK,,2002.
- [7] **BS 3558-1, 1997.** *Glossary of rubber terms. International terms.* The British Standards Institution, 1997.
- [8] **Huding, Donald E.**, *Plastics Tehnology Handbook*. CRC Press, 2007.
- [9] **Plavšić, Milenko.**, *Polimerni materijali, Nauka i inženjerstvo*. Naučna knjiga, Beograd, 1996.
- [10] **Chanda Manas, Salil K. Roy.**, *Plastics Tehnology Handbook*, CRC Press, 2007.
- [11] **Callister, William D., David G. Rethwisch.**, *Materials science and engineering, Vol. 9*, John Wiley & Sons, New York 2016.
- [12] **Bayer. AG.**, *Manual for the Rubber Industry*. Bayer AG, Leverkusen 1993.
- [13] **Plavšić M., Popović R., Popović R.**, *Elastomerni materijali- kaučuci, guma i kompoziti*. Naučna knjiga, Beograd 1995.
- [14] **The Rubber Manufacturers Association.**, *International Standards of quality and packing for natural rubber grades (The green book)*, The Rubber Manufacturers Associations, Washington DC, 1979.
- [15] **Sadhan, De K. White, Jim R.**, *Rubber Technologist's Handbook*, Rapra Technology Limited, 2001.
- [16] **ISO 2000, 2003.** *Rubber, raw natural - Guidelines for the specification of technically specified rubber (TSR)*. International Organization for Standardization, 1964.



- [17] **Rodgers, Brendan.**, *Rubber compounding-Chemistry and Applications*, CRC Press, 2016.
- [18] **Simpson, Richard B.**, *Rubber Basic*, Rapra Technology Limited, 2002.
- [19] **Ciullo, P. A., Hewitt, N.**, *The rubber formulary*, Noyes Publications-William Andrew Publishing, New York 1999.
- [20] **Petković, V.**, *Tehnologija gume*, GHI "Balkanbelt", Beograd, 1999.
- [21] **White, J., De, S.K, Naskar, K.**, *Rubber Technologist's Handbook, Volume 2*, Smithers Rapra Technology, 2009.
- [22] **Franata, I.**, *Elastomers and rubber Compounding Materials*. Elsevier, New York, 1989.
- [23] **Ramarad, S.**, *Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future*. Progress in Materials Science, 2015, стр. 100-140.
- [24] **Forrest, M.**, *Recycling and Re-use of Waste Rubber*, Smithers Rapra Technology Ltd, Shawbury, UK, 2014.
- [25] **Andrew, Ciesielski.**, *An Introduction to Rubber Technology*, Rapra Technology Limited, 1999.
- [26] **Kohjiya, Shinzo Ikeda, Yuko.**, *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber*. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2014.
- [27] **Đekić P, Temeljkovski D, Nusev S, Rančić B.**, *Modern waste tyre recycling system*, The 7th international conference research and development of mechanical elements and systems, Zlatibor, 2011, стр. 57-62.
- [28] **Sienkiewicz M, Kucinska-Lipka J, Janik H, Balas A.**, *Progress in used tyres management in the European Union: A review*, Waste Management, бр. 32, 2012, стр. 1742-1751.
- [29] **Yehia, A. A.**, *Recycling of rubber waste*, Polymer-Plastics technology and engineering, 2004, стр. 1735-1754.
- [30] **Li, S., Lamminmäki, J., & Hanhi, K.**, *Improvement of mechanical properties of rubber compounds using waste rubber/virgin rubber*. Polymer Engineering & Science, 2005, стр. 1239-1246.
- [31] **Đekić P., Radenković G., Milutinović B. , Stefanović G.**, *Environmental, economic and technical assessment of rubber blends with multi-criteria analysis*, 29th international conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact on Energy Systems Portorož, Slovenia, 2016, стр. 450.
- [32] **Morin, J. E., Williams, D. E., & Farris, R. J.**, *A novel method to recycle scrap tires: high-pressure high-temperature sintering*. Rubber chemistry and technology, 2002, стр. 955-968.



- [33] **Tripathy, A. R., Morin, J. E., Williams, D. E., Eyles, S. J., Farris, R. J.,** *A novel approach to improving the mechanical properties in recycled vulcanized natural rubber and its mechanism*, *Macromolecules*, 2002, стр. 4616-4627.
- [34] **Hrdlicka, Z., Kuta, A., Hrdlickova, M., & Duchacek, V.,** *Properties of Natural and Synthetic Rubber Recycled via High-Pressure High-Temperature Sintering*. KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe, 2011, стр. 22-25.
- [35] **Ciro, E., Parra, J., Zapata, M., & Murillo, E. A.,** *Effect of the Recycled Rubber on the Properties of Recycled Rubber/Recycled Polypropylene Blends*. *Ingeniería y Ciencia*, 2015, стр. 173-188.
- [36] **Haworth, B., Chadwick, D., Chen, L., & Ang, Y. J.,** *Thermoplastic composite beam structures from mixtures of recycled HDPE and rubber crumb for acoustic energy absorption*. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2016.
- [37] **Rosana, G., Maria, P., Jerónimo, K., Paz, M., Amono, S., Ricardo, A., & Juan Carlos, B.,** *Cover system for roofs manufactured with recycled polyethylene and rubber*, *Key Engineering Materials*, 2016, стр. 668.
- [38] **Qin, J., Ding, H., Wang, X., Xie, M., & Yu, Z.,** *Blending LLDPE and ground rubber tires*, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2008, стр. 199-202.
- [39] **Girskas, G., & Nagrockienė, D.,** *Crushed rubber waste impact of concrete basic properties*, *Construction and Building Materials*, 2017, стр. 36-42.
- [40] **Na, O., & Xi, Y.,** *Mechanical and durability properties of insulation mortar with rubber powder from waste tires*, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2017, стр. 763-773.
- [41] **Wang, S., Cheng, D., & Xiao, F.,** *Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt*. *Construction and Building Materials*, 2017, стр. 101-113.
- [42] **Shu, X., & Huang, B.,** *An overview: Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete*, *Construction and Building Materials*, 2014, стр. 217-224.
- [43] **Abadyan, M., Bagheri, R., & Kouchakzadeh, M. A.,** *Fracture toughness of a hybrid-rubber-modified epoxy. I. Synergistic toughening*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, стр. 2467-2475.
- [44] **Dekić P., Milutinović B., Tomić M.,** *Application of polyurethane waste in virgin rubber blends*,. Banja Luka, BiH, 13. International conference on accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology (DEMI2017). 2017, стр. 749-755.
- [45] **Goodyear, C.,** U.S. Patent 3 633, 1844.



- [46] **Morin, Jeremy E., Farris, Richard J.**, *Recycling of 100% cross-linked rubber powder by hightemperature*, ANTEC 2001, Dallas, 2001.
- [47] **Hershafft, A.A.**, *Enviroment science Tehnology*, 1972.
- [48] **Swor, R. A., Jensen L. W. , Budzol M.**, *Ultrafine Recycled Rubber*, Rubber Chemistry and Technology, 1980, стр. 1215-1225.
- [49] **Fujimoto, K., Nishi, T., and Okamoto, T.**, *Studies on structure and physical properties of vulcanizates containing comminuted vulcanizates. VI. Influence of the type of crosslinks on the physical properties of the composites*, Nippon Gomu Kyokaish, 1981, стр. 310.
- [50] **Burford, R.P., and Pittolo M.**, *Characterizacion and performance of powde rubber*, Rubber Chemical Tehnology, 1982, стр. 1233.
- [51] **Burford., R.P., Pittolo. M.**, *The mechanical properties of rubber*, Journal of materials science, 1984, стр. 3059-3067.
- [52] **Negmatov, S.S., Umarova, M.A., Kh. Matkarimov, S., Kh. Nazirbekov, R., Kobelev, I.A.**, *Feasibility of using ground wastes of mechanical rubber goods in compositions of vulcanizates*, Uzbekskii Khimicheskii Zhurnal, 1986, стр. 59.
- [53] **Phadke, A.A., Bhowmick, A.K., De, S.K.**, *Effect of cryoground rubber on properties*, Journal of Applied Polymer Science, 1986, стр. 4063-4074.
- [54] **Fesus, E.**, *Scrap Rubber: A Compounding Tool*, ACS.Rubber Divn.Spring meeting, Chicago, Illinois, 1994.
- [55] **Nah, C., Cho, S., Lee, K.J., Jeon, D.J., Cho, C.T., and Kaang, S.**, *Mechanical properties of rubber compounds containing polynorbonene vulcanizate powde*. Pollimo, Korean, 1996, стр. 547.
- [56] **Kluppel M., Kuhrcke A., Schuster R.H.**, *Recycling of scrap rubber in technical el astomers*, Kautsch Gummi, 1997, стр. 373-379.
- [57] **Baranwal, K. and Rogers, J.W.**, *Catalytic regeneration of rubber: Part 1 — Polychloroprene*, The 154th ACS Rubber Division Meeting Nashville, TN, USA, 1998..
- [58] **Klingensmith, W. and Baranwal, K.**, *An overview: Recycling of rubber*, Rubber World, 6p.17, 1998.
- [59] **Kim, Jin Kuk.**, *Fracture Behavior of Crumb Rubber-Filled Elastomers*, Journal of Applied Polymer Science, 1999, стр. 3137-3144.
- [60] **Naskar, A.K., Pramanik, P.K., Mukhopadhyay, R., De, S.K., and Bhowmick,** *Characterization of ground rubber tire and its effect on natural rubber compound.*, Rubber Chemical Technolgy, 2000, стр. 902.





- [61] **Jacob, P.C., De P., K., Bhowmick A., K., De S.,** *Recycling of epdm waste. i. effect of ground epdm*, Journal of Applied Polymer Science, бр. 83, 2001, стр. 3293–3303.
- [62] **Jacob, P.C., Bhowmick A.K., De P.P., De, S.K.,** *Utilization of powdered EPDM scrap in EPDM compound*, Rubber Chemical Technology, 2003, стр. 76.
- [63] **Jacob, P.C., De, P.P., De, S.K.,** *Utilization of powdered natural rubber vulcanizate as a filler*, Rubber World, 2002, стр. 227.
- [64] **Sadhan, K.De., Avraam I.I., Mlementina K.,** *Rubber recycling*, Taylor & Francis Group, 2005.
- [65] **Ghosh, A., Rajeev, R.S., Bhattacharya, A.K., Bhowmick, A.K., De, S.K.,** *Recycling of silicone rubber waste: effect of ground silicone rubber vulcanizate powder on the properties of silicone rubber compound..* Polymer Engineering & Science, 2003, стр. 43.
- [66] **Ismail, H., Nordin, R., Noor, A. M.,** *The comparison properties of recycle rubber powder, carbon black, and calcium carbonate filled natural rubber compounds.* Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2002, стр. 847-862.
- [67] **Ismail, H., Nordin, R., & Noor, A. M.,** *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2002, стр. 847-862.
- [68] **Ismail, H., Nordin, R., Noor, A. M.,** *The effects of recycle rubber powder (RRP) content and various vulcanization systems on curing characteristics and mechanical properties of natural rubber/RRP blends.* Iranian Polymer Journal, 2003, стр. 373-380.
- [69] **Ismail, H., Omar, N. F., Othman, N.,** *Effect of carbon black loading on curing characteristics and mechanical properties of waste tyre dust/carbon black hybrid filler filled natural rubber compounds.* Journal of Applied Polymer Science, 2011, стр. 1143-1150.
- [70] **Han, S. C., & Han, M. H.,** *Fracture behavior of NR and SBR vulcanizates filled with ground rubber having uniform particle size*, Journal of Applied Polymer Science, 2002, стр. 2491-2500.
- [71] **Li, S., Lamminmäki, J., Hanhi, K.,** *Effect of ground rubber powder on properties of natural rubber*, In Macromolecular Symposia, 2004, стр. 209-216.
- [72] **Ravichandran, K., Natchimuthu, N.,** *Vulcanization characteristics and mechanical properties of natural rubber–scrap rubber compositions filled with leather particles*, Polymer internationa, 2005, стр. 553-559.
- [73] **Kim, S. W., Park, H. Y., Lim, J. C., Jeon, I. R., Seo, K. H.,** *Cure characteristics and physical properties of ground-rubber-filled natural rubber vulcanizates: Effects of the curing systems of the ground rubber and rubber matrix*, Journal of applied polymer science, 2007, стр. 2396-2406.



- [74] **Baeta, D. A., Zattera, J. A., Oliveira, M. G., Oliveira, P. J.,** *The use of styrene-butadiene rubber waste as a potential filler in nitrile rubber: order of addition and size of waste particles.* Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2009, стр. 23-31.
- [75] **Zulkepli, N. N., Ismail, H., Rashid, A.,** *Effects of different particle sizes of recycled acrylonitrile-butadiene rubber and its blend ratios on mechanical and morphological properties and curing characteristics of SBR/NBR blends.* Iran Polymep Journal, 2009, стр. 139-148.
- [76] **Đekić, P. S., Radenković, G. M.,** *The influence of the share of recycled tire on the rubber mixture properties.* Hemijska industrija, 2010, стр. 247-252.
- [77] **Đekić, P. S., Temeljkovski, D. I., Rancic, B., & Nusev, S.,** *Application of recycled rubber powder (RRP) in NR/SBR compounds,* Journal of scientific and industrial research, 2012, стр. 295-298.
- [78] **Formela, K., Haponiuk, J. T.,** *Curing characteristics, mechanical properties and morphology of butyl rubber filled with ground tire rubber (GTR).* Iranian Polymer Journal, 2014, стр. 185-194.
- [79] **Dierkes, W.,** *Surface activated rubber crumb: A new development in rubber recycling,* Journal of Elastomers & Plastics, 1996, стр. 257-278.
- [80] **Smith, F. G., Daniels, E. J., Teotia, A. P. S.,** *Testing and evaluating commercial applications of new surface-treated rubber technology utilizing waste tires.* Resources, conservation and recycling, 1995, стр. 133-144.
- [81] **Kim, J. K. Burford, R. P.,** *Study on powder utilization of waste tires as a filler in rubber compounding.* Rubber chemistry and technology, 1998, стр. 1028-1041.
- [82] **Amash, A., Giese U., Schuster R. H.,** *Interphase grafting of reclaimed rubber powder.* Kautschuk Gummi Kunststoffe, 2002, стр. 218-218.
- [83] **Ismail, H., Nordin, R.,** *Effect of epoxidized natural rubber (ENR) and ethylene-co-acrylic acid copolymer on properties of silica-filled natural rubber/recycle rubber powder blends,* Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2004, стр. 285-300.
- [84] **Yehia, A. A., Mull, M. A., Ismail, M. N., Hefny, Y. A., Abdel-Bary, E. M.,** *Effect of chemically modified waste rubber powder as a filler in natural rubber vulcanizates,* Journal of applied polymer science, 2004, стр. 30-36.
- [85] **Du, M., Guo, B., Jia, D.,** *Effects of thermal and UV-induced grafting of bismaleimide on mechanical performance of reclaimed rubber/natural rubber blends.* Journal of Polymer Research, 2005, стр. 473-482.



- [86] **Noriman, N. Z., Ismail, H., Ratnam, C. T., Rashid, A. A.,** *The effect of electron beam (EB) irradiation in presence of TMPTA on cure characteristics and mechanical properties of styrene butadiene rubber/recycled acrylonitrile-butadiene rubber (SBR/NBRr) blends.* Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2010, стр. 228-236.
- [87] **Li, Y., Zhao, S., & Wang, Y.,** *Microbial desulfurization of ground tire rubber by Thiobacillus ferrooxidans.* Polymer Degradation and Stability, 2011, стр. 1662-1668.
- [88] **SRPS ISO 4632:1997.** *Guma, vulkanizovana - Klasifikacioni sistem,* Institut za standardizaciju Srbije, 1997.
- [89] **ASTM D5603, 96,** *Standard Classification for Rubber Compounding Materials—Recycled Vulcanizate Particulate Rubber,* ASTM International, West Conshohocken, USA, 1996.
- [90] **Sichina, W.J.** *Characterization of Polymers Using TGA.* PerkinElmer Instruments, Waltham, USA, 2015.
- [91] **Forrest, M. J.** *Rubber Analysis: Polymers, Compounds and Products,* Smithers Rapra Publishing, 2001.
- [92] **De, P.P, Choudhury, N.R., Dutta, N. K.,** *Thermal Analysis of Rubbers and Rubbery Materials,* Smithers Rapra Technology Ltd, Shropshire, UK, 2010.
- [93] **ASTM D 6370-99.** *Standard Test Method for Rubber-Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA),* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [94] **ISO9277.** *Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.
- [95] **SRPS G.C1.072.** *Kaučuk - Prirodni kaučuk (NR) - Ispitna receptura za ocenu vulkanizacionih karakteristika,* Institut za standardizaciju Srbije, 1984.
- [96] **SRPS G.C1.072, 1984.** *Kaučuk - Prirodni kaučuk (NR) - Ispitna receptura za ocenu vulkanizacionih karakteristika,* Institut za standardizaciju Srbije, 1984.
- [97] **SRPS G.S2.118, 1984.** *Guma, smese - Merenje vulkanizacionih osobina pomoću vulkametra sa oscilirajucim diskom,* Institut za standardizaciju Srbije, 1984.
- [98] **SRPS.G.S2.125.** *Određivanje tvrdoće metodom utiskivanja igle (tvrdoća po šoru A i D),* Institut za standardizaciju Srbije, 1986.
- [99] **Matador rubber,** *Test methods of rubber materials and products,* Matador rubber SW.R.O, Dolne Kočkovce, Slovak Republic, 2007.
- [100] **Brown, Roger.** *Physical testing of rubber,* Springer, . New York, 2009.
- [101] **SRPS.G.S2.127.** *Određivanje zateznih svojstava gume,* Institut za standardizaciju Srbije, 1985.
- [102] **SRPS.G.S2.735.** *Određivanje otpora prema cepanju gume,* Institut za standardizaciju Srbije, 1986.



- [103] **SRPS.G.S2.130.***Одређивање трајне деформације сабијањем на одређену висину - Физикална испитивања гуме.* Институт за стандардизацију Србије, 1984.
- [104] **SRPS G.S2.301.***Испитивање отпорност према хабању вулканизоване природне или синтетичке гуме - Метода поŠоперу (Schopper),* Институт за стандардизацију Србије, 1964.
- [105] **ISO 37.***Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties,* ISO, 2005.
- [106] **SRPS G.S2. 131.***Одређивање одбојне еластичности - Физикална испитивања гуме,* Институт за стандардизацију Србије, 1986.
- [107] **ASTM D945-92.,** *Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression or Shear (Mechanical Oscillograph),* ASTM International, 1992.
- [108] **SRPS G.S2.126, 1986.***Гума - Испитивање вештачким старењем,* Институт за стандардизацију Србије, 1986.
- [109] **SRPS.G.S2.126:1970,** *Физикална испитивања гуме - Вештачко старење гуме,* Институт за стандардизацију Србије, 1970.
- [110] **ISO 812, 2011.***Гума добијена вулканизацијом или термoplastична гума — Одређивање кртости на ниској температури,* Институт за стандардизацију Србије, 2011.
- [111] **Van de Ven, P. M., & Noordermeer, J. W. M.,** *Mould Fouling of EPDM Rubber Compounds.* KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, 2003, стр. 172-183.
- [112] **Heideman, Geert.***Reduced zinc oxide levels in sulphur vulcanisation of rubber compounds.* Докторска дисертација, University of Twente, 2004.
- [113] **Guzmán, M., Agulló, N., Giese, U., Borrós, S.,***Exploring tire crumb as activator for sulfur vulcanization,* Journal of Applied Polymer Science, 2013, стр. 2809-2820.



## 9 ПОПИС СЛИКА

Сл. 2.1 Полимеризација полиетилена .....	15
Сл. 2.2 Полимеризација винил-хлорида .....	16
Сл. 2.3 Начини иницирања реакције при адисионој полимеризацији .....	16
Сл. 2.4 Полимеризација полиуретана .....	17
Сл. 2.5 Изглед различитих кополимерних ланаца .....	17
Сл. 2.6 Структурална формула <i>cis</i> и <i>trans</i> NR каучука.....	19
Сл. 2.7 Агрегат који граде честице чађи.....	30
Сл. 2.8 Ниско и високоструктурални агрегати.....	30
Сл. 2.9 Појавни облици агрегата чађи.....	33
Сл. 2.10 Примарна честица, агрегат и агломерат чађи.....	33
Сл. 2.11 Утицај удела чађи на својства смеша и гуме.....	34
Сл. 2.12 Примарна честица, агрегат и агломерат SiO <sub>2</sub> .....	35
Сл. 2.13 Утицај удела немодификованог рециклираног гуменог праха на својства смеша и гуме .....	37
Сл. 2.14 Поступак вулканизације сумпором .....	40
Сл. 2.15 Типови веза код сумпорног умрежавања NR каучука .....	41
Сл. 2.16 Процес пероксидне вулканизације .....	42
Сл. 2.17 Попречни пресек ауто-гуме.....	43
Сл. 2.18 Попречник пресек транспортних трака са текстилним умецима и челичним сајлама ..	45
Сл. 2.19 Попречни пресек гуменог црева .....	47
Сл. 2.20 Подела третмана рециклаже отпадне гуме .....	49
Сл. 2.21 Шема процеса уситњавања отпадне гуме амбијенталним поступком и изглед честице .....	50



Сл. 2.22 Шема процеса уситњавања отпадне гуме криогеним поступком.....	52
Сл. 2.23 Изглед честице добијен различитим поступцима уситњавања: а) амбијенталним; б) криогеним; в) мокрим.....	53
Сл. 4.1 Шема експерименталног истраживања Одређивање својстава честица.....	65
Сл. 4.2 Уређај за термогравиметријску анализу .....	68
Сл. 4.3 Уређај за одређивање специфичне површине честице .....	69
Сл. 4.4 Двоваљак за умешавање смеша .....	72
Сл. 4.5 Преса за вулканизацију узорака.....	78
Сл. 4.6 Изглед уређаја <i>Monsanto</i> реометар а) и узорака за испитивање б).....	79
Сл. 4.7 Типична крива вулканизације .....	79
Сл. 4.8 Тврдомер Тип А.....	81
Сл. 4.9 Звонаста епрувета.....	83
Сл. 4.10 Изглед епрувета и резног алата (а) и изглед мерног места за испитивање затезних својстава (б).....	83
Сл. 4.11 Епрувета (тип А) за испитивање отпора према цепању гуме .....	84
Сл. 4.12 Изглед резног алата са епруветом тип А (а) и мерног места за испитивање (б), .....	85
Сл. 4.13 Уређај за испитивање сабијањем.....	86
Сл. 4.14 Уређај за сабијање(а) и епрувете за испитивање(б).....	86
Сл. 4.15 Уређај за испитивање хабањем (а) са епруветом (б).....	87
Сл. 4.16 Уређај за истезање епрувета.....	88
Сл. 4.17 Shob-ово клатно.....	90
Сл. 4.18 Yerzley механички осцилограф а) и мерно место са епруветом б).....	91
Сл. 4.19 Крива мерења са карактеристичним тачкама .....	91
Сл. 4.20 Шема уређаја за проверу кртости .....	94
Сл. 4.21 Електронски микроскоп (а) напарени узорци (б).....	95
Сл. 4.22 Узорци припремљени и напарени за испитивање на електронском микроскопу .....	95



Сл. 5.1 Изглед РГП снимљеног на микроскопу .....	96
Сл. 5.2 Изглед и површина честице РГП.....	97
Сл. 5.3 ТГА гуменог узорка .....	98
Сл. 5.4 Изглед микроструктуре честице у зависности од момента модификације: а) пре почетка модификације, б) у 5-ом минути, в) у 10-ом минути, г) у 15-ом минути.....	123
Сл. 5.5 Изглед узорка гуме А.....	124
Сл. 5.6 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 10 phr: а) НМГП, б) МГП.....	124
Сл. 5.7 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 5 phr: а) НМГП, б) МГП.....	125
Сл. 5.8 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 10 phr: а) НМГП, б) МГП.....	125
Сл. 5.9 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 20 phr: а) НМГП, б) МГП.....	125
Сл. 5.10 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 30 phr: а) НМГП, б) МГП.....	126
Сл. 5.11 Изглед микроструктуре узорка од NR-гуме са 50 phr: а) НМГП, б) МГП.....	126
Сл. 5.12 Изглед узорка гуме А1 .....	127
Сл. 5.13 Изглед микроструктуре узорка од NR/SBR-гуме са 20 phr: а) НМГП, б) МГП.....	127
Сл. 5.14 Изглед микроструктуре узорка од NR/SBR-гуме са 30 phr: а) НМГП, б) МГП.....	127
Сл. 6.1 Изглед поломљене честице и промене структуре честице МГП1 .....	130
Сл. 6.2 Тврдоће узорака од NR-гуме.....	131
Сл. 6.3 Тврдоће узорака од NR/SBR-гуме .....	132
Сл. 6.4 Шематски приказ микроструктуре гуме са НМГП и МГП .....	133
Сл. 6.5 Затезне чврстоће узорака од NR-гуме .....	134
Сл. 6.6 Затезне чврстоће узорака од NR/SBR-гуме .....	135
Сл. 6.7 Прекидна издужења узорака од NR-гуме .....	135
Сл. 6.8 Прекидна издужења узорака од NR/SBR-гуме боја.....	136
Сл. 6.9 Модули при издужењу 100% узорака од NR-гуме.....	136
Сл. 6.10 Модули при издужењу 100% узорака од NR/SBR-гуме.....	137
Сл. 6.11 Утицај НМГП и МГП на структуру гуме.....	138



Сл. 6.12 Дијаграм промене отпора према цепању узорака од NR-гуме.....	139
Сл. 6.13 Дијаграм промене отпора према цепању узорака од NR/SBR-гуме.....	139
Сл. 6.14 Шематски приказ цепања гуме .....	140
Сл. 6.15 Трајне деформације сабијањем на одређену висину узорака од NR-гуме.....	141
Сл. 6.16 Трајне деформације сабијањем на одређену висину узорака од NR/SBR-гуме .....	141
Сл. 6.17 Отпорности према хабању узорака од NR-гуме.....	143
Сл. 6.18 Отпорности према хабању узорака од NR/SBR-гуме .....	143
Сл. 6.19 Трајне деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине узорака од NR-гуме.....	145
Сл. 6.20 Трајне деформација при константном издужењу за 100% мерне дужине узорака од NR/SBR-гуме .....	145
Сл. 6.21 Дијаграм промене одбојне елстичности узорака од NR-гуме.....	147
Сл. 6.22 Дијаграм промене одбојне елстичности узорака од NR/SBR-гуме .....	148
Сл. 6.23 Дијаграм промене еластичности по Yertzley узорака од NR-гуме .....	149
Сл. 6.24 Дијаграм промене еластичност по Yertzley узорака од NR/SBR-гуме.....	149
Сл. 6.25 Хистерезиси по Yertzley узорака од NR-гуме.....	150
Сл. 6.26 Хистерезис по Yertzley узорака од NR/SBR-гуме .....	151
Сл. 6.27 Ефективног динамичког модула узорака од NR-гуме .....	152
Сл. 6.28 Ефективног динамичког модула узорака од NR/SBR-гуме.....	152
Сл. 6.29 Апсорбоване енергије удара узорака од NR-гуме.....	154
Сл. 6.30 Апсорбоване енергије удара узорака од NR/SBR-гуме .....	154
Сл. 6.31 Изглед површине узорка NR-гуме (а) и NR/SBR- гуме(б) без РГП .....	156
Сл. 6.32 Раслојавање епрувете са 50 phr НМГП .....	156
Сл. 6.33 Агломера НМГП у при уделу од 3 phr у NR-гуми .....	157
Сл. 6.34 Изглед микроструктуре узорка са 30 phr МГП.....	157
Сл. 6.35 Синтетичко влакно у гуми.....	158





---

Сл. 6.36 Агломерат чађи (а) и сумпора (б) стрелице .....	159
Сл. 6.37 Пенаста структура услед заробљеног ваздуха.....	159
Сл. 6.38 Страна тела у гуми: део тканине (а) и длака (б) .....	160
Сл. 6.39 Присуство ZnS у гуми.....	160



## 10 ПОПИС ТАБЕЛА

Табела 2.1 Списак мономера који се користе приликом синтезе каучука .....	15
Табела 2.2 Хемијски састав свежег латекса .....	20
Табела 2.3. Стандарди за класификацију каучука зависно од земаља порекла .....	21
Табела 2.4 Техничке карактеристике каучука према ISO 2000 .....	22
Табела 2.5 Подела пунила према ојачавајућем дејству .....	29
Табела 2.6 Подела типова чађи према ASTM D-1765 стандарду .....	32
Табела 2.7 Подела убрзивача према хемијском саставу.....	38
Табела 2.8 Подела убрзивача према функционалности .....	38
Табела 2.9 Јачина везе при сумпорној вулканизацији.....	39
Табела 2.10 Рецептуре протекторских смеша теретне ауто-гуме.....	44
Табела 2.11 Рецептуре смеша за израду бочница и адхезионог слојатеретне ауто-гуме.....	44
Табела 2.12 Рецептуре радне облоге и атхезивне смеше .....	46
Табела 2.13 Облога за цев отпорна на абразију .....	47
Табела 2.14 Примена продуката рециклаже отпадне гуме уситњавањем .....	53
Табела 4.1 Рецептуре смеша при различитим режимима умешавања .....	71
Табела 4.2 Рецептуре смеша са различитим уделом НМГП.....	73
Табела 4.3 Рецептуре NR/SBRсмеше са различитим уделом НМГП .....	74
Табела 4.4 Рецептуре смеша са различитим типовима МГП.....	75
Табела 4.5 Рецептуре смеша са 30 phr за различите врсте модификације.....	76
Табела 4.6 Рецептуре смеша са различитим уделом МГП1 .....	76
Табела 4.7 Рецептуре NR/SBRсмеше са различитим уделом МГП .....	77
Табела 4.8 Параметри вулканизације узорак.....	78



Табела 4.9 Димензије резног алата.....	82
Табела 5.1 Хемијски састав РГП .....	97
Табела 5.2 Реолошка својства NR-гуме при температуру до 155 °C .....	98
Табела 5.3 Реолошка својства NR-гуме при температуру до 176 °C .....	99
Табела 5.4 Реолошка својства NR/SBR-гуме при температуридо 155 °C.....	100
Табела 5.5 Реолошка својства NR/SBR-гуме при температуру до 176 °C.....	100
Табела 5.6 Тврдоћа гумених за различите режиме умешавања.....	101
Табела 5.7 Затезна чврстоћа узорака за различите режиме умешавања .....	101
Табела 5.8 Отпор према цепању узорака за различите режиме умешавање .....	102
Табела 5.9 Тврдоћа гумених за различите типове модификације .....	102
Табела 5.10 Затезна чврстоћа узорака за различите типове модификације .....	103
Табела 5.11 Прекидно издужење узорака за различите типове модификације.....	103
Табела 5.12 Отпор према цепању узорака за различите типове модификације.....	104
Табела 5.13 Трајна деформација сабијањем узорака за различите типове модификације.....	104
Табела 5.14 Хабање узорака од NR-гуме.....	105
Табела 5.15 Твродћа гумених узорака од NR-гуме.....	105
Табела 5.16 Тврдоћа гумених узорака од NR/SBR-гуме .....	106
Табела 5.17 Затезна чврстоћа узорака од NR-гуме .....	106
Табела 5.18 Затезна чврстоћа узорака од NR/SBR -гуме .....	107
Табела 5.19 Прекидно издужење узорака од NR-гуме .....	107
Табела 5.20 Прекидно издужење узорака од NR/SBR -гуме .....	108
Табела 5.21 Модула при издужењу од 100% мерног дела епрувете од NR-гуме .....	108
Табела 5.22 Модула при издужењу од 100% мерног дела епрувете од NR/SBR -гуме.....	109
Табела 5.23 Отпор према цепању узорака од NR-гуме .....	109
Табела 5.24 Отпор према цепању узорака од NR/SBR -гуме.....	110
Табела 5.25 Трајна деформација сабијањем код NR-гуме .....	110
Табела 5.26 Трајна деформација сабијањем код NR/SBR-гуме.....	111



Табела 5.27 Хабање узорака од NR-гуме.....	111
Табела 5.28 Хабање узорака од NR/SBR -гуме .....	112
Табела 5.29 Трајна деформација истезањем узорака од NR-гуме .....	112
Табела 5.30 Трајна деформација истезањем узорака од NR/SBR -гуме .....	113
Табела 5.31 Промена статичких својстава NR-гуме после вештачког старења.....	113
Табела 5.32 Промена статичких својстава NR/SBR-гуме после вештачког старења .....	114
Табела. 5.33 Одбојна еластичност узорака од NR-гуме .....	114
Табела 5.34 Еластичност по Yertzley узорака за различите типове модификације .....	115
Табела 5.35 Хистерезис по Yertzley узорака за различите типове модификације .....	115
Табела 5.36 Ефективни динамички модул узорака за различите типове модификације .....	116
Табела 5.37 Апсорбоване енергије удара узорака за различите типове модификације .....	116
Табела. 5.38 Одбојна еластичност узорака од NR-гуме .....	117
Табела 5.39 Одбојна еластичност узорака од NR/SBR -гуме .....	117
Табела 5.40 Еластичност по Yertzley узорака од NR-гуме.....	118
Табела 5.41 Еластичност по Yertzley узорака од NR/SBR-гуме .....	118
Табела 5.42 Хистерезис по Yertzley узорака од NR-гуме.....	119
Табела 5.43 Хистерезис по Yertzley узорака од NR/SBR-гуме .....	119
Табела 5.44 Ефективни динамички модул узорака од NR-гуме.....	120
Табела 5.45 Ефективни динамички модул узорака од NR/SBR-гуме .....	120
Табела 5.46 Апсорбоване енергије удара узорака од NR-гуме.....	121
Табела 5.47 Апсорбоване енергије удара узорака од NR/SBR-гуме .....	121
Табела 5.48 Промена динамичких својстава NR-гуме после вештачког старења .....	122
Табела 5.49 Промена динамичких својстава NR/SBR-гуме после вештачког старења.....	122



## 11 БИОГРАФИЈА АУТОРА

Петар С. Ђекић је рођен 20.04.1979. године у Нишу. Основну школу и гимназију Бора Станковић природно-математичког смера завршио је у родном граду. Основне студије на Машинском факултету Универзитета у Нишу, производног смера, завршио је школске 2008. године. Дипломирао на Машинском факултету у Нишу са просечном оценом 9,25, а дипломски рад под називом *Испитивање гуменог заптивача за клип кочионог цилиндра вагона* одбранио са оценом 10. Своје даље усавршавање наставио је уписом на докторске студије 2008. године на Машинском факултету Универзитета у Нишу на смеру производно-информационе технологије и менаџмент. Учествовао је на пројекту размене студената, у оквиру кога је неколико месеци провео у фирми *Mollex* у Кошицама, Словачка, на пројекту *ISO quality controlling processes and improving plastic parts production*. Као даљу надоградњу свог знања из области полимерних материјала учествовао је у активностима на пројекту Министарства науке и технологије под називом *TP 14007 Истраживање и унапређење примарног огибљења електричних локомотива за отежане услове*. У оквиру пројекта учествовао је у лабораторијским испитивањима гумено-металних елемената у три правца и изводио испитивања епрувета напрегнутих на притисак и смицање на *Yerzley*-евом клатну. Као истраживач-сарадник Машинског факултета Универзитета у Нишу учествовао је на два пројекта Министарства науке и технологије под називом *ИИИ 41017 Виртуелни коштане зглобни систем човека и његова примена у претклиничкој и клиничкој пракси* и *TP 35034 Истраживање примене савремених неконвенционалних технологија у производним предузећима са циљем повећања ефикасности коришћења, квалитета производа, смањења трошкова и уштеде енергије и материјала*. Учествовао је у међународном пројекту 158781 – *TEMPUS-RS-TEMPUS-JPHES -Occupational safety and health - degree curricula and lifelong learning* и *TEMPUS IPROD 530577 Improvement of Product Development Studies in Serbia And Bosnia and Herzegovina*. Тренутно учествује на међународном пројекту пројекту *EPACMUC + 561821-EPP-1-2015-1-RS-EPPKA2-SBHE-JP Waste management curricula development in partnership with public and private sector*. Од 2011. године ради као сарадник у настави на Високој техничкој школи струковних студија у Нишу. Аутор је великог броја научних и стручних радова.

## Изјава 1.

### ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

**„Анализа утицаја рециклираног гуменог праха на својства и структуру гумених смеша“**

која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, \_\_\_\_\_

Потпис аутора дисертације:



\_\_\_\_\_ **Ђекић Петар**

## Изјава 2.

### ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов дисертације:

**„Анализа утицаја рециклираног гуменог праха на својства и структуру  
гумених смеша“**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, \_\_\_\_\_

Потпис аутора дисертације:



\_\_\_\_\_

Ђекић Петар

### Изјава 3:

#### ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

**„Анализа утицаја рециклираног гуменог праха на својства и структуру гумених смеша“**

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство **(CC BY)**
2. Ауторство – некомерцијално **(CC BY-NC)**
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде **(CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**
5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**
6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)**<sup>4</sup>

У Нишу, \_\_\_\_\_

Потпис аутора дисертације:



\_\_\_\_\_

Ђекић Петар

---

<sup>4</sup> Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.



## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног  
 родитеља и име                      Ђекић, Стојадин, Петар  
 Датум и место рођења                20.04.1979. год., Ниш

#### Основне студије

Универзитет  
 Факултет  
 Студијски програм  
 Звање  
 Година уписа  
 Година завршетка  
 Просечна оцена

#### Магистарске студије

Универзитет    Универзитет у Нишу  
 Факултет    Машински факултет  
 Студијски програм    Производни смер  
 Звање    дипломирани машински инжењер-магистар  
 Година уписа    1998  
 Година завршетка    2008  
 Просечна оцена    9,25

Научна област    Производно машинство  
 Наслов завршног рада    Испитивање гуменог заптивача за клип кочионог цилиндра

#### Докторске студије

Универзитет    Универзитет у Нишу  
 Факултет    Машински факултет у Нишу  
 Студијски програм    Производно-информационе технологије и индустријски менаџмент  
 Година уписа    2008/2009  
 Остварен број ЕСПБ бодова    90  
 Просечна оцена    9,56

### НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације                      Анализа утицаја рециклираног гуменог праха на својства и структуру гумених смеша  
 Име и презиме ментора, звање                      др Горан Раденковић, ван. проф.  
 Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације                      НСВ број 8/20-01-003/16-035 у Нишу, 18.04.2016. године

### ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна    183  
 Број поглавља    8  
 Број слика (шема, графикона)                      98  
 Број табела    72  
 Број прилога    0

**МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ**

Примљено: 24.08.2017			
Орг. јед.	Број	Прилог	Вредности
	612-394/2017		

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА  
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

P. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
	<b>P. Đekić, G. Radenković, B. Milutinović, G. Stefanović, <i>Environmental, economic and technical assessment of rubber blends with recycled rubber</i>, Safety Engineering, 2017, vol. 7 br. 1, прихваћен за објављивање.</b>	
1	Представљена је анализа различитих гумених смеша (са различитим уделом рециклираног гуменог праха) са економског, техничког и аспекта животне средине. За анализу је коришћено четири критеријума: потрошња природних ресурса, механичка својства гуме, сложеност система за производњу и цена гумене смеше.	M53
2	<b>P. Djekić, G. Radenković, B. Milutinović, <i>Improvement of the properties of ground tire rubber by mechanochemical modification and application in SRB/NR blends</i>, 12. International conference on accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology (DEMI2015), ISBN 978-99928-29-53-8, Banja Luka, 2015, pp. 119-125</b> Рад анализира утицај механичко-хемијске модификације површине честице рециклираног гуменог праха на механичке особине гумене смеше. Анализиране су две врсте гумених смеша које су пуњене модификованим гуменим прахом. Испитивана су различита својства гумених смеша: модул еластичности, затезна чврстоћа, отпорност према угаоном цепању, хабање итд.	M33
3	<b>I. Pavlović, I. Ćirić, P. Djekić, V. Nikolić, R. Pavlović, Ž. Čojbasić, G. Radenković, <i>Rheological model optimization using advanced evolutionary computation for the analysis of the influence of recycled rubber on rubber blend dynamical behaviour</i>, Meccanica, 2013, vol. 48 br. 10, str. 2467-2477.</b> У раду је приказана употреба генеских алгоритама за предикцију реолошког модела гумене смеше у коју је додат рециклирани гумени прах. Помоћу Војтовог, Макселовог модела опасина су динамичка својства гуме.	M21
4	<b>P. Djekić, D. Temeljovski, B. Rančić, S. Nusev, <i>Application of recycled rubber powder (RRP) in NR/SBR compounds</i>, Journal of scientific &amp; industrial research, 2012, vol. 71 br. 4, str. 295-298.</b> Рад представља анализу процеса рециклаже гума за производњу гуменог праха и анализу његовог коришћења у NR/SBR смешама као замена за црна пуњења (чађ). Такође су представљени резултати испитивања особина различитих смеша у циљу налажења најбољег односа чађи и гуменог праха.	M23
5	<b>P. Djekić, G. Radenković, <i>The Influence of the Share of Recycled Tire on the Rubber Mixture Properties</i>, Hemijska industrija, 2010, vol. 64 br. 3, str. 247-252.</b> У раду су представљени резултати испитивања утицаја удела рециклиране гуме на статичка (тврдоћа, хабање, одбојна еластичност, трајна деформација истезањем, трајна деформација сабијањем) и динамичка (динамички модул еластичности, пригушење, хистерезис, степен еластичности по Јерзлеу) својства смеше. Истраживањем је одређен утицај удела рециклиране гуме на статичка и динамичка својства смеше.	M23

**НАПОМЕНА:** уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

**ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА

Кандидат Петар Ђекић поднео је 26.02.2016 године (број 612-163/2016) Захтев за одобравање теме докторске дисертације под називом „Анализа утицаја рециклираног гуменог праха на својства и структуру гумених смеша“. Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу на седници одржаној 29.03.2016. године Одлуком број 612-230-3/2016 предложило је Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу др Горан Раденковић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Гордана Стефановић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Иванка Поповић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду, др Душан Стаменковић, редовни професор Машинског факултета у Нишу и др Милан Банић, доцент Машинског факултета у Нишу. Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу на седници одржаној 18.04.2016. године Одлуком број 8/20-01-003/16-035 именовало је Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу др Горан Раденковић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Гордана Стефановић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Иванка Поповић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду, др Душан Стаменковић, редовни професор Машинског факултета у Нишу и др Милан Банић, доцент Машинског факултета у Нишу.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници од 08.06.2016. године на основу Извештаја Комисије о научној заснованости теме докторске дисертације (број 612-379/16) под називом „Анализа утицаја рециклираног гуменог праха на својства и структуру гумених смеша“ Одлуком број 612-359-7/2016, усвојило тему докторске дисертације и предложило др Горана Раденковића, ванредног

професора Машинског факултета у Нишу за ментора. Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу на седници од 04.07.2016. године Одлуком број 8/20-01-005/16-019 дало је сагласност на Одлуку о усвајању теме докторске дисертације и на истој седници Одлуком број 8/20-01-005/16-019, именовало је др Горана Раденковића, ванредног професора Машинског факултета у Нишу за ментора за израду докторске дисертације.

Кандидат Петар Ђекић поднео је 20.06.2017. године Захтев за формирање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације (број 612-80-182/2017). Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу на седници одржаној 21.06.2017. године Одлуком број 612-327-9/2017 предложило је Комисије за оцену и одбрану дисертације у саставу др Горан Раденковић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Гордана Стефановић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Иванка Поповић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду, др Душан Стаменковић, редовни професор Машинског факултета у Нишу и др Милан Банић, доцент Машинског факултета у Нишу. Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу на седници од 04.07.2017. године Одлуком број 8/20-01-005/17-030 именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу др Горан Раденковић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Гордана Стефановић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Иванка Поповић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду, др Душан Стаменковић, редовни професор Машинског факултета у Нишу и др Милан Банић, доцент Машинског факултета у Нишу.

Кандидат Петар Ђекић је првопотписани аутор два рада објављена у часопису са SCI листе и коаутор пет радова објављених у часописима са SCI листе, из уже области којој припада тема докторске дисертације. Такође је и првопотписани аутор рада објављеног у часопису који издаје факултет Универзитета у Нишу из уже области којој припада тема докторске дисертације.

На основу претходно наведеног, кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Машинског факултета Универзитета у Нишу.

### **ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Кратак опис појединих делова дисертације (*до 500 речи*)

Докторска дисертација се састоји из 7 поглавља и одговарајућих прилога: коришћене литературе, пописа слика и табела, прилога, као и кратке биографије аутора. По форми и садржају рад у потпуности испуњава стандарде за докторску дисертацију. Наслови поглавља у докторској дисертацији су следећи:

- 1) Увод
- 2) Гума као технички материјал
- 3) Преглед досадашњих истраживања
- 4) Експериментално истраживање,
- 5) Резултати експерименталног истраживања и
- 6) Анализа експерименталних резултата
- 7) Закључак

Истраживања у оквиру докторске дисертације обухватају следеће:

У *Првом поглављу* дат је увод у проблематику отпадне гуме и начинима решавања и дефинисани су циљеви истраживања.

Поред уводног поглавља, овај рад се састоји из две целине које су подељене у поглавља.

У поглављу *Гума као технички материјал* описане су основне карактеристике полимерних материјала, представљена су основна својства гуме и дат је преглед и карактеристике најчешће коришћених врста каучука и ингредијената, као и њихова улога у утицају на својства гуме, а посебно ингредијената који су коришћени у смешама развијеним за потребе овог истраживања.

У трећем поглављу приказан је преглед досадашњих истраживања примене РГП у гуми. Преглед истраживања је подељен на групу истраживања која су испитивала примену немодификованог РГП и на групу истраживања која су испитивала примену модификованог РГП у гуми.

У поглављу *Експериментално истраживање* приказане су коришћене методе испитивања статичких и динамичких својства, стандарди по којима су испитивања извршена, методе кондиционирања узорака пре испитивања, епрувете, уређаји и опрема на којима су вршена испитивања, затим поступак самог мерења и на крају обрада измерених вредности. Такође су описане примењене методе испитивања улазних сировина од који је израђена смеша, режима умешавања и испитивања смеше, као и поступка вулканизације и модификације РГП.

У поглављу *Резултати експерименталног истраживања* приказани су резултати мерења статичких и динамичких својстава гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП, својстава честица и смеше. Такође су представљени резултати испитивања структуре честице и гуме.

У поглављу *Анализа експерименталних резултата*, извршена је анализа измерених вредности. упоредно

су приказана својства гуме са различитим уделом немодификованог и модификованог РГП, анализиран је тренд промене испитаних својстава и дато је тумачење резултата, као и разлози утврђених промена својстава. На основу измерених својстава изведени су закључци о оптималном уделу РГП, при коме не долази до битне промене одређене групе статичких и динамичких својстава гуме.

У последњем поглављу су наведени закључци до којих је аутор дошао током анализе резултата, као и правци даљег истраживања.

### **ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације *(до 200 речи)*

Истраживањем у оквиру докторске дисертације, кандидат је остварио све постављене циљеве. Основни циљ истраживања у оквиру докторске дисертације који је постављен, био је одређивање максималног удела немодификованог и модификованог гуменог праха при коме не долази до битне промене одређене групе статичких и динамичких својстава вулканизиране гумене смеше.

Кандидат је такође остварио све постављене појединачне циљеве: испитивање својстава невулканизиране гумене смеше са различитим масеним уделом немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха (прерадљивост, реолошка својства, брзина вулканизације, итд.); испитивање статичких својстава вулканизиране гумене смеше са различитим масеним уделом немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха пре и после старења (тврдоћа, затезна својства, трајна деформација при истезању и сабијању, отпорност на угаоно цепање, отпорност на хабање, отпорност при ниским температурама, итд.); испитивање динамичких својстава вулканизиране гумене смеше са различитим масеним уделом немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха пре и после старења (динамички модул еластичности, динамички хистерезис, пригушење, итд.); испитивање структуре гуме са различитим масеним уделом немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха (величина честице, агломерација честица, структура, итд.) и утврђивање физичко-хемијских својстава модификованог рециклираног гуменог праха.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације *(до 200 речи)*

Научни доприноси докторске дисертације су следећи:

- Одређивање оптималног удела немодификованог и модификованог гуменог праха, имајући у виду очекиване карактеристике крајњег производа, при коме не долази до битне промене одређене групе статичких и динамичких својстава гуме.
- Дефинисање поступака модификације рециклираног гуменог праха при коме се повећава удео рециклираног гуменог праха у гуми, а да при томе не долази до битне промене одређених својстава гуме.
- Утврђивање утицаја масеног удела немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха на процес вулканизације (параметри прерадљивости, брзина вулканизације, температура вулканизације).
- Утврђивање утицаја масеног удела немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха на статичка својства вулканизиране гумене смеше.
- Утврђивање утицаја масеног удела немодификованог и модификованог рециклираног гуменог праха на динамичка својства вулканизиране гумене смеше.

Стручни допринос докторске дисертације је:

- Дефинисање смернице примене немодификованог и модификованог гуменог праха у комерцијалним смешама.

Оцена самосталности научног рада кандидата *(до 100 речи)*

Кандидат је кроз спроведена истраживања и резултате добијене у дисертацији, показао да поседује адекватна знања из различитих области потребних за израду докторске дисертације.

Кандидат је испољио висок ниво самосталности, систематичности и инвентивности у научно-истраживачком раду и показао способност да сагледа проблеме истраживања са више аспеката и креативно приступи њиховом решавању уз наглашену оригиналност у осмишљавању и креирању одређених научних и стручних решења.

У прилог томе говори и чињеница да је резултат провере докторске дисертације коришћењем софтвера за детекцију плагијаризма утврдио поклапање са другим радовима у проценту од свега 1%, чиме је провера прошла позитивно по оцени софтвера.

Резултати до којих је кандидат дошао истраживањима у дисертацији су верификовани кроз објављивање научних радова из ове области на међународним конференцијама и у часописима, при чему је публиковао више радова у часописима индексираним на SCI листи.

### **ЗАКЉУЧАК** *(до 100 речи)*

Имајући у виду значај и актуелност обрађене теме и остварене научне резултате кандидата публиковане у референтним часописима из уже научне области којој припада тема докторске дисертације, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације констатују да поднета докторска дисертација

представља оригиналан и вредан допринос развоју ове научне области и са задовољством предлажу Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу, да рад Петра Ђекића, дипл. инж. маш. под називом






**„АНАЛИЗА УТИЦАЈА РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНОГ ПРАХА НА СВОЈСТВА И СТРУКТУРУ ГУМЕНИХ СМЕША“**

прихвати као докторску дисертацију и да кандидата позове на усмену јавну одбрану.

**КОМИСИЈА**

Број одлуке ННВ о именовану Комисије **НСВ број 8/20-01-005/17-030**

Датум именовања Комисије **04.07.2017. године**

Р. бр.	Име и презиме, звање	Потпис
1.	др Горан Раденковић, ванредни професор Производни системи и технологије Машински факултет Универзитет у Нишу	ментор, председник 
2.	др Иванка Поповић, редовни професор Полимерно инжењерство Технолошко-металуршки факултет Универзитет у Београду	члан 
3.	др Гордана Стефановић, ванредни професор Термотехника, термоенергетика и процесна техника Машински факултет Универзитет у Нишу	члан 
4.	др Душан Стаменковић, редовни професор Саобраћајно инжењерство Машински факултет Универзитет у Нишу	члан 
5.	др Милан Банић, доцент Машинске конструкције Машински факултет Универзитет у Нишу	члан 

Датум и место:

...18.8.2017. Ниш, Београд

# ЗАПИСНИК

са усмене одбране докторске дисертације Петра Ђекића, дипломираног инжењера машинства, одржане 14. децембра 2017. године на Машинском факултету у Нишу.

Одбрана докторске дисертације почела је у 12<sup>30</sup> часова уводним излагањем Председника Комисије, који је саопштио основне биографске податке о кандидату, ток поступка израде докторске дисертације као и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

Кандидат је приступио излагању докторске дисертације, износећи методологију рада и постигнуте резултате до којих је дошао.

После завршеног усменог излагања кандидата, чланови Комисије су поставили више питања на које је кандидат дао одговоре.

Одбрана је завршена у 13<sup>45</sup> часова.

На основу усмене одбране, одговора кандидата на постављена питања чланова Комисије и на основу Одлуке о усвајању Извештаја Наставно-научног већа Факултета и Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу, чланови Комисије су једногласно донели


## О Д Л У К У


Петар Ђекић, дипломирани инжењер машинства, одбранио је докторску дисертацију под називом:

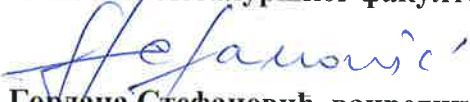
„АНАЛИЗА УТИЦАЈА РЕЦИКЛИРАНОГ ГУМЕНОГ ПРАХА НА СВОЈСТВА И СТРУКТУРУ ГУМЕНИХ СМЕША“


и стекао научни назив

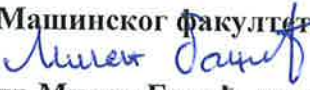
ДОКТОР НАУКА – МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

  
др Горан Раденковић, ванредни професор  
Машинског факултета у Нишу

  
др Иванка Поповић, редовни професор  
Технолошко-металуршког факултета у Београду

  
др Гордана Стефановић, ванредни професор  
Машинског факултета у Нишу

  
др Душан Стаменковић, редовни професор  
Машинског факултета у Нишу

  
др Милан Банић, доцент  
Машинског факултета у Нишу

Број: 612-182-3/2017  
У Нишу, 14.12.2017.год.