

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

დოქტორანტურის საგანმანათლებლო პროგრამა ქიმია

მაკრომოლეკულურ ნაერთთა ქიმიის კათედრა

ლევან ლონდარიძე

ახალი ეკოლოგიურად სუფთა კომპოზიტები მცენარეული ნედლეულისა
და ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის ბაზაზე

ქიმიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი
დისერტაცია

სამეცნიერო ხელმძღვანელ(ებ)ი: პროფ.

ომარ მუკბანიაძე

ქიმიის დოქტორი ელიზა მარქარაშვილი

თბილისი
2025 წელი

Ivane Javakhishvili Tbilisi State University
Faculty of Exact and Natural Sciences

Doctoral Program Chemistry

Department of Macromolecular Science

Levan Londaridze

**New Environmentally Friendly Composites Based on Plant Raw Materials and
Triethoxysilylated Styrene**

The thesis work is performed to obtain a PhD academic degree in Chemistry

Scientific Supervisor(s):Prof.

Omar Mukbaniani

Dr. Eliza Markarashvili

Tbilisi
2025

აბსტრაქტი

თანამედროვე მერქან-პოლიმერული კომპოზიციური მასალების წარმოება დიდწილად ეფუძნება ფორმალდეჰიდის შემცველ სინთეზურ შემკვრელებს, რომელებიც მნიშვნელოვან უარყოფით გავლენას ახდენენ ადამიანის ჯანმრთელობაზე. ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის მიერ ფორმალდეჰიდი კლასიფიცირებულია, როგორც კანცეროგენული ნივთიერება, ამის გამო მისი შემცველობა მასალებში მკაცრად კონტროლდება სხვადასხვა სტანდარტებით.

ჩვენი მიზანი იყო შეგვექმნა ისეთი მასალა, რომელიც იქნებოდა ადამიანის ჯანმრთელობისთვის უსაფრთხო და ამასთანავე ხელს შეუწყობდა გარემოზე უარყოფითი ზემოქმედების შემცირებას.

წინამდებარე ნაშრომში წარმოდგენილია ეკოლოგიურად სუფთა შემკვრელი ნივთიერების მიღების ორი სხვადასხვა მეთოდი, განხილულია სინთეზის პროცესები, ფიზიკური კვლევები, ემპირული თეორიული გათვლები, შემკვრელის მოდიფიკაციები, მასალების მიღების პროცესები სხვადასხვა ფიზიკურ პარამეტრებზე. დეტალურად არის განხილული სხვადასხვა ბუნებრივი შემავსებლის ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების მექანიკური მახასიათებლები - სიმტკიცე, მოქნილობა, ტენისადმი მედეგობა, აგრესიულ გარემოში სტაბილურობა. გაკეთებულია შედარებები, ტრადიციულ - ფორმალდეჰიდის შემცველი შემკვრელებით მიღებულ ანალოგ მასალებთან.

მიუხედავად იმისა, რომ კვლევებში, ჩვენს მიერ მიღებული და შემდგომ გამოყენებული შემკვრელი ნივთიერება სრულიად თავისუფალია ფორმალდეჰიდისგან, მაინც დიდი ყურადღება მიექცა შემკვრელი ნივთიერების ტოქსიკოლოგიური შეფასების საკითხს. ბიოლოგიის დეპარტამენტთან მჭირდრო თანამშრომლობით ჩატარდა კვლევები ლაბორატორიულ ვირთაგვებზე, კვლევის მიზანი იყო შემკვრელი ნივთიერების მოსალოდნელი მომწალავი ზემოქმედების შეფასება. ექსპერიმენტში გამოვიყენეთ ДСП - ხის ბურბუშელოვანი ფილა და ახალი კომპოზიციების სანიმუშო ეპგზემპლიარები. ნაჩვენები იქნა, რომ ახალი კომპოზიციური მასალები არ იწვევს

ექსპერიმენტული ცხოველების პეირფერიულ სისხლში ლეიკოციტების რაოდენობის მნიშვნელოვან დაქვეითებას.

Abstract

The production of modern wood-based composite materials largely relies on synthetic adhesives containing formaldehyde, which pose significant health risks to humans. Formaldehyde has been classified as a carcinogenic substance by the World Health Organization, and its content in materials is therefore strictly regulated by various international standards.

The aim of this study was to develop a composite material that is safe for human health and simultaneously contributes to reducing negative environmental impacts.

This paper presents two different methods for synthesizing an environmentally friendly adhesive. It discusses the synthesis processes, physical experiments, empirical and theoretical evaluations, adhesive modifications, and material fabrication under varying physical conditions. The mechanical properties of the resulting composites—including strength, flexibility, moisture resistance, and stability in aggressive environments—are analyzed in detail. Comparative analysis with conventional formaldehyde-based materials is also provided.

Although the adhesive used in our formulations is completely free of formaldehyde, special attention was paid to its toxicological evaluation. In close collaboration with the Department of Biology, laboratory testing was conducted on rats to assess the adhesive's potential adverse biological effects. According to the results, no significant pathological changes were observed in the test subjects, allowing us to preliminarily classify the adhesive as relatively safe for use in wood-based materials. Although the binder substance developed and subsequently utilized in our research was entirely free of formaldehyde, significant attention was nonetheless devoted to assessing its toxicological profile. In close collaboration with the Department of Biology, studies

were conducted on laboratory rats to evaluate the potential irritant effects of the binder. The experiment involved both Particleboard (ДСП) — and sample specimens of the newly developed composites. The results demonstrated that OSB caused a significant decrease in leukocyte count in the peripheral blood of the experimental animals, a response that was not observed with the new composite material.

სარჩევი

შესავალი	1
თემის აქტუალობა.....	1
მიზნები და ამოცანები.....	2
სამეცნიერო სიახლე	3
თავი I.....	5
ლიტერატურის მიმოხილვა.....	5
1.1 კომპოზიციური მასალები	5
1.2 ფორმალდეჰიდი.....	8
1.3 ბუნებრივი შემავსებლები	10
1.3.1 ფიჭვის ხე	10
1.3.2 ჭადარი.....	11
1.4 შემავსებლის შემადგენელი ბიოპოლიმერების დახასიათება.....	12
1.5 შემავსებლის ქიმიური მოდიფიკაცია.....	14
1.6 კომპოზიციური მასალების მოდიფიკაცია ანტიპირენებით	15
1.6.1 ანტიპირენი - ალუმინის ჰიდროქსიდი.....	16
1.6.2 ანტიპირენი - ტეტრაეთოქსისილანი	18
1.7 ალკილირება - ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი.....	19
თავი II.....	22
ექსპერიმენტული მონაცემების განსჯა	22
2.1 სილილირებული სტიროლის მონომერის ფიზიკური კვლევები.....	22
2.1.2 სილილირებული სტიროლის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული კვლევა.....	24
2.1.3 სილილირებული სტიროლის NMR კვლევა.....	24
2.1.4 სილილირებული სტიროლის ორგანოზომილებიანი ბირთვული მაგნიტურ-რეზონანსული სპექტროსკოპიული კვლევა.....	26
2.1.5 სილილირებული სტიროლის სტრუქტურის დადგენა სიმკვრივის ემპირული ფუნქციური თეორიის გამოყენებით.....	27
2.2 სილილირებული სტიროლის ფიზიკური კვლევა	35
2.2.1 სილილირებული სტიროლის NMR კვლევა.....	35

2.3 თანაპოლიმერი LL2-ის ფიზიკური კვლევები.....	36
2.3.1 თანაპოლიმერი LL2-ის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული კვლევა	36
2.3.2 თანაპოლიმერი LL2-ის NMR კვლევა	38
2.3.3 თანაპოლიმერი LL2-ის გელ შეღწევადი ქრომატოგრაფიული კვლევა	39
2.4 ფიჭვის ხის მერქნის ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების მექანიკური თვისებები შესწავლა....	42
2.4.1 წყალშთანთქმა.....	42
2.4.2 სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე და დარყმითი ძალის განსაზღვრა ჩარპის მეთოდით	48
2.4.2 ეთილსილიკატის გავლენა წყალშთანთქმაზე	55
2.5 ეთილსილიკატის გავლენა კომპოზიტების ზოგიერთ მექანიკურ მახასიათებელზე.....	59
2.5.1 გაჭიმვის სიმტკიცე.....	59
2.5.2 მასალის სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით	61
2.6 კომპოზიციური მასალების ფიზიკური კვლევები.....	63
2.6.1 ფურიე გარდაქმნის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული გამოკვლევები	63
2.7 ოპტიკურ კვლევები.....	66
2.7.1 ფიჭვის კომპოზიტების ზედაპირის მორფოლოგიური ანალიზი	66
2.7.2 სკანირებადი ელექტრონ-მიკროსკოპიული გამოკვლევები	68
2.8.1 თერმოგრაფიკული გამოკვლევები	79
2.8.2 გარბილების ტემპერატურის განსაზღვრა ვიკას მეთოდით.....	89
2.9 ანტიპირენის შემცველი კომპოზიტების ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული გამოკვლევები .	91
2.10 ანტიპირენის შემცველი კომპოზიტების ოპტიკურ-მიკროსკოპიული კვლევა.....	92
2.11 რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი.....	95
2.12 კომპოზიციური მასალების ბიოლოგიური შეფასება	96
ჭადრის ფოთლის ფქვილის ბაზაზე მიღებული კომპოზიციური მასალები	101
2.13 კომპოზიციური მასალების მიღება ჭადრის ფოთლის ფქვილისა და თანაპოლიმერის ბაზაზე	101
2.14 ჭადრის ფოთლის ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების მექანიკური თვისებები შესწავლა....	102
2.15 ჭადრის ფოთლის კომპოზიტების წყალშთანთქმა.....	112
2.16 ფიზიკური კვლევები	125
2.16.1 ფოთლის მასალების ფურიე გარდაქმნის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული კვლევა	125
2.17 ოპტიკური კვლევა.....	128

2.17.1 მასალის ზედაპირის მიკროსკოპიული კვლევა.....	128
2.17.2 ენერგო დისპერსიული X-სხივური ანალიზი	130
2.18 თერმული თვისებების შესწავლა	134
2.18.1 გარბილების ტემპერატურის განსაზღვრა ვიკას მეთოდით.....	134
2.18.2 ფოთლის ფქვილის კომპოზიტების თერმოგრაფიმეტრული კვლევა	137
2.19 რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი	142
2.19.1 ფოთლის ფქვილის კომპოზიტების რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი.....	142
თავი III	146
ექსპერიმენტული ნაწილი	146
3.1 გამოყენებული ნივთიერებები	146
3.2 სტიროლის ინჰიბიტორისგან გასუფთავება.....	146
3.3 სილილირებული სტიროლის მონომერის სინთეზი	147
3.3.1 სტიროლის და ვინილტრიეთოქსი სილანის ურთიერთქმედება (I გზა)	147
3.3.2 დივინილბენზოლის ჰიდროსილილირების რეაქცია ტრიეთოქსისილანთან	148
3.4 სტიროლის და სილილირებული სტიროლის თანაპოლიმერიზაცია	148
3.4 თანაპოლიმერის - LL2 სინთეზი	148
კომპოზიციური მასალები	149
3.5 მასალების მიღება - შემავსებლის და შემკვრელის ურთიერთქმედება.....	149
3.6 კომპოზიტების მიღების მანიპულაციები	152
3.7 ნიმუშების ფორმირებისას გამოყენებული წნეხფორმების გეომეტრია და ტემპერატურის გაზომვა.....	153
3.8 მექანიკური გამოკვლევები - მეთოდика.....	154
3.8.1 სიმტკიცის განსაზღვრა სტატისტიკური ლუნვის დროს	154
3.8.2 დარტყმითი ძალის გასაზღვრა	155
3.8.3 წყალშთანთქმა.....	156
3.8.4 სიმკვრივე.....	156
3.8.5 სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით.....	157
3.8.6 გაჭიმვაზე სიმტკიცე.....	158
3.9 ნიმუშების ზედაპირის მორფოლოგია.....	158
3.9.1 ელექტრონული მიკროსკოპიული კვლევა	158

3.9.2 ოპტიკური მიკროსკოპიული კვლევა	158
3.10 კომპოზიტების თერმული ანალიზი.....	159
3.10.1 თერმოგრაფიმეტრული ანალიზი	159
3.10.2 გარბილების ტემპერატურა - ვიკას მეთოდი.....	159
3.11 რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი	159
3.12 ქიმიური კომპოზიტების ბიოლოგიური გავლენის შეფასება	160
3.12.1 ფიჭვის ნახერხის, სტიროლისა და ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ) სილანის ბაზაზე შექმნილი ახალი კომპოზიციური მასალის ცოცხალ სისტემებზე შესაძლო უარყოფითი ზემოქმედების შესწავლა.....	160
დასკვნები.....	163
გამოყენებული ლიტერატურა.....	166

სურათები

სურათი 1. ცელულოზის ქიმიური სტრუქტურა.....	13
სურათი 2. ჰემიციელულოზის ქიმიური სტრუქტურა.....	14
სურათი 3. ლიგნინის ქიმიური სტრუქტურა	14
სურათი 4. ალუმინის ჰიდროქსიდის მოსალოდნელი რეაქციები შემკვრელისა და ცელულოზის ზედაპირთან.....	18
სურათი 5. ვინილორგანოდიქლორსილანის ფრიდელ-კრაფტის რეაქცია ბენზოლთან და მის წარმოებულებთან.....	19
სურათი 6. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის მიღების სქემა.....	20
სურათი 7. სტიროლის და ვინილტრიეთოქსი სილანის რეაქცია, უწყლო ალუმინის ქლორიდის თანაობისას	20
სურათი 7. ვინილტრიეთოქსისილანის ფრიდელ-კრაფტის ალკილირების რეაქცია სტიროლთან	21
სურათი 9. დივინილბენზოლის ჰიდროსილირების რეაქცია.....	22
სურათი 10. ტიროლის და ვინილტრიეთოქსი სილანის რეაქცია, უწყლო ალუმინის ქლორიდის თანაობისას	23
სურათი 11. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საწყისი მდგომარეობა (ორთო მიერთება)	28

სურათი 12. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საბოლოო მდგომარეობა (ორთო მიერთება)	29
სურათი 13. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საწყისი მდგომარეობა (მეტა მიერთება)	30
სურათი 14. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საბოლოო მდგომარეობა (მეტა მიერთება)	31
სურათი 15. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საწყისი მდგომარეობა (პარა მიერთება)	32
სურათი 16. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საბოლოო მდგომარეობა (პარა მიერთება)	33
სურათი 17. ტრიეთოქსისილანის, დივინილ ბენზოლთან მიმდინარე ჰიდროსილილირების რეაქცია	35
სურათი 18. ტრიეთოქსი(ვინილფენთილ)სილანის სტიროლთან თანაპოლიმერიზაციის რეაქცია	36
სურათი 19. გაჭიმვის კვლევის შედეგი I (TESst 3%, 180°C) კომპოზიტისთვის - ძალისა და დეფორმაციის დამოკიდებულება	59
სურათი 20. გაჭიმვის კვლევის შედეგი VII' (TESst 3%, 220°C) კომპოზიტისთვის - ძალისა და დეფორმაციის დამოკიდებულება	60
სურათი 21. გაჭიმვის კვლევის შედეგი XLVII (TESst 5%, Al(OH) ₃ 10%, 1800C) კომპოზიტისთვის - ძალისა და დეფორმაციის დამოკიდებულება ნახერხი 85%	61
სურათი 22. III კომპოზიტის ოპტიკური მიკროგრაფი (ნახერხი 97%, სილ.სტიროლი - 3%, 180°C)	67
სურათი 23. VII კომპოზიტის ოპტიკური მიკროგრაფი (ნახერხი 97%, სილ.სტიროლი - 3%, 220°C)	67
სურათი 24. X კომპოზიტის ოპტიკური მიკროგრაფი (ნახერხი 95%, სილ.სტიროლი - 5%, 180°C)	67
სურათი 25. XIV კომპოზიტის ოპტიკური მიკროგრაფი (ნახერხი 90%, სილ.სტიროლი - 10%, 220°C)	68
სურათი 26. III კომპოზიტის სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები	69
სურათი 27. IV კომპოზიტის სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები	70
სურათი 28. VII კომპოზიტის სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები	71
სურათი 29. 2% Al(OH) ₃ 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი შემცველი კომპოზიტის XLVI კომპოზიტის სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები 200-ჯერ გადიდების პირობებში	74

სურათი 30. 10% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVIII სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები 200-ჯერ გადიდების პირობებში (ა-სპექტრი 1, ბ-სპექტრი 2)	76
სურათი 31. ტემპერატურის და გაზების წარმოქმნის დამოკიდებულება ფიჭვის ხის პიროლიზური დაშლის დროს	80
სურათი 32. ლიგნინო-ცელულოზური ბიომასის თერმული ფრაქციონირების ჰიპოთეზური კონფიგურაცია	81
სურათი 33. VII კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული ანალიზი აზოტის არეში	82
სურათი 34. V კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული და წარმოებული თერმოგრაფიმეტრული მრუდი	84
სურათი 34-1. V კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული მრუდი	85
სურათი 35. IX კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული მრუდი	86
სურათი 36. IX c-DTA კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული მრუდი	86
სურათი 37. IX კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული მრუდი	86
სურათი 38-1. X კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული მრუდი	87
სურათი 38-2. X კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული მრუდი	87
სურათი 39. V, IX, X კომპოზიტების თვა მრუდების შედარება	89
სურათი 40. 1% ანტიპირენის ($\text{Al}(\text{OH})_3$) შემცველი კომპოზიტის XLIV ოპტიკურ მიკროსკოპიული მიკროგრაფები	93
სურათი 41. 2% ანტიპირენის ($\text{Al}(\text{OH})_3$) შემცველი კომპოზიტის XLVI ოპტიკურ მიკროსკოპიული მიკროგრაფები	94
სურათი 42. ზრდასრული თაგვების პერიფერიულ სისხლში ლეიკოციტების საერთო რაოდენობის ცვლილებაზე საკვლევი კომპოზიტის ზემოქმედების შესწავლა	97
სურათი 43. ზრდასრული თეთრი თაგვების ღვიძლის ჰისტოარქიტექტონიკასა და პროლიფერაციულ აქტიურობაზე კომპოზიტის ზემოქმედების შესწავლა ღვიძლის ქსოვილის მიკროფოტოები	98
სურათი 44. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის და სტიროლის, შესაძლო ურთიერთქმედება შემავსებლის ბიოპოლიმერებთან, დიკუმილის ზეჟანგის თანაობისას	102
სურათი 45. ჭადრის ფოთოლი გაცრილი ა და დაფქვილი ბ	128
სურათი 46. 150°C-ზე მიღებული 3% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი და 3% სტიროლის შემცველი კომპოზიტის I ზედაპირი 60-ჯერ გადიდების პირობებში	129
სურათი 47. 190°C-ზე მიღებული 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი და 5% სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XIX ზედაპირი 60-ჯერ გადიდების პირობებში	129

სურათი 48. 190°C-ზე მიღებული 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი და 10% სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XXIV ზედაპირი 60-ჯერ გადიდების პირობებში.....	130
სურათი 49. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის სტიროლთან თანაპოლიმერიზაციის რეაქცია	149
სურათი 50. ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და ცელულოზის მოლეკულათშორისი ურთიერთქმედებისა და ეთერიფიკაციის რეაქციები	151
სურათი 51. შემავსებელთან დაკავშირებული ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის in situ პოლიმერიზაცია	151
სურათი 52. ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის მატრიცაში in situ პოლიმერიზაცია	151
სურათი 53. ტრიეთოქსისილილირებული პოლისტიროლის ეთერიფიკაციის და მოლეკულათშორისი ურთიერთქმედების რეაქციები შემავსებელთან	152
სურათი 54. ნიმუშის მდებარეობა სტატიკური გაღუნვის გამოცდის დროს.....	155

ცხრილები

ცხრილი 1. მყარი და რბილი მერქნის ბიოპოლიმერული ზოგადი შემადგენლობა	12
ცხრილი 2. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ზოგიერთი ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები* 23	
ცხრილი 3. თანაპოლიმერის ანალიზის ჩატარების პირობები და შედეგების შეჯამება.....	40
ცხრილი 4. ხის ბურბუშელოვანი ფილის წყალშთანთქმა და ზოგიერთი მექანიკური თვისება....	42
ცხრილი 5. ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და ნახერხის ბაზაზე სხვადასხვა ტემპერატურაზე და წნევაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა.....	43
ცხრილი 6. სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე და დარტყმითი ძალის მნიშვნელობის დამოკიდებულება ხის კომპოზიციური მასალის მიღების პირობებზე.....	48
ცხრილი 7. ტემპერატურის გავლენა ალუმინის ჰიდროქსიდის შემცველ კომპოზიტის მექანიკურ თვისებებზე.....	51
ცხრილი 8. ალუმინის ჰიდროქსიდის, როგორც ანტიპირენის გავლენა წყალშთანთქმაზე	53
ცხრილი 9. ეთილსილიკატის, როგორც წვის ხელისშემშლელი აგენტის გავლენა მასალის მექანიკურ თვისებებზე	56
ცხრილი 10. ეთილსილიკატის გავლენა კომპოზიციის წყალშთანთქმაზე.....	57
ცხრილი 11. ფიჭვის კომპოზიტების ზედაპირის სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით და K-კოეფიციენტის დადგენა	61
ცხრილი 12. III კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი	70

ცხრილი 13. IV კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი	71
ცხრილი 14. VII კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი.....	73
ცხრილი 15. 2% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% შემცველი ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის კომპოზიტის XLVI ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი (სპექტრი 1-220°C)	75
ცხრილი 16. 2% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVI ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი (სპექტრი 2-220°C)).....	75
ცხრილი 17. 10% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVIII ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი	78
ცხრილი 18. 10% $\text{Al}(\text{OH})_3$ შემცველი კომპოზიტის XLVIII ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი.....	78
ცხრილი 19. VII კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული ანალიზი ცხრილი	82
ცხრილი 20. ჭადრის ფოთლი ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების ფიზიკურ-მექანიკური პარამეტრები	102
ცხრილი 21. ჭადრის ფოთლის კომპოზიტების ზედაპირის სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით და K-კოეფიციენტის დადგენა	105
ცხრილი 22. ჭადრის ფოთლის, ანტიპირენის 5-10%, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლის „in-situ” პოლიმერიზაციით 15 მპა წნევაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების გამოცდა ღუნვაზე და დარტყმითი ძალა	106
ცხრილი 23. ჭადრის ფოთლის, ანტიპირენის 5-10%, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლის „in-situ” პოლიმერიზაციით 10 მპა წნევაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების გამოცდა ღუნვაზე და დარტყმითი ძალა	107
ცხრილი 24. ჭადრის ფოთლის, ანტიპირენის 5-10%, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლის „in-situ” პოლიმერიზაციით 5 მპა წნევაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების გამოცდა ღუნვაზე და დარტყმითი ძალა	109
ცხრილი 25. ჭადრის ფოთლის, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლის „in-situ” პოლიმერიზაციით	114
მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა	114
ცხრილი 26. ჭადრის ფოთლის, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის, სტიროლის და ალუმინის ჰიდროქსიდით, „in-situ” მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა.....	117
ცხრილი 27. ფოთლის, ტრიეთოქსისილანის, სტიროლის და ალუმინის ჰიდროქსიდით, 15 მპა წნევასა და მორიეაგირე ნივთიერებათა სხვადასხვა კონცენტრაციებზე „in-situ” პოლიმერიზაციით მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა	119

ცხრილი 28. ფოთლის, ტრიეთოქსისილანის, სტიროლის და ალუმინის ჰიდროქსიდით, 10 მპა წნევასა და მორიეაგირე ნივთიერებათა სხვადასხვა კონცენტრაციებზე „ <i>in-situ</i> ” პოლიმერიზაციით მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა	121
ცხრილი 29. ფოთლის, ტრიეთოქსისილანის, სტიროლის და ალუმინის ჰიდროქსიდით, 5 მპა წნევასა და მორიეაგირე ნივთიერებათა სხვადასხვა კონცენტრაციებზე „ <i>in-situ</i> ” პოლიმერიზაციით მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა	123
ცხრილი 30. I კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი	131
ცხრილი 31. I კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი 400x გადიდების პირობებში	131
ცხრილი 32. XXIV კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი 500x გადიდების პირობებში	132
ცხრილი 33. XV კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი 200x გადიდების პირობებში	133

გრაფიკები

გრაფიკი 1. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის იწ სპექტრი	24
გრაფიკი 2. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ^1H ბმრ სპექტრი	25
გრაფიკი 3. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ^{13}C ბმრ სპექტრი	25
გრაფიკი 4. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ჰეტერო Cozy ბმრ სპექტრი	26
გრაფიკი 5. სისტემის ენერგიის ცვლილების დამოკიდებულება (ΔE) C1-C17 ნახშირბადის ატომებს შორის მანძილზე (RC-C) სტიროლის ვინილტიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის მოდელურ რეაქციაში (ორთო მიერთება)	29
გრაფიკი 6. სისტემის ენერგიის ცვლილების დამოკიდებულება (ΔE) C2-C17 ნახშირბადის ატომებს შორის მანძილზე (RC-C) სტიროლის ვინილტიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის მოდელურ რეაქციაში (მეტა მიერთება)	31
გრაფიკი 7. სისტემის ენერგიის ცვლილების დამოკიდებულება (ΔE) C3-C17 ნახშირბადის ატომებს შორის მანძილზე (RC-C) სტიროლის ვინილტიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის მოდელურ რეაქციაში (პარა მიერთება)	34
გრაფიკი 8. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ბმრ ^1H სპექტრი	35
გრაფიკი 9. LL2 თანაპოლიმერის იწ სპექტრი	38
გრაფიკი 10. II თანაპოლიმერის ^1H ბმრ სპექტრი	38
გრაფიკი 11. II თანაპოლიმერის ^{13}C ბმრ სპექტრი	39

გრაფიკი 12. II თანაპოლიმერის გელშელწევადი ქრომატოგრაფიული მრუდი.....	40
გრაფიკი 13. კომპოზიციური მასალის წყალშთანთქმის დამოკიდებულება დაწნეხის ტემპერატურაზე	47
გრაფიკი 14. კომპოზიტების წყალშთანთქმის დამოკიდებულება შემაკავშირებლის კონცენტრაციაზე,	48
გრაფიკი 15. კომპოზიტის (III - ხის ნახერხი 97% +სილ.სტიროლი 3% 180°C) FTIR სპექტრი.....	64
გრაფიკი 16. კომპოზიტის (VII - ხის ნახერხი 97% +სტიროლი 3% 200°C) FTIR სპექტრი	64
გრაფიკი 17. LIII კომპოზიტის (3% ეთილსილიკატი+ 5% სილ.სტ.-180°C) იწ სპექტრი	65
გრაფიკი 18. LIV კომპოზიტის (3% ეთილსილიკატი+ 5% სილ.სტ.-220°C) იწ სპექტრი.....	65
გრაფიკი 19. III კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური სპექტრი 2.....	69
გრაფიკი 20. IV კომპოზიტის ენერგოდისპერსიული X-სხივური სპექტრი.....	71
გრაფიკი 21. VII კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური სპექტრი	73
გრაფიკი 22. 2% Al(OH) ₃ და 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVI ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი (ა - სპექტრი 1, ბ - სპექტრი 2 - 220°C).....	75
გრაფიკი 23. 10% Al(OH) ₃ და 5% 220C ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVIII ენერგო დისპერსიული X-სხივური სპექტრი.....	77
გრაფიკი 24. კომპოზიტის (3% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 97% ნახერხი) ინდენტორის ნიმუშში ჩაღრმავების (გარბილების ტემპერატურის) დამოკიდებულება ტემპერატურაზე,	90
გრაფიკი 25. კომპოზიტის (5% - ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 95% ნახერხი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე,	91
გრაფიკი 26. კომპოზიტის (10% - ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 90% ნახერხი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე	91
გრაფიკი 27. XLVI კომპოზიტის (2%-Al(OH) ₃ + 5% სილ.სტ. -220°C) იწ სპექტრი.....	92
გრაფიკი 28. XLVIII კომპოზიტის (10%-Al(OH) ₃ + 5% სილ.სტ. -220°C) იწ სპექტრი	92
გრაფიკი 29ა. Sawdust-VII-Composite და Sawdust-XIV-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამები..	95
გრაფიკი 29ბ. Sawdust-VII-Composite და Sawdust-XIV-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამა.....	96
გრაფიკი 30. ჭადრის ფოთლის კომპოზიტის წყალშთანთქმის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე	112
გრაფიკი 31. კომპოზიციური მასალის I (3% სილ.სტიროლი , 3% სტიროლი - 150°C) იწ სპექტრი	126

გრაფიკი 32. კომპოზიციური მასალის V (3% სილ.სტიროლი , 3% სტიროლი - 190°C) იწ სპექტრი	127
გრაფიკი 33. კომპოზიციური მასალის X (3% სილ.სტიროლი , 6% სტიროლი - 190°C) იწ სპექტრი	127
გრაფიკი 34. კომპოზიციური მასალის XIX (5% სილ.სტიროლი , 5% სტიროლი - 190°C) იწ სპექტრი	127
გრაფიკი 35. კომპოზიციური მასალის XXIV (5% სილ.სტიროლი , 10% სტიროლი - 190°C) იწ სპექტრი	128
გრაფიკი 36. კომპოზიტის (3% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 3 % სტიროლი +94% ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით	135
გრაფიკი 37. კომპოზიტის (3% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 6% სტიროლი +91%ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით	135
გრაფიკი 38. კომპოზიტის (3% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 9 % სტიროლი +88% ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით	136
გრაფიკი 39. კომპოზიტის (5% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 5 % სტიროლი +90% ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით	136
გრაფიკი 40. კომპოზიტის (5% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 10 % სტიროლი +90% ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით, სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს XX მიღებულს 150°C, 2 – XXI (160°C), 3 - XXII (170°C), 4 - XXIII (180°C) და 5 - XXIV (190°C)	137
გრაფიკი 41. (I) 3% TESST, 3% სტიროლი, 94% ფოთოლი 150°C	138
გრაფიკი 42. (V) 3% TESST, 3% სტიროლი, 94% ფოთოლი, 190°C	138
გრაფიკი 43. 3% სილ.სტიროლი, 6% სტიროლი, ჭადრის ფოთოლი 91%, 190°C	139
გრაფიკი 44. ალუმინის ჰიდროქსიდი 10%, სილ.სტიროლი 5%, ჭადრის ფოთოლი 85% 220°C ...	139
გრაფიკი 45. ალუმინის ჰიდროქსიდი 2%, სილ.სტიროლი 5%, ჭადრის ფოთოლი 93% 220°C	139
გრაფიკი 46. ფოთოლის ბაზაზე მიღებული პოლიმერული კომპოზიტების	140
თერმოგრაფიკული მრუდები, ატმოსფერული ჰაერის არეში, გაცხელების სიჩქარე 10°C/წუთი	140
გრაფიკი 47ა. Leaf-V-Composite და Leaf-X-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამები	143
გრაფიკი 47ბ. Leaf-V-Composite და Leaf-X-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამები	143

აბრევიატურები

MDF – საშუალო სიმკვრივის ბოჭკოვანი ფილა

OSB - ორთოგონალურად განლაგებული შპონების ფილა

TGA/თგა - თერმოგრავიმეტრული ანალიზი

DTG - დიფერენციალური თერმოგრავიმეტრია

TG - თერმული ანალიზი

DTA - დიფერენციალური თერმული ანალიზი

DFT - სიმკვრივის ემპირული ფუნქციური თეორია

TESst - ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი

FTIR/იწ - ფურიე-გარდაქმნის ინფრაწითელი სპექტროსკოპია

NMR - ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსი

GPC - გელ-შელწევადი ქრომატოგრაფია

SEM - სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპია

EDS - რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპია

ISO – საერთაშორისო სტანდარტიზაციის ორგანიზაცია

ASTM – ამერიკის ტესტირების და მასალების საზოგადოება

რემ - რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპი

მპა - მეგა პასკალი

შესავალი

თემის აქტუალობა

თანამედროვე სამშენებლო და ავეჯის ინდუსტრია აქტიურად იყენებს მერქან-პოლიმერულ კომპოზიციურ მასალებს, რომელთა შორის განსაკუთრებით გავრცელებულია საშუალო სიმკვრივის ფილა (MDF) და ორთოგონალურად განლაგებული შპონების ფილა (OSB), ფანერა (Plywood), ბურბუშელოვანი ფილა (Particleboard), მაღალი სიმკვრივის ფილა (HDF), დაბალი სიმკვრივის ფილა (LDF) და ა.შ. აღნიშნული მასალები ხის მეორადი ნედლეულის საფუძველზე იქმნება. აღნიშნული მასალების წარმოებაში გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის ქიმიური შემკვრელები, რომელთა უმრავლესობა დაფუძნებულია ფორმალდეჰიდის შემცველ ფისებზე. კომპოზიციური მასალები, მიუხედავად მათი მექანიკური და ეკონომიკური უპირატესობებისა, ბოლო წლების განმავლობაში სულ უფრო მწვავე კრიტიკის ობიექტი გახდა, რაც დაკავშირებულია ჯანმრთელობისა და გარემოს დაცვის საკითხებთან.

ზემოთ ჩამოთვლილი კომპოზიციური ფილები, წარმოადგენენ მრავალი დანიშნულების მქონე მასალებს, რომლებიც გამოირჩევიან კარგი მექანიკური მახასიათებლებით, ერთგვაროვანი სტრუქტურითა და დამუშავების სიმარტივით. მათი წარმოება მნიშვნელოვნად ამცირებს ხის ბუნებრივი რესურსების მოხმარებას, რაც ერთი შეხედვით ეკოლოგიურად მისაღებ ალტერნატივად შეიძლება ჩაითვალოს, თუმცა მათში შემავალი ქიმიური შემკვრელები, განსაკუთრებით ფორმალდეჰიდის ბაზაზე არსებული ფისები, გარემოსა და ადამიანის ჯანმრთელობაზე მავნე ზემოქმედებას ახდენენ – რაც გამოიხატება გარემოში ფორმალდეჰიდის ემისიით. ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის მიერ ფორმალდეჰიდი აღწერილია, როგორც კანცეროგენი, რის გამოც შემოდებულია რეგულაციები, რომლითაც კონტროლდება ჰაერში აქროლად ნივთიერებათა კონცენტრაციები (www.regulations.gov 2016).

ამის ფონზე, იზრდება ინტერესი ეკოლოგიურად სუფთა - ალტერნატიული შემკვრელების გამოყენების, როგორებიცაა ბუნებრივი ფისები, მცენარეული ზეთები, ცილები და მათი შემცველები. პარალელურად, სულ უფრო აქტუალური ხდება ე.წ.

„მწვანე სტანდარტების“ დანერგვა, რომლებიც განსაზღვრავენ ფორმალდეჰიდის მაქსიმალურად დასაშვებ დონეს კომპოზიციური მასალებისთვის, ამის მაგალითს E_0 და CARB2 სერტიფიკატები წარმოადგენს. (compositepanel თ. გ.)

დღესდღეობით, ბუნებრივი ნედლეულის ბაზაზე კომპოზიციური მასალების ეკოლოგიური შეფასება და მათი განვითარების მიმართულებები წარმოადგენს მნიშვნელოვან კვლევით თემას, როგორც მასალათმცოდნეობის, ისე გარემოსდაცვითი მეცნიერებების ჭრილში. ამ კონტექსტში, განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ გზების პოვნა, რომლებიც უზრუნველყოფენ მასალების მექანიკური თვისებების შენარჩუნებას და ამავე დროს შეამცირებენ ეკოლოგიურ ზემოქმედებას.

მიზნები და ამოცანები

ჩვენი კვლევების მიზანი იყო მიგვეღო ეკოლოგიურად სუფთა, ჯანმრთელობისთვის უსაფრთხო - ფორმალდეჰიდისაგან თავისუფალი, გაუმჯობესებული ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მქონე ახალი კომპოზიციური მასალები, განახლებადი მცენარეული ნედლეულის - ფიჭვის ხის ნახერხის და ჭადრის ფოთლის ფქვილის ბაზაზე. მიღებული მასალებისთვის გაგვეუმჯობესებინა საექსპლუატაციო პირობები, ჰქონოდათ მაღალი მექანიკური მახასიათებლები, წყალშთანქმის და წვის მიმართ მედეგობა, დაგვედგინა მასალების მიღების ოპტიმალური პირობები, ამასთანავე შეგვესწავლა მიღებული კომპოზიტების ზედაპირის სტრუქტურა სხვადასხვა მეთოდებით, გაგვეკეთებინა სიღრმისეული ანალიზი კომპოზიციური მასალების თერმული თვისებების გასაგებად, გამოგვეკვლია მიღებული მასალების სტრუქტურა, გაგვეკეთებინა კომპლექსური კვლევები კომპოზიტების მექანიკური თვისებებს გასაგებად შესაბამისი სტანდარტების (ISO, ASTM) მიხედვით და ბიოლოგიის დეპარტამენტის, მორფოლოგიის კათედრის წევრებთან თანამშრომლობით გაგვეგო ექნებოდა თუ არა ჩვენს მიერ მიღებულ მასალას, რაიმე უარყოფითი გავლენა მოზარდი და ზრდასული თაგვების სხვადასხვა ქსოვილის მორფო-ფუნქციურ აქტიურობაზე.

სამეცნიერო სიახლე

შესრულებულ ნაშრომში სამეცნიერო სიახლეს წარმოადგენს მეორადი ბუნებრივი ნედლეულის ბაზაზე კომპოზიციური მასალების მიღება, სადაც შემკვრელ აგენტად გამოვიყენეთ ტრიეთოქსივინილფენეთილ სილანის მონომერი, რომელსაც აქვს უნარი ცელულოზის, ჰემიცელულოზის და ლიგნინის ჰიდროქსილის ჯგუფებთან შევიდეს ეთერიფიკაციის რეაქციებში და წარმოქმნას ახალი კოვალენტური ბმები, შემკვრელსა და ბიოპოლიმერულ მატრიცას შორის. ამასთანავე ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანს, სტრუქტურაში არსებული ვინილის ჯგუფის ხარჯზე აქვს შესაძლებლობა გარდაიქმნას პოლიმერად და დამატებით მაარმირებელი აგენტის როლი შეასრულოს, რაც კომპოზიციის მექანიკურად გაძლიერებაზე დადებითად აისახება. ამასთან ერთად, კომპოზიციური მასალების მექანიკური თვისებების გაუმჯობესებისთვის ტრიეთოქსივინილფენეთილ სილანის მონომერი, მატრიცაში შევიყვანეთ სტიროლის მონომერთან ერთად, რომლებიც ცხლად დაწნეხის პირობებში წარმოქმნიან თანაპოლიმერს, ეს პროცესი *in-situ* პოლიმერიზაციის სახელითაა ცნობილი, მასალაში თანაპოლიმერის არსებობა პოტენციურად იძლევა მექანიკური თვისებების გაუმჯობესების შესაძლებლობას.

პუბლიკაციები

დისერტაციის მასალები გამოქვეყნებულია 9 სამეცნიერო სტატიადა, აქედან 2 იმფაქტ ფაქტორის მქონე ჟურნალში.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა

სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 173 გვერდს, შედგება ძირითადი თავებისგან: შესავალი, ლიტერატურის მიმოხილვა, ექსპერიმენტული ნაწილი, ექსპერიმენტული მონაცემების განსჯა, მასალები, დასკვნები, ციტირებული ლიტერატურის ნუსხა 85, ცხრილი 33, სურათი 55, გრაფიკი 47. სადოქტორო ნაშრომი შესრულებულია ივანე ჯავახიშვილი სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტის ქიმიის დეპარტამენტის, მაკრომოლეკულური ქიმიის კათედრაზე, სსიპ შოთა რუსთაველის საქართველოს

ეროვნული სამეცნიერო ფონდის კვლევითი საგრანტო პროექტის (FR-19-795)
ფარგლებში.

თავი I

ლიტერატურის მიმოხილვა

1.1 კომპოზიციური მასალები

ბოლო წლების განმავლობაში დიდი ინტერესია მიმართული ახალი, თერმოპლასტიკური პოლიმერული მატრიცებიდან მიღებული კომპოზიტების განვითარებისაკენ, რომლებიც გამყარებულია ხის შემავსებლით. დიდი ინტერესი გამოწვეულია მათი გარემოს დაცვითი და ეკონომიკური სარგებელის მხრივ. ასევე საინტერესოა არიან ისეთი თვისებების გამო, როგორიცაა განახლებადობა, ბიოდეგრადირების უნარი, დაბალი სიმკვრივე, მაღალი სიმტკიცე და შედარებით დაბალი ფასი (Torres და Cubillas 2005). მერქან-პოლიმერული კომპოზიციური მასალების წარმოება ევროპაში 18.7 მილიარდ ევროს შეადგენს, ხოლო ეს მასალები რომლებიც შემდგომ გამოიყენება სამშენებლო და კონსტრუქციული მასალების წარმოებაში, მიღებული საქონელი 51 მილიარდ ევროს უტოლდება. (Toia 2017)

ზოგადად ბოჭკოვანი ფილები სამი ტიპის არსებობს: მტკიცე/მაღალი სიმკვრივის ფილა, ნახევრად მტკიცე/საშუალო სიმტკიცის ფილა და რბილი/დაბალი სიმკვრივის ფილა.

1. მაღალი სიმკვრივის ფილა: მტკიცე ფილად ითვლება ფილა, რომლის სიმკვრივე 800 კგ/მ³-ია. აღნიშნული კომპოზიცი ოთხი ხარისხის არსებობს ესენია: უმაღლესი ხარისხი, ვხედებით ასევე პირველ, მეორე და მესამე ხარისხებს. ეს კომპოზიციური მასალები ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებით მსგავსი არიან ნახევრად-მტკიცე ფილების, თუმცა ხასიათდებიან შედარებით მაღალი სიმტკიცით, ამასთანავე სხვაობაა სისქის მიხედვითაც 2.2მმ, 3მმ, 3.2მმ, 4მმ, 5მმ და ა.შ.

2. საშუალო სიმკვრივის ბოჭკოვანი ფილა მზადდება მერქნის ბოჭკოსგან ან სხვა მცენარეებისგან, რომელსაც დამატებული აქვს შემკვრელი აგენტი და ცხლად არის დაწნეხილი. სიმკვრივე 0.5-0.88გ/სმ³-ია. საშუალო სიმკვრივის ფილები ერთიმეორისგან განსხვავდებიან სიმკვრივით, ამის გამო კლასიფიცირებულნი არიან 80, 70 და 60 ტიპებად, ამასთანავე ხარისხის მიხედვით დაყოფილი არიან, უმაღლეს, პირველ და მეორე

ხარისხებად. სისქის მიხედვით არსებობს 6 მმ, 9 მმ, 12 მმ, 15 მმ და ა.შ. მათთვის წაყენებულ მთავარი მოთხოვნა დაბალი ტენიანობის მაჩვენებელი 4-13%-ია, წყლის შთანთქმისას გაჯირჯება <12%, სიმტკიცე გაჭიმვაზე, სიმტკიცე ღუნვაზე და ა.შ.

ორთოგონალურად განლაგებული შპონების ფილა (OSB), საშუალოს სიმკვრივის მერქანბოჭკოვანი ფილა (MDF), დაბალი სიმკვრივის მერქანბოჭკოვანი ფილა (LDF) (Qiang Yuan 2021), Hardboard - მერქნის მყარი ბოჭკოვანი ფილა (Vale, Petrovic და Zari 2017), Plywood - ფანერა (Castanié, და სხვ. 2024) და სხვა. ამგვარ მასალებში უმეტესად გამოყენებულ შემკვრელ ფისს შარდოვანა-ფორმალდეჰიდი წარმოადგენს (Organization, Formaldehyde 2022), თუმცა ხარისხის და ექსპლუატაციის მიხედვით შესაძლებელია სხვა შემაკავშირებლებიც იყოს გამოყენებული, როგორცაა მელამინ-შარდოვანა-ფორმალდეჰიდი, ფენოლ-ფორმალდეჰიდი. გამონაკლისია პოლიმეთილენ დი-იზოციანატი და აღსაღნიშნავია, რომ მისი ფასი გაცილებით მაღალია. უმეტეს მასალებში შემაკავშირებელ აგენტს ფორმალდეჰიდის შემცველი ფისი წარმოადგენს.

ბუნებრივი რესურსების დაცვის, დამუშავებისა და ბიოდეგრადირებადობის დაცვის მნიშვნელობა არის ძირითადი მიზეზი ლიგნოცელულოზური მასალის უფრო ფართო გამოყენებისა პოლიმერული კომპოზიციებში. ავტორების მიერ (Vanli 2017) განხილულია პოლიმერული კომპოზიტები არმირებული ხის შემავსებლით, რომელთაც მკვლევართა დიდი ყურადღება მიიპყრო. მათ შორის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება განახლებად მცენარეულ ნედლეულს, სხვადასხვა ტიპის ხის ფხვნილები და ლიგნოცელულოზური არმირებული პოლიმერული კომპოზიციური მასალები.

მერქანპლასტიკურ მასალებში ყველაზე ხშირად გამოყენებული თერმოპლასტიკური პოლიმერები - პოლივინილქლორიდი, პოლიპროპილენი, პოლიეთილენი და პოლისტიროლია, რომლებიც თავისმხრივ ხასიათდებიან მაღალი ჰიდროფობურობით. აღნიშნული პოლიმერები დიდი პოპულარობით სარგებლობენ მათი არაგამჭირვალეობის, დენადობის და კარგი ელექტროსაიზოლაციო თვისებების გამო. აღნიშნული თერმოპლასტიკური ჰიდროფობური პოლიმერები ერევიან ჰიდროფილურ ბუნებრივ შემსავსებლებს, რომლებიც თავისმხრივ დამუშავებულია

სპეციალური აგენტებით (Friedrich 2021). ავტორს თავის ნაშრომში აღწერილი აქვს, რომ მაკულატურა და გამოყენებული პლასტმასი წარმოადგენენ ერთერთ ძირითად მყარ ნარჩენებს, რომელიც შეიძლება გადამუშავებულ იქნას კომპოზიციური მასალის მისაღებად (Najafi 2013 September)

სტიროლი არის ერთ-ერთი ყველაზე ღირებული სინთეზური პრეკურსორი, რადგან იგი გამოიყენება რამდენიმე ტიპის პოლისტიროლის ქაფის წარმოებისთვის. მისი პოლიმერიზაციის რეაქცია ინიცირდება თავისუფალი რადიკალების მიერ, რომლებიც ურთიერთქმედებენ სტიროლის მოლეკულასთან, იხსნება ვინილის ჯგუფის ორმაგი კავშირი, რის შედეგადაც წარმოიქმნება პოლისტიროლი. (Lever 2001)

ხის ნარჩენების, განსაზღვრული მონომერების გამოყენებით გაჟღენთვის მეთოდი და *in-situ* პოლიმერიზაცია, რამდენიმეჯერ აუმჯობესებს ხის არასასურველ თვისებებს. ესეთ დროს, მერქნის ნახერხს გაჟღენთავენ დაბალმოლეკულური მონომერ(ებ)ით ან დაბალი სიბლანტის ოლიგომერებით, რომელთაც შესწევთ უნარი, შეავსონ ხის შიგნით უჯრედული ან/და უჯრედშორისი სივრცეები და ქიმიურად დაუკავშირდნენ გარკვეულ პოლისაქარიდებს და ლიგნინს ხის უჯრედულ კედელში. (Wei-Dan Ding 2013 April) (Md. Saiful Islam 2013)

თეთრ ფიჭვთან მუშაობისას (*Pinus strobus* Linnaeus), ავტორების (M.M. El-Awady 2003) მიერ მიღებულ იქნა მერქანპლასტიკური კომპოზიციური მასალები (WPC) გამასხივების ქვეშ სტიროლის მონომერის ადგილზე *in-situ* პოლიმერიზაციის გზით, რითიც მიიღეს წყლის და ტენის მიმართ გაზრდილი მედეგობა. მერქანპლასტიკური პოლიმერული კომპოზიცია მიიღეს სტიროლის ადგილზე *in-situ* პოლიმერიზაციით მზარდ და ზრდასრულ ფიჭვში (Andrey Pereira Acosta 2020). დამუშავების პარამეტრები და თვისებები შეფასდა ინფრაწითელი სპექტროსკოპიის, თერმოგრაფიმეტრიის და მექანიკური ტესტებით. *In-situ* პოლიმერიზაციით მიღებულმა ნიმუშებმა აჩვენეს გაუმჯობესებული თერმული და მექანიკური მახასიათებლები.

ნაშრომში (Washington Luiz Esteves Magalhães 2003) ავტორები აღწერენ სტიროლსა და მერქნის ნახერხს შორის ქიმიური ბმის წარმოქმნაზე და ამტკიცებენ, რომ აღმნიშნული

ბმები სუსტია სტიროლის არაპოლარული არომატული სტრუქტურის გამო, რაც დაკავშირებულია ხეში პოლიმერის მცირე შეკავებით. აღწერენ, რომ ორი შთანთქმის ზოლი გამოიყოფა 1490 და 1600 cm^{-1} უბანში დამუშავებულ ფიჭვში, რომელსაც თვლიან, რომ წარმოიქმნება წარმოქმნილ პოლისტიროლსა და ხის უჯრედს შორის, რადგან ისინი დაკავშირებულნი არიან ორ ნახშირბადს ($\text{C}=\text{C}$) შორის სტიროლის არომატულ ბირთვში (C. Merlatti 2008). ეს შესაძლო ქიმიური ბმები გამოიკვლიეს ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსული და რენტგენო ფოტოელექტრონული სპექტროსკოპიით. აღნიშნული შთანთქმის ზოლები ავტორებმა მიაკუთვნეს პოლისტიროლის არაპოლარული ბირთვის ვალენტურ რხევებს.

მიღებულია კომპოზიციური მასალები განახლებადი მცენარეული ნედლეულის წვრილად დისპერსირებული მშრალი ფოთოლის და ზოგიერთი ორგანო არაორგანული შემკვრელის (ფენილეთოქსისლოქსანი, პოლიეთილენი, კანიფოლი ხის წებოს და თხევადი მინა) ბაზაზე, სადაც შემკვრელის შემავსებელთა თანაფარდობით 3-10 მასური % ის ფარგლებშია (J. A. O.Mukbaniani 2017). ანალოგიური კვლევებია ჩატარებული ავტორების მიერ ხის ნახერხზე ბამბუკზე (W. B. O.Mukbaniani 2017) და სხვა ბუნებრივ განახლებად ნედლეულზე. (J. A. O.Mukbaniani 2015)

კომპოზიტების ფიზიკური და მექანიკური თვისებები დამოკიდებულია რიგ ფაქტორებზე, მათ შორის მერქნის სახეობაზე, შემაკავშირებელი აგენტის ტიპზე, ნაწილაკების ზომებზე, სიმკვრივეზე, სწორად შერჩეულ წნევაზე, ტემპერატურასა და მორეაგირე ნივთიერებათა თანაფარდობაზე. ელასტიურობის, სიხისტის და სიმტკიცის მახასიათებლები წარმოადგენს ძირითად მექანიკურ მახასიათებლებს პროდუქტის ექსპლუატაციისას.

1.2 ფორმალდეჰიდი

დღეისათვის არსებული მერქნის კომპოზიციური მასალებისთვის მთავარ გამოწვევას მათში შემავალი შემკვრელი ნივთიერების - ფორმალდეჰიდის მომწამვლელი ბუნება წარმოადგენს.

მსოფლიო ჯანდაცვის ორგანიზაციის (World Health Organization) მიერ ფორმალდეჰიდი მოხსენიებულია, როგორც კანცეროგენური საფრთხე ადამიანებისთვის. ამის გამო WHO-ს შემოღებული აქვს რეგულაციები დახურულ სივრცეში ფორმალდეჰიდის კონცენტრაციებთან დაკავშირებით (Organization, Concise International Chemical Assessment Document 40 2022). WHO მიხედვით, შიდა სივრცეში თავისუფალი ფორმალდეჰიდის კონცენტრაცია არ უნდა აღემატებოდეს 0.1 მგ/მ^3 . (Organization, Formaldehyde 2022) ბევრი ქვეყნისთვის ეს მაჩვენებელი $0.3\text{-}2.0 \text{ კპმ-მდე}$ ზღვრებშია. ზოგადად ბევრ ქვეყანას ფორმალდეჰიდის ემისიის სხვადასხვა ზღვრები და პროტოკოლი გააჩნიათ, მაგალითად ევროპის ქვეყნებში ფორმალდეჰიდის ემისია, რის წყაროსაც უშუალოდ მერქნის კომპოზიციური მასალები წარმოადგენენ, კონტროლდება ევროპული სტანდარტით EN 13986:2004+A1:2015, ემისიის ზედა ზღვარი E1 კლასიფიკაციით განისაზღვრება და 0.124 მგ/მ^3 შეადგენს (Nairn, 2023).

ფორმალდეჰიდის ემისიის სტანდარტში გამოყოფილია ემისიის სამი დონე: E₀, E₁, და E₂.

E₀ - ფორმალდეჰიდის შემცველობა $\leq 0.5 \text{ მგ/100გ}$;

E₁ - ფორმალდეჰიდის შემცველობა $\leq 9 \text{ მგ/100გ}$;

E₂ - ფორმალდეჰიდის შემცველობა $\leq 30 \text{ მგ/100გ}$;

E₀ - რეკომენდირებულია მერქან-პოლიმერულ კომპოზიციურ მასალებში, მისი გამოყენება მიზანშეწონილია ინტერიერში ზედმეტი დამუშავებების გარეშე. (Athanassiadou და Ohlmeyer 2009). ფორმალდეჰიდის კონცენტრაციის განსაზღვრა ჰაერში და მერქან-პოლიმერული კომპოზიციური მასალებიდან ასევე იზომება ამერიკული ASTM E1333-22 სტანდარტით (E1333-22 2022).

ჩანაცვლებული ფენოლების და ამინების პოლიმერულ ფისებში გამოყენება ახალი მიგნება ნამდვილად არაა. ისეთი კომპონენტები, როგორიცაა მეთილფენოლები იგივე კრეზოლები, დიმეთილფენოლები (ქსილენოლები), 3-ტეტრ-ბუთილფენოლი, 3-ფენილ-ფენოლი, ნონილფენოლი, 1,3-ბენზინდიოლი (რეზორცინოლი) და ბისფენოლ - ა, ასევე სხვადასხვა ალდეჰიდები, მათშორის ფორმალდეჰიდი, აცეტალდეჰიდი და ფურფურალდეჰიდი, მათი გამოყენება ინდუსტრიულად ფართოა. ფენოლური

წარმოებულებს აქვთ უნარი აწარმოონ მრავალი სახის ფისები და ქაფები (BRODE 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons 1982) და მათი ნაწარმებით აწამოებენ იმაზე გაცილებით მეტ მასალას, ვიდრე სხვა ნებისმიერი პოლიმერიდან. ამასთანავე ფენოლურ ნაწარმებს ფართო გამოყენება აქვს საღებავებსა და ლუბრიკანტებში და ისეთი კომპოზიციური მასალების წარმოებაში, როგორიც ხის სამშენებლო და კონსტრუქციული მასალებია (BAUMAN 1985). ამინო-ფისები ძალიან ჰგავს ფენოლურ ფისებს, თუმცა უფრო მეტად ძვირია, რის გამოც ნაკლებ მიმზიდველია კომერციული თვალსაზრისით. მელამინ-ფორმალდეჰიდური ფისის უპირატესობა მისსავე ფიზიკურ თვისებაშია, ხასიათდება ღია ფერით, რაც ფენოლური ფისებისგან განასხვავებს. ესეთი ფიზიკურობა მეტ შესაძლებლობას იძლევა ინტერიერში, ავეჯის და დეკორატიული მასალების შექმნის თვალსაზრისით. მელამინი და შარდოვანა თანაპოლიმერში ფორმალდეჰიდთან არიან ბმაში და ფენოლური ფისების მსგავსად, ისინიც კონდენსაციის გზით იშლებიან. ამგვარი ფისების უარყოფით თვისებას მათი დაბალი მედეგობა წარმოადგენს ტენიანობისა და ულტრაიისფერი გამოსხივების მიმართ, რის გამოც მწარმოებლები არ იძლევიან რეკომენდაციას ამგვარი მასალის გარე სივრცეში გამოყენების. (BOOGH and MEZZENEGA 2000)

1.3 ბუნებრივი შემავსებლები

1.3.1 ფიჭვის ხე

ფიჭვი (ლათ. *Pinus halepensis*) წარმოადგენს მარადმწავნე მცენარეს, რომელიც დედამიწის თითქმის ყველა წერტილში გვხვდება, უმეტესად აზიაში, ევროპაში, ჩრდილო ამერიკასა და აფრიკაშია გავრცელებული. ფიჭვი მიეკუთვნება წიწვოვან მცენარეთა ოჯახს, რომლის 120-ზე მეტი სახეობაა ცნობილი (მიქელაძე 1987). ფიჭვი ძვირფასი ხის ჯიშია, რომელმაც ფართო გამოყენება ჰპოვა მშენებლობაში. ხასიათდება ტანის სისწორით, სიმსუბუქით, მაღალი ტექნიკური თვისებებით. აქვს მკვეთრად გამოხატული მუქი წითელი ან ღია ყვითელი ფერის გული, დიდი რაოდენობით შეიცავს ფისს (18-20 კგ ფისი 1 მ³ მერქანზე), რაც უზრუნველყოფს მერქნის მაღალ მდგრადობას ლპობის საწინააღმდეგოდ. სიმკვრივე მშრალ მდგომარეობაში იცვლება ზღვრებში 400-710 კგ/მ³. ფიჭვი შესანიშნავი საშენი მასალაა და პრაქტიკულად ნებისმიერი კონსტრუქციის

დასამზადებლად გამოიყენება. საქართველოში გავრცელებულია 4 სახეობა: კავკასიური - სოსნოვსკის, ბიჭვინთის, ელდარისა და კოხის ფიჭვი. (ბიბლიოვიკი 2022).

1.3.2 ჭადარი

ჭადარის ხე (ლათ. *Platanus*) - წარმოადგენს მცენარეთა გვარს ჭადრისებრთა ოჯახიდან. ჭადრის ფოთოლი მიეკუთვნება ფართოფოთლოვანი ხის არამერქნიან ნაწილს-ფოთლოვან ბიომასას. ჭადარი ფოთოლმცვენი მყარი მერქნის ტიპის ხეა, რომლის სიმაღლე 50 მ, ხოლო გარშემოწერილობა 18 მ აღწევს (ბიბლიოვიკი 2022). ჭადარი სწრაფად მზარდი ხეა, დაახლოებით 2000 წელს ცოცხლობს. გამოიყენება ავეჯის, ანათალი შპონის, სამხატვრო და საყოფაცხოვრებო ნაკეთობათა წარმოებასა და სადურგლო საქმეში. საქართველოში ყველაზე დიდი ჭადარი დგას თელავში, რომლის სიმაღლე 40 მ-ია, გარშემოწერილობა 12 მ, წლოვანება კი 800 წელს აღწევს. ჭადრის ხეს აქვს უნარი მკაცრ გარემოში არსებობის, წარმოადგენს მრავალი ქვეყნის ქალაქებში ხელოვნურად გაშენებულ ხეს, ამის მიზეზი რამდენიმეა, მათგან გამოსარჩევია მდგრადობა და გამძლეობა, მიკროკლიმატის შენარჩუნება (გაგრილება), დიდი ფოთლების ხარჯზე ნახშირბადის დიოქსიდის გარდაქმნა. ჭადრის ფოთოლი საუკეთესო ალტერნატივაა, როდესაც საქმე ეხება ჰაერის დამაბინძურებლების შთანთქმას და ჰაერში არსებული წვრილი ნაწილაკების გაფილტვრას (PM 2.5 - PM 10). ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ ჭადრის ფოთლების ეფექტურად არეგულირებენ კლიმატს, ქმნიან გამაგრილებელ ეფექტს და ინარჩუნებენ ტენიანობას. დიდი ფოთლების ერთობლიობა ქმნის ჩრდილს, რაც საბოლოო ჯამში მნიშვნელოვანია ქალაქის მიკროკლიმატისთვის (Aravanopoulos November 2010). ჭადრის ფოთლები ხასიათდებიან დიდი მოცულობით (12-25 სმ) და ღრმა ჩაღრმავებით, რომლებიც ქმნიან 5 ნაწილს (ლობებს), ამასთანავე გააჩნიათ უხეში დაკბილული კიდეები (woodwideweb 2023). საქართველოში გავრცელებულ ჭადარს „აღმოსავლეთის ჭადარი“ წარმოადგენს. მსოფლიოში რამდენიმე ჯიშის ჭადარია, თუმცა მათი მერქნის და ფოთლის ბიოპოლიმერულ შემადგენლობაში მცირედი სხვაობებია, მსგავსად, როგორც ფიჭვის შემთხვევაში იყო, ბიოპოლიმერების რაოდენობრივი განაწილება ადგილმდებარეობის და კლიმატის მიხედვით იცვლება (Gommes 2002).

1.4 შემავესებლის შემადგენელი ბიოპოლიმერების დახასიათება

მცენარეულ ბოჭკოს აქვს კომპლექსური სტრუქტურა, რომელშიც მრავალი ორგანული კომპონენტისგან შედგება, მათ შორის ცელულოზა, ლიგნინი, ჰემიცელულოზა, ორგანული ფისები, ცხიმოვანი მჟავები, ცხიმები, პექტინები და სხვა. ცელულოზა, ჰემიცელულოზა და ლიგნინი წარმადგენენ სამ მთავარ ბიოპოლიმერს მცენარეულ ბოჭკოში, ამის გამო მცენარეულ ბოჭკოს, ცელულოზურ ან ლიგნოცელულოზურ ფოჭკოდაც მოიხსენიებენ. ბოჭკოში მათი პროპორციები დამოკიდებულია მცენარის ასაკზე და ბუნებაზე. მცენარეული ბოჭკოს მთავარი კომპონენტი ცელულოზაა, რომელიც წარმოადგენს პოლისაქარიდის გრძელ ჯაჭვს, რომელიც β -D გლუკოზის მოლეკულებისგანაა აგებული 1-4 გლიკოზიდური ბმებით.

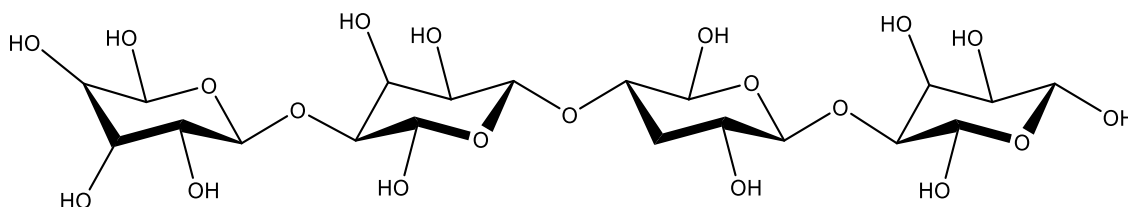
ხის მერქანი შედგება 99% ორგანული და 1% არაორგანული ნივთიერებებისაგან. ორგანული ნივთიერებები შედგება 40-50% ცელულოზისაგან, 20-30% ჰემიცელულოზისაგან (პენტოზანები, ჰექსოზანები და სხვა.) და 20-30% ლიგნინი. ცელულოზა ხასიათდება კრისტალური სტრუქტურით, რაც განაპირობებს მის მაღალ სიმტკიცეს და ჰიდროლიზის მიმართ მედეგობას. რაოდენობრივად მეორე პოლიმერს ჰემიცელულოზა წარმოადგენს, რომელსაც მცენარის ყველა ფენაში ვხვდებით, თუმცა მის კონცენტრაციის ზონად პირველი და მეორე ფენა ითვლება, სადაც შეკავშირებულია ცელულოზასთან და ლიგნინთან. ლიგნინი არის განტოტვილჯაჭვიანი კომპლექსური მოლეკულა, რომელიც ამორფული სტრუქტურით ხასიათება და ასრულებს შემაკავშირებელი აგენტის როლს ბოჭკოს უჯრედსა და ბოჭკოს კედელს შორის. (Ramage, et al. 2017)

ცხრილი 1. მყარი და რბილი მერქნის ბიოპოლიმერული ზოგადი შემადგენლობა

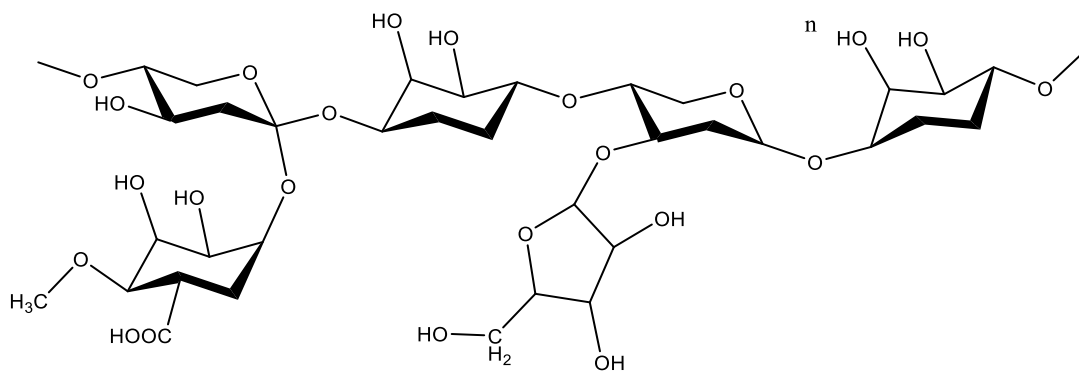
	Softwood	Hardwood
Chemical Composition (wt%)		
Cellulose	40–44	40–44
Hemicellulose	30–32	15–35
Lignin	25–32	18–25
Extractives	5	2
Lignin Linkage Types (number/100 phenylpropane units)		
β -O-4	43–50	50–65
α -O-4	6–8	4–8
β -5 + α -O-4	9–12	4–6
β - β	2–4	3–7
5-5'	10–25	4–10
4-O-5'	4	6–7
β -1	3–7	5–7
C-6, C-2	3	2–3

ცხრილი 1 აღებულია Researchgate.net-დან Sustainable Process for the Depolymerization/Oxidation of Softwood and Hardwood Kraft XLXgnins Using Hydrogen Peroxide under Ambient Conditions, Zaid Ahmad 1, Waleed Wafa Al Dajani 2, Michael Paleologou 2,* and Chunbao (Charles) Xu 1, 16 May 2020

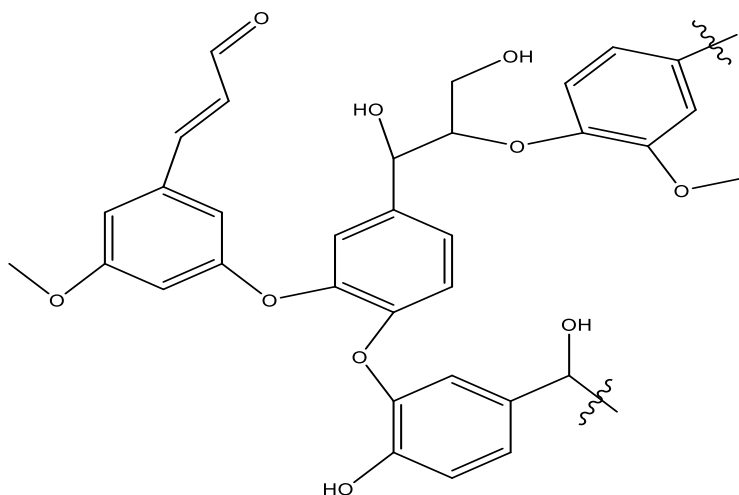
ჰემიცელულოზა შედგება ქსილოზის, გალაქტოზის, მანოზის და არაბინოზის ნაშთებისგან, გააჩნია განტოტვილი უწყესრიგო ამორფული სტრუქტურა და მარტივად ჰიდროლიზდება (Chen 2015). ამორფულობის გამო ხასიათდება დაბალი სიმტკიცით და ჰიდროლიზდება მჟავებითა და ფუძეებით. ბიოპოლიმერების თერმულ ანალიზებში ჩანს, რომ ჰემიცელულოზა, ცელულოზა და ლიგნინის დეკომპოზიცია სხვადასხვა ტემპერატურულ ინტერვალში მიმდინარეობს. პირველ ეტაპზე ჰემიცელულოზის დეკომპოზიცია ხდება 220-315°C, შემდეგ ცელულოზის 300-400°C და ბოლოს ლიგნინის, აღსაღნიშნავია რომ ლიგნინის დეკომპოზიციის ინტერვალი გაცილებით დიდია და 100-900°C-მდე ინტერვალშია. (Li, et al. 2025)



სურათი 1. ცელულოზის ქიმიური სტრუქტურა



სურათი 2. ჰემიცელულოზის ქიმიური სტრუქტურა



სურათი 3. ლიგნინის ქიმიური სტრუქტურა

1.5 შემავსებლის ქიმიური მოდიფიკაცია

კომპოზიციური მასალების კვლევის დროს უცხოური ლიტერატურის გაცნობისას ხშირად შევხვდებით სხვადასხვა მეცნიერების გამოცდილებებს, განსხვავებული მოდიფიკაციების და მეთოდების შემუშავების თვალსაზრისით. ერთ-ერთი ესეთი გამოცდილებაა შემავსებლის ქიმიური მოდიფიკაცია და შესაბამისად შემავსებლის როლის გაზრდა კომპოზიციურ მასალის მექანიკურ მახასიათებლებში, რაც ჩვენი მხრიდანაც იქნა გათვალისწინებული. მაგალითისთვის, მერქნის ნახერხი უნდა იყოს

გამოშრობილი მასალად ჩამოყალიბების დაწყებამდე, რათა მიღწეულ იქნას მაქსიმალური მექანიკური სიმტკიცე - მახასიათებლები. ცნობილია ტენის უარყოფითი გავლენები მასალის დამზადების პროცესებში, ხშირად შემავსებლის მაღალი ტენიანობა ხდება დეფორმაციების, ფორების, ბზარების წარმოქმნის და სხვა უარყოფითი გავლენის მიზეზი. შემავსებლის ქიმიურმა და ფიზიკურმა მოდიფიკაციებმა შესაძლებელია გააუმჯობესონ კომპოზიციური მასალების მექანიკური თვისებები. ერთ-ერთი მეთოდი შემდგენიარია: დაქუცმაცებული მერქნის თერმულად 80°C -ზე გამოშრობა და 10% NaOH ხსნარით დამუშავება, რაც აუჯობებს ბოჭკოს ხარისხს. აცეტილაცია: ბოჭკოს დამუშავება მმარმჟავით და მმარმჟავის ანჰიდრიდით, რაც პასუხისმგებელია შემავსებლის ხარისხის და სხვადასხვა თვისების გაუმჯობესებაზე. ბენზილაცია: დაქუცმაცებული მერქნის დამუშავება 10% NaOH ხსნარით და შემდგომ ბენზოილის ქლორიდით, რაც საბოლოო ჯამში ამცირებს შემავსებლის ჰიდროფილურობას. შემავსებლის პეროქსიდული დამუშავება დიკუმილის ზეჟანგის და აცეტონის ხსნარით, კალიუმის პერმანგანატის და აცეტონის ხსნარით დამუშავება, რომელიც ბენზილაციის მსგავსად ამცირებს შემავსებლის ჰიდროფილურობას და სილანური დამუშავება, რითიც უმჯობესდება მასალის ზედაპირის თვისებები და ა.შ (La Mantia და Morreale 2011) საბოლოო ჯამში ამგვარი მანიპულაციები აუმჯობესებენ მასალის მექანიკურ თვისებებს.

1.6 კომპოზიციური მასალების მოდიფიკაცია ანტიპირენებით

როგორც უკვე აღინიშნა, მერქან-პოლიმერულ კომპოზიციურ მასალებს შესწევთ უნარი შეამცირონ გარემოზე მიყენებული ზიანი და ჩაანაცვლონ მრავალი მასალა, თუმცა აალების მიმართ ნაკლები მედეგობა ზღუდავს გამოყენების არეალს. ამრიგად, წვის მიმართ მედეგობის გაზრდისთვის მასალას სხვადასხვა წვის შემაფერხებელი თვისების მქონე ქიმიური ნივთიერებებით ამუშავებენ. ბოლო წლებში მნიშვნელოვანი აქცენტი გაკეთდა სხვადასხვა მეტალების, ფოსფორის, ბორის, სილიციუმის და ნახშირბადის შემცველი ცეცხლშემნელებლების გამოყენებაზე (Chunxiang Ding და De 2022).

ცეცხლის ჩახშობის პრევენციისთვის იყენებენ ორ მეთოდს: ზედაპირის დაფარვის და სისტემაში ხსნარის შეყვანის მეთოდს. ზედაპირის დაფარვის მეთოდის დროს იყენებენ

ისეთ ხელოვნურ საფარს, რომელსაც შესწევს უნარი ჟანგბადის „ხელმისაწვდომობა“ შეზღუდოს. ესეთი ნივთიერებები ტემპერატურის მატებისას გამოყოფენ ნახშირის ქაფს, რომელიც კომპოზიტს გარს ეკვრის და დამატებით იცავს მასალას აალებისა და გახურებისაგან, ამასთანავე ნაწილობრივ დეკორატიული დატვირთვაც გააჩნიათ. მეორე გზას სისტემაში ხსნარის შეყვანის მეთოდი წარმოადგენს. ამგვარ ცეცხლის გავრცელების შემაფერხებელ ყველაზე მეტად გამოყენებად ნივთიერებებს ფოსორ-აზოტის, ბორის, ჰალოგენების და მეტალთა ოქსიდები წარმოადგენენ. მათი მთავარი დანიშნულებაა შეზღუდონ ან მთლიანად შეაჩერონ ცეცხლის გავრცელება. (Chunxiang Ding და De 2022) ცნობილია არაორგანული ანტიპირენების დიდი რაოდენობა, მათ შორის მაგნიუმის ჰიდროქსიდი, ალუმინის ჰიდროქსიდი, ფოსფატები და ჰიდროფოსფატები, ასევე მარილთა ჰალოგენიდები, ალუმინი/მაგნიუმის ჰიდროქსიდი, ამონიუმის პოლიფოსფატი (APP), თუთიის ბორატი, ზოგი ინერტული შემავსებელი SiO_2 , CaCO_3 და ა.შ. (Malte Pries 2013)

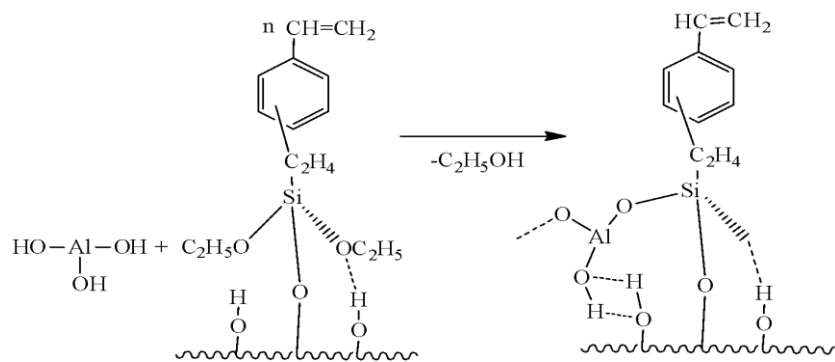
კვლევის ფარგლებში მივიღეთ კომპოზიციური მასალები, სადაც ანტიპირენად გამოვიყენეთ ალუმინის ჰიდროქსიდი - $\text{Al}(\text{OH})_3$ ან $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$, როგორც ყველაზე იაფი და ეკოლოგიურად უსაფრთხო ნივთიერება, რომელიც მაღალ ტემპერატურაზე დაშლისას არ წარმოქმნის ეკოლოგიურად არასუფთა ნივთიერებებს, რომლის დაშლის პროდუქტებს ალუმინის ოქსიდი და წყალი წარმოადგენს.

1.6.1 ანტიპირენი - ალუმინის ჰიდროქსიდი

ალუმინის ჰიდროქსიდის განსაკუთრებით ორი მახასიათებელია საგულისხმო, ესენია: აალების შენელების უნარი და ულტრაიისფერი სხივების მცირედ შთანთქმა. აღნიშნული ალუმინის ჰიდროქსიდი სამი კრისტალური ფორმით არსებობს, ალფა, ბეტა და გამა ფორმებით. გამა - ალუმინის ჰიდროქსიდი იგივე გიბსიტია ან მეორენაირად ჰიდრარგილიტი, ალფა - ალუმინის ჰიდროქსიდი ბაიერიტის ან კორუნდის სახელითაა ცნობილი და ბეტა - ალუმინის ჰიდროქსიდი ნორდსტრანდიტის. ჩვენს შემთხვევაში ანტიპირენად გამოვიყენეთ - გიბსიტი, რომელიც თეთრი ფერისაა, უსუნო, უგემო ფხვნილისებური მასაა, მაღალი სისუფთავის (99.7%). თეთრი კრისტალური ნივთიერებაა

პასიური ქიმიური თვისებებით, ხასიათდება არატოქსიკური თვისებებით და მაღალეფექტური ალის შემაფერხებელი აგენტია. ალუმინის ჰიდროქსიდი აქტიურად გამოიყენება, როგორც ალის შემაფერხებელი დანამატი მინის, კერამიკის, პოლივინილქლორიდის და სხვა პოლიმერული მასალების წარმოებაში. ალუმინის ჰიდროქსიდი 300°C ფარგლებში გამოყოფს წყალს, ამის გამო ხდება მასალის გაგრილება და წვის შენელება. მას შემდეგ, რაც ტემპერატურა მიაღწევს პიკურ მდგომარეობას და ალუმინის ჰიდროქსიდი დაიშლება, წარმოქმნება ბარიერი, რომელიც ანელებს ჟანგბადის ნაკადს. მართალია ალუმინის ჰიდროქსიდი უზრუნველყოფს აალების შემცირებას, თუმცა დიდი ოდენობით გამოყენება გავლენას ახდენს მასალის მექანიკურ და რეოლოგიურ მახასიათებლებზე. ერთ-ერთი მაგალითია მასალის დინების სიჩქარის შენელება და შესაბამისად სიბლანტის გაზრდა. ალუმინის ჰიდროქსიდი დადებითად მოქმედებს დიელექტრიკულ მახასიათებლებზე და წყლის მიმართ მედეგობაზე. ალუმინის ჰიდროქსიდის ძირითადი ნაკლი არის ის, რომ მისი გამოყენება კომპოზიციაში დიდი რაოდენობითაა საჭირო, დაახლოებით 40-65%, რათა ეფექტი მაქსიმალური იყოს და შეამციროს აალება პოლიმერებში (V_i კლასიფიკაცია UL94 სტანდარტის მიხედვით), რაც რასაკვირველია უარყოფითად მოქმედებს მასალის ზოგიერთ მექანიკურ მახასიათებელზე (Wypych 2016).

გარდა ამისა ალუმინის ჰიდროქსიდი სპეციალურად იქნა შერჩეული, რადგან ცნობილია, რომ ალუმინის ჰიდროქსიდი ეკოლოგიურად სუფთაა და არ ახდენს უარყოფით გავლენას ადამიანის ჯანმრთელობაზე, ამასთანავე თეორიულად შესაძლებელია რეაქციაში შევიდეს ჩვენს მიერ გამოყენებულ შემკვრელთან ეთილის სპირტის გამოყოფით და/ან წყალბადური ბმების წარმოქმნით ისევე, როგორც მე-8 სურათზეა მოცემული:



სურათი 4. ალუმინის ჰიდროქსიდის მოსალოდნელი რეაქციები შემკვრელისა და ცელულოზის ზედაპირთან

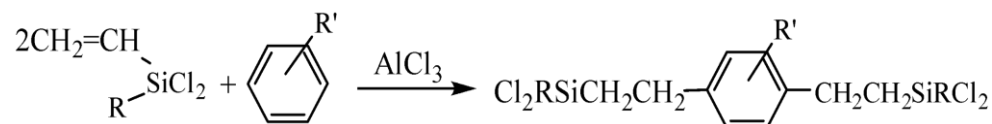
შესაძლებელია ანტიპირენის ჰიდროქსილის ჯგუფის ურთიერთქმედება წარიმართოს გარდაქმნის უფრო ღრმა სტადიებზე მიმდინარე რეაქციებში. კომპოზიციურ მასალებში ალუმინის ჰიდროქსიდი აიღებოდა 0.1 - 10% რაოდენობით.

1.6.2 ანტიპირენი - ტეტრაეთოქსისილანი

დამატებით, თერმომედეგობის და უწყალობის გაზრდის მიზნით კომპოზიციურ მასალებში შევიტანეთ ტექნიკური ხარისხის ტეტრაეთოქსისილანი, იგივე ეთილსილიკატი, სხვადასხვა რაოდენობით. ტეტრაეთოქსისილანი არ არის ტიპური ანტიპირენი, მაგრამ მას შეუძლია გარკვეული პირობებში ხელი შეუწყოს მასალის ცეცხლმედეგობის გაუმჯობესებას. ტეტრაეთოქსისილანი ჰიდროლიზისა და კონდენსაციის გზით გარდაიქმნება სილიკატად, სწორედ ეს სილიკატური ფენა ქმნის გარკვეულ ბარიერს ჟანგბადისთვის და მედეგს ხდის მასალას მაღალი ტემპერატურის მიმართ. მასალის ზედაპირის მოდიფიცირებისთვის, კომპოზიციაში გამოყენებული ეთილსილიკატი უზრუნველყოფს მასალის ჰიდროფობურობასა და სტრუქტურულ სტაბილურობას, რაც დამატებით აფერხებს ნესტისა და ბიოლოგიური დეგრადაციის განვითარების რისკებს, ზედაპირული საფრები ეთილსილიკატურ შემაკავშირებელზე მიეკუთვნება არაორგანულ საფარს, ცინკით გამდიდრებული არაორგანული საფრები ეთილსილიკატის ბაზაზე გამოიყენება რკინის კოროზიისაგან დასაცავად (Malte Pries 2013).

1.7 ალკილირება - ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი

ფრიდელ-კრაფტის რეაქციების გამოყენების შესახებ პირველი ინფორმაცია მოწოდებული იქნა კანდრიანოვისა და მისი თანამშრომლების მიერ (А. Ж. К.А. Андрианов, XXXXXXXX 1961) (А. Ж. К.А. Андрианов, XXXXXXXX 1962) (А. Ж. К.А. Андрианов 1967). მათ შეისწავლეს ვინილორგანოდიქლორსილანის და ვინილტრიქლორსილანის (ფრიდელ-კრაფტის) რეაქციები უწყლო ალუმინის ქლორიდის თანაობისას ბენზოლთან და მის წარმოებულებთან, მორეაგირე კომპონენტების 2:1 თანაფარდობით, რის შედეგადაც მიიღებოდა ბისილილწარმოებულები შემდეგი სურათი 5-ის მიხედვით:

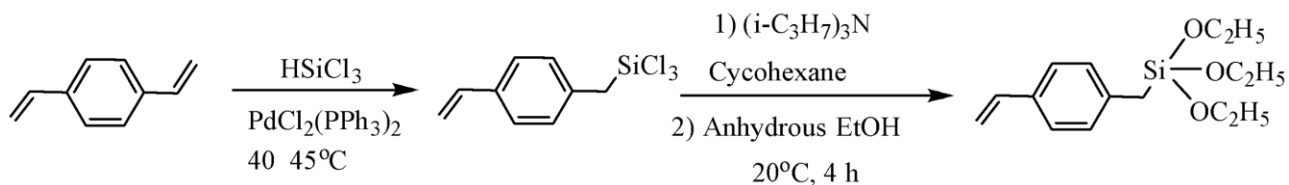


სურათი 5. ვინილორგანოდიქლორსილანის ფრიდელ-კრაფტის რეაქცია ბენზოლთან და მის წარმოებულებთან

სადაც R-Me, Cl; R'=CH₃, H, Cl.

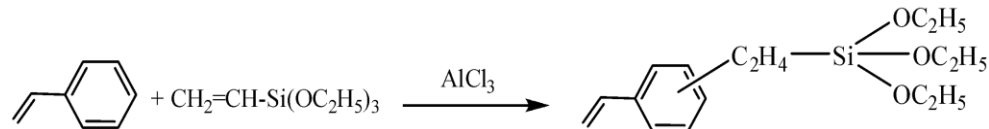
დისილილ წარმოებულების გამოსავალი აღნიშნულ რეაქციაში შეადგენდა 50%-ს. ავტორების მიერ აღწერილია, რომ მიიღება, როგორც თანამდე პროდუქტი, ასევე მონოსილილ წარმოებულები R'C₆H₄SiRCl₂.

ტრიალკოქსი(4-ვინილფენეთილ)სილანის (StSi(OR)₃) ტიპის მონომერები სინთეზირებულია ორსაფეხურიანი რეაქციების საშუალებით: 1,4-დივინილ ბენზოლის ჰიდროსილილირების რეაქცია ტრიქლორსილანთან, შემდგომი ეთერიფიკაციის რეაქციებით პირველადი სპირტების თანაობისას (Swanson, Polybutadiene graft copolymers as coupling agents in rubber compounding 2016) (Guy, Pevere and Vidal 2012). ტრიალკოქსი ჯგუფის შემცველი ნაერთების გამოსავალი არის დაახლოებით 50%.



სურათი 6. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის მიღების სქემა

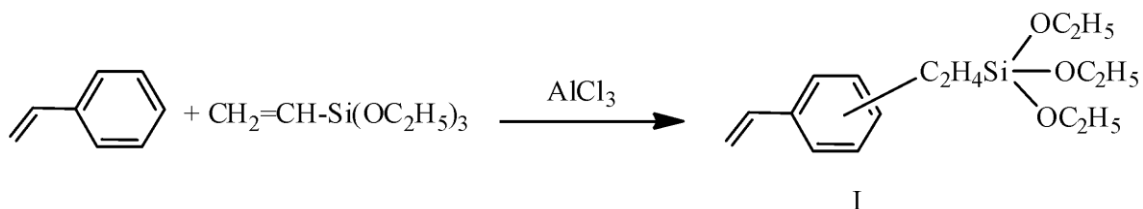
სილილირებული სტიროლის შესახებ პირველი ინფორმაცია შემოთავაზებული იყო ავტორების მიერ (G. Titvinidze 2006). კერძოდ ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი მიიღეს სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტსის რეაქციებით, მონაწილე ნივთიერებების 1:1 თანაფარდობით, სადაც ნაჩვენებია, რომ სილილირებული სტიროლის მიღება შესაძლებელი იყო სტიროლის ფუნქციონალიზაციით ვინილის შემცველი სილანებით, ლუისის მჟავების (FeCl_3 და AlCl_3) თანაობისას (G. Titvinidze 2006). დადგენილი იყო, რომ სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანით ალკილირების რეაქციის გამოსავალი ფრიდელ-კრაფტსის მეთოდით უფრო მაღალია AlCl_3 - ის გამოყენებისას, ვიდრე FeCl_3 -ის შემთხვევაში.



სურათი 7. სტიროლის და ვინილტრიეთოქსი სილანის რეაქცია, უწყლო ალუმინის ქლორიდის თანაობისას

ერთსაფეხურიანი გზით წარმართული რეაქციის დროს მივიღეთ ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის იზომერების ნარევი, რომლის უპირატესი პროდუქტის დადგენისთვის გამოვიყენეთ სიმკვრივის არაემპირული ფუნქციური თეორია, გავიგეთ თუ რა მიმართულებებით შესაძლოა წარიმართოს რეაქცია. არაემპირული სიმკვრივის ფუნქციური თეორიით გათვლის მეთოდი ფართოდაა გავრცელებული ამგვარ კვლევებში, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ კარგად ცნობილი ენერგეტიკული დელოკალიზაცია და სტატიკური კორელაციური შეცდომები ზღუდავს მეთოდის სიზუსტეს.

ვინილტრიეთოქსისილანის ალკილირების რეაქცია სტიროლთან კატალიზატორის უწყლო ალუმინის ქლორიდის თანაობისას, მორეაგირე კომპონენტების 1:1 თანაფარდობით. რეაქცია მიმდინარეობს სურათი 8-ის მიხედვით (G. Titvinidze 2006):



სურათი 7. ვინილტრიეთოქსისილანის ფრიდელ-კრაფტის ალკილირების რეაქცია სტიროლთან სინთეზირებული ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი წარმოადგენს გამჭვირვალე სისტემას.

თავი II

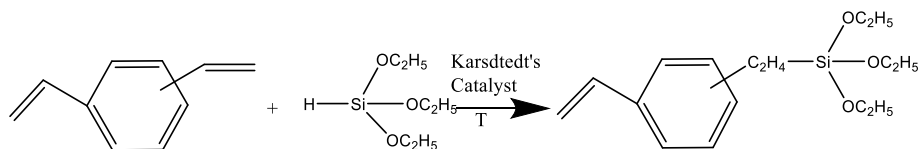
ექსპერიმენტული მონაცემების განსჯა

2.1 სილილირებული სტიროლის მონომერის ფიზიკური კვლევები

2.1.1 მოლეკულური მასა და მოლეკულური რეფრაქცია

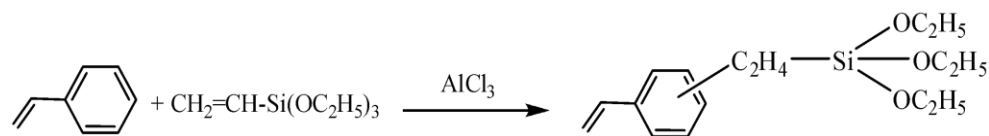
კვლევის ფარგლებში შევისწავლეთ ორი სხვადასხვა ბიომეცხეხელის - ფიჭვის ხის ნახერხის და ჭადრის ფოთლის ფქვილის ბაზაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების ფიზიკური და მექანიკური თვისებები, რომელშიც შემკვრელ ნივთიერებად გამოვიყენეთ ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი, რომელიც ორი სხვადასხვა გზით მივიღეთ. მიღებული ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის მონომერი შევიყვანეთ ფიჭვის ნახერხის სუპრამოლეკულურ მატრიცაში ბენზოილის ზეჟანგის თანაობისას, რა დროსაც ვფიქრობდით, რომ ადგილი ექნებოდა ვინილური ჯგუფის გახსნას, შესაბამისად სილილირებული პოლისტიროლი დამატებით მარმირებელი აგენტის როლს შეასრულებდა და კომპოზიციურ მასალას გაუმჯობესებდა მექანიკურ მახასიათებლებს, ამგვარი პროცესი ლიტერატურაში *in-situ* პოლიმერიზაციის სახელითაა ცნობილი.

ტრიეთოქსისილანის ჰიდროსილილირების რეაქცია დივინილბენზოლთან კარსტედტის კატალიზატორის თანაობისას. ჰიდროსილილირების რეაქცია ხორციელდება შემდეგი სქემის მიხედვით:



სურათი 9. დივინილბენზოლის ჰიდროსილილირების რეაქცია

მეორე გზით წარმართეთ ერთსაფეხურიანი რეაქცია, რა დროსაც სტიროლის მონომერზე ვიმოქმედეთ ვინილტრიეთოქსისილანით, ლუისის მჟავის - უწყლო ალუმინის ქლორიდის თანაობით, რა დროსაც მივიღეთ ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის იზომერების ნარევი, რომლის უპირატესი პროდუქტის დადგენისთვის გამოვიყენეთ სიმკვრივის ემპირული ფუნქციური თეორია.



სურათი 10. ტიროლის და ვინილტრიეთოქსი სილანის რეაქცია, უწყლო ალუმინის ქლორიდის თანაობისას

თავდაპირველად ვვარაუდობდით რომ, ტიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი, ვინილის ჯგუფის ხარჯზე შეძლებდა პოლიმერის წარმოქმნას და კომპოზიციურ მასალაში მარმირებელი აგენტის როლს შეასრულებდა, თუმცა ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი რადიკალური მექანიზმით, ბენზოილის ზეჟანგის კატალიზატორის თანაობისას მცირედ, დაახლოებით 14% განიცდის პოლიმერიზაციას (Swanson, POLYBUTADIENE GRAFT COPOLYMERS AS COUPLING AGENTS IN RUBBER 2016). მამასადამე, მასალის მექანიკური სიმტკიცის გაზრდისთვის ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი ვაურთიერთქმედეთ სტიროლის მონომერთან 1:9 თანაფარდობით და მივიღეთ სტატისტიკური ტიპის თანაპოლიმერი.

სინთეზირებული ნივთიერების სტრუქტურა და შედგენილობა დადგენილია მოლეკულური მასის და მოლეკულური რეფრაქციის განსაზღვრით, FTIR, ¹H და ¹³C ზმრ სპექტრების საფუძველზე. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ზოგიერთი ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები მოცემულია ცხრილში 2.

ცხრილი 2. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ზოგიერთი ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები*

#	ნივთიერება	T დუღ °C, P=10 mmHg	გამოსავალი , %	nd ²⁰	D ₄ ²⁰	M*	M _{RD} **
I	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}_2\text{H}_4-\text{Si} \begin{matrix} \nearrow \text{OC}_2\text{H}_5 \\ \text{---} \text{OC}_2\text{H}_5 \\ \searrow \text{OC}_2\text{H}_5 \end{matrix}$	85-90	55	1,4340	0,8987	$\frac{294}{275}$	$\frac{84.9}{84.3}$

მოლეკულური მასა განსაზღვრულია ებულიოსკოპიური მეთოდით

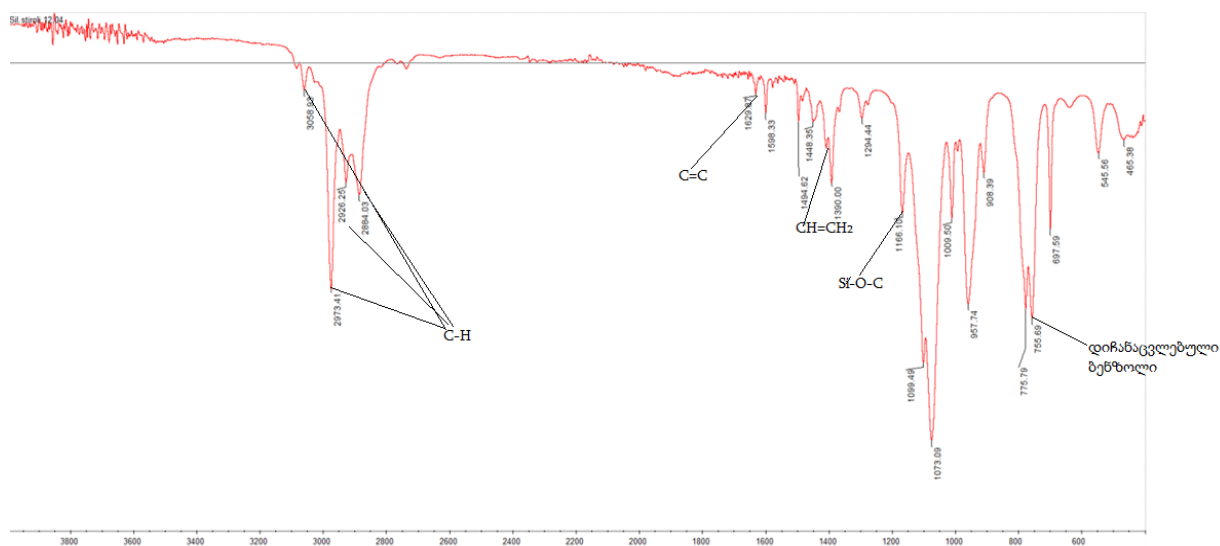
*მოლეკულური რეფრაქცია. მრიცხველში გათვლილი მნიშვნელობა, მნიშვნელში ნაპოვნი.

როგორც მე-10 სურათიდან ჩანს რეაქციის წარმართვა შესაძლებელია, როგორც ორთო ასევე პარა მიმართულებით, ან ორივე მიმართულებით იზომერული მიერთების პროდუქტების წარმოქმნით.

2.1.2 სილილირებული სტიროლის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული კვლევა

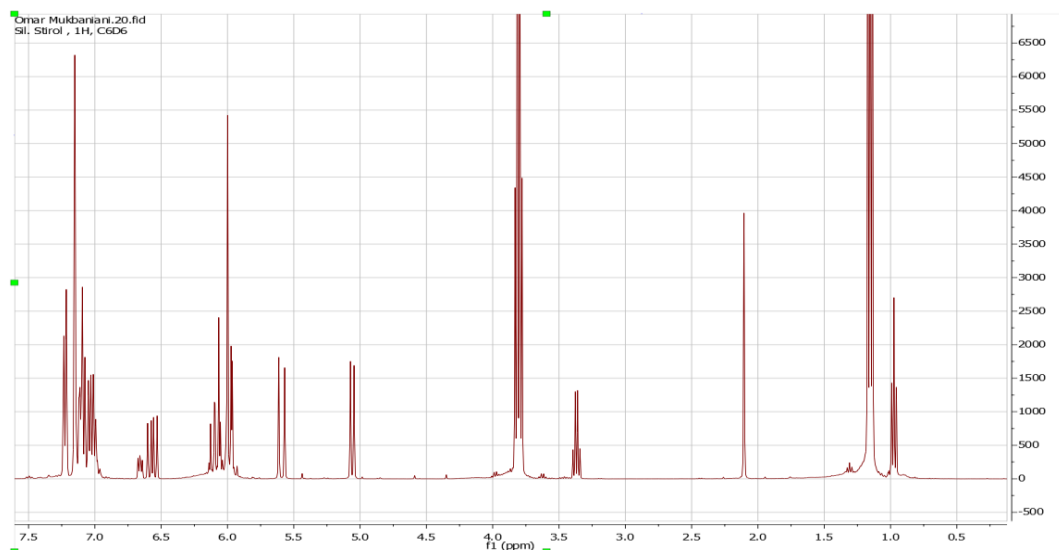
ფურიე-გარდაქმნის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული კვლევა ჩავატარეთ Nicolet Nexus 470 მოდელზე (MCTB დეტექტორზე (კალიუმის ბრომიდით)). ^1H და ^{13}C ბირთვულ მაგნიტური სპექტრები გადავიღეთ Bruker ARX400 NMR სპექტრომეტრზე 400-MHz სიხშირეზე, სადაც გამხსნელად გამოყენებული იყო დეიტერირებული ქლოროფორმი - CDCl_3 .

ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის იწ სპექტრში (გრაფიკი 1.) შეიმჩნევა შთანთქმის ზოლები 755 და 776 cm^{-1} უბანში დამახასიათებელი დიჰანაცვლებული ბენზოლის ბირთვისათვის (B. C. Smith 2016). ასევე შეიმჩნევა შთანთქმის ზოლები 1166 cm^{-1} უბანში დამახასიათებელი (Si-O-C) ბმისათვის, 1270 (Si-C), 1406 ($\text{CH}=\text{CH}_2$), და 2800-3100 cm^{-1} (C-H). სპექტრში ასევე არის არომატული ბირთვის $\text{C}=\text{C}$ დამახასიათებელი შთანთქმის ზოლი 1650 cm^{-1} უბანში.

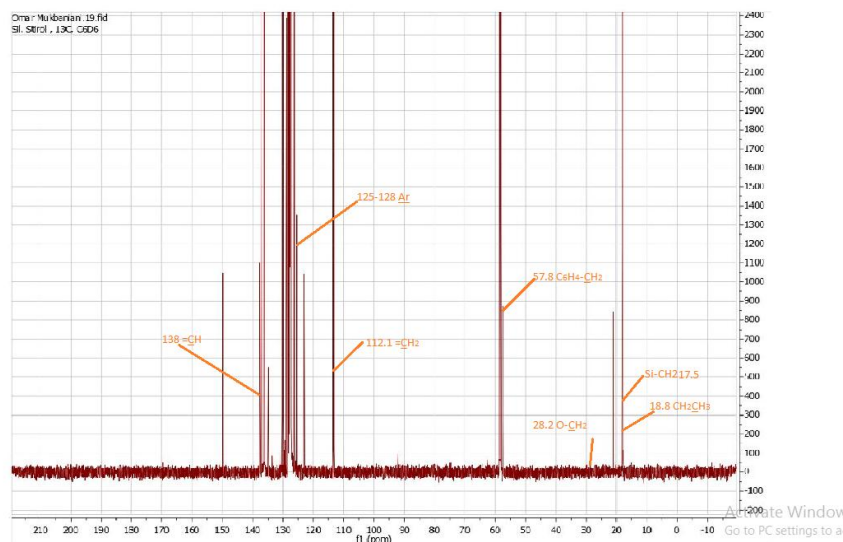
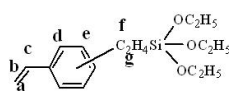


გრაფიკი 1. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის იწ სპექტრი

2.1.3 სილილირებული სტიროლის NMR კვლევა



გრაფიკი 2. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ^1H ზმრ სპექტრი



გრაფიკი 3. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ^{13}C ზმრ სპექტრი

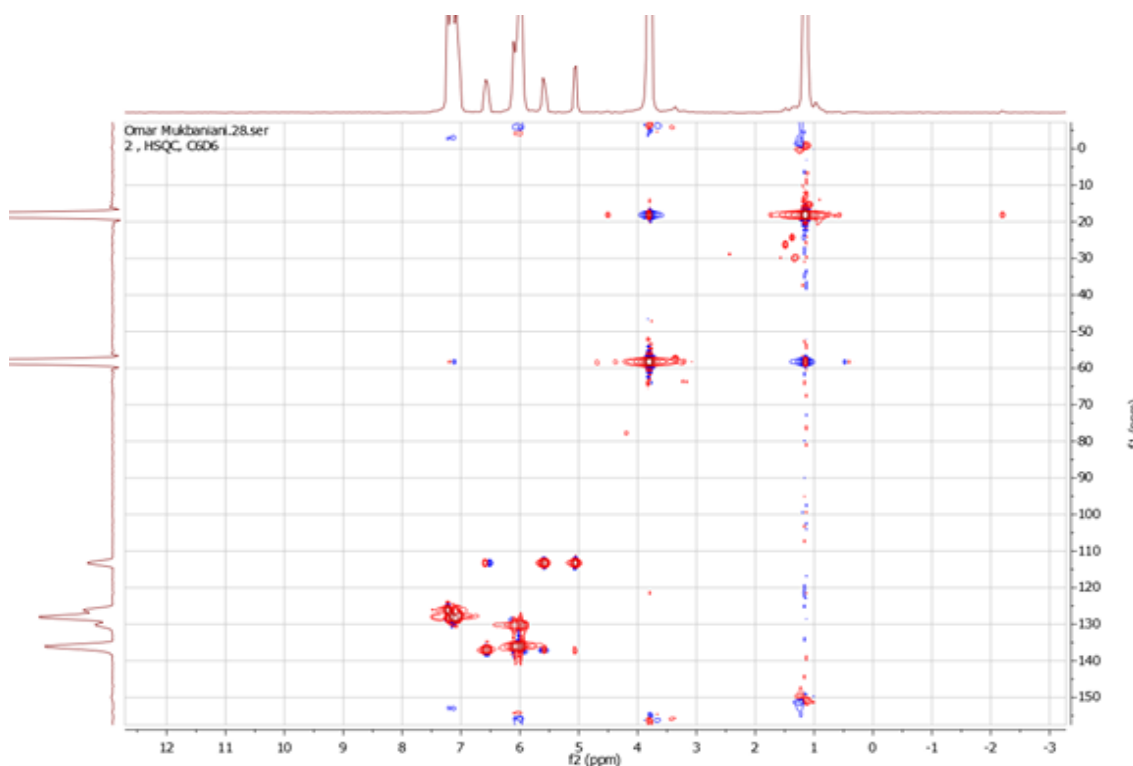
ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ^1H ზმრ სპექტრში (დეიტერირებული ბენზოლი), შეიმჩნევა სიგნალები ქიმიური გადაადილებით δ (ვმნ): $\delta = 0.8-0.99$ (2H, t – Si-CH₂); 1.1 – 1.3 (9H, m – CH₂CH₃); 2.2 – 2.3 (2H, C₆H₄-CH₂); 3.4 – 3.6, 3.8 (2H, O – C H₂); ფენილის პროტონებისათვის 6.9 – 7.2; 5.1, 5.2, 5.6 და 5.6 (2H, d - =CH₂); 5.9 – 6.6 (m - =CH) (გრაფიკი 2). აღნიშნული სიგნალების ქიმიური გადაადილებები ახლოა ავტორების მიერ მოწოდებულ მნიშვნელობასთან (ChemBioDraw Ultra 12 n.d.) ვფიქრობთ, რომ

ალკილირება მიმდინარეობს იზომერული ნაერთების წარმოქმნით და ადგილი აქვს ქიმიური წანაცვლებების ზედდებას.

2.1.4 სილილირებული სტიროლის ორგანოზომილებიანი ბირთვული მაგნიტურ-რეზონანსული სპექტროსკოპიული კვლევა

2-D NMR სპექტრის გადაღებულ იქნა Avance III 400 MHz-ით. ყველა სპექტრის გადაღებისას გამოყენებული იყო დეიტერირებული ბენზოლი.

მე-4 გრაფიკზე წარმოდგენილია ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ჰეტერო Cozy ბმრ სპექტრი, სადაც ^{13}C ბმრ და ^1H ბმრ სპექტრი კორელაციაშია ერთმანეთთან.



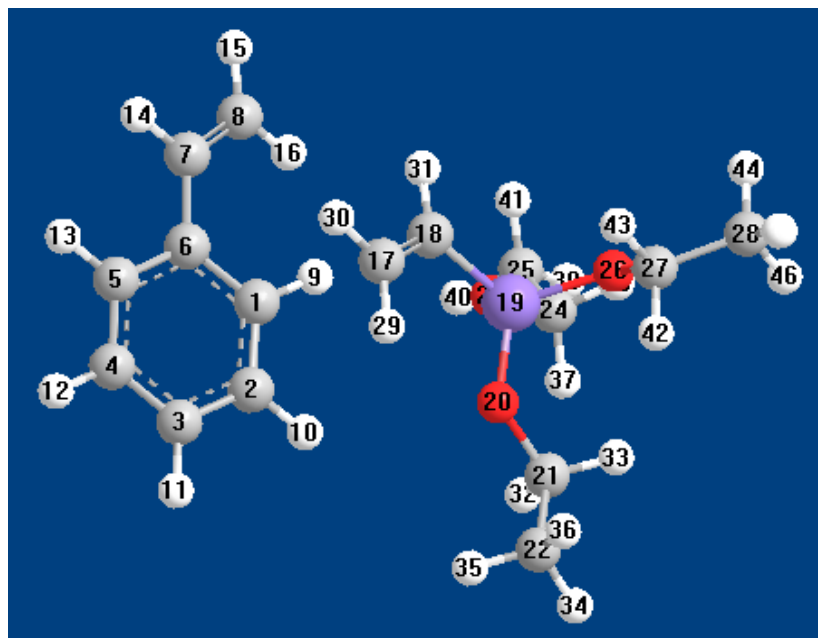
გრაფიკი 4. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ჰეტერო Cozy ბმრ სპექტრი ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ^1H და ^{13}C ბრ სპექტრების მიხედვით ვფიქრობთ, რომ ალკილირების რეაქცია მიმდინარეობს ორივე მიმართულებით. ამასთანავე ბმრ სპექტრის სიგნალების მიკუთვნება პარა ან ორთო-მიერთების პროდუქტებისათვის გაძნელებულია. ვინაიდან ადგილი აქვს ამ სიგნალების ურთიერთ გადაფარვას. ბმრ სპექტრები შევისწავლეთ სხვადასხვა პროგრამებით: ChemBioDraw ULTRA, Mestre Nova,

და ^1H ბმრ სპექტრების იმიტირებული შესწავლის მეთოდებით, რომელთა გამოყენებით დადასტურებულია სიგნალების გადაფარვა.

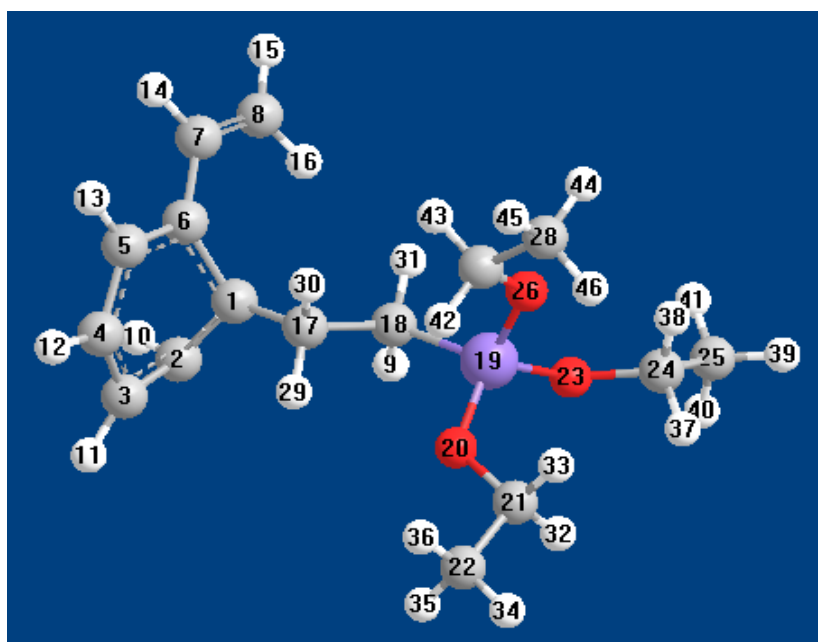
2.1.5 სილილირებული სტიროლის სტრუქტურის დადგენა სიმკვრივის ემპირული ფუნქციური თეორიის გამოყენებით

ალკილირების რეაქციის დეტალური შესწავლისათვის ჩვენ გამოვიყენეთ სიმკვრივის ემპირული ფუნქციური თეორია (DFT) (Laikov D.N. 2005). აღნიშნული ტექნიკა ფართოდ გამოიყენება, როგორც მოლეკულების, ასევე მასალების მიმართ, მაგრამ კარგად ცნობილი ენერგეტიკული დელოკალიზაციისა და სტატიკური კორელაციის შეცდომები პრაქტიკულ მიმოცვლით-კორელაციურ მიახლოებებში, ზღუდავს რაოდენობრივ სიზუსტეს (Zhao and Truhlar 2011) (Roksana Wałęsa and Broda 2015). ქვანტურ-ქიმიური გათვლები შესრულებულად გამოყენებულ იქნა პროგრამა „Priroda-04“. (Laikov D.N. 2005)

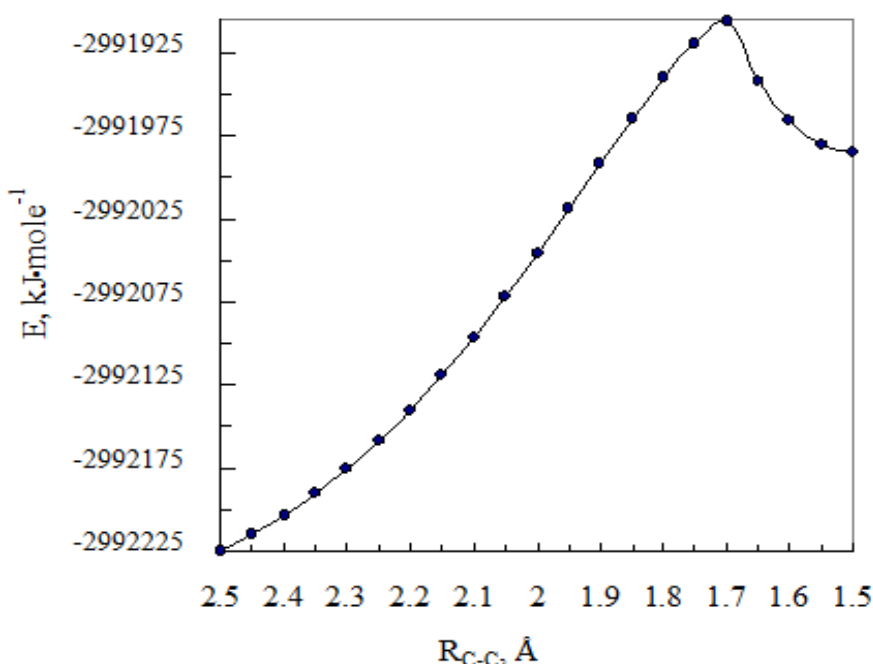
განხილულ იქნა მიერთების რეაქციები ორთო-, მეტა- და პარა-მდგომარეობებში (Kirste 2016)]. მანძილი ნახშირბადის ატომებს შორის ($\text{C}_1\text{-C}_{17}$, $\text{C}_2\text{-C}_{17}$, $\text{C}_3\text{-C}_{17}$) და ნახშირბადისა და წყალბადის ატომებს შორის ($\text{H}_9\text{-C}_{18}$, $\text{H}_{10}\text{-C}_{18}$, $\text{H}_{11}\text{-C}_{18}$) აღებულ იქნა 1.0 Å-ით მეტი, ვიდრე ბმის მანძილი საბოლოო პროდუქტში. მანძილების ცვლილება ატომებს შორის ხდებოდა 0.05 Å-ის ინტერვალით. სისტემების საწყისი მდგომარეობები მოცემულია სურათებზე 1, 3 და 5, ხოლო საბოლოო მდგომარეობები სურათებზე 2, 4 და 6. სისტემების ენერგიის ცვლილების (ΔE) დამოკიდებულება ატომებს შორის მანძილზე მოცემულია გრაფიკებზე 5, 6 და 7.



სურათი 11. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტსის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საწყისი მდგომარეობა (ორთო მიერთება)



სურათი 12. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საბოლოო მდგომარეობა (ორთო მიერთება)

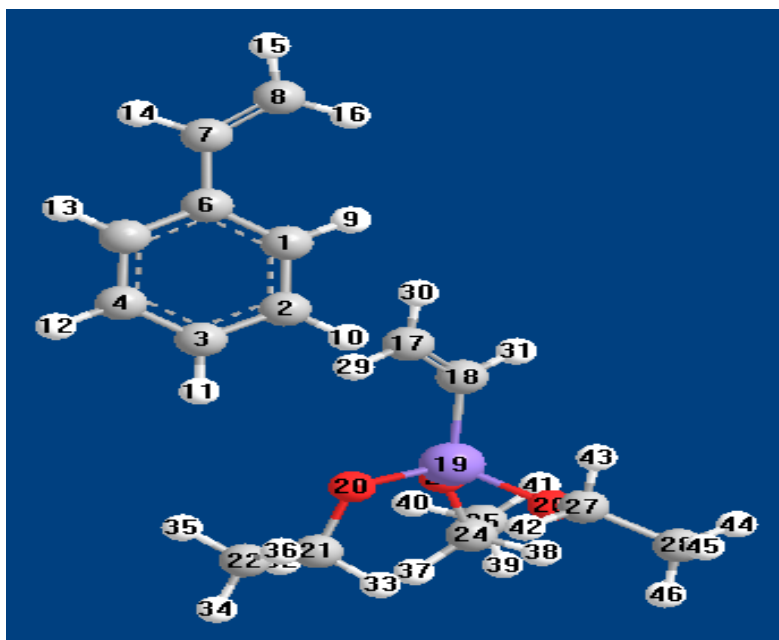


გრაფიკი 5. სისტემის ენერგიის ცვლილების დამოკიდებულება (ΔE) C_1 - C_{17} ნახშირბადის ატომებს შორის მანძილზე (R_{C-C}) სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის მოდელურ რეაქციაში (ორთო მიერთება)

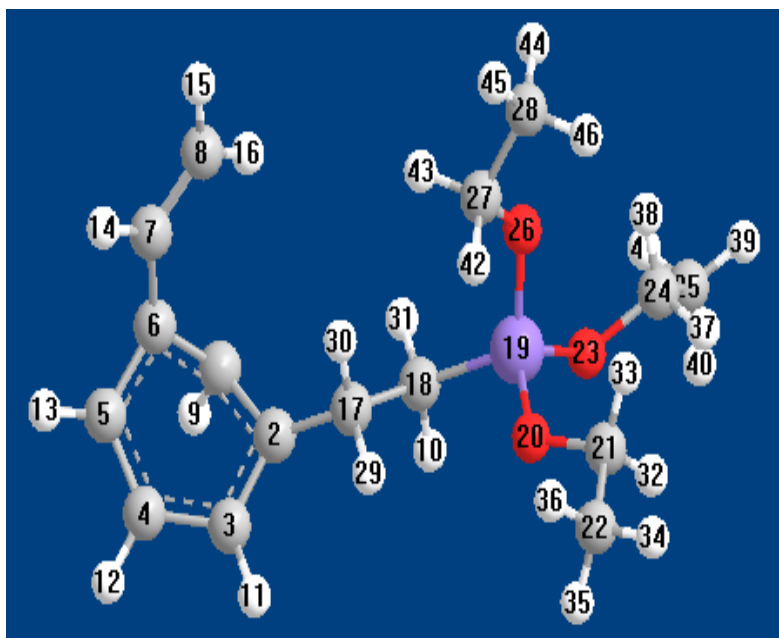
როგორც მე-5 გრაფიკიდან ჩანს, ნახშირბადის C_1 ატომის მიახლოებისას ნახ-შირბადის C_{17} ატომთან $R_{C_1-C_{17}} = 1.7 \text{ \AA}$ მანძილამდე, სისტემის ენერგია იზრდება. ერთდროულად ბმის რიგი C_1 და C_2 ატომებს შორის სტიროლის მოლეკულაში მცირდება 1.30-დან 0.99-მდე, ხოლო C_1 და C_6 ატომებს შორის 1.42-დან 1.22-მდე. ასევე მცირდება ბმის რიგი ნახშირბადის C_1 ატომსა და წყალბადის H_9 ატომს შორის (0.89-0.51) და შეიმჩნევა ახალი ბმების წარმოქმნა ($P_{C_1-C_{17}} = 0.73$ და $P_{C_{18}-H_9} = 0.43$). ორმაგი ბმა გადადის ერთმაგ $C-C$ ბმაში. წყალბადის ატომი სრულად წყდება ნახშირბადის C_1 ატომს ($P_{C_1-H_9} = 0.00$) და უერთდება ნახშირბადის C_{18} ატომს ($P_{C_{18}-H_9} = 0.93$). აქტივაციის ენერგია $\Delta E^* = 318.25 \text{ კჯ/მოლი}$, ხოლო რეაქციის სითბური ეფექტი $\Delta E = 239.75 \text{ კჯ/მოლი}$. როგორც ვხედავთ, რეაქცია ენდოთერმულია.

იმის გათვალისწინებით, რომ სისტემაში წარმოდგენილია 4 სარეაქციო ცენტრი [გაწყვეტილი ბმები (2): C_1-H_9 , $C_{17}=C_{18}$; წარმოქმნილი ბმები (2): C_1-C_{17} , $C_{18}-H_9$], აღნიშნული

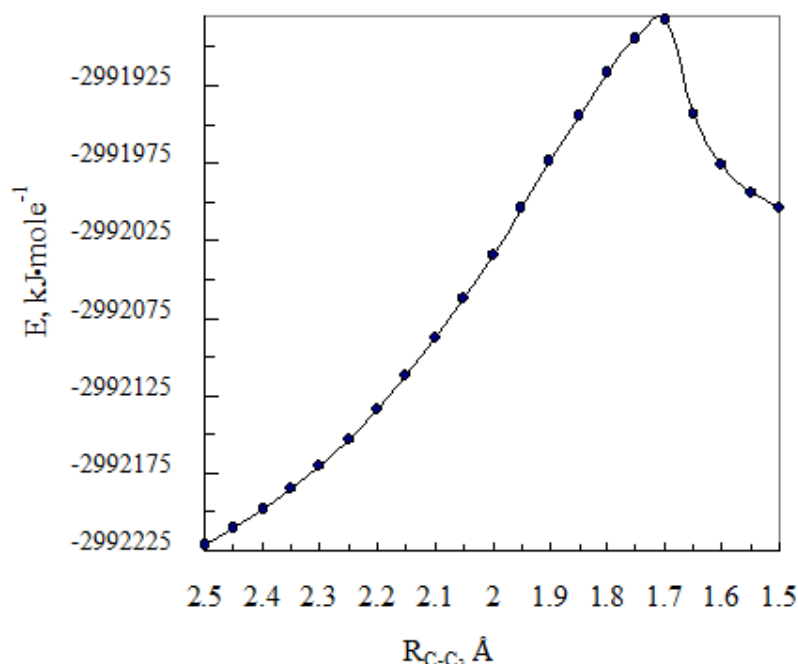
აქტივაციის ენერგია უნდა გაიყოს 4-ზე. ამ შემთხვევაში ერთ სარეაქციო ცენტრზე გაანგარიშებული აქტივაციის ენერგია $\Delta E^\ddagger = 318.25 \text{ კჯ/მოლი}/4 = 79.56 \text{ კჯ/მოლი}$, რაც იმას ნიშნავს, რომ მიღებული მნიშვნელობა შეესაბამება ქიმიური რეაქციების მიმდინარეობის ენერგეტიკულ მახასიათებელს.



სურათი 13. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საწყისი მდგომარეობა (მეტა მიერთება)



სურათი 14. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტსის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საბოლოო მდგომარეობა (მეტა მიერთება)

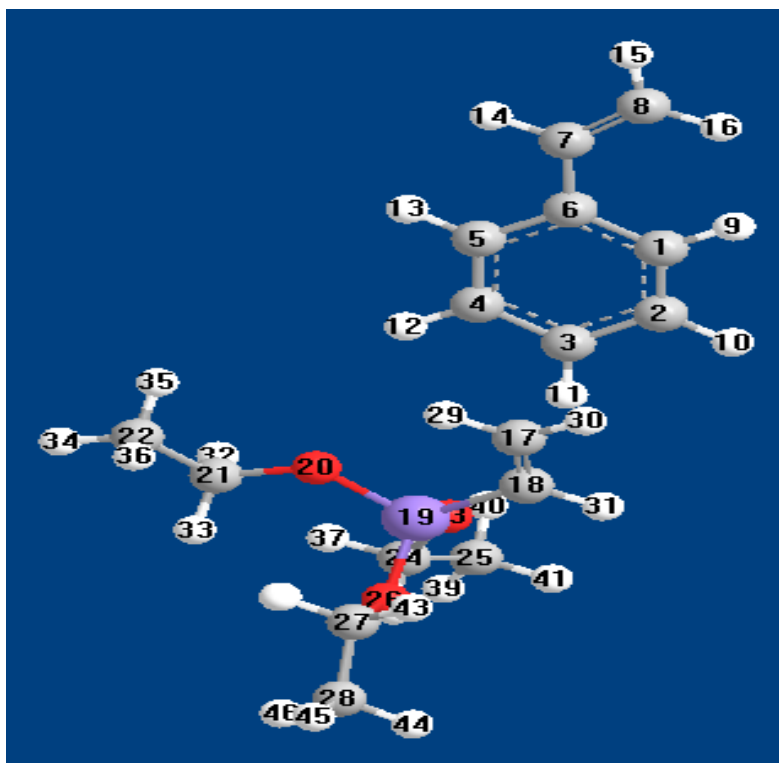


გრაფიკი 6. სისტემის ენერგიის ცვლილების დამოკიდებულება (ΔE) C2-C17 ნახშირბადის ატომებს შორის მანძილზე (R_{C-C}) სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტსის მოდელურ რეაქციაში (მეტა მიერთება)

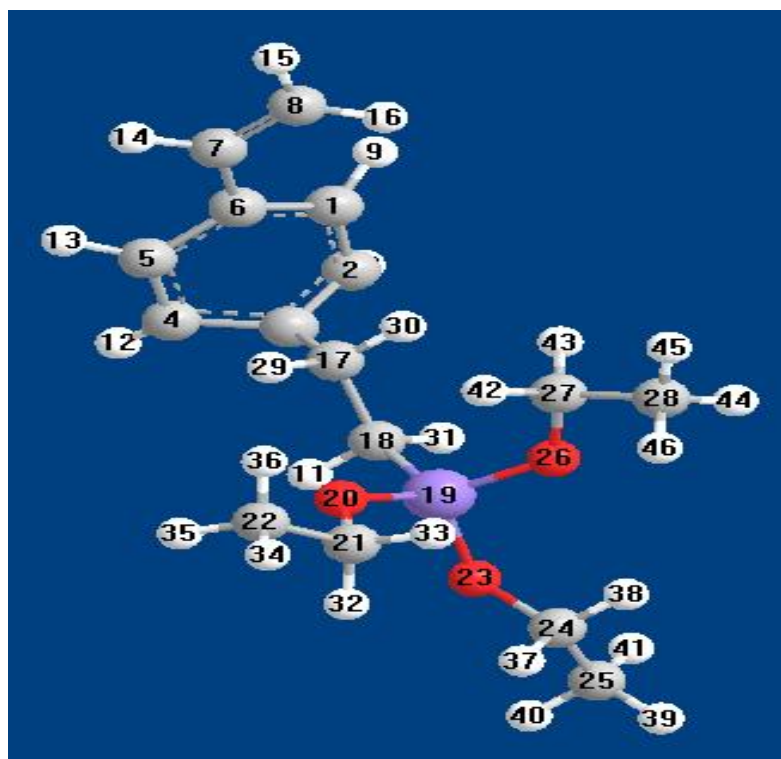
როგორც მე-6 გრაფიკიდან ჩანს, ნახშირბადის C2 ატომის მიახლოებისას ნახშირბადის C17 ატომთან $R_{C2-C17} = 1.7 \text{ \AA}$ მანძილამდე, სისტემის ენერგია იზრდება. ერთდროულად ბმის რიგი C2 და C3 ატომებს შორის სტიროლის მოლეკულაში მცირდება 1.37-დან 1.12-მდე, ხოლო C2 და C1 ატომებს შორის 1.38-დან 1.14-მდე. ასევე მცირდება ბმის რიგი ნახშირბადის C2 ატომსა და წყალბადის H10 ატომს შორის (0.93-0.46) და შეიმჩნევა ახალი ბმების წარმოქმნა ($P_{C2-C17} = 0.75$ და $P_{C18-H10} = 0.46$). ორმაგი ბმა გადადის ერთმაგ C-C ბმაში. წყალბადის ატომი სრულად წყდება ნახშირბადის C2 ატომს ($P_{C2-H10} = 0.00$) და უერთდება ნახშირბადის C18 ატომს ($P_{C18-H10} = 0.94$). აქტივაციის ენერგია $\Delta E^* = 338.76 \text{ კჯ/მოლი}$, ხოლო რეაქციის სითბური ეფექტი $\Delta E = 216.67 \text{ კჯ/მოლი}$. როგორც ვხედავთ, რეაქცია ენდოთერმულია.

იმის გათვალისწინებით, რომ სისტემაში წარმოდგენილია 4 სარეაქციო ცენტრი [გაწყვეტილი ბმები (2): C2-H10, C17=C18; წარმოქმნილი ბმები (2): C2-C17, C18-H10], აღნიშნული

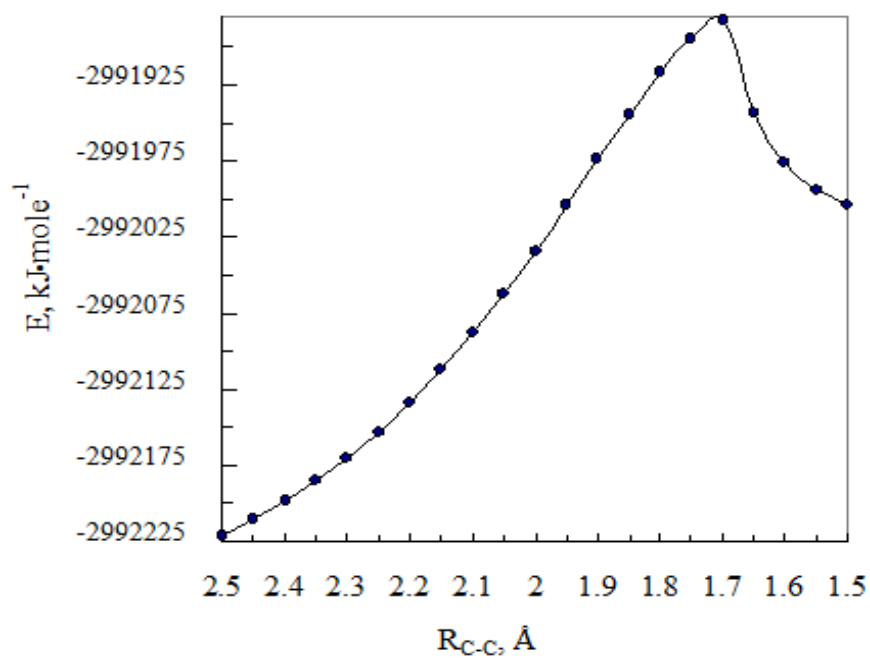
აქტივაციის ენერგია უნდა გაიყოს 4-ზე. ამ შემთხვევაში ერთ სარეაქციო ცენტრზე გაანგარიშებული აქტივაციის ენერგია $\Delta E^\ddagger = 338.76 \text{ კჯ/მოლი}/4 = 84.69 \text{ კჯ/მოლი}$, რაც იმას ნიშნავს, რომ მიღებული მნიშვნელობა შეესაბამება ქიმიური რეაქციების მიმდინარეობის ენერგეტიკულ მახასიათებელს.



სურათი 15. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტსის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საწყისი მდგომარეობა (პარა მიერთება)



სურათი 16. სტიროლის ვინილტრიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის რეაქციაში მონაწილე მონომერების საბოლოო მდგომარეობა (პარა მიერთება)



გრაფიკი 7. სისტემის ენერგიის ცვლილების დამოკიდებულება (ΔE) C3-C17 ნახშირბადის ატომებს შორის მანძილზე (RC-C) სტიროლის ვინილტიეთოქსისილანთან ფრიდელ-კრაფტის მოდელურ რეაქციაში (პარა მიერთება)

როგორც მე-7 გრაფიკიდან ჩანს, ნახშირბადის C₃ ატომის მიახლოებისას ნახშირბადის C₁₇ ატომთან $R_{C3-C17} = 1.7 \text{ \AA}$ მანძილამდე, სისტემის ენერგია იზრდება. ერთდროულად ბმის რიგი C₃ და C₄ ატომებს შორის სტიროლის მოლეკულაში მცირდება 1.38-დან 1.10-მდე, ხოლო C₃ და C₂ ატომებს შორის 1.37-დან 1.10-მდე. ასევე მცირდება ბმის რიგი ნახშირბადის C₃ ატომსა და წყალბადის H₁₁ ატომს შორის (0.93-0.49) და შეიმჩნევა ახალი ბმების წარმოქმნა ($P_{C3-C17} = 0.75$ და $P_{C18-H11} = 0.43$). ორმაგი ბმა გადადის ერთმაგ C-C ბმაში. წყალბადის ატომი სრულად წყდება ნახშირბადის C₃ ატომს ($P_{C3-H11} = 0.00$) და უერთდება ნახშირბადის C₁₈ ატომს ($P_{C18-H11} = 0.93$). აქტივაციის ენერგია $\Delta E^* = 330.51 \text{ კჯ/მოლი}$, ხოლო რეაქციის სითბური ეფექტი $\Delta E = 256.10 \text{ კჯ/მოლი}$. როგორც ვხედავთ, რეაქცია ენდოთერმულია.

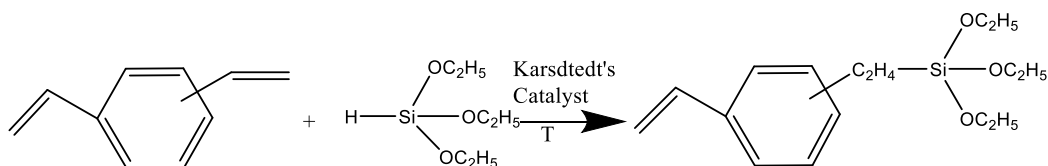
იმის გათვალისწინებით, რომ სისტემაში წარმოდგენილია 4 სარეაქციო ცენტრი [გაწყვეტილი ბმები (2): C₃-H₁₁, C₁₇=C₁₈; წარმოქმნილი ბმები (2): C₃-C₁₇, C₁₈-H₁₁], აღნიშნული აქტივაციის ენერგია უნდა გაიყოს 4-ზე. ამ შემთხვევაში ერთ სარეაქციო ცენტრზე გაანგარიშებული აქტივაციის ენერგია $\Delta E^* = 330.51 \text{ კჯ/მოლი}/4 = 82.63 \text{ კჯ/მოლი}$, რაც იმას ნიშნავს, რომ მიღებული მნიშვნელობა შეესაბამება ქიმიური რეაქციების მიმდინარეობის ენერგეტიკულ მახასიათებელს.

აქტივაციის ენერგიის მნიშვნელობების მიხედვით ენერგეტიკულად ყველაზე ხელსაყრელია მიერთება ორთო მდგომარეობაში. ამასთანავე უნდა აღინიშნოს, რომ ქვანტურ-ქიმიური მიდგომა იყენებს სამგანზომილებიან მოლეკულურ სტრუქტურას, ხოლო პროგნოზირების მეთოდი არ ითვალისწინებს სტერეოქიმიას. ასევე, ეს უკანასკნელი მეთოდი დამაკმაყოფილებლად მუშაობს მხოლოდ მაშინ, თუ მონაცემთა ბაზაში მსგავსი სტრუქტურაა ნაპოვნი (G. Titvinidze 2006). ამდენად ჩვენ ვთვლით, რომ ამ ფრიდელ-კრაფტის ალკილირების რეაქციით მიიღება ორთო და პარა-მიერთების იზომერული ნაერთები.

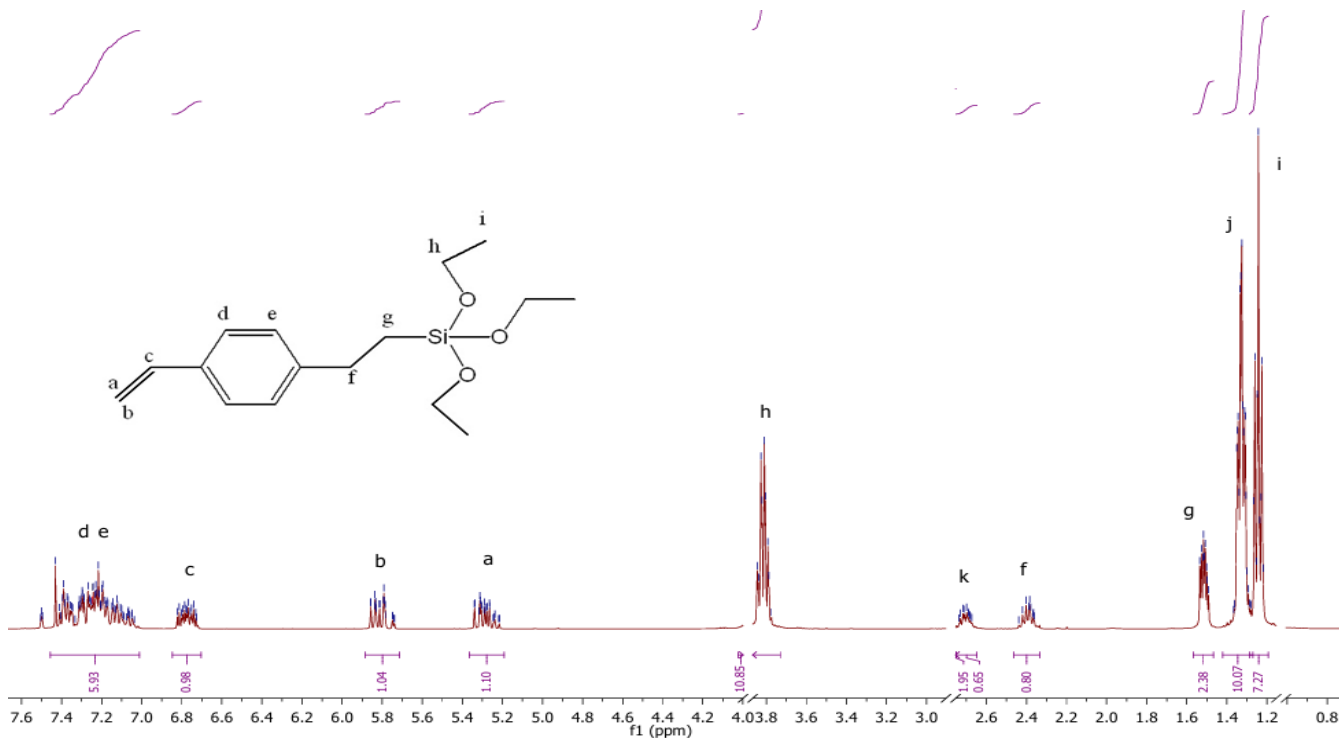
2.2 სილილირებული სტიროლის ფიზიკური კვლევა

2.2.1 სილილირებული სტიროლის NMR კვლევა

ტრიეთოქსისილანის ჰიდროსილილირების რეაქცია დივინილბენზოლთან წარიმართა 1:1 თანაფარდობით, კარსტედტის კატალიზატორის თანაობისას. ჰიდროსილილირების რეაქცია ხორციელდება შემდეგი სქემის მიხედვით:



სურათი 17. ტრიეთოქსისილანის, დივინილ ბენზოლთან მიმდინარე ჰიდროსილილირების რეაქცია



გრაფიკი 8. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ბმრ ¹H სპექტრი

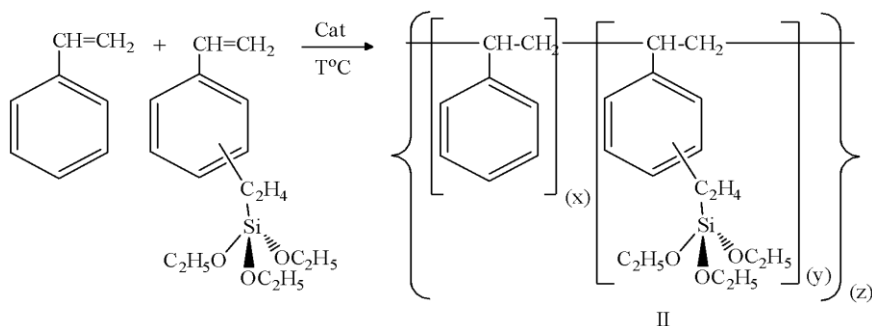
¹H - ბმრ სპექტრზე გვაქვს მულტიპლეტური სიგნალი -CH₂-Si, რომელიც მეთილენის პროტონის დამახასიათებელი სიგნალია, ქიმიური გადასვლით $\delta = 1.08$ ppm და მულტიპლეტური სიგნალი, რომელიც დამახასიათებელია Ar-CH₂ ფრაგმენტისთვის, ქიმიური გადასვლით $\delta = 2.38$ ppm, რომელიც წარმოქმნილია ორთო და პარა

დივინილბენზოლის მიქსტურის ჰიდროსილილირების რეაქციის დროს. მულტიპლეტური სიგნალები $d=1.36$ ppm, $d=3.87$ ppm მიუთითებს პროტონის ფრაგმენტზე $-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ და $-\text{O}-\text{CH}_2-$. სიგნალები $d=5.30$ და $d=5.79$ მიუთითებს მეთილენის ფრაგმენტზე, ცის და ტრანს მდგომარეობაში $\text{CH}_2=\text{CH}$. მულტიპლეტური სიგნალი $d=6.79$ ppm მიუთითებს მეთინის პროტონზე, $\text{CH}_2=\text{CH}$. მულტიპლეტური სიგნალები $d=7.32$ 7.49 ppm მიუთითებს ორთო და პარა ჩანაცვლებულ ფენილის წყალბადს. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ^{13}C ბმრ სპექტრში შეიმჩნევა სიგნალები ქიმიური გადაადილებით, δ (ვმნ): 18.8 (CH_2CH_3); 17.5 ($\text{Si}-\text{CH}_2$); 28.8 ($\text{O}-\text{CH}_2$); 57.8 ($\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2$); 112.1 ($=\text{CH}_2$); 125-128 (არომატული ბირთვის ნახშირბადის ბირთვებისათვის); 138 ($=\text{CH}$). ^{13}C ბმრ სპექტრი თანხმობაშია ^1H ბმრ სპექტრებთან.

2.3 თანაპოლიმერი LL2-ის ფიზიკური კვლევები

2.3.1 თანაპოლიმერი LL2-ის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული კვლევა

კვლევები ჩავატარეთ ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის და სტიროლის მონომერების ერთდროულად შევიყვანით შემავსებლის მატრიცაში, აღნიშნული პროცესი *in-situ* თანაპოლიმერიზაციას წარმოადგენს.



სურათი 18. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის სტიროლთან თანაპოლიმერიზაციის რეაქცია

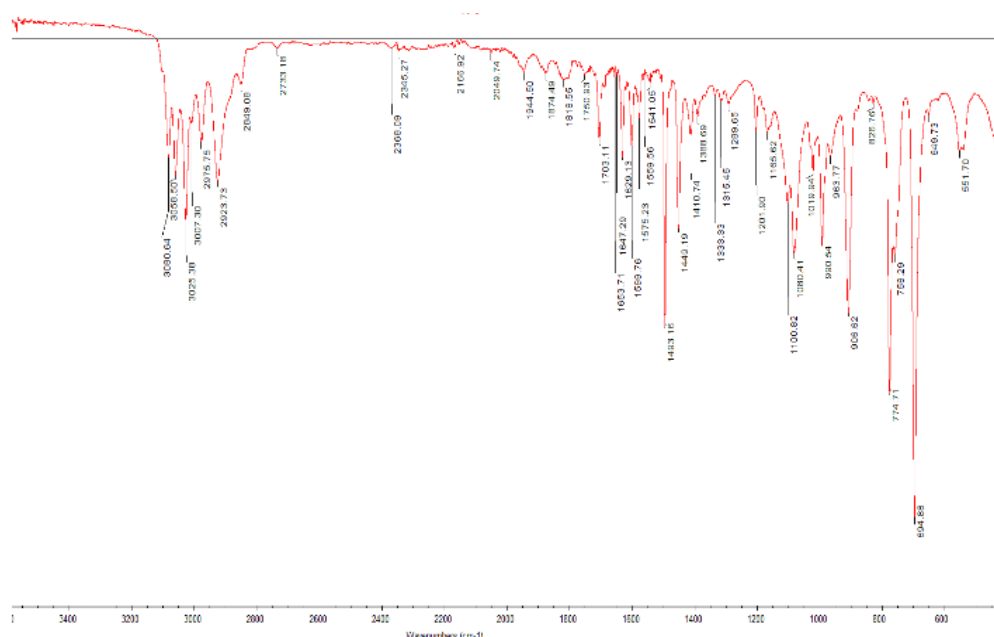
ჭადრის ფოთლის ფქვილის მატრიცაში შეგვეყვავდა განსაზღვრული რაოდენობის მონომერების ნარევი, რა დროსაც ვვარაუდობდით, რომ კომპოზიტის დაწნეხა/გაცხელების პროცესში მოხდებოდა მონომერების ურთიერთქმედება, რის შედეგადაც მივიღებდით თანაპოლიმერს. ამასთანავე მასალის საექსპლუატაციო თვისებების გაუმჯობესებისათვის ჩავატარეთ კომპოზიციური მასალის სხვადასხვაგვარი

მოდირიცირება, კერძოდ წვის მიმართ მედეგობის გასაზრდელად გამოვიყენეთ რამდენიმე სახის ანტიდამჟანგავი ნივთიერება და შევარჩიეთ ისეთი თანაფარდობები, რომელმაც მასალებისთვის კრიტიკულად მნიშვნელოვანი მექანიკური თვისებების გაუარესების ზღვარზე გაიარა.

სინთეზირებული პოლიმერის სტრუქტურა და შედგენილობა დადგენილია, FTIR, ^1H და ^{13}C ზმრ სპექტრების საფუძველზე.

თანაპოლიმერის II FTIR სპექტრში შეიმჩნევა ის შთანთქმის ზოლები, რომელიც დამახასიათებელია რეაქციაში შემავალი საწყისი I ნივთიერებისათვის გრაფიკი 9.

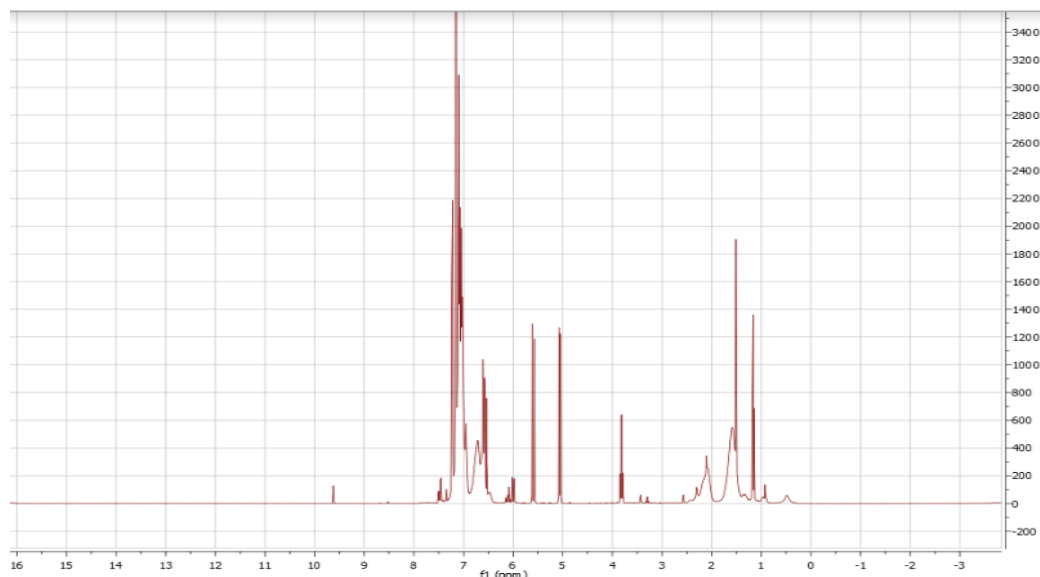
თანაპოლიმერის იწ სპექტრში შეიმჩნევა შთანთქმის ზოლები დიჰანაცვლებული ბენზოლის ბირთვისათვის 774 და 826 სმ^{-1} უბანში (B. C. Smith 2016). ასევე შეიმჩნევა დუბლეტური შთანთქმის ზოლები $963\text{--}980\text{ სმ}^{-1}$ დამახასიათებელი $\text{Si-OCH}_2\text{CH}_3$ ჯგუფისთვის, 1165 სმ^{-1} უბანში დამახასიათებელი (Si-O-C) ზმისათვის, 1269 (Si-Me) და $2819\text{--}3100\text{ სმ}^{-1}$ (C-H). სპექტრში ასევე შეიმჩნევა არომატული ბირთვის $\text{C}=\text{C}$ დამახასიათებელი შთანთქმის ზოლი 1659 სმ^{-1} უბანში, ოლეფინური ($1630\text{--}1640\text{ სმ}^{-1}$) ზოლი მკვეთრად შესუსტებულია - რაც გვაფიქრებინებს, რომ მონომერების ვინილური $\text{C}=\text{C}$ მზა რეაქციაში შევიდა და თანაპოლიმერიზაცია წარიმართა.



გრაფიკი 9. LL2 თანაპოლიმერის იწ სპექტრი

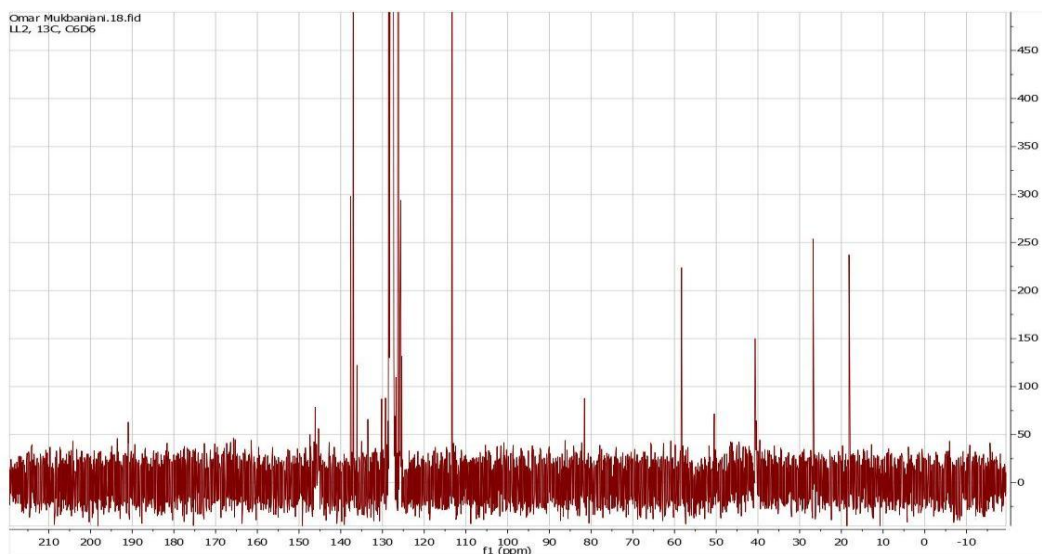
2.3.2 თანაპოლიმერი LL2-ის NMR კვლევა

სინთეზირებული თანაპოლიმერის II ^1H ბირთვულ მაგნიტურ რეზონანსის სპექტრში გრაფიკი 10, შეიმჩნევა მულტიპლეტური სიგნალები ქიმიური გადაადგილების ცენტრით $\delta \approx 1,15$ ვმნ (9H, t - CH_2CH_3); 1,5 – 1,7 ვმნ (2H, m - $\equiv\text{Si}-\text{CH}_2$); 2.0 – 2.3 ვმნ (2H, m - $\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-$); 3.65 – 3.80 ვმნ (2H, m - $\text{O}-\text{CH}_2$); ფენილის პროტონებისათვის 6.9 – 7.2 ვმნ; 5.0 – 5.7 ვმნ (2H, m - $=\text{CH}_2$); 6.5 – 6.7 ვმნ (m - $=\text{CH}$) პროტონებისათვის.



გრაფიკი 10. II თანაპოლიმერის ^1H ბმრ სპექტრი

თანაპოლიმერის II ^{13}C ბირთვულ მაგნიტურ რეზონანსის სპექტრში გრაფიკი 11, შეიმჩნევა მულტიპლეტური სიგნალები ქიმიური გადაადგილებით $\delta \approx 24.8$ ვმნ (CH_2CH_3); 17.8 – ($\equiv\text{Si}-\text{CH}_2$); 57.8 ვმნ ($\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-$); 28.8 ვმნ ($\text{O}-\text{CH}_2$); ფენილის პროტონებისათვის 125-128 ვმნ; 112.1 ვმნ ($=\text{CH}_2$); 138 ვმნ ($=\text{CH}$).

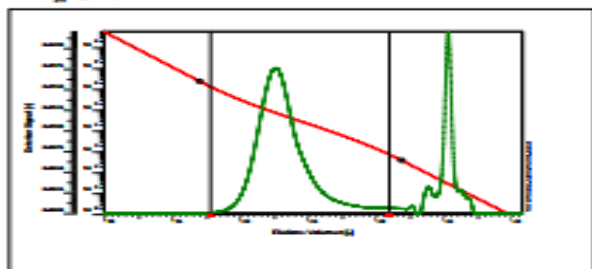


გრაფიკი 11. II თანაპოლიმერის ^{13}C ბმრ სპექტრი

2.3.3 თანაპოლიმერი LL2-ის გელ შეღწევადი ქრომატოგრაფიული კვლევა

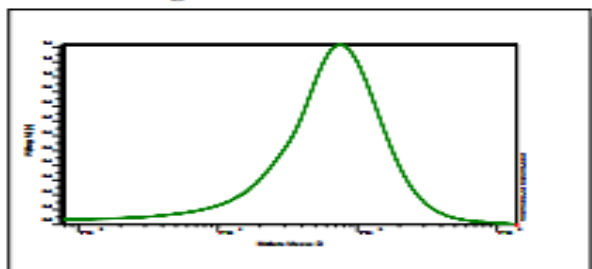
საშუალო რიცხვითი და წონითი მოლეკულური მასები, რომელთა მნიშვნელობებია $\sum M_n$, $\sum M_w$ და პოლიდისპერსობა $D = \sum M_w / \sum M_n$, განისაზღვრა გელ-შეღწევადი ქრომატოგრაფიის საშუალებით. II თანაპოლიმერისათვის ჩატარებულია გელ-შეღწევადი ქრომატოგრაფიული გამოკვლევები.

Elugram:



Calibration: pst0119_201113.CAL
 Eluent: Toluol
 Flow rate: 1,0 ml/min
 Pump: PSS SECcurity
 Inj.vol: 100,00
 Column1: PSS SDV 10e6 10µm
 Column2: PSS SDV 10e4 10µm
 Column3: PSS SDV 500 10µm
 Temp.: 30,00 °C
 Detector: PSS SECcurity UV
 Detector: PSS SECcurity RI

Molecular weight distribution:



— PSS SECcurity RI

Name	Mn	Mw	D	Vp	Mp	Area
PSS SECcurity	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS SECcurity	24172,40	88864,30	3,68	22,55	77517,90	0,06

გრაფიკი 12. II თანაპოლიმერის გელშელწევადი ქრომატოგრაფიული მრუდი
ცხრილი 3. თანაპოლიმერის ანალიზის ჩატარების პირობები და შედეგების შეჯამება

პარამეტრი	მნიშვნელობა
ნიმუშის სახელი	PSS SECurity
ელუენტი	ტოლუოლი
ნაკადის სიჩქარე	1.0 მლ/წთ
ინექციის მოცულობა	100.00 მიკროლიტრი
ტემპერატურა	30.0°C
სვეტი 1	PSS SDV 106Å 10µm
სვეტი 2	PSS SDV 106Å 10µm
სვეტი 3	PSS SDV 500Å 10µm
დეტექტორები	PSS SECurity UV, PSS SECurity RI
M _n (საშ. რიცხვითი მოლეკულური მასა)	24,172.40
M _w (საშ. წონითი მოლეკულური მასა)	88,864.30
დისპერსობა (D)	3.68
V _p (პიკის ელუენტის მოცულობა)	22.55 მლ
M _p (პიკის მოლეკულური წონა)	77,517.90
ფართობი	0.06

ცხრილში წარმოდგენილია LL2 თანაპოლიმერის გელ-შელწევადი ქრომატოგრაფიული ანალიზის შედეგი, ცხრილში ჩანს ანალიზის ჩატარების პირობები. მე-12 გრაფიკიდან ირკვევა, რომ თანაპოლიმერი მონომოდალური ბუნებისაა. განსაზღვრულია თანაპოლიმერის საშუალო რიცხვითი და წონითი მოლეკულური მასები, რომელთა მნიშვნელობებია $\Sigma M_n=24,172.40$; $\Sigma M_w=88,864.30$, ხოლო პოლიდისპერსობა $D=\Sigma M_w/\Sigma M_n=3.68$. ნიმუშის ანალიზმა აჩვენა ფართო მოლეკულური განაწილება, რაც მიუთითებს პოლიდისპერსიულ პოლიმერზე. სტიროლი, როგორც მაღალი რეაქტიულობის მქონე

მონომერი, პოლიმერიზაციის პროცესში დომინირებს და ქმნის ძირითად პოლიმერულ ჯაჭვს, ხოლო TEVPES, რომელიც შედარებით დიდი და ნაკლებად რეაქტიული მონომერია, პოლიმერულ ქსელში მხოლოდ ნაწილობრივ და შემთხვევითად ერთვება. შედეგად, TEVPES-ის ერთეულები განლაგებულია არათანაბრად, მცირე ჯგუფებად, რაც ქმნის სტრუქტურულად ჰეტეროგენულ სეგმენტებს. მიღებული მოლეკულური წონის მაჩვენებლები მიუთითებს, რომ ნიმუშში ძირითადად მაღალი მოლეკულური წონის მქონე ფრაქციებია, შესაბამისად გრაფიკი ადასტურებს პოლიმერული ნიმუშის არსებობას.

დასკვნა

კვლევის ფარგლებში სილილირებული სტიროლის მისაღებად ჩავატარეთ დივინილბენზოლის ჰიდროსილილირების რეაქცია ტრიეთოქსისილანით, კარსტედტის კატალიზატორის გამოყენებით და სტიროლის ალკილირების რეაქცია ვინილტრიეთოქსისილანით. აღნიშნული ნივთიერების მოლეკულური სტრუქტურა შევისწავლეთ მოლეკულური რეფრაქციით, მოლეკულური მასით, NMR ^1H და ^{13}C სპექტრით. გამოვიყენეთ ქვანტურ-ქიმიური გათვლა, არაემპირული სიმკვრივის ფუნქციური თეორიის მეთოდის გამოყენებით განვსაზღვრეთ რეაქციის წარმართვის შესაძლო ვარიანტები. აღმოჩნდა, რომ მიერთების რეაქცია ხორციელდება ორივე მიმართულებით, როგორც ერთი ისე პარა პოზიციაში. მივიღეთ სილილირებული სტიროლი და სტიროლის თანაპოლიმერი - LL2, განვუსაზღვრეთ სიზლანტე, დავადგინეთ მისი წონითი მოლეკულური და რიცხვითი მოლეკულური მასები, გამოვიკვლიეთ პოლიდისპერსობის ხარისხი.

2.4 ფიჭვის ხის მერქნის ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების მექანიკური თვისებები

შესწავლა

2.4.1 წყალშთანთქმა

როგორც ფიჭვის, ისე სხვა შემავსებლების კომპოზიციებისთვის წყალშთანთქმის შესასწავლად ვამზადებდით 4 გრამიან ნიმუშებს და ვსწავლობდით მათ ქცევას წყლიან გარემოში. მიღებულ კომპოზიტებს ვათავსებდით გამოხდილ წყალში, აღნიშნული ცდით ვსწავლობით ნიმუშის წყალშთანთქმას, ანათვალს ვიღებდით 3 საათისა და 24 საათის შემდეგ და მიღებულ შედეგებს ვსახავდით პროცენტებში.

წყალშთანთქმა წარმოადგენს მნიშვნელოვან სიდიდეს მერქანბოჭკოვანი კომპოზიტებისათვის, რადგან ისინი ხშირად გამოიყენებიან მაღალი ტენიანობის პირობებში. ამდენად ჰიდროფობური თვისებების მქონე კომპოზიტების მიღება წარმოადგენს ერთერთ მნიშვნელოვან საკითხს. დღეისათვის წარმოებული კომპოზიციური მასალების ზოგიერთი მექანიკური თვისება მოცემულია ცხრილ 4-ში.

ცხრილი 4. ხის ბურბუშელოვანი ფილის წყალშთანთქმა და ზოგიერთი მექანიკური თვისება

#	მასალა	დარტყმითი სიბლანტე ჩარპის მეთოდით, კჯ/მ ²	სიმტკიცე ღუნვაზე, მპა	სიმტკიცე გაჭიმვაზე, მპა	სიმტკიცე კუმშვაზე, მპა	წყალშთანთქმა, %
1	მერქნის ბურბუშელოვან ი ფილა	4 - 8	10-15	2.8	30-35	20-30

კომპოზიციური მასალებისთვის წყალშთანთქმა შესვისწავლეთ EN 317-1993 სატანდარტის შესაბამისად, რომელიც გამოიყენება საშუალო სიმკვრივის ფილებსა (MDF) და ორთოგონალურად განლაგებული შპონების ფილების (OSB) შემთხვევაში. წყალშთანთქმის შედეგები წარმოდგენილია ცხრილ 5-ში.

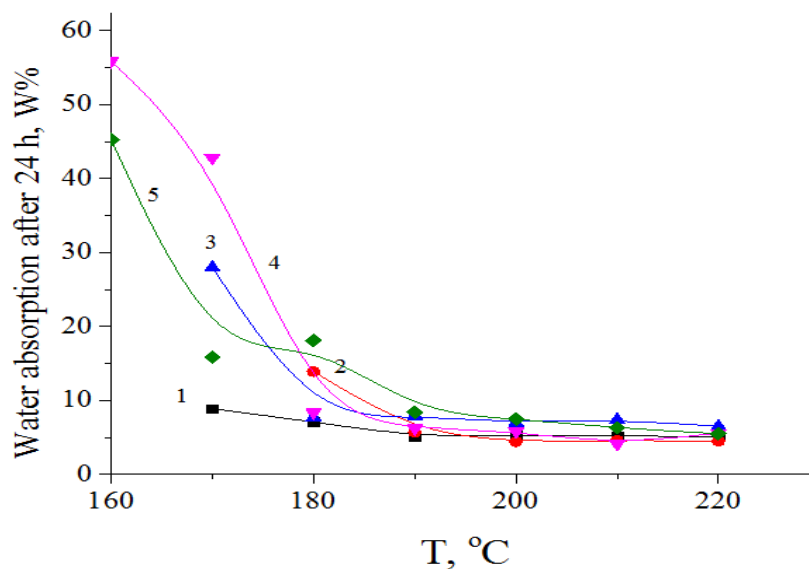
ცხრილი 5. ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და ნახერხის ბაზაზე სხვადასხვა ტემპერატურაზე და წნევაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა

#	კომპოზიტი (მას %) TESSt+ ნახერხი+ 1% ინიციატორი (წნევა მპა)	T°C	მასა, გ	მოცულობა, სმ³	სიმკვრივე, კგ/მ³	კომპ. მასა წყალში 3-სთ ექსპოზიციის შემდეგ, გ	კომპ. მასა წყალში 24-სთ ექსპოზიციის შემდეგ, გ	წყალშთანთქმა, წყალში 24-სთ ექსპოზიციის შემდეგ, %
I	3%TESSt+ 97% ნახერხი (5)	160	3,78	2,65	1140	4.486	5.197	37.5
II	3%TESSt+ 97% ნახერხი (5)	170	3,80	2,6	1460	3.921	4.145	8.9
III	3%TESSt+ 97% ნახერხი (5)	180	3,75	2,58	1450	3.953	4.064	7.1
IV	3%TESSt+ 97% ნახერხი (5)	190	3,73	2,54	1470	3.963	4.062	5.1
V	3%TESSt+ 97% ნახერხი (5)	200	3,68	2,51	1460	3.746	3.871	5.3
V'	3%TESSt+ 97% ნახერხი (10)	200	3,835	2,561	1546	3.885	4.014	3.44
V"	3%TESSt+ 97% ნახერხი (15)	200	3,898	2,579	1512	3.979	4.258	9.23
VI	3%TESSt+ 97% ნახერხი (5)	210	3,67	2,56	1430	3.727	3.850	5.2
VII	3%TESSt+ 97% ნახერხი (5)	220	3,71	2,54	1460	3.785	3.898	5.1
VII'	3%TESSt+ 97% ნახერხი (10)	220	3,829	2,561	1567	3.869	3.961	4.66
VII"	3%TESSt+ 97% ნახერხი (15)	220	3,755	2,508	1497	3.790	3.932	4.71
VIII	5%TESSt+ 95% ნახერხი (5)	160	3,81	2,54	1500	3.90	5.083	32.9
IX	5%TESSt+ 95% ნახერხი (5)	170	3,81	2,50	1520	3.88	4.780	30.7

X	5%TESSt+ 95% ნახერბი (5)	180	3,78	2,50	1510	3.96	4.307	13.9
XI	5%TESSt+ 95% ნახერბი (5)	190	3,85	2,52	1530	3.89	4.072	5.7
XII	5%TESSt+ 95% ნახერბი (5)	200	3,83	2,48	1540	3.85	4.000	4.4
XII'	5%TESSt+ 95% ნახერბი (10)	200	3,591	2,460	1741	3,690	4,285	19,36
XII"	5%TESSt+ 95% ნახერბი (15)	200	3,622	2,472	1900	3,744	4,696	29,65
XIII	5%TESSt+ 95% ნახერბი (5)	210	3,78	2,51	1510	3.81	3.952	4.6
XIV	5%TESSt+ 95% ნახერბი (5)	220	3,76	2,49	1510	3,80	3.930	4.5
XIV'	5%TESSt+ 95% ნახერბი (10)	220	3,731	2,640	1500	3,799	3,965	6,27
XIV"	5%TESSt+ 95% ნახერბი (15)	220	3,731	2,533	1582	3,813	4,008	7,42
XV	10%TESSt+ 90% ნახერბი (5)	150	3,69	2,54	1450	4.252	5.112	38.5
XVI	10%TESSt+ 90% ნახერბი (5)	160	3,56	2,48	1440	4.049	4.686	31.6
XVII	10%TESSt+ 90% ნახერბი (5)	170	3,61	2,45	1470	3.779	4.631	28.0
XVIII	10%TESSt+ 90% ნახერბი (5)	180	3,66	2,46	1490	3.723	3.938	7.7
XIX	10%TESSt+ 90% ნახერბი (5)	190	3,43	2,40	1430	3.505	3.700	7.9
XX	10%TESSt+ 90% ნახერბი (5)	200	3,44	2,49	1380	3.503	3.680	7.0
XXI	10%TESSt+ 90% ნახერბი (5)	210	3,45	2,47	1400	3.522	3.718	7.8
XXII	10%TESSt+ 90% ნახერბი (5)	220	3,40	2,40	1420	3.468	3.627	6.5

XXIII	15%TESSt+ 85% ნახერბი (5)	150	3,400	2,369	1435	4.079	6.528	92.0
XXIV	15%TESSt+ 85% ნახერბი (5)	160	3,467	2,361	1468	3.581	5.405	55.9
XXV	15%TESSt+ 85% ნახერბი (5)	170	3,506	2,384	1470	3.677	5.008	42.8
XXVI	15%TESSt+ 85% ნახერბი (5)	180	3,464	2,384	1453	3.539	3.754	8.4
XXVII	15%TESSt+ 85% ნახერბი (5)	190	3,436	2,384	1441	3.475	3.650	6.2
XXVIII	15%TESSt+ 85% ნახერბი (5)	200	3,421	2,384	1434	3.453	3.619	5.8
XXIX	15%TESSt+ 85% ნახერბი (5)	210	3,441	2,375	1448	3.449	3.582	4.1
XXX	15%TESSt+ 85% ნახერბი (5)	220	3,438	2,375	1447	3.503	3.630	5.6
XXXI	20%TESSt+ 80% ნახერბი (5)	150	3,287	2,207	1489	3.397	4.522	37.6
XXXII	20%TESSt+ 80% ნახერბი (5)	160	3,235	2,207	1465	3.367	4.701	45.3
XXXIII	20%TESSt+ 80% ნახერბი (5)	170	3,325	2,260	1471	3.422	3.855	15.9
XXXIV	20%TESSt+ 80% ნახერბი (5)	180	3,251	2,225	1461	3.527	3.840	18.1
XXXV	20%TESSt+ 80% ნახერბი (5)	190	3,274	2,225	1471	3.341	3.548	8.4
XXXVI	20%TESSt+ 80% ნახერბი (5)	200	3,209	2,190	1465	3.36	3.460	7.8
XXXVII	20%TESSt+ 80% ნახერბი (5)	210	3,203	2,207	1451	3.237	3.404	6.3
XXXVIII	20%TESSt+ 80% ნახერბი (5)	220	3,120	2,190	1424	3.157	3.293	5.5
XXXIX	25%TESSt+ 75% ნახერბი (5)	200	2,889	1,855	1557	2.932	3.168	9.65

XL	25%TESSt+ 75% ნახევარი (5)	220	2,789	1,872	1462	2.821	2.890	3.62
----	-------------------------------	-----	-------	-------	------	-------	-------	------

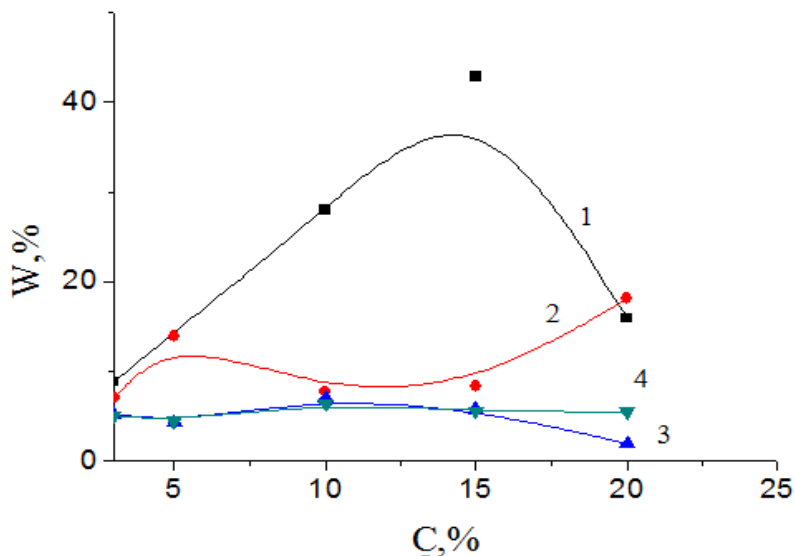


გრაფიკი 13. კომპოზიციური მასალის წყალშთანთქმის დამოკიდებულება დაწნეხის

ტემპერატურაზე, სადაც 1 მრუდი შეესაბამება შემაკავშირებლის 5%

ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლს, 2 – 3%, 3 – 10%, 4 – 15%, 5 – 20%.

მე-13 გრაფიკზე მოცემულია წყალშთანთქმის დამოკიდებულება დაპრესვის ტემპერატურაზე, შემაკავშირებლის 3-20% რაოდენობის დროს. წარმოდგენილი ნახაზიდან ჩანს, რომ ყველაზე ნაკლები წყალშთანთქმა დამახასიათებელია კომპოზიტებისათვის, რომლებიც შეიცავენ 5 (მას)% შემაკავშირებლს და მიღებულია მაღალ ტემპერატურაზე დაწნეხის დროს, რაც თანხვედრაშია ჩვენს მიერ გამოქვეყნებულ მონაცემებთან (Mukbaniani, et al. 2021). მე-14 გრაფიკზე ნაჩვენებია წყალშთანთქმის დამოკიდებულება შემაკავშირებლის კონცენტრაციაზე, საიდანაც ვიგებთ, რომ შემაკავშირებლის კონცენტრაციის გაზრდასთან ერთად წყალშთანთქმა იზრდება.



გრაფიკი 14. კომპოზიტების წყალშთანთქმის დამოკიდებულება შემკავშირებლის კონცენტრაციაზე, სადაც 1 მრუდი შეესაბამება 170°C, 2 – 180°C, 3 – 200°C, 4 – 220°C.

მე-13 და მე-14 გრაფიკებზე გამოსახული დამოკიდებულება, გამოხატავს ფიზიკურ-ქიმიური გარდაქმნების ხასიათს, რომელიც ძირითადად მიმდინარეობს კომპოზიტში თერმული დამუშავებით. შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ახალი ქიმიური ბმების წარმოქმნის პროცესებმა, რომელიც ზრდის მიკროკონტაქტებს ორ ფაზას შორის უნდა შეამციროს წყალშთანთქმა და პირიქით, ესა თუ ის ატომთა ჯგუფები, რომელებიც არ შედიან ქიმიურ რეაქციაში, წარმოქმნიან კავერნებს, მიკროსიცარიელებს, აღნიშნული მომენტი გაზრდის წყლის მოლეკულების დიფუზიას ამ კავერნებში, შესაბამისად გაზრდის წყალშთანთქმას.

2.4.2 სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე და დარყმითი ძალის განსაზღვრა ჩარპის

მეთოდით

ცხრილი 6. სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე და დარყმითი სიბლანტის მნიშვნელობის დამოკიდებულება მერქან-პოლიმერული კომპოზიციური მასალის მიღების პირობებზე (ტემპერატურა, მუდმივი წნევა, შემკვრელის კონცენტრაცია)

#	კომპოზიტი	შემკვრელი, %	წნევა, MPa	ტემპერატ. °C	სიმტკიცე ღუნვაზე მპა	დარტყმითი სიბლანტე, კჯ/მ²
1	III	3% TESSst+ 1% BP	15	180	17	15
2	IV	3% TESSst+ 1% BP	15	190	38	21
3	V	3% TESSst+ 1% BP	15	200	40	17
4	VI	3% TESSst+ 1% BP	15	210	44	17
5	VII	3% TESSst+ 1% BP	15	220	55	20
6	X	5% TESSst+ 1% BP	15	180	19	15
7	XI	5% TESSst+ 1% BP	15	190	40	16
8	XII	5% TESSst+ 1% BP	15	200	51	20
9	XIII	5% TESSst+ 1% BP	15	210	44	19
10	XIV	5% TESSst+ 1% BP	15	220	50	21
11	XVIII	5% TESSst+ 1% BP	15	180	31	23
12	XIX	10% TESSst+ 1% BP	15	190	36	25
13	XX	10% TESSst+ 1% BP	15	200	37	25
14	XXI	10% TESSst+ 1% BP	15	210	41	21
15	XXII	10% TESSst+ 1% BP	15	220	39	26
16	XXXIX	25% TESSst+ 1% BP	15	200	23	26
17	XL	25% TESSst+ 1% BP	15	220	19	28

მე-6 ცხრილი გვაძლევს საშუალებას გავაკეთოთ შემდეგი მონაცემები: ღუნვაზე სიმტკიცე იზრდება დაწნეხის ტემპერატურის გაზრდასთან ერთად (180-220°C) მუდმივი წნევის და 3%-იანი შემაკავშირებლის დროს 17-დან 51 კგ/სმ²-მდე. როგორც ჩანს მაღალ ტემპერატურაზე ტრიეთოქსისილილირებულ სტიროლის მოლეკულებსა და მერქნის აქტიურ ჯგუფებს შორის ადგილი აქვს ჰეტეროგენულ ეთერიფიკაციის რეაქციებს ან/და დონორულ-აქცეპტორულ ურთიერთქმედებებს, რომელსაც მიყვავართ ქიმიური ბმების სივრცითი კონცენტრაციების გაზრდასთან. მე-6 ცხრილიდან ჩანს, რომ შემაკავშირებლის გაზრდისას 25%-მდე, ღუნვაზე სიმტკიცე მცირდება, რაც შეეხება დარტყმითი სიბლანტის მნიშვნელობას ის იზრდება. პოლიმერის მოქნილობა Y შეიძლება განსაზღვრულ იქნას ფორმულიდან:

$$Y = V_{sp}/\sum_i^n U_{bi}$$

სადაც V_{sp} ხვედრითი მოცულობაა, გ/სმ³, მოცემულ ტემპერატურაზე, მაშინ როცა შეჯამება მიმდინარეობს მოცემული პოლიმერის ელემენტური რგოლების სიმტკიცეთა შეჯამებით. დადგენილია, რომ ღუნვაზე სიმტკიცე მოქნილობის უკუპროპორციულია. თუ შემკვრელის კონცენტრაციას 5 მას% მეტს ავიღებთ სიმტკიცე ღუნვაზე მცირდება, ალბათ იმიტომ რომ შემკვრელს გააჩნია შედარებით მაღალი მოქნილობა. დარტყმითი სიბლანტე მეტად მნიშვნელოვანი ექსპლუატაციური მაჩვენებელია. მის სიდიდეს დიდი ყურადღება ექცევა იმ დროს, როდესაც საქმე აქვთ მყისიერ დატვირთვებთან, რაც შეეხება დარტყმით ძალის მნიშვნელობას, აქ შეიძლება დავასკვნათ, რომ III კომპოზიტის (3% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი + 97% ნახერხი) შემთხვევაში ტემპერატურის 180°C-დან 220°C-მდე გაზრდისას დარტყმითი სიბლანტის მნიშვნელობა იზრდება 17 დან 20 კგძ*სმ/სმ². სხვა კომპოზიციების შემთხვევაშიც ეფექტი ანალოგიურია, მხოლოდ შემცირებული. მაქსიმალური მნიშვნელობები ამ შემთხვევაშიც მიიღწევა შემკვრელის 3% და 5% შემცველობისას.

შესწავლილია ანტიპირენის - ალუმინის ჰიდროქსიდის გავლენა კომპოზიტის მექანიკურ თვისებებზე. მე-7 ცხრილში წარმოდგენილია კომპოზიტების კვლევის შედეგები სიმტკიცე ღუნვაზე და სიმტკიცე დარტყმითი სიბლანტის დროს. აღნიშნული კვლევები ჩატარებულია შესაბამისი სტანდარტის მიხედვით.

ცხრილი 7. ტემპერატურის გავლენა ალუმინის ჰიდროქსიდის შემცველ კომპოზიტის მექანიკურ თვისებებზე

#	კომპოზიტის მასა (%)	P მპა	T°C	S სმ²	h1-h2 სმ	ლუნვა აპარატზე PC	გამოცდა ლუნვაზე მპა	დარტყმითი სიბლანტე კჯ/მ²
XLI	ნახერხი 94% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ - 0,1%, ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	180	1.5×0,7=1,05	16	2,71	4,88	14,94
XLII	ნახერხი 94% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ -0,1%, ბენზოილ ზეჟანგი 1%	15	220	1.5×0,7=1.05	17,5	2,77	4,99	16,35
XLIII	ნახერხი 93% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ -1%, ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	180	1.5×0,72=1.08	17	2,47	4,19	15,43
XLIV	ნახერხი 93% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ -1%, ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	220	1.5×0.72=1.08	15,5	3,04	5,16	14,07
XLV	ნახერხი 92% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ -2%, ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	180	1.5×0.71=1.06	16,5	2,26	4,01	15,27
XLVI	ნახერხი 92% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ -2%, ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	220	1.5×0.1=1.06	18,5	2,70	4,72	17,11
XL VII	ნახერხი 85% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ 10%	15	180	1.5×0.83=1,245	24	1,46	1,52	18,90

	ბენზოილის ზეჟანგი 1%							
XL VII I	ნახერხი 85% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ 10% ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	220	1.5×0.81=1,215	24,5	2,33	3,13	19,77

მე-7 ცხრილიდან ჩანს, რომ ტემპერატურის გაზრდით ღუნვაზე სიმტკიცის მნიშვნელობა იზრდება, ხოლო რაც შეეხება დარტყმითი სიბლანტის მნიშვნელობას - მცირდება. ალუმინის ჰიდროქსიდის კონცენტრაციის გაზრდასთან ერთად ღუნვაზე სიმტკიცის მნიშვნელობა მცირდება, ხოლო დარტყმითი სიბლანტის მნიშვნელობა უმნიშვნელოდ იზრდება. როგორც ზემოთ უკვე ვახსენე, დიდი რაოდენობით ანტიპირენის დამატება უარყოფით გავლენას ახდენს მასალის მექანიკურ თვისებებზე, მცირე რაოდენობების (0,1-2%) შემთხვევაში შესამჩნევ გავლენა არ მოუხდენია მექანიკურ პარამეტრებზე.

ფიჭვის ხის ნახერხის საფუძველზე მიღებული კომპოზიციური მასალებისთვის გაიზომა წყალშთანთქმის მაჩვენებელი, ანტიპირენის სხვადასხვა პროცენტული შემცველობის დროს.

ცხრილი 8. ალუმინის ჰიდროქსიდის, როგორც ანტიპირენის გავლენა წყალშთანთქმაზე

#	კომპოზიტი (მას%)	P მპა	T°C	მასა, გ	მოცულობა , სმ³	სიმკვრივე, კგ/მ³	მასა წყალში 3-სთ-ნი ექსპოზიცი ის შემდეგ, გ	მასა წყალში 24-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	წყალშთანთქმა, წყალში 24-სთ-იანი ექსპოზიციის შემდეგ, %
XLI	ხის ნახერხი 96% +სილ.სტიროლი-3% + ბპ 1% + Al(OH) ₃ - 0,1%	15	180	3,700	2,4816	1491	3,716	4,082	10,27%
XLII	ხის ნახერხი 96% +სილ.სტიროლი-3% + ბპ - 1% +Al(OH) ₃ - 0,1%	15	220	3,413	2,5963	1462	3,889	3,976	4,74%
XLIII	ხის ნახერხი 95% +სილ.სტიროლი-3% + ბპ 1% + Al(OH) ₃ -1%	15	180	3,651	2,4551	1487	3,700	4,030	10,38%
XLIV	ხის ნახერხი 95% +სილ.სტიროლი-3% + ბპ - 1% + Al(OH) ₃ - 1%	15	220	3,567	2,596	1465	3,889	4,049	6,47%
XLV	ხის ნახერხი 94% +სილ.სტიროლი-5% + ბპ- 1% + Al(OH) ₃ - 2%	15	180	-	2,4374	1512	3,757	3,882	5,32%
XLVI	ხის ნახერხი 94% +სილ.სტიროლი-5% + ბპ- 1% +Al(OH) ₃ - 2%	15	220	3,731	2,4762	1507	3,758	3,874	3,83%
XLV II	ხის ნახერხი 85% +სილ.სტიროლი-5% +ბპ - 1%	15	180	3,085	1,978	1559	3,131	3,236	4,9%

	+Al(OH) ₃ 1%								
XLV III	ხის ნახერხი 85% +სილ.სტიროლი-5% +ბპ - 1% +Al(OH) ₃ 1%	15	220	2,647	1,766	1499	2,715	2,745	3,7%

მე-8 ცხრილში მოცემულია შედეგები, სადაც ასახულია კომპოზიტების წყალშთანთქმის დამოკიდებულება ანტიპირენის კონცენტრაციაზე. როგორც მე-8 ცხრილიდან ჩანს ანტიპირენის შეტანა კომპოზიციურ მასალებში ამცირებს წყალშთანთქმას 10.27%-დან (კომპოზიტი XLI), 5.32%-მდე (კომპოზიტი XLV). აქაც შეიმჩნევა წყალშთანთქმის შემცირება დაპრესვის ტემპერატურის გაზრდასთან ერთად, რაც დიდი ალბათობით აიხსნება მოლეკულათშორისი ეთერიფიკაციის რეაქციების გაზრდით შემკვრელს, ანტიპირენსა და შემავსებლის მატრიცის ჰიდროქსილის ჯგუფებს შორის.

0,1-2% ალუმინის ჰიდროქსიდის დამატება უარყოფითად არ აისახება არცერთ მექანიკურ მახასიათებელზე, რაც შეეხება ანტიპირენის 10% გაზრდისას, აბსოლუტურად ყველა მექანიკური მახასიათებელი რამდენიმე რიგით გაუარესდა, განსაკუთრებით დაბალ ტემპერატურაზე - სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე შემცირდა 2-3 ჯერ, გაჭიმვაზე სიმტკიცე და სიხისტე თითქმის 3-ჯერ არის გაუარესებული. უნდა აღინიშნოს, რომ ანტიპირენს მაღალი ეფექტურობისთვის კომპოზიტებში დაახლოებით 30% ოდენობით იყენებენ.

2.4.2 ეთილსილიკატის გავლენა წყალშთანთქმაზე

თერმომედეგობის და უწყადობის გაზრდის მიზნით კომპოზიციურ მასალებში შევიტანეთ ეთილსილიკატი, იგივე ტეტრაეთოქსი სილანი (TEOS), სხვადასხვა რაოდენობით.

შესწავლილია ეთილსილიკატის გავლენა კომპოზიტების XLIX-LIV წყალშთანთქმაზე. დადგენილია, რომ ეთილსილიკატის კონცენტრაციის გაზრდით კომპოზიტში 1-დან 3%-მდე, კომპოზიტის წყალშთანთქმის მნიშვნელობა მცირდება. ანალოგიურად შესწავლილია კომპოზიტის მიღების ტემპერატურის გავლენა წყალშთანთქმის კოეფიციენტზე და დადგენილია, რომ ფორმირების ტემპერატურის გაზრდით 180°C ტემპერატურიდან 220°C ტემპერატურამდე წყალშთანთქმის კოეფიციენტი მცირდება მთელი ერთნახევარი რიგით (იხ. ცხრილი 9). წყალშთანთქმის კოეფიციენტის ესეთი შემცირება აიხსნება ეთილსილიკატის მონაწილეობით ახალი ქიმიური ბმების წარმოქმნასთან, მერქანში შემავალი ცელულოზის და ჰემიციელოზის ჰიდროქსილის ჯგუფებთან მიმდინარე ეთერიფიკაციის რეაქციებში.

ცხრილი 9. ეთილსილიკატის, როგორც წვის ხელისშემშლელი აგენტის გავლენა მასალის მექანიკურ თვისებებზე

#	კომპოზიტის მასა (%)	P მპა	T°C	S სმ ²	h1-h2 სმ	ღუნვა აპარატზე PC	გამოცდა ღუნვაზე მპა	დარტყმითი სიბ- ლანტე კჯ/მ ²
XLIX	ნახერხი 96% სილ.სტიროლი 3% ეთილსილიკატი 1% ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	180	1.5×0.78=1.17	22	3.30	5,17	19,28
L	ნახერხი 96% სილ.სტიროლი 3% ეთილსილიკატი 1% ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	220	1.5×0.69=1.035	24	2,64	4,89	22,75
LI	ნახერხი 95% სილ.სტიროლი 3% ეთილსილიკატი 2% ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	180	1.5×0.77=1.155	19	2,94	4,38	16,13
LII	ნახერხი 95% სილ.სტიროლი 3% ეთილსილიკატი 2% ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	220	1.5×0.70=1.05	18	2,57	4,63	16,80
LIII	ნახერხი 95% სილ.სტიროლი 5% ეთილსილიკატი 3% ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	180	1.5×0.96=1.44	23	2,83	2,65	15,66
LIV	ნახერხი 95% სილ.სტიროლი 5% ეთილსილიკატი 3% ბენზოილის ზეჟანგი 1%	15	220	1.5×0.68=1.02	23	2,27	4,33	22,10

ცხრილი 10. ეთილსილიკატის გავლენა კომპოზიციის წყალშთანთქმაზე

#	კომპოზიტი (მას%)	P მპა	T°C	მასა, გ	მოცულობა , სმ³	სიმკვრივე, კგ/მ³	მასა წყალში 3-სთ-ნი ექსპოზიცი ის შემდეგ, გ	მასა წყალში 24-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	წყალშთანთქმ ა, წყალში 24- სთ-იანი ექსპოზიციის შემდეგ, %
XLIX	ხის ნახერხი 96% +სილ.სტიროლი- 3% + ბპ 1% + ეთილსილიკატი 1%	15	180	3,87	2,561	1511	4,144	-	-
L	ხის ნახერხი 96% +სილ.სტიროლი- 3% + ბპ 1% ეთ.სილიკატი 1%	15	220	3,81	2,543	1498	3,850	4,031	5,8%
LI	ხის ნახერხი 95% +სილ.სტიროლი- 3% + ბპ 1% ეთ.სილიკატი 2%	15	180	3,83	2,561	1496	3,902	4,623	20,7%
LII	ხის ნახერხი 95% +სილ.სტიროლი- 3% + ბპ 1% ეთ.სილიკატი 2%	15	220	3,92	2,614	1499	3,960	4,115	4,97%
LIII	ხის ნახერხი 92% +სილ.სტიროლი- 5%	15	180	3,71	2,402	1545	3,920	4,111	10,78%

	+ ბპ 1% ეთ.სილიკატი 3%								
LIV	ხის ნახერხი 92% +სილ.სტიროლი- 5% + ბპ 1% ეთ.სილიკატი 3%	15	220	3,615	2,402	1504	3,636	3,773	4,37%

ეთილსილიკატის დამატებამ კომპოზიციაში, მაღალ ტემპერატურაზე, მონომერების მაღალი კონცენტრაციის შემთხვევაში წყალშთანთქმის კოეფიციენტი შეამცირა, რაც აიხსნება ეთილსილიკატის აქტიურ ჯგუფებსა და ბიოპოლიმერების ჰიდროქსილის ჯგუფებს შორის შესაძლო სილანიზაციის რეაქციებით. აღსაღნიშნავია, რომ ეთილსილიკატს თეორიულად შესწევს შესაძლებლობა წარმოქმნას ოთხი ქიმიური ბმა, აქტიური ფუნქციური ჯგუფების ხარჯზე.

2.5 ეთილსილიკატის გავლენა კომპოზიტების ზოგიერთ მექანიკურ მახასიათებელზე

2.5.1 გაჭიმვის სიმტკიცე

გაჭიმვის მიმართ მედეგობა, ეს არის მასალის უნარი გაუძლოს განივი (გაჭიმვითი) ძალის ზემოქმედებას გაწყვეტამდე. იგი განსაზღვრავს, თუ რა ძალა შეიძლება იქნეს გამოყენებული მასალაზე, სანამ ის გაწყდება. უნდა აღინიშნოს, რომ ეს კვლევა არ არის სტანდარტული კვლევა მერქანბურბუშელოვანი კომპოზიციური მასალებისთვის, ვინაიდან ჩვენს მიერ მიღებული კომპოზიტები არ წარმოადგენენ ჰომოგენურ მასალას, რის გამოც აღნიშნული მეთოდი ნაკლებად ეფექტურია. ამის გამო კვლევა გავაკეთეთ სამ ნიმუშზე, რათა გვეჩვენა ზოგადი წარმოდგენა და შედარების საშუალება სხვა კომპოზიციურ მასალებთან. სიმტკიცე გაჭიმვაზე ჩატარდა I, VII, XLVII კომპოზიტებზე, რათა გაგვეჩვენა როგორი გავლენა ჰქონდა დაწნევის ტემპერატურას და ანტიპირენის დიდი ოდენობით არსებობას მასალის სიმტკიცეზე გაჭიმვისას.



სურათი 19. გაჭიმვის კვლევის შედეგი I (TESst 3%, 180°C) კომპოზიტისთვის - ძალისა და დეფორმაციის დამოკიდებულება

ნიმუში წარმოდგენილი იყო მართკუთხა კვეთის ფორმით, სისქით 7.3 მმ, ფართობით 10.95 მმ² და გათვლილი სამუშაო სიგრძით 70 მმ. მიღებული მონაცემების ანალიზის შედეგად დადგინდა შემდეგი მახასიათებლები: მაქსიმალური დატვირთვა - 1417.6 ნიუტონი, მაქსიმალური დეფორმაცია: 1.707 მმ, გაწყვეტის სიმტკიცე 12.946 ნ/მმ², გაწელვა: 2.44%.



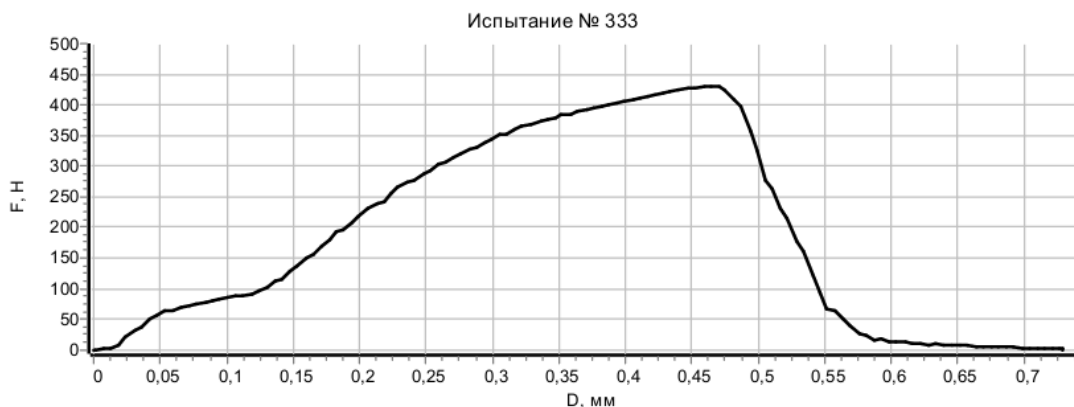
სურათი 20. გაჭიმვის კვლევის შედეგი VII” (TESst 3%, 220°C) კომპოზიტისთვის - ძალისა და დეფორმაციის დამოკიდებულება

მეორე ნიმუშის შემთხვევაში მაქსიმალური დატვირთვა 1463.1 N იყო, მაქსიმალური დეფორმაცია: 1,979 მმ, გაწყვეტის სიმტკიცე: 13.55 ნ/მმ², მასალის გაწელვა 3.53% შეადგინა, შედარებით მაღალი გაწელვის მაჩვენებელი (3.53%) მიუთითებს მცირე, მაგრამ მაინც არსებული პლასტიკური დეფორმაციის უნარზე. I და VII” ნიმუშების გრაფიკული ანალიზის საფუძველზე იკვეთება, რომ ნიმუშის გაიჭიმა 2.44%-ით, რის შემდეგაც ზედმეტი დეფორმაციის გარეშე მოხდა მყისიერი გატეხვა, რაც მიუთითებს მასალის ხისტ სტრუქტურასა და შედარებით მაღალ სიმყიფეზე, ესეთი ქცევა სრულიად შეესაბამება საშუალო სიმკვრის მერქანბოჭკოვანი ფილის ტიპურ მექანიკურ ქცევას. I ნიმუში შედარებით ნაკლებად მყიფეა ვიდრე VII“, თუმცა საერთო სურათში მაინც ავლენს დაბალ პლასტიკურობას.

მესამე ნიმუშზე (XLVII) მაქსიმალური დატვირთვა 430.1 ნ, მაქსიმალური დეფორმაცია 0.729 მმ, გაწყვეტის სიმტკიცე 3.93 ნ/მმ², მაქსიმალური გაჭიმვა 1.12%.

ზემოთ როგორც უკვე აღინიშნა, ანტიპირენის - ალუმინის ჰიდროქსიდის დიდი რაოდენობით დამატება საგრძნობლად ამცირებს პოლიმერის რეოლოგიურ თვისებებს, ამასთანავე უარყოფითად მოქმედებს მექანიკურ სიმტკიცის მაჩვენებლებზე, ამ შემთხვევაშიც შედეგი ლოგიკურია, ალუმინის ჰიდროქსიდის არსებობამ მასალაში, სიმტკიცე გაჭივზე ორჯერ შეამცირა და 0,73 მპა შეადგინა. აჩვენა ძალიან დაბალი გაჭიმვა და სიმტკიცე, რაც მიუთითებს მასალის მეტისმეტად მყიფე

ხასიათზე. გატეხვა მოხდა ძალიან მოკლე დროში (6 წამში), რაც ადასტურებს მყისიერ გატეხვას.



სურათი 21. გაჭიმვის კვლევის შედეგი XLVII (TESst 5%, Al(OH)₃ 10%, 1800C)

კომპოზიტისთვის - ძალისა და დეფორმაციის დამოკიდებულება ნახერხი 85%

გრაფიკული ანალიზის საფუძველზე იკვეთება, რომ ნიმუშებმა გამოავლინეს მაღალი სიმყიფე და მცირე ზომის წაგრძელება, რაც დამახასიათებელია მერქანბოჭკოვანი კომპოზიციური მასალებისთვის.

2.5.2 მასალის სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით

კომპოზიციურ მასალების ზედაპირის სიხისტე შევისწავლეთ ბრინელის მეთოდით, საიდანაც დავადგინეთ ზოგიერთი კომპოზიტის მექანიკური მახასიათებელი, ამასთანავე დავადგინეთ „K” კოეფიციენტი, რომელიც წარმოადგენს ღუნვის მიმართ მედეგობის ფარდობას ზედაპირის სიხისტესთან, რითიც როგორც ზემოთ უკვე აღვნიშნეთ ვიგებთ ზედაპირის სიხისტესა და მასალის შიდა სტრუქტურულ სიმტკიცეს შორის კავშირს.

ცხრილი 11. ფიჭვის კომპოზიტების ზედაპირის სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით და K-კოეფიციენტის დადგენა

#	კომპოზიტი	წნევა bar	ტემპერატურა °C	d მმ	BHN კგძ/მმ ²	R _ღ მპა	K
XL	ნახერხი 74% სილ.სტიროლი 25% 1% ბპ	150	220	2.415	51.15	19	0.4
XLIV	ნახერხი 95% +სილ.სტიროლი-3% + ბპ - 1%	150	180	3.22	27,7	52,62	1,9

	+ Al(OH) ₃ - 1%						
XLVII	ნახერხი 85% სილ.სტიროლი 5% ბპ 1% Al(OH) ₃ 10%	150	180	3.864	17,39	15.53	0.89
XLVIII	ნახერხი 85% სილ.სტიროლი 5% Al(OH) ₃ 10% ბპ 1%	150	220	4.025	15.66	31.96	2.04
XLIX	ნახერხი 96% სილ.სტიროლი 3% ეთილსილიკატი 1% ბპ 1%	150	180	3.542	22.34	49.9	2.23
L	ხის ნახერხი 96% +სილ.სტიროლი-3% + ბპ 1% ეთ.სილიკატი 1%	150	220	2.3345	55.17	52.8	0.96
LI	ნახერხი 95% სილ.სტიროლი 3% ეთილსილიკატი 2% ბპ 1%	150	180	3.22	27.09	44.64	1.65
LIII	ნახერხი 95% სილ.სტიროლი 5% ეთილსილიკატი 3% ბპ 1%	150	180	4.025	15.66	27.07	1.73

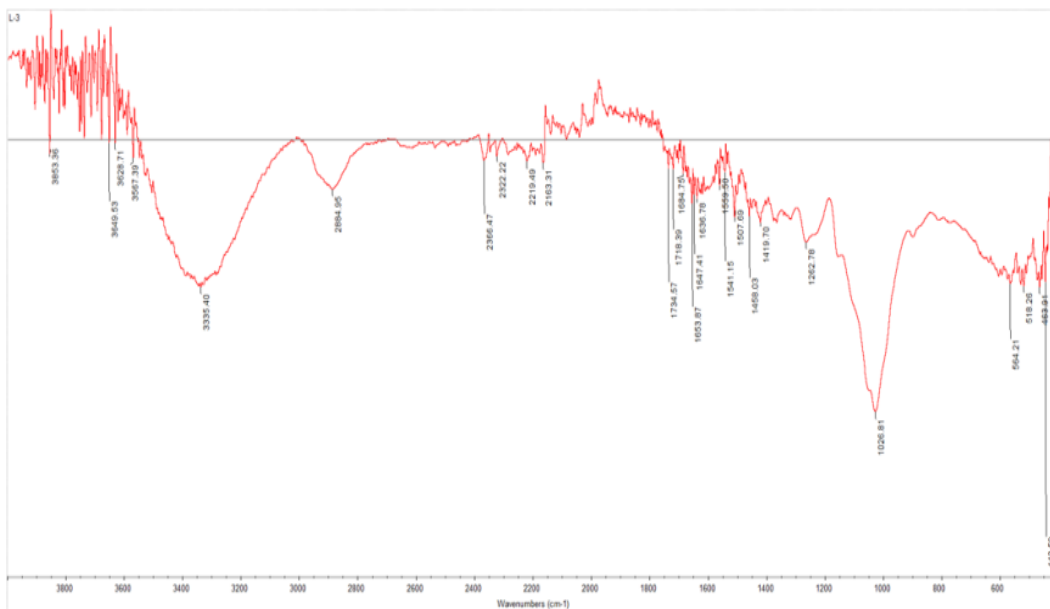
ცხრილში მიღებული მონაცემებიდან შეგვიძლია გარკვეული დასკვნების გაკეთება, იმ შემთხვევაში, როცა ნიმუშზე არსებული ინდენტორის d-ს მნიშვნელობა მაღალია, ესეთ დროს შემცირებულია ბრინელის რიცხვი, რაც ლოგიკურიცაა, აქედან გამომდინარე შეგვიძლია ვთქვათ, რომ მასალის სიხისტე მით უფრო მცირეა, რაც უფრო მაღალია d-ს მნიშვნელობა, მისი მნიშვნელობა კი მჭირდროდ არის დაკავშირებული, როგორც კომპოზიციაზე ასევე თითოეულ პარამეტრზე. XLIX და L კომპოზიციებში, სხვაობა მხოლოდ ტემპერატურაა, ფაქტია რომ მაღალმა ტემპერატურამ სიხისტეზე დადებითად იმოქმედა, ვინაიდან 2,5-ჯერ უფრო გაზრდილია აღნიშნული მაჩვენებელი. ისეთ შემთხვევაში, სადაც გამოყენებული გვექონდა დიდი ოდენობით ალუმინის ჰიდროქსიდი, მასალის სიხისტე მკვეთრად არის შემცირებული, ასევე მკვეთრად არის შემცირებული სხვა მექანიკური მახასიათებლებიც, მათ შორის სიმტკიცე გაჭიმვაზე. ესეთ კომპოზიციებში

გაზრდილია d-ს მნიშვნელობა, შესაბამისად მცირეა ბრინელის რიცხვი. ეთილსილიკატის არსებობამ კომპოზიციაში, მაღალ ტემპერატურაზე მიღებულ მასალებში გაზარდა სიხისტის მაჩვენებელი, აღნიშნული უფრო მეტად აშკარა რომ იყოს, შეგვიძლია შევადაროთ L და LI კომპოზიტები, სადაც d მნიშვნელობა დაბალ ტემპერატურაზე 1,4 ჯერ მეტია, შესაბამისად ესეთი კომპოზიტის სიხისტე 2-ჯერ ნაკლებია. ასევე სიხისტის გათვალისწინების კარგი შედეგია XL კომპოზიტის შემთხვევაც, სადაც ინდენტორით ყველა მცირე ჩაღმავებაა მიღებული (d-ს მნიშვნელობა ყველაზე მცირეა), ეს სავარაუდოდ განპირობებულია სინთეზური პოლიმერის მაღალი შემცველობით და მისი ელასტიური ხასიათით. სინთეზური პოლიმერი, როგორც ჩანს, ხელს უწყობს მცირე დეფორმაციის შთანთქმას და სტრუქტურის მდგრადობას ინდენტაციის დროს, რაც მის უპირატესობას განსაზღვრავს მექანიკური დატვირთვის პირობებში. ცხრილში ასევე დათვლილია K-ს მნიშვნელობები, სტანდარტებიდან ცნობილია, რომ ბურბუშელოვანი ტიპის მასალებისთვის K-ს დიაპაზონი უნდა მეყვოდეს 0.8-1.2 ფარგლებში, რასაც ჩვენს მიერ მიღებული კომპოზიტები მოთხოვნას სავსებით აკმაყოფილებენ.

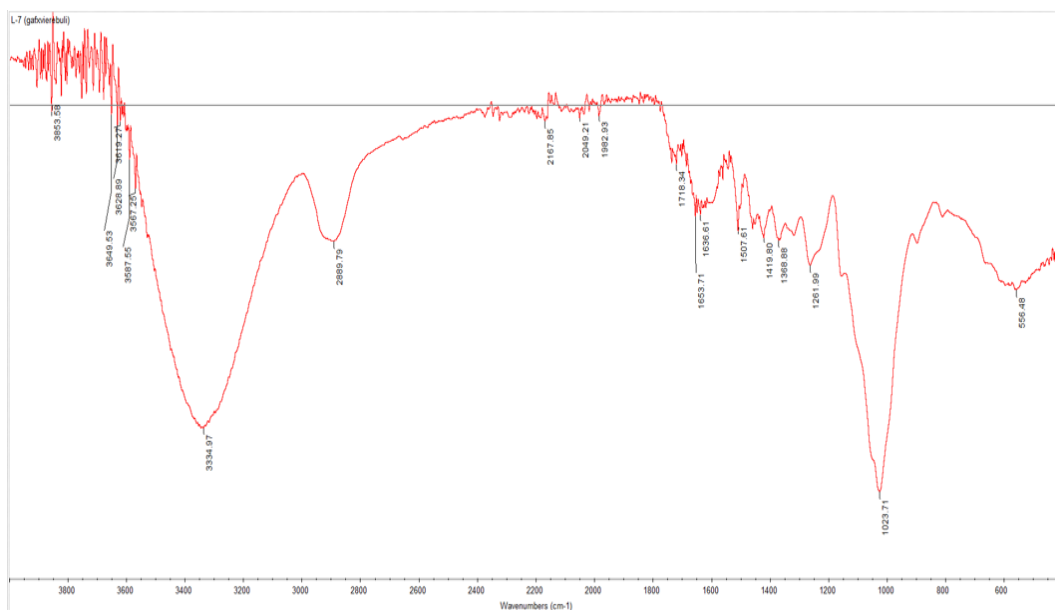
2.6 კომპოზიციური მასალების ფიზიკური კვლევები

2.6.1 ფურიე გარდაქმნის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული გამოკვლევები

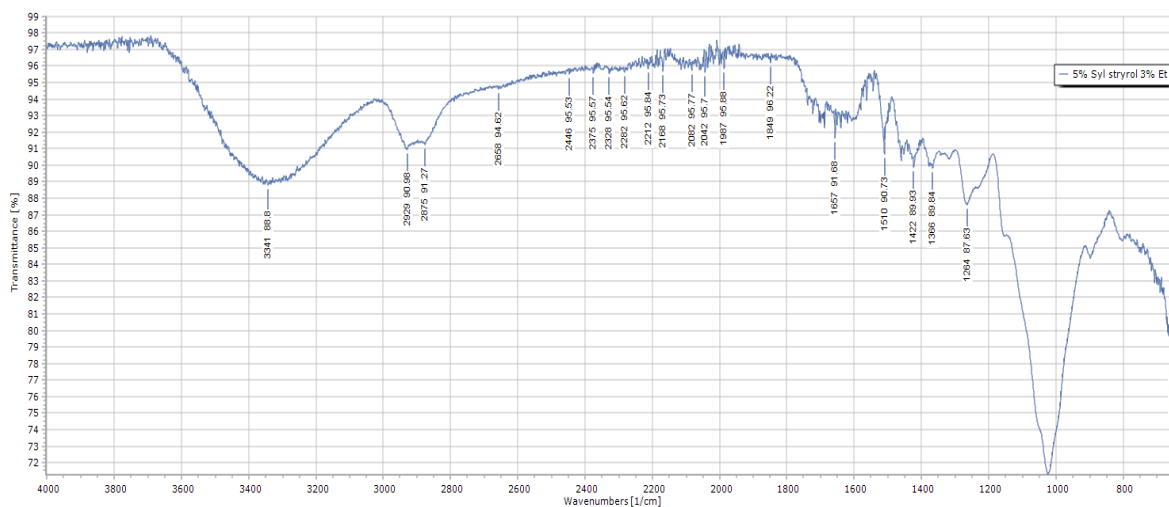
მიღებული კომპოზიტებისათვის ჩავატარეთ ფურიე გარდაქმნის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული გამოკვლევები. სპექტრებში შეიმჩნევა შთანთქმის ზოლები 1026 სმ^{-1} უბანში დამახასიათებელი ხაზოვანი $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ ბმის ასიმეტრიული ვალენტური რხევებისათვის. შთანთქმის ზოლები 1150 სმ^{-1} შეესაბამება ასიმეტრიულ ვალენტურ რხევებს დამახასიათებელს Si-O-C და C-O-C ბმებისათვის. ამ შემთხვევაში ადგილი აქვს შთანთქმის ზოლების ზედდებას. შთანთქმის ზოლები 1262, 1370, 1419, 1507, 1600-1650, 1720, 2800-2950 და 3346 სმ^{-1} უბანში შეესაბამება მეთილის ჯგუფს. CH ბმებს ($-\text{C}/\text{C}-/\text{CH}_3$), CH_2 ცელულოზა-ლიგნინი, $\text{C}=\text{C}$ არომატული, $\text{C}=\text{C}$ ალკენი, ($\text{C}=\text{O}$ ესტერული ბმა), ფენილის და $-\text{OH}$ ჯგუფებისათვის შესაბამისად. შთანთქმის ზოლები 1349 და 1458 სმ^{-1} უბანში შეესაბამება $\equiv\text{Si-OC}_2\text{H}_5$ ჯგუფებს (გრაფიკი 15, 16).



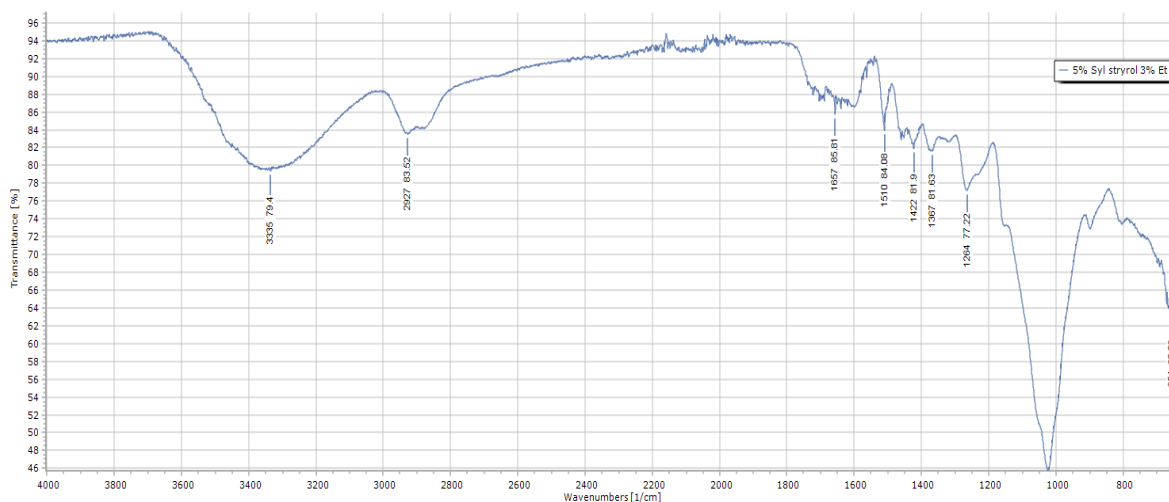
გრაფიკი 15. კომპოზიტის (III - ხის ნახერხი 97% +სილ.სტიროლი 3% 180°C) FTIR სპექტრი



გრაფიკი 16. კომპოზიტის (VII - ხის ნახერხი 97% +სტიროლი 3% 200°C) FTIR სპექტრი შესწავლილია 3%-იანი ეთილსილიკატის შემცველი LIII- LIV კომპოზიტის ინფრაწითელი სპექტრი.



გრაფიკი 17. LIII კომპოზიტის (3% ეთილსილიკატი+ 5% სილ.სტ.-180°C) იწ სპექტრი



გრაფიკი 18. LIV კომპოზიტის (3% ეთილსილიკატი+ 5% სილ.სტ.-220°C) იწ სპექტრი

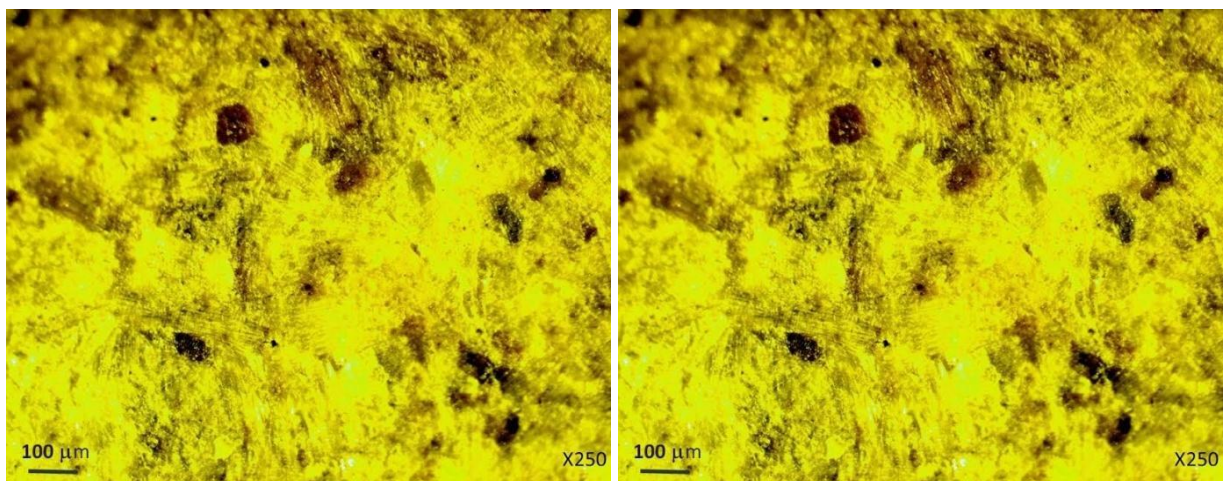
სპექტრებში შეიმჩნევა შთანთქმის ზოლები 1027 სმ^{-1} უბანში დამახასიათებელი ხაზოვანი $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ ბმის ასიმეტრიული ვალენტური რხევებისათვის. შთანთქმის ეს ზოლი ზედდება $\equiv\text{Si-O-C=}$ ბმის დამახასიათებელ შთანთქმის ზოლთან. შთანთქმის ზოლები 1264, 1366, 1422, 1510-1522, 1657, 1730, 2800-3000 და 3341 სმ^{-1} უბანში შეესაბამება მეთილის ჯგუფს. CH ბმებს ($-\text{C} / \text{C}- / \text{CH}_3$), CH_2 ცელულოზა-ლიგნინი, $\text{C}=\text{C}$ არომატული, $\text{C}=\text{C}$ ალკენი, ($\text{C}=\text{O}$ ესტერული ბმა), ფენილის და $-\text{OH}$ ჯგუფებისათვის შესაბამისად.

2.7 ოპტიკურ კვლევები

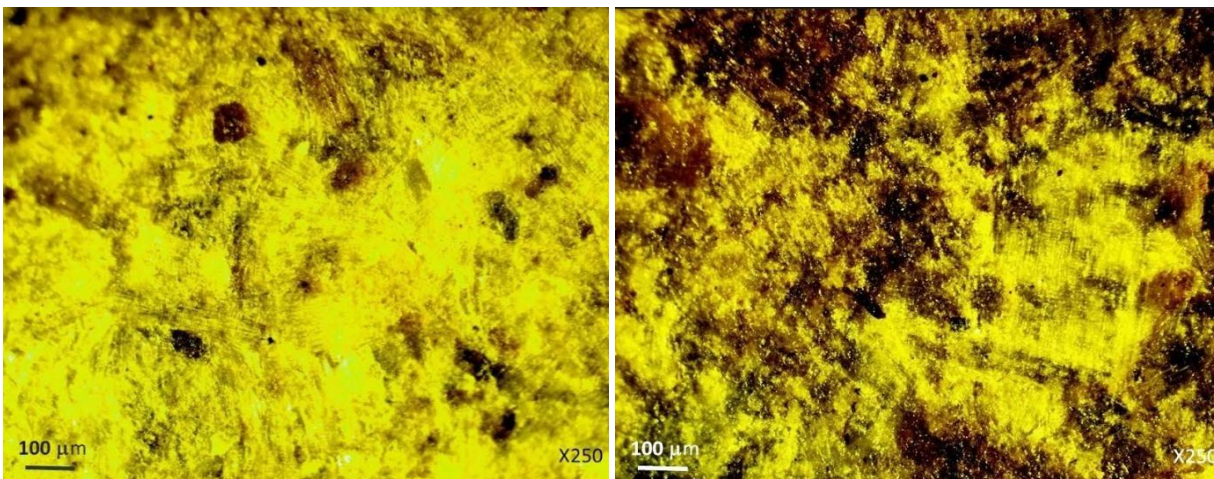
2.7.1 ფიჭვის კომპოზიტების ზედაპირის მორფოლოგიური ანალიზი

ფიჭვის ნახერხი გაიცრა სხვადასხვა ზომის საცრებში, კომპოზიტების მისაღებად გამოვიყენეთ 1 მილიმეტრი ზომის საცრეში გატარებული ფრაქცია, რომელსაც შემდგომ დავაკვირდით ოპტიკური მიკროსკოპის საშუალებით, სადაც გამოჩნდა 0,02მმ - 1მმ ზომის მერქნის ფანტელები.

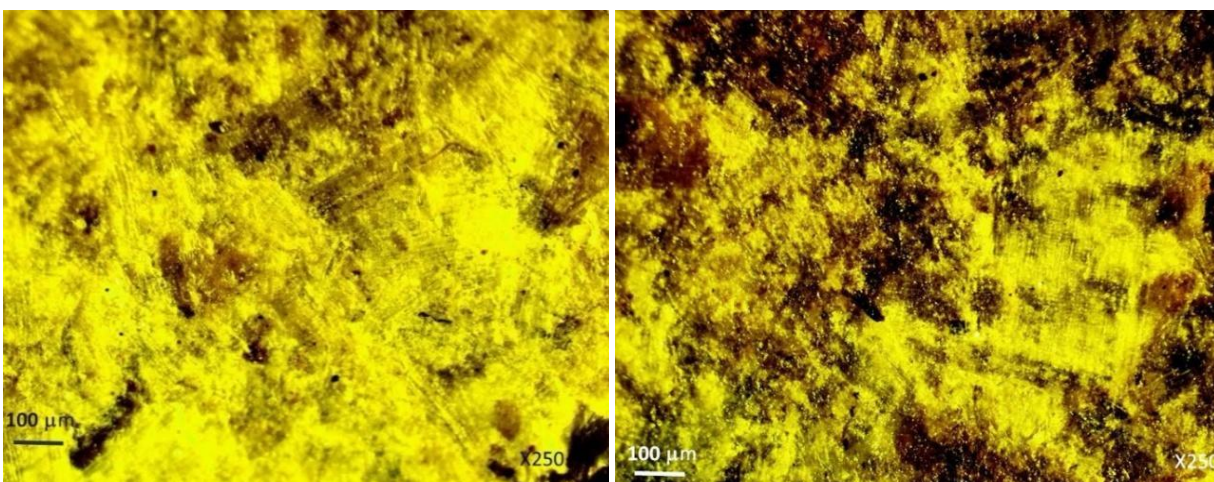
სურათი 22-25 გვიჩვენებს კომპოზიტების მიკროგრაფებს x250 გადიდებისას, სხვადასხვა უბანში. მიკროგრაფებზე შეიმჩნევა ამორფული კლასტერები ზომით 20-75 მკმ, ასევე შეიმჩნევა კონცენტრაციული არაერთგვაროვნება. ძირითადად მიღებული კომპოზიტები იზოტროპიულია და ხასიათდება სუპრამოლეკულური სტრუქტურების ბოჭკოვანი აგებულებით. მიკროგრაფულ სურათებზე შეიმჩნევა სხვადასხვა ზომის ჩანართები (საშუალოდ 300 მიკრომეტრი). ასევე შეიმჩნევა ბზარები, გამყოფი ხაზები და ზედაპირული დეფექტები, რომლებიც ცხლად დაწნეხვის დროს წარმოიქმნება, რომელთა ზომები ადვილად შეიძლება დადგინდეს სურათზე ნაჩვენები მასშტაბის - 100 მიკრომეტრიანი ზოლის გამოყენებით.



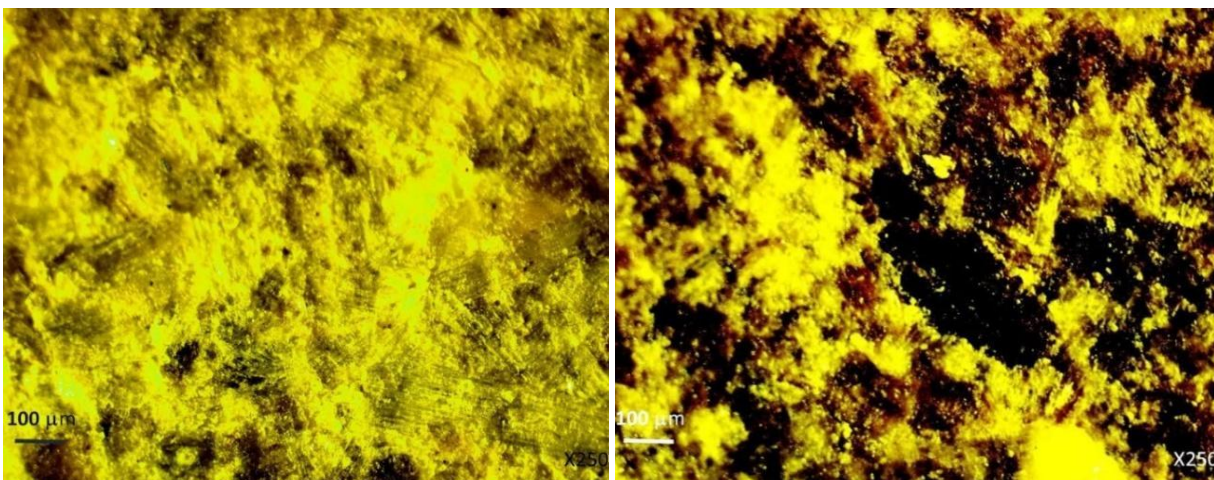
სურათი 22. III კომპოზიტის ოპტიკური მიკროგრაფი (ნახერხი 97%, სილ.სტიროლი - 3%, 180°C)



სურათი 23. VII კომპოზიტის ოპტიკური მიკროგრაფი (ნახერხი 97%, სილ.სტიროლი - 3%, 220°C)



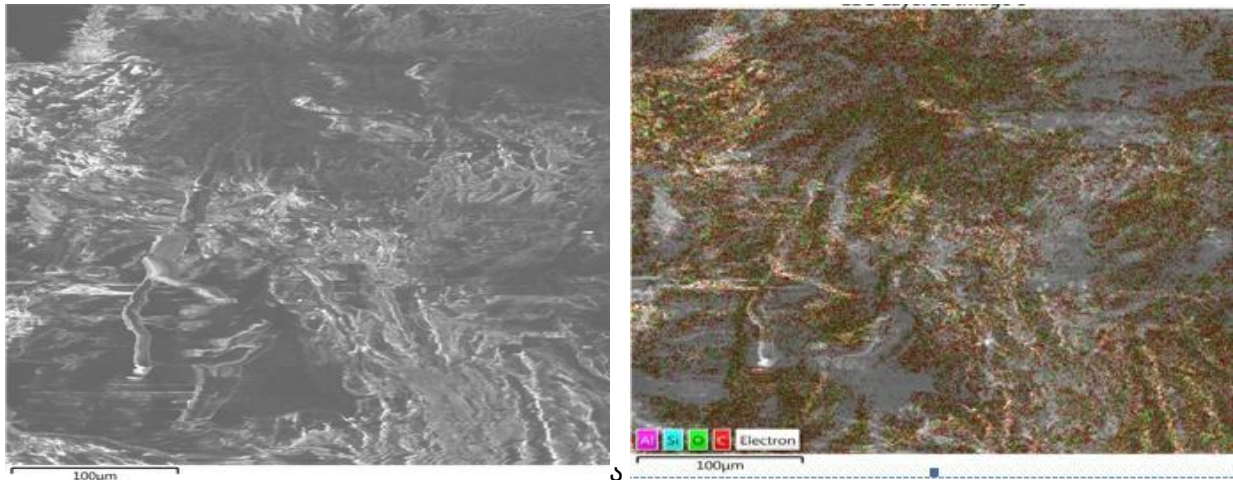
სურათი 24. X კომპოზიტის ოპტიკური მიკროგრაფი (ნახერხი 95%, სილ.სტიროლი - 5%, 180°C)



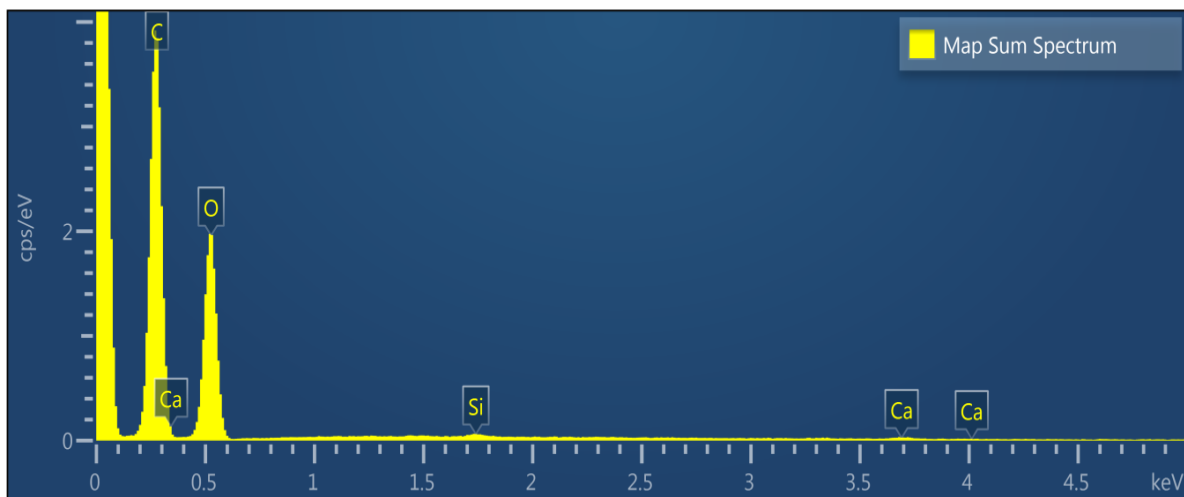
სურათი 25. XIV კომპოზიტის ოპტიკური მიკროგრაფი (ნახერხი 90%, სილ.სტიროლი - 10%, 220°C)

2.7.2 სკანირებადი ელექტრონ-მიკროსკოპიული გამოკვლევები

შევისწავლეთ კომპოზიტების ზედაპირის მორფოლოგია რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპის გამოყენებით. დასაკვირვებელი უბნების შერჩევა მოხდა შემთხვევითობის პრინციპით, თითოეულ მხარეს დაკვირვება მოხდა 4-4 უბანზე. სურათებზე 32-34 წარმოდგენილია III, IV და VII კომპოზიტის მიკროგრაფები, საიდანაც ჩანს ზედაპირის არაერთგვაროვანი მორფოლოგია. მიკროგრაფებზე მკვეთრი შეფერილობები აღნიშნავს ცალკეულ უბანზე არსებულ ფორებს. ბ-3 კომპოზიტის გამოსახულება ფერადი ლაქების სახითაა წარმოდგენილი, ვარდისფერი ლაქები აღნიშნავს ალუმინის განაწილებას კომპოზიტში, ცისფერი შეფერილობის ლაქები სილიციუმის შემცველობას, მწვანე ლაქები ქანგბადის, ხოლო წითელი შეფერილობის ლაქები ნახშირბადის ელემენტის განაწილებას კომპოზიტის ზედაპირზე.



სურათი 26. III კომპოზიტის სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები



გრაფიკი 19. III კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური სპექტრი 2

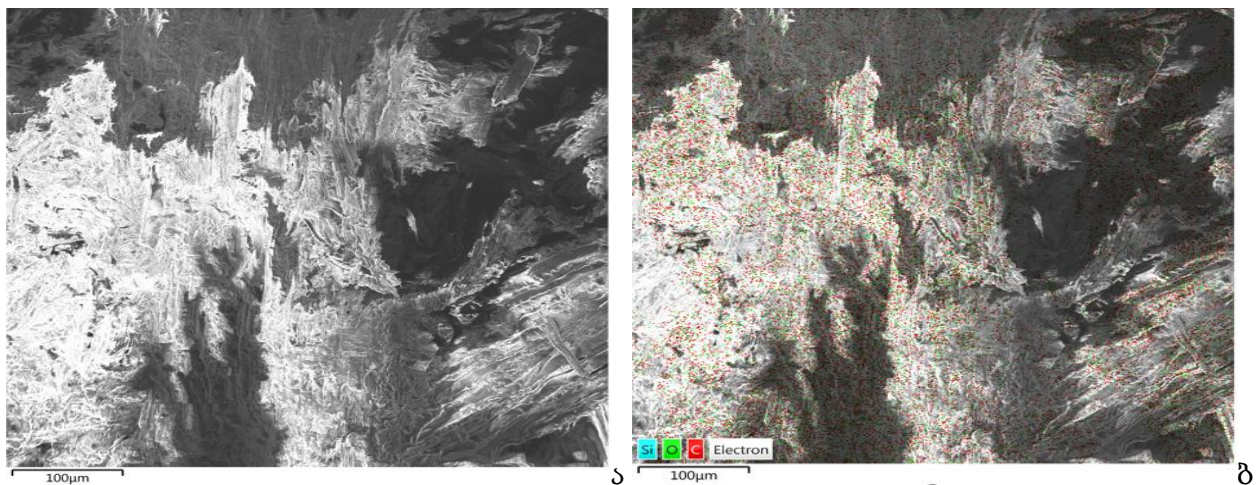
მე-19 გრაფიკზე მოცემულია III კომპოზიტის ენერგოდისპერსიული სპექტრი, სადაც მიკროანალიზის სპექტრზე პიკებით აღნიშნულია ელემენტების პროცენტული განაწილება.

მე-12 ცხრილში მოცემულია III კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზის შედეგები.

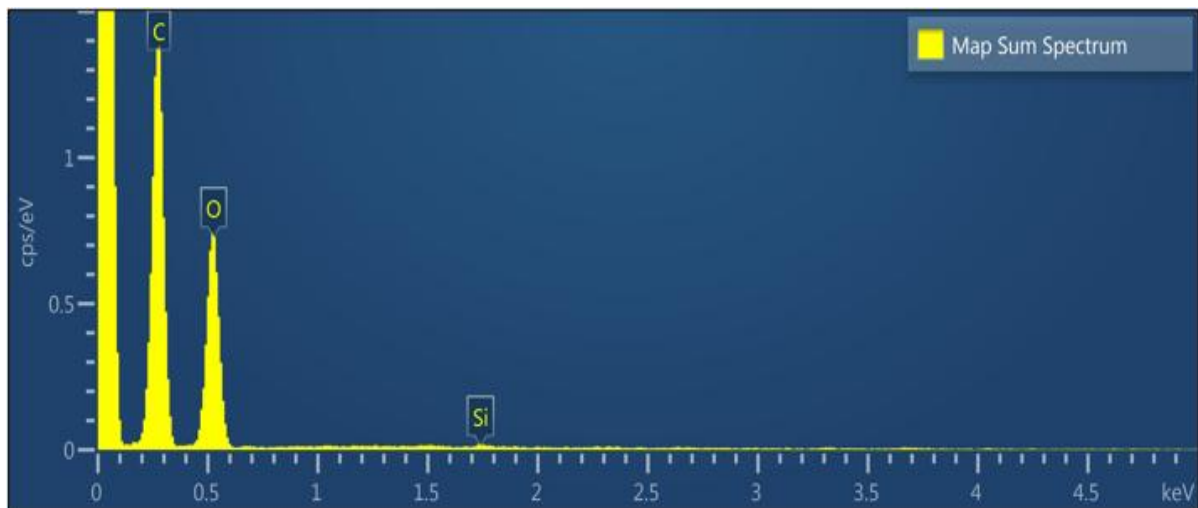
Map Sum Spectrum				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	52.46	0.23	59.56
O	K series	47.34	0.23	40.35
Si	K series	0.09	0.01	0.04
Ca	K series	0.11	0.01	0.04
Total		100.00		100.00

ცხრილი 12. III კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი

33-ე სურათზე მოცემულია IV კომპოზიტის სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპიით მიღებული მიკროგრაფები.



სურათი 27. IV კომპოზიტის სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპიის მიკროგრაფები



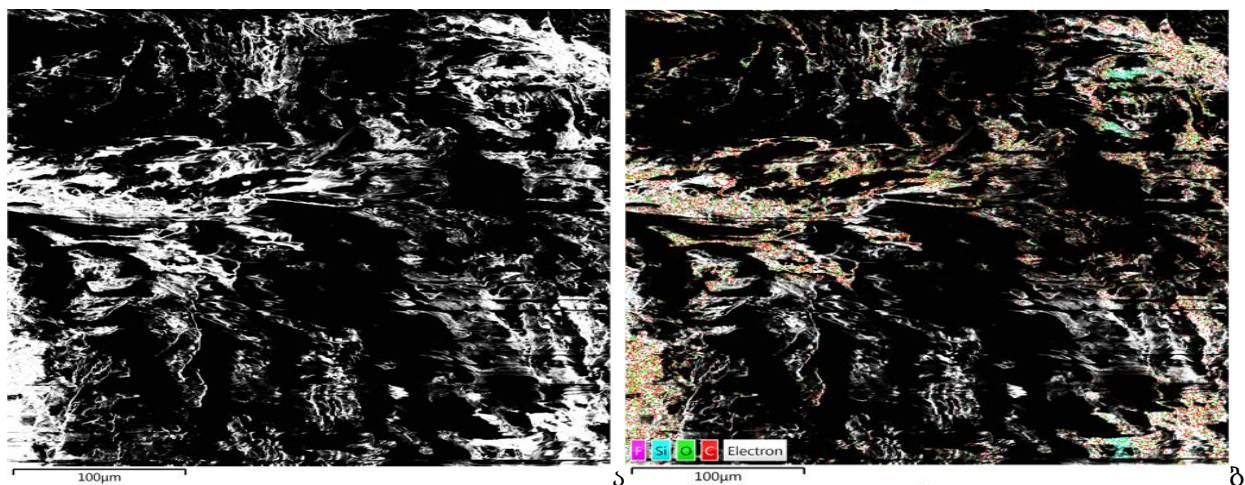
გრაფიკი 20. IV კომპოზიტის ენერგოდისპერსიული X-სხივური სპექტრი

სადაც ა - ასახავს შემთხვევითობის პრინციპით IV კომპოზიტის ცალკეულ უბანზე გადაღებულ სემ-მიკროგრაფს, სადაც მკვეთრი შეფერილობები აღნიშნავს უბანზე არსებულ ფორებს. ბ-ზე - IV კომპოზიტის გამოსახულება ფერადი ლაქების სახითაა წარმოდგენილი, ცისფერი შეფერილობის ლაქები ესადაგება სილიციუმის შემცველობას, მწვანე ლაქები ჟანგბადის, ხოლო წითელი შეფერილობის ლაქები ნახშირბად ელემენტის მდებარეობას.

ცხრილი 13. IV კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი

Map Sum Spectrum				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	51.62	0.43	58.72
O	K series	48.29	0.43	41.24
Si	K series	0.09	0.02	0.04
Total		100.00		100.00

30-ე სურათზე მოცემულია VII კომპოზიტის სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპით მიღებული მიკროგრაფები:



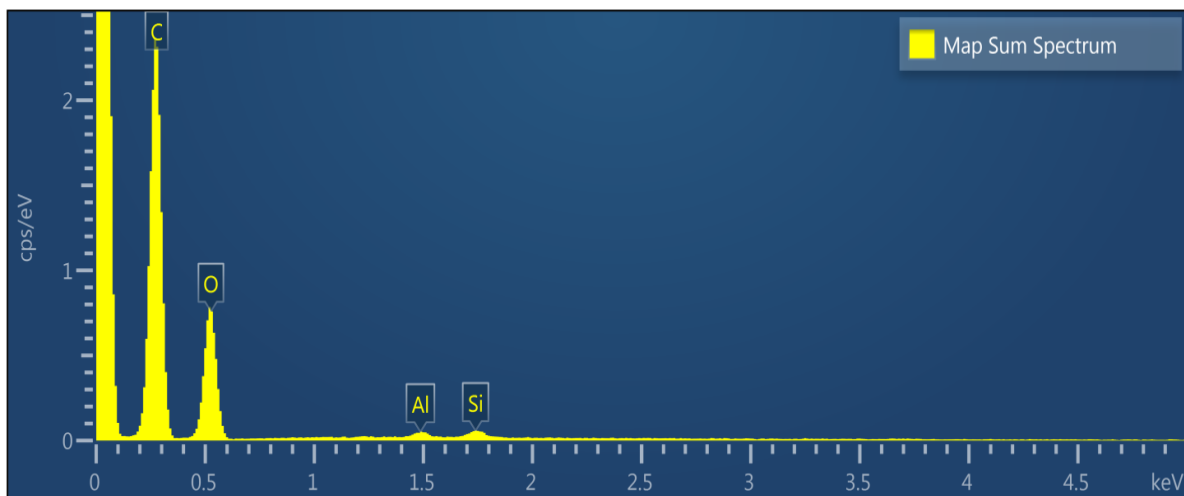
სურათი 28. VII კომპოზიტის სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები

სადაც ა - ასახავს შემთხვევითობის პრინციპით მე-7 კომპოზიტის ცალკეულ უბანზე გადაღებულ სემ-მიკროგრაფს, სადაც მკვეთრი შეფერილობები აღნიშნავს უბანზე არსებულ ფორებს, ზედაპირის არაერთგვაროვან მორფოლოგიას - ჩაღმავებებს,

ჩანართებს, რომელთა ზომა 30-40 მკმ ფარგლებშია. რაც შეეხება სურათს 3ბ, აქ VII კომპოზიტის გამოსახულება ფერადი ლაქების სახითაა წარმოდგენილი, ვარდისფერი ლაქები აღნიშნავს ალუმინის არსებობას კომპოზიტის ზედაპირზე, ცისფერი შეფერილობის ლაქები სილიციუმის შემცველობას, მწვანე ლაქები ჟანგბადის, ხოლო წითელი შეფერილობის ლაქები ნახშირბად ელემენტის მდებარეობას.

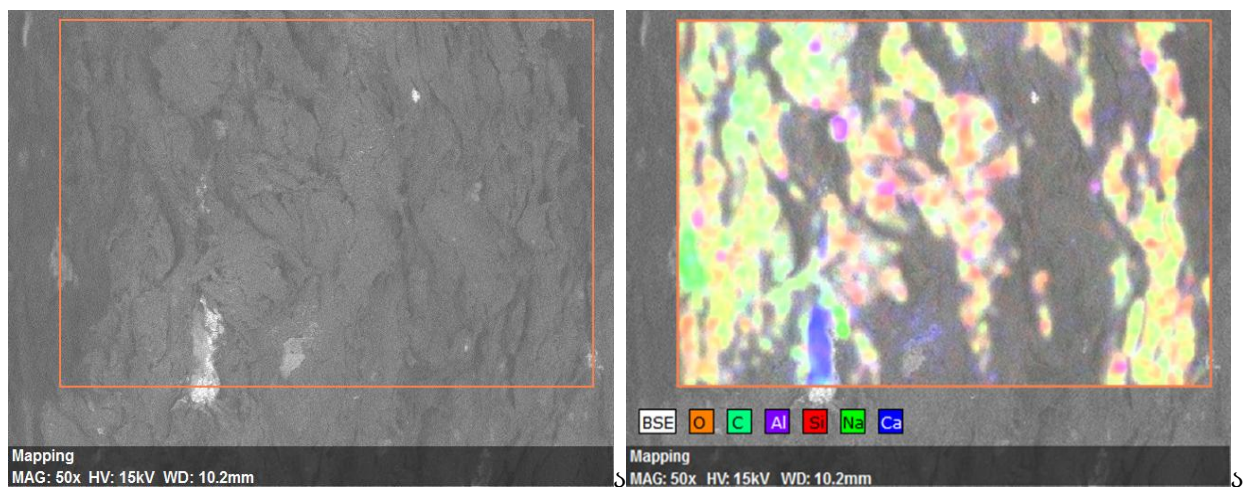
როგორც ცნობილია ენერგოდისპერსიული სპექტროსკოპია არის სტანდარული მეთოდი ელემენტარული კომპოზიციების იდენტიფიკაციისა და რაოდენობრივი განსაზღვრისათვის მასალის ძალიან მცირე ნიმუშში (თუნდაც რანდენიმე კუბური მიკრომეტრი). იგი ეყრდნობა ურთიერთქმედებას რენტგენის ალგზნების წყაროსა და ნიმუშს შორის, კერძოდ საკვლევი ნიმუშის ზედაპირზე არსებული ატომები ალგზნებულია ელექტრონული სხივებით და ასხივებენ რენტგენის სხივების სეციფიკური ტალღის სიგრძეს, რომლებიც დამახასიათებელია ელემენტის ატომური სტრუქტურისათვის. დეტექტორს შეუძლია გაანალიზოს ეს ემისია და მიანიჭოს შესაბამისი ელემენტის სტრუქტურა.

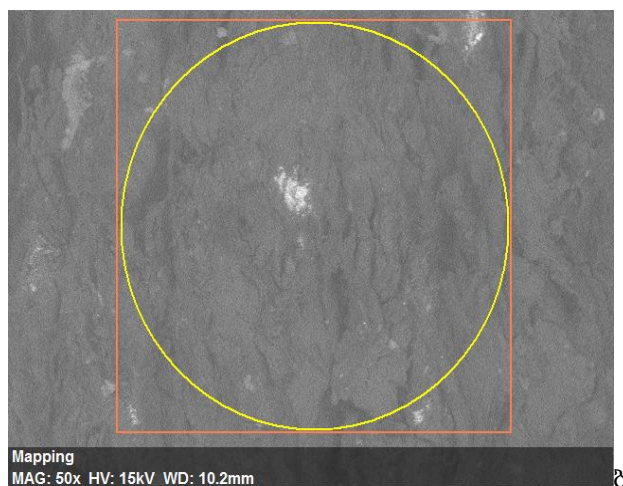
რაოდენობრივი ანალიზის დროს, ნიმუშში არსებული კონკრეტული ელემენტის კონცენტრაცია იზომება პიკების ინტენსივობით. ვინაიდან თითოეულ ელემენტს გააჩნია უნიკალური ატომური სტრუქტურა, იგი იძლევა პიკების რიგს ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრში. რაოდენობრივი ანალიზის დროს გამოვლენილია სპექტრში სხვადასხვა ინტენსივობის რენტგენული პიკები მითითებული პოზიციებით. ცხრილი 12, 13 და 14 ენერგოდისპერსიულ X-სხივური სპექტრები აღწერს III, IV და VII ნახერხისკომპოზიტის ელემენტურ შედგენილობას, ენერგოდისპერსიულ X-სხივური მიკროანალიზის სპექტრზე პიკებით აღნიშნული ელემენტების პროცენტულ განაწილებას. მიღებული სპექტრებიდან და ასევე ცხრილიდან ჩანს, რომ კომპოზიტში შემავალი ძირითადი ელემენტებია C, O, Si, F და Ca, სადაც ყველაზე მეტი რაოდენობით ელემენტი ნახშირბადი არის წარმოდგენილი.



გრაფიკი 21. VII კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური სპექტრი
 ცხრილი 14. VII კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი

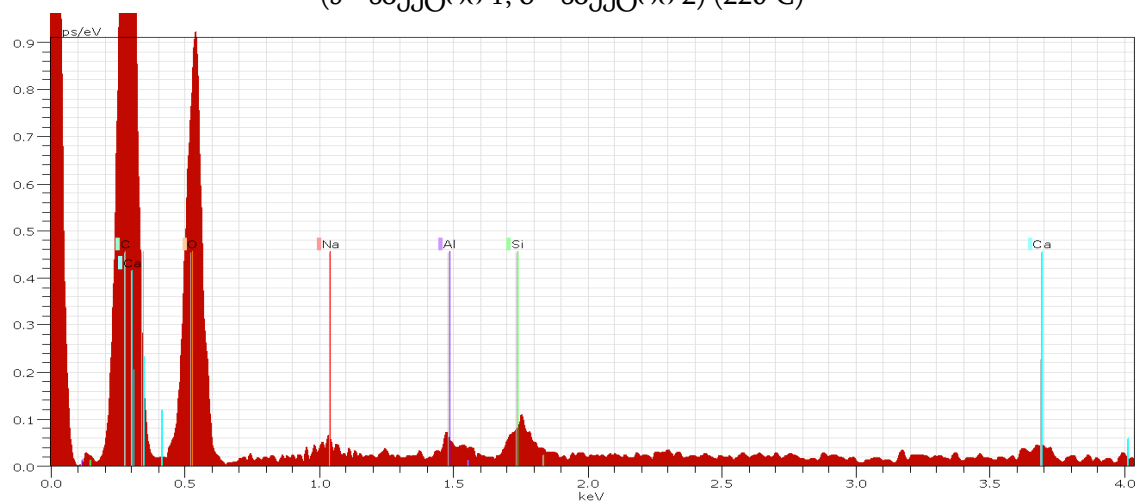
Map Sum Spectrum				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	52.55	0.31	59.77
O	K series	46.36	0.31	39.59
Si	K series	0.59	0.03	0.29
F	K series	0.50	0.14	0.36
Total		100.00		100.00



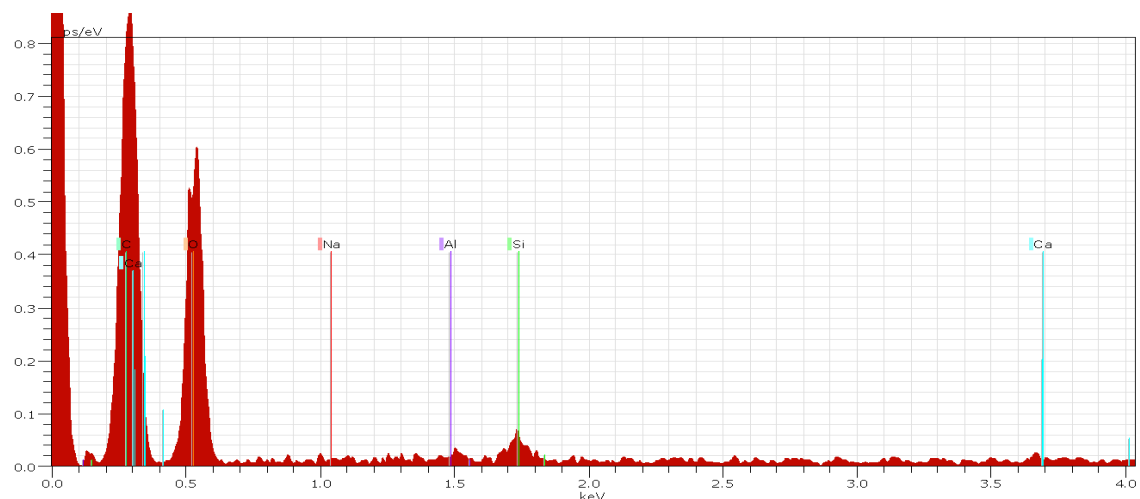


სურათი 29. 2% $\text{Al}(\text{OH})_3$ 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი შემცველი კომპოზიტის XLVI კომპოზიტის სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები 200-ჯერ გადიდების პირობებში

(ა - სპექტრი 1, ბ - სპექტრი 2) (220°C)



ს



ბ

გრაფიკი 22. 2% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVI ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი (ა - სპექტრი 1, ბ - სპექტრი 2 - 220°C)

ცხრილი 15. 2% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% შემცველი ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის კომპოზიტის XLVI ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი (სპექტრი 1-220°C)

Spectrum: Point

Element AN Series norm. C Atom. C

[wt.%) [at.%)

Carbon	6	K-series	50.68	58.24
Oxygen	8	K-series	47.16	40.69
Silicon	14	K-series	0.77	0.38
Sodium	11	K-series	0.60	0.36
Calcium	20	K-series	0.46	0.16
Aluminium	13	K-series	0.34	0.17

Total: 100.00 100.00

ცხრილი 16. 2% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVI ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი (სპექტრი 2-220°C))

Spectrum: Point

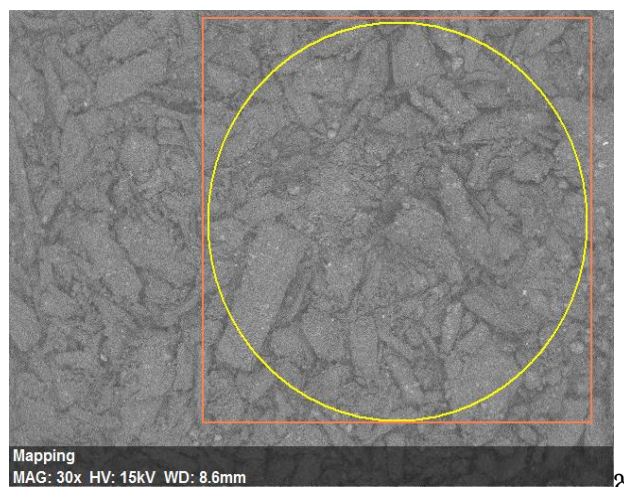
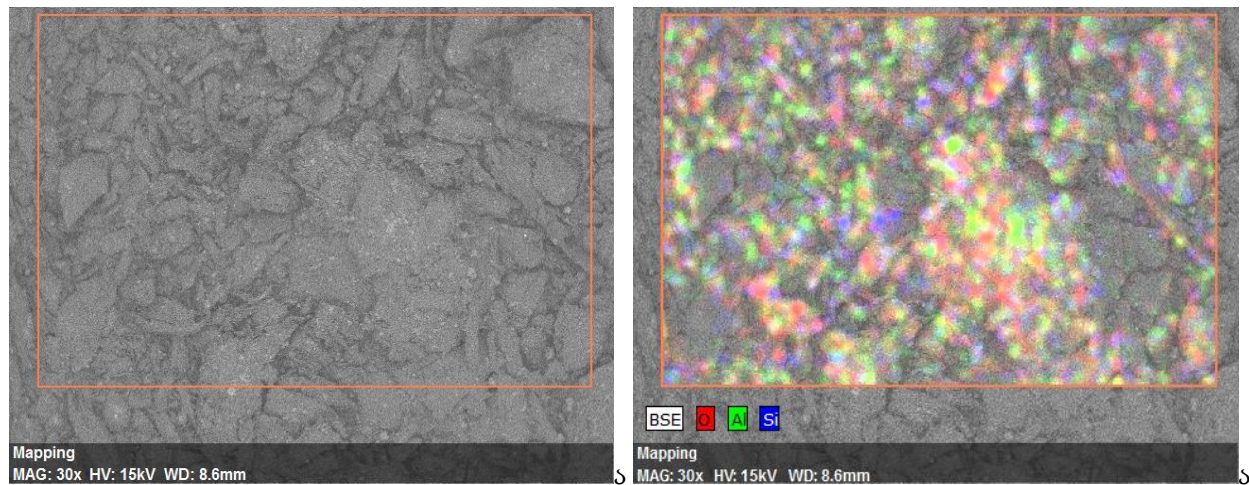
Element AN Series norm. C Atom. C

[wt.%) [at.%)

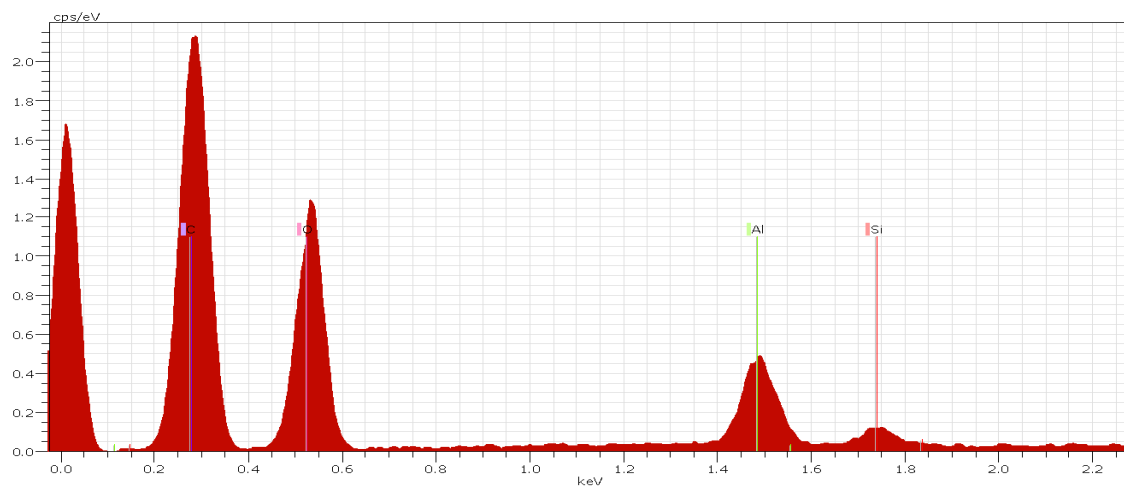
Oxygen	8	K-series	52.64	45.66
Carbon	6	K-series	46.81	54.09
Silicon	14	K-series	0.40	0.20
Calcium	20	K-series	0.16	0.06

Aluminium 13 K-series	0.00	0.00
Sodium 11 K-series	0.00	0.00

Total:	100.00	100.00



სურათი 30. 10% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVIII სკანირებად ელექტრონული მიკროსკოპის მიკროგრაფები 200-ჯერ გადიდების პირობებში (ა-სპექტრი 1, ბ -სპექტრი 2)



5

გრაფიკი 23. 10% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% 220C ტრეითოქსილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVIII ენერგო დისპერსიული X-სხივური სპექტრი

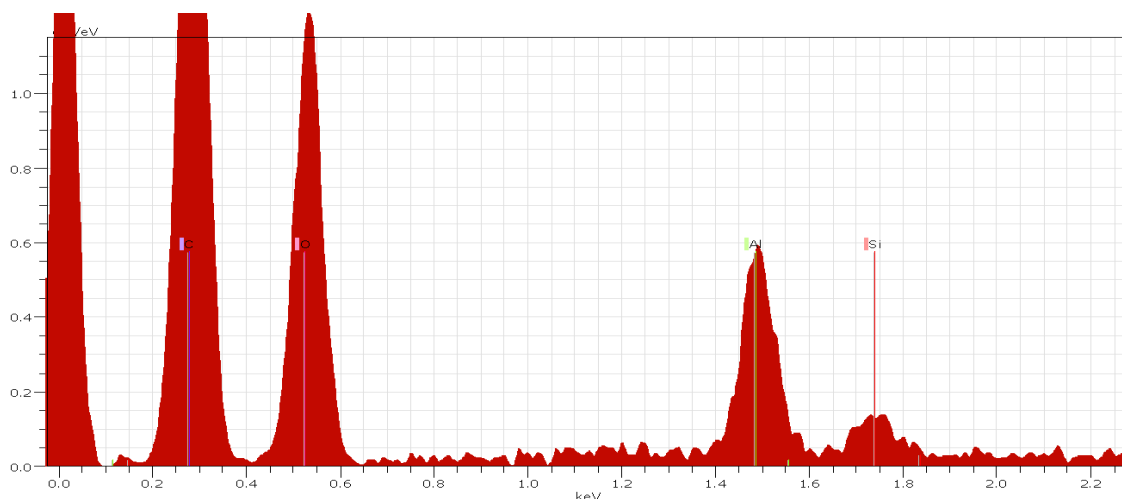
(ა - სპექტრი 1, ბ - სპექტრი 2) (ა - სპექტრი 1)

Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm.	C Atom.	C
			[wt.%]	[at.%]	

Carbon	6	K-series	51.97	59.86
Oxygen	8	K-series	44.11	38.14
Aluminium	13	K-series	3.25	1.67
Silicon	14	K-series	0.67	0.33

Total: 100.00 100.00



ბ

ცხრილი 17. 10% $\text{Al}(\text{OH})_3$ და 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XLVIII ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი

(ბ - სპექტრი 2)

Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm.	C	Atom.	C
	[wt.%]				[at.%]	

Carbon	6	K-series	51.21	59.31
Oxygen	8	K-series	43.97	38.23
Aluminium	13	K-series	3.97	2.05
Silicon	14	K-series	0.85	0.42

Total: 100.00 100.00

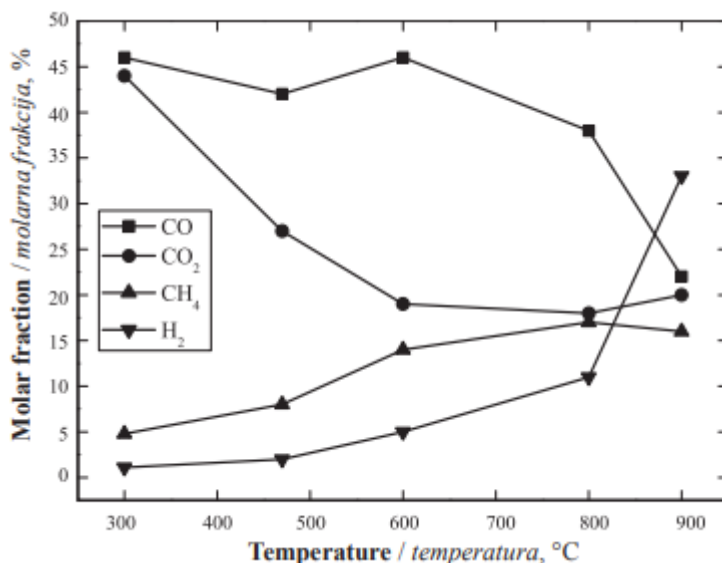
ცხრილი 18. 10% $\text{Al}(\text{OH})_3$ შემცველი კომპოზიტის XLVIII ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი

გამომდინარე იქიდან რომ, ჩვენი შემავსებელი მერქნის დაქუცმაცებულ ფრაქციას წარმოადგენს, 32-ე და სხვა SEM სურათებზე 100x მიახლოების პირობებში, დაიმზირება წახნაგოვანი ნაწილაკების ასიმეტრიული განლაგება.

2.8 თერმული თვისებების შესწავლა

2.8.1 თერმოგრავიმეტრული გამოკვლევები

თერმოგრავიმეტრული ანალიზი ჩატარდა, როგორც ინერტულ - აზოტის, ისე ატმოსფერული ჰაერის არეში. ინერტულ აირმატარებლად გამოვიყენეთ აირადი აზოტი, აღნიშნული პროცესი ჩატარდა ოთახის ტემპერატურიდან 900°C ინტერვალში. ესეთ დროს თერმოჟანგვითი დესტრუქცია შეზღუდულია, შესაბამისად კომპოზიტის გახურება 900°C -მდე გახდა შესაძლებელი. უცხოური წყაროებიდან ცნობილია, რომ ინერტულ არეში მიმდინარე პროცესის დროს, საკვლევ მასალაში შემავალი ბიოპოლიმერების დეკომპოზიციას აქვს ადგილი, უფრო მცირე ზომის მოლეკულებად. რთული სათქმელია, აღნიშნული ბიოპოლიმერები, რომელ დაბალმოლეკულურ ნივთიერებებად იშლება, თუმცა სამეცნიერო სტატიებიდან ცნობილია ცელულოზის, ჰემიცილულოზის და ლიგნინის ჟანგვითი პიროლიზური დაშლის პროდუქტები (Karol Ronewicz 2016). 37-ე სურათზე განხილული აქვთ ფიჭვის ხის პიროლიზური დაშლის დროს სხვადასხვა ტემპერატურაზე გამოყოფილი CO , CO_2 , CH_4 , H_2 -ის კონცენტრაციების ვარირება.

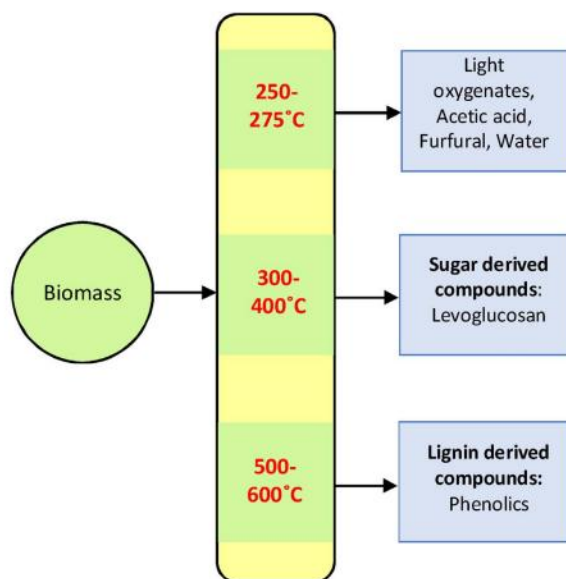


სურათი 31. ტემპერატურის და გაზების წარმოქმნის დამოკიდებულება ფიჭვის ხის პიროლიზური დაშლის დროს

31-ე სურათი აღებულია Researchgate.net-დან J. K. L. H. D. K. Karol Ronewicz, "Chemical and Physical Properties of Pine Wood during Pyrolysis," 15.11.2016.

ატმოსფერული ჰაერის არეში ჩატარებული კვლევებმა საშუალება მოგვცა შეგვესწავლა კომპოზიციური მასალების თერმული ქცევა 500°C-მდე, ეს პროცესი ჟანგვითი პიროლიზის სახელთაა ცნობილი. ჟანგვითი პიროლიზი წარმოადგენს პოლიმერების წვის პროცესს ჰაერის ან ჭარბი ჟანგბადის არეში, რის შედეგადაც წარმოიქმნება სხვადასხვა ჟანგბადშემცველი დაბალმოლეკულური ნაერთები. აღნიშნული პროცესი მნიშვნელოვანია ჟანგბადიან გარემოში პოლიმერების დაშლის მექანიზმის შესასწავლად (Engineering, Oxidative Pyrolysis 2016). კვლევა ჩატარდა V-IX-X ნიმუშზე, ოთახის ტემპერატურიდან - 500°C-მდე, 10°C/წთ გახურების პირობებში. ტემპერატურული ინტერვალი შეირჩა შემავსებლის ბუნებიდან გამომდინარე, ვინაიდან ხის შემადგენელი კომპონენტები და მცენარეები, როგორცაა მერქანი და ჭადრის ფოთოლი და სხვა დანარჩენი ბუნებრივი წარმონაქმნები, თითოეული მათგანი წარმოდგენილია სამი ძირითადი ბიოპოლიმერის სახით - ცელულოზა, ჰემიცილულოზა და ლიგნინი. წარმოგენილი ბუნებრივი ნედლეულის ქიმიური შემადგენლობა და თვისებები განსხვავებულია, შესაბამისად მათი ქცევაც

ტემპერატურის მიმართ სხვადასხვაა, ამასთანავე ატმოსფერული ჰაერის პირობებში გახურების შესაძლებლობა შემცირებულია. ძნელია ვისაუბროთ მასალის თერმული დესტრუქციის დროს, რა ნივთიერებებად მოხდა ბიოპოლიმერების დეკომპოზიცია, თუმცა მეცნიერული კვლევებიდან შეგვიძლია ვივარაუდოთ დაახლოებით რა პროცესებს და რომელი ნივთიერებების წარმოქმნას შეიძლება ჰქონდეს ადგილი (Waters, et al. 2017).

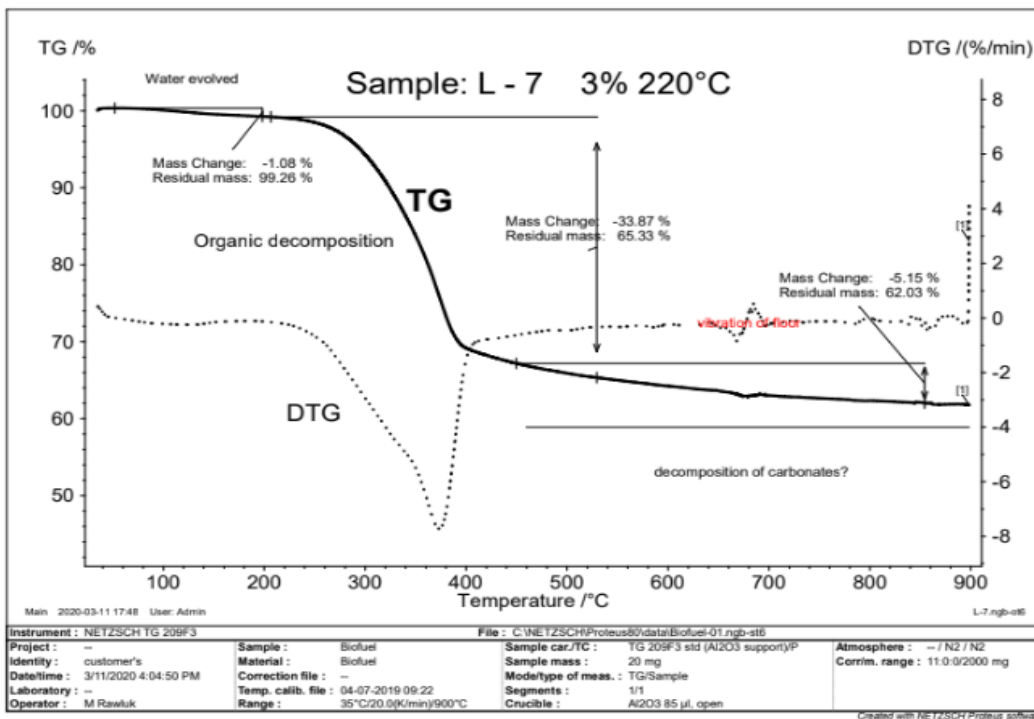


სურათი 32. ლიგნინო-ცელულოზური ბიომასის თერმული ფრაქციონირების ჰიპოთეზური კონფიგურაცია

სურათი 32 აღებულია C. L. Waters, R. R. Janupala, R. G. Mallinson and L. L. Lobban, "Staged thermal fractionation for segregation of lignin and cellulose pyrolysis products: An experimental study of residence time and temperature effects," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 126, pp. 380-389, 2017.

ზემოთ როგორც აღვნიშნეთ, კომპოზიციურ მასალებზე თერმოგრავიმეტრული კვლევა ჩატარდა ასევე ინერტულ არეშიც. გახურების დიაპაზონი ინერტული არეს შემთხვევაში, ოთახის ტემპერატურიდან (25°C) 900°C-ის ფარგლებში იყო, გახურების სიჩქარე 10°C/წთ შეადგენდა. ეტალონად გამოყენებულ ნივთიერებას კორუნდი - α - Al_2O_3 წარმოადგენდა, რომელიც თავისმხრივ თერმოინერტული ნივთიერებაა.

თითოეულ მასალაზე, ატმოსფერული ჰაერის არეში ჩატარებული კვლევების შედეგებმა გვაჩვენა, რომ 500°C-ზე თითქმის სრულად ხდება მასალის დესტრუქცია, რაც კომპოზიტში შემავალი ორგანული ბიოპოლიმერების ბუნებით აიხსნება.



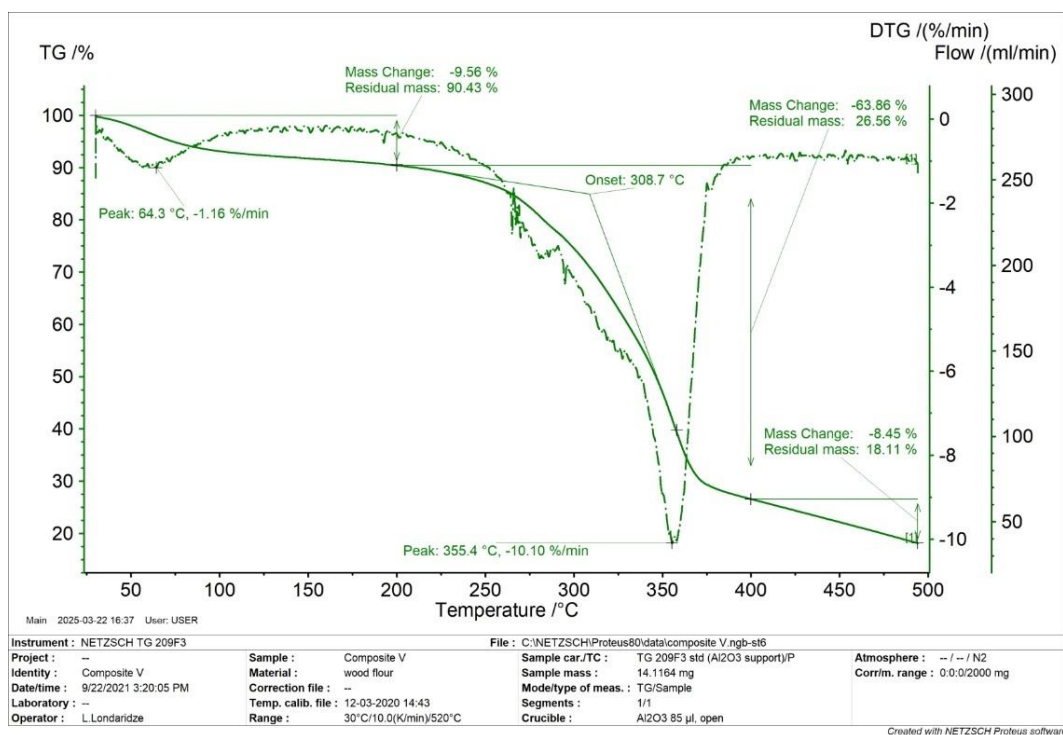
სურათი 33. VII კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული ანალიზი აზოტის არეში
ცხრილი 19. VII კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული ანალიზი ცხრილი

სეცია	მასის ცვლილება (%)	ნაშთი მასა (%)	პროცესის აღწერა
I	-1.08%	99.26%	წყლის აორთქლება
II	-33.87%	65.33%	თერმოჟანგვითი დესტრუქცია
III	-5.15%	62.03%	ნარჩენი მასა (ნახშირბადი, ნაცარი და არაორგანული მინარევები)

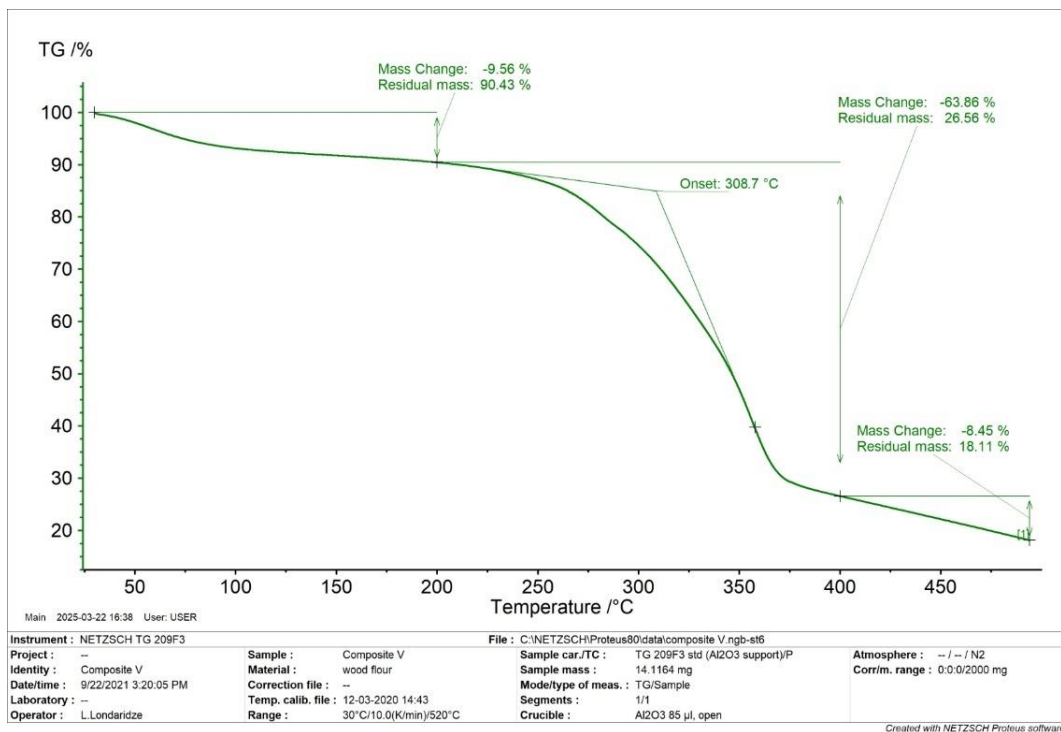
35-ე ნახაზზე მოცემულია VII კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული მრუდი აზოტის არეში. როგორც ნახაზიდან ჩანს 220°C შეიმჩნევა 1,08% მასის დანაკარგი. II ეტაპად ავიღეთ ის უბანი, რომელშიც თერმოჟანგვითი დესტრუქციის ძირითადი პროცესია მოქცეული 250-420°C ტემპერატურულ ინერვალში, რომელშიც მასის კლება 33.87% შეადგინა, რაც გრაფიკზე TG მრუდით ასიახა. III ეტაპმა მოიცვა 400-900°C ინტერვალი, რა დროსაც მყარი ნაშთის მასამ საწყისი მასის ~ 62% შეადგინა.

ატმოსფერული ჰაერის პირობებში ჩატარებულმა თერმოგრაფიმეტრულმა კვლევებმა გვაჩვენა, რომ 500°C-ზე კომპოზიციური მასალების საწყისი მასის დანაკარგმა დაახლოებით 85-95% შეადგინა. ხის მერქნის და ჭადრის ფოთლის კომპოზიტების ქცევა გახურების მიმართ თითქმის ერთმანეთის მსგავსი იყო, თითოეულის შემთხვევაში კომპოზიციის თავდაპირველი მასის დანაკარგი 25-100°C, დაახლოებით 5-7% შეადგენდა. გამომდინარე იქიდან, რომ აღნიშნულ კომპოზიციურ მასალებში გამოყენებული შემავსებლები ხასიათდებიან ჰიგროსკოპიული ბუნებით, აქედან გამომდინარე ვფიქრობთ, რომ 5-7%-ის გარკვეული წილი ჰაერიდან აბსორბირებული ტენი უნდა იყოს, ან ისეთი აქროლადი ნივთიერება, როგორიც ეთილის სპირტია. ეს მოსაზრება გამომდინარეობს იქიდან რომ, შემავსებლის და შემკვრელის ურთიერთქმედების დროს, შემავსებლის ჰიდროქსილის ჯგუფებსა -OH და ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის C_2H_5O - ჯგუფებს შორის მიმდინარე რეაქციის შედეგად გამოყოფილი ეთილის სპირტის ის ნარჩენი, რომელმაც სხვადასხვა მიზეზებიდან გამომდინარე დაწნეხის დროს, სისტემიდან გამოდენა ვერ შეძლო. პირობითად პროცესი ეტაპებად რომ დავყოთ, მეორე ეტაპს წარმოადგენს 200-400°C ტემპერატურული დიაპაზონი, სწორედ ამ შუალედში ხდება კომპოზიციური მასალის მასის მაქსიმალური კლება, რაც თერმოჟანგვითი დესტრუქციით შეგვიძლია ავხსნათ, გამომდინარე იქიდან, რომ თერმული ანალიზი ტარდება ატმოსფერული ჰაერის პირობებში. ამას მოსაზრებას ამყარებს DTA მრუდის საშუალებით ჩაწერილი ეგზოთერმული ეფექტი, ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ თერმოჟანგვითი დესტრუქცია ეგზოთერმული ეფექტით ხასიათდება. ამავე დიაპაზონში 355°C -ზე

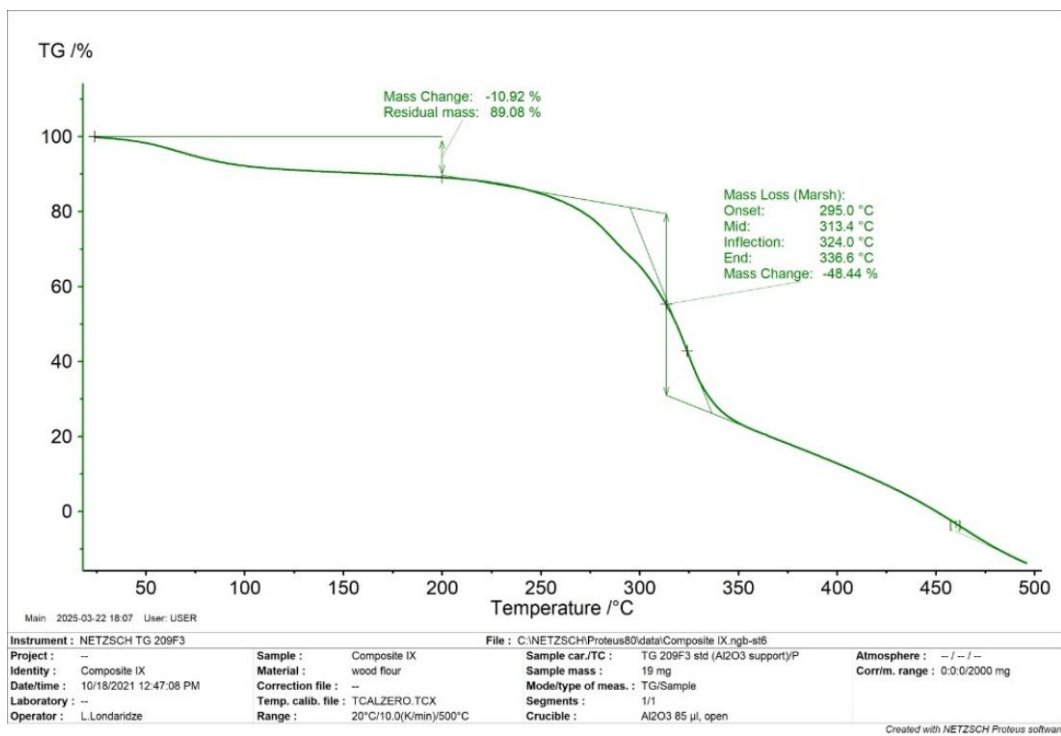
ვხედავთ რიგით მესამე - DTG მრუდს, რომელიც გვაძლევს ინფორმაციას აღნიშნულ მონაკვეთში მიმდინარე თერმოჟანგვითი პროცესის სიჩქარის მაქსიმუმის შესახებ. სწორედ ამ ტემპერატურაზე ხდება კომპოზიტის საწყისი მასის 64% დანაკარგი. 500°C-ზე კომპოზიტის მასის დანაკარგმა 82% შეადგინა. On set მნიშვნელობა, რომელიც წარმოადგენს TG და DTG მრუდებზე დამოკიდებულ ფუნქციას, წარმოადგენს წონის ცვლილების საწყის წერტილს, გრაფიკიდან გამომდინარე შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ნიმუშის დესტრუქცია აქტიურად 308°C-დან იწყება.



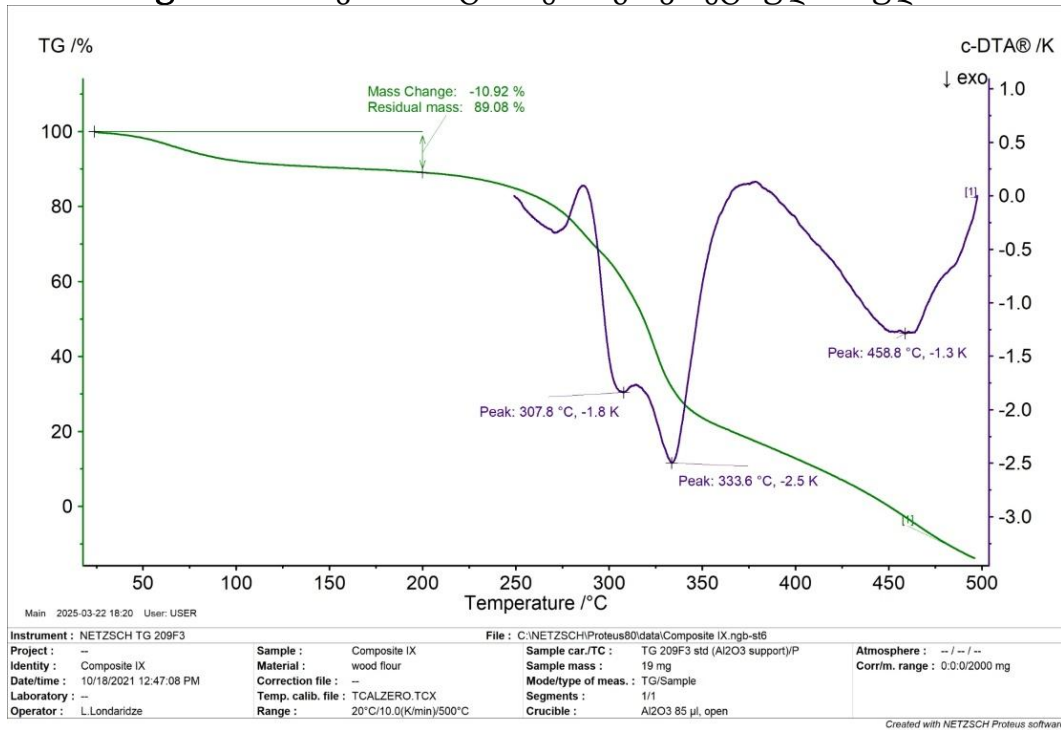
სურათი 34. V კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიმეტრული და წარმოებული თერმოგრაფიმეტრული მრუდი



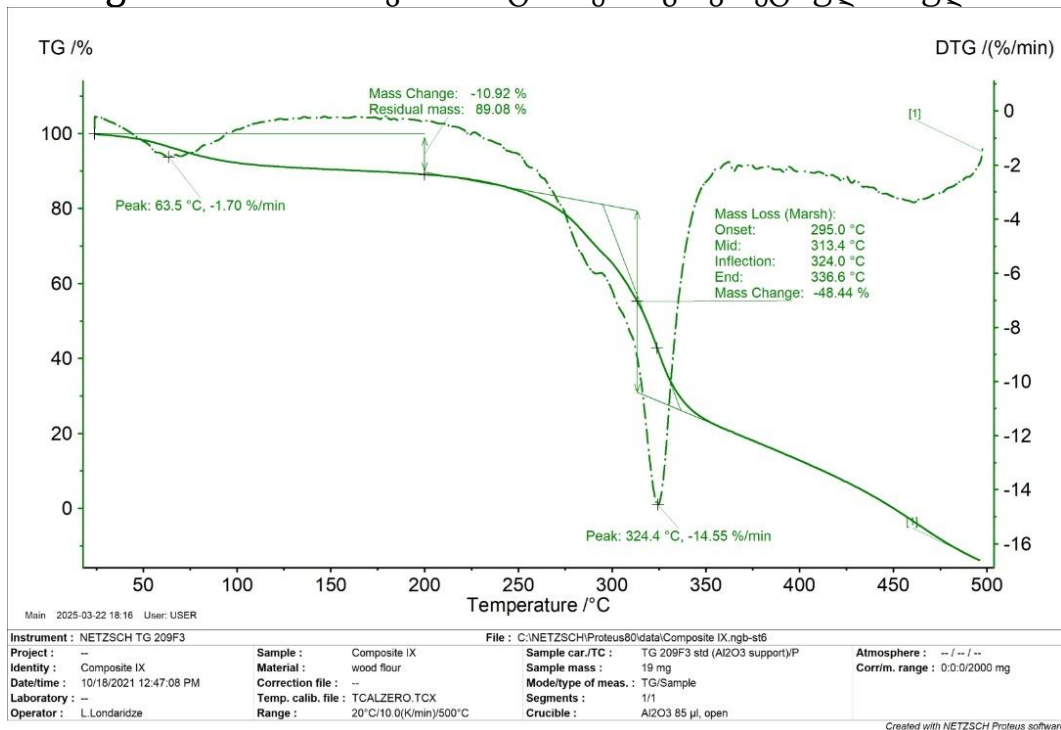
სურათი 34-1. V კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიკული მრუდი



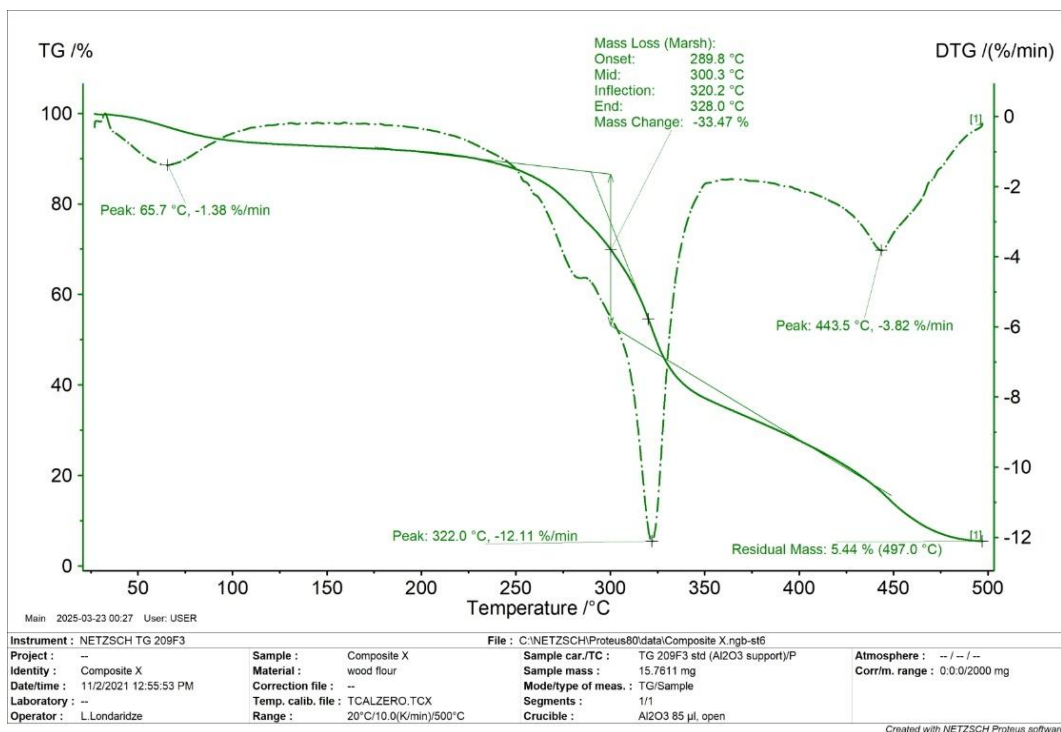
სურათი 35. IX კომპოზიტის თერმოგრაფიკული მრუდი



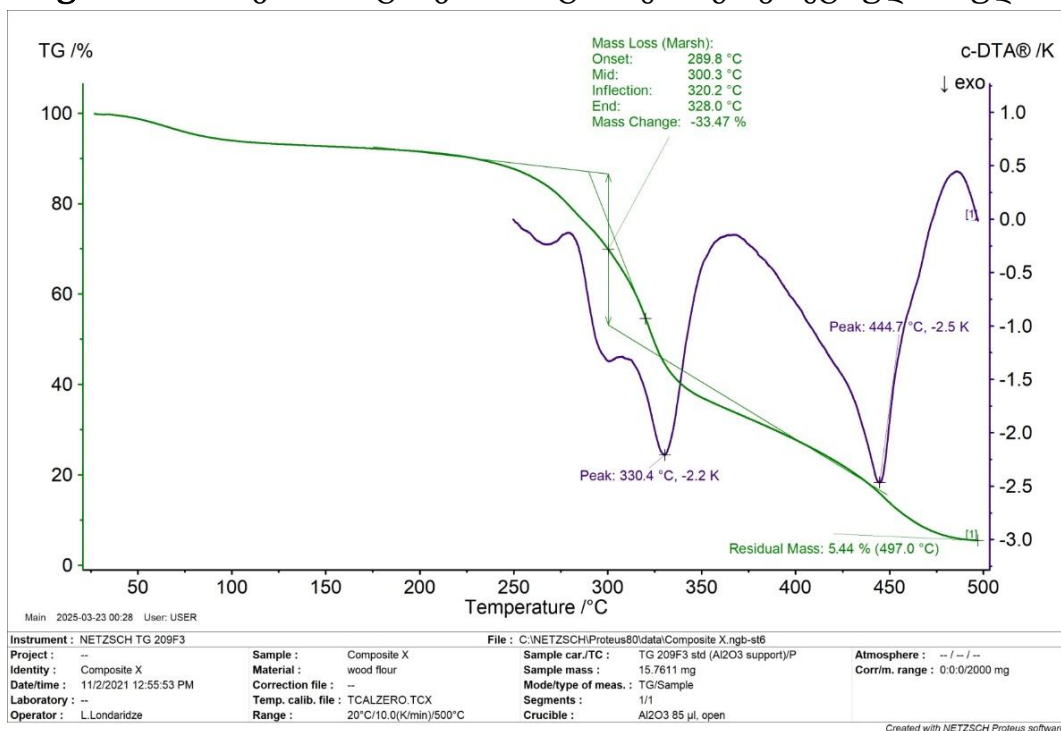
სურათი 36. IX c-DTA კომპოზიტის თერმოგრაფიკული მრუდი



სურათი 37. IX კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიკული მრუდი

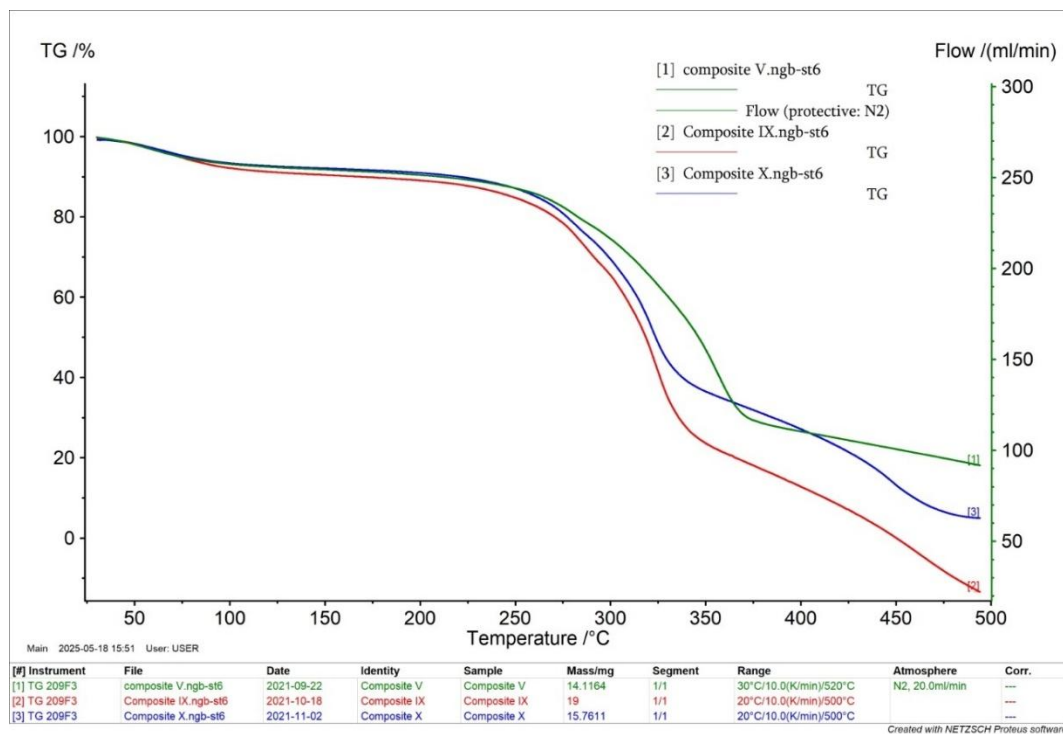


სურათი 38-1. X კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიკული მრუდი



სურათი 38-2. X კომპოზიტის კომპოზიტის თერმოგრაფიკული მრუდი

34-34-ე სურათზე ნაჩვენებია თერმოგრაფიმეტრული მრუდები ატმოსფერული ჰაერის არეში დესტრუქციის დროს. ტემპერატურა შეირჩა მერქანში ბიოპოლიმერის ბუნებიდან გამომდინარე, ვინაიდან მასალა ორგანიკას წარმოადგენს, თითოეული მათგანის მასური დანაკარგი 500°C დაახლოებით >80%-ზე მეტი იყო. ნაჩვენებია, რომ კომპოზიტებში 5%-დან 7% მასის კლება აღინიშნება უკვე 100°C-ზე. დესტრუქციის ძირითადი პროცესი მიმდინარეობს 270-350°C, DTA და TG მრუდებიდან მიღებული ინფორმაციით შეგვიძლია დაზუსტებით ვთქვათ რომ 250-330°C-ზე წვის რეაქცია ინტენსიურად მიმდინარეობს, რაც ეგზოთერმული და მასის კლების მრუდებით არის ასახული. 500°C-ზე კომპოზიტის მყარი ნაშთის მასამ, საწყისი მასის დაახლოებით 5% შეადგინა. DTG მრუდის პიკი გვიჩვენებს საკვლევი ნიმუშის წონის ცვლილების სიჩქარეს, ვინაიდან თერმოგრაფაზე DTG მრუდზე ორი ძირითადი პიკი მივიღეთ, აქედან პირველი ანალიზის საწყის ეტაპზე 64°C, მასის ასეთი კლება, ჩვენი აზრით, განპირობებულია კომპოზიტში არსებული სინესტის აორთქლებით ან ეთერიფიკაციის შემდგომი რეაქციებით.

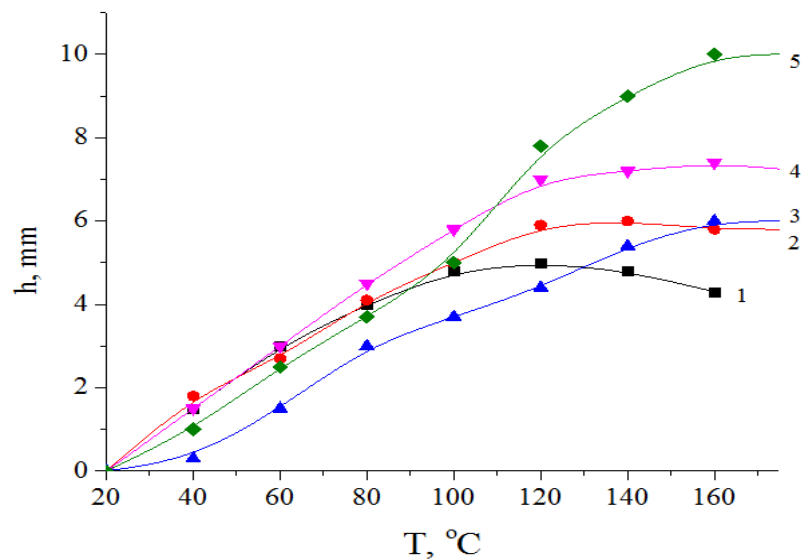


სურათი 39. V, IX, X კომპოზიტების თვა მრუდების შედარება

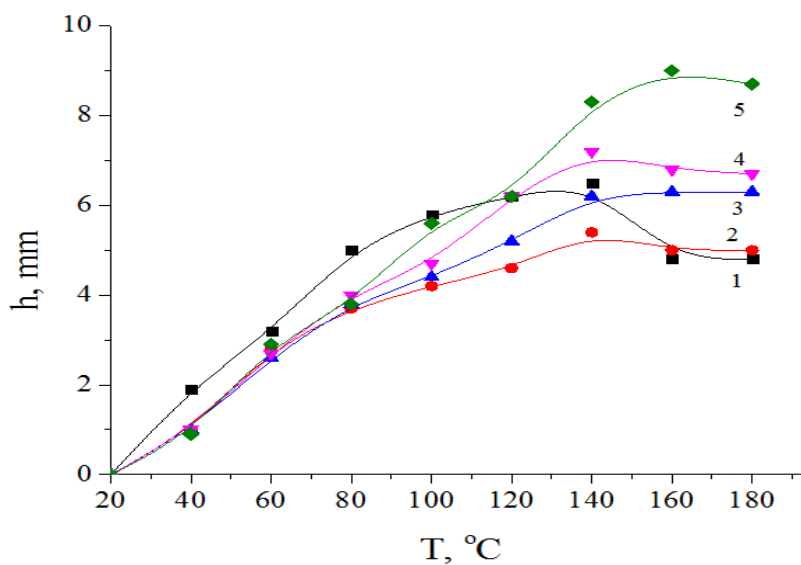
39-ე სურათიდან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თითოეული კომპოზიტის მასის დანაკარგი 250°C ინტერვალში ერთმანეთის ტოლია, რაც როგორც უკვე აღვნიშნეთ მასალაში არსებული ტენი ან დაბალმოლეკულური აქროლადი ნივთიერებების, ძირითადად ეთილის სპირტის არსებობით არის გამოწვეული, რომელიც უშუალოდ ეთერიფიკაციის რეაქციის დროს გამოიყოფა. მეორე ზონა არის $250-390^{\circ}\text{C}$, სადაც სამივე კომპოზიტისთვის მასის დანაკარგი დაახლოებით 65%-ის ფარგლებშია, რაც აიხსნება ცელულოზის და ჰემიცელულოზის თერმული დესტრუქციით და ნაწილობრივ ლიგნინის, გამომდინარე იქიდან, რომ ლიგნინი რთულ სისტემას წარმოადგენს და მის დეკომპოზიციას ან/და თერმოჟანგვით დესტრუქციას შედარებით დიდი ტემპერატურული დიაპაზონი გააჩნია. სწორედ მესამე ზონაში, შედარებით მაღალ ტემპერატურაზე $400-500^{\circ}\text{C}$ -ზე სავარაუდოდ ნარჩენი ბიოპოლიმერების თერმოჟანგვით დესტრუქციას აქვს ადგილი.

2.8.2 გარბილების ტემპერატურის განსაზღვრა ვიკას მეთოდით

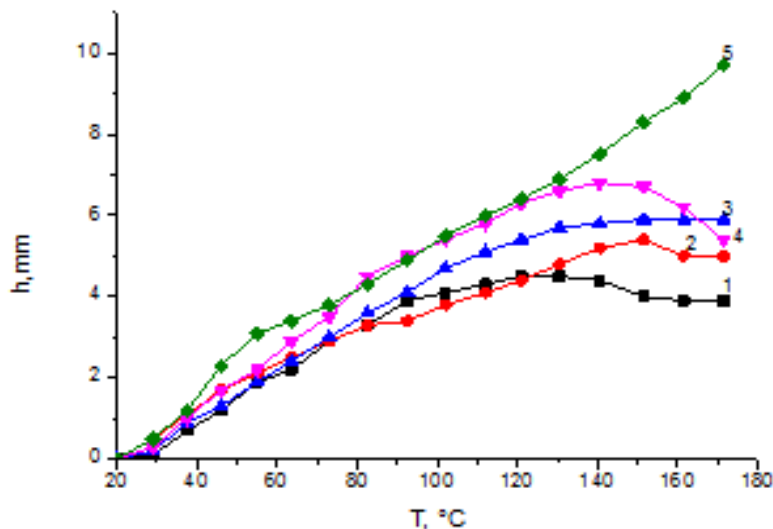
24-26-ე გრაფიკებზე მოცემულია კომპოზიტების გარბილების ტემპერატურის ცვლილება ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით. როგორც ნახაზებიდან ჩანს ტემპერატურის გაზრდასთან ერთად იზრდება h მნიშვნელობა ანუ გარბილების ტემპერატურის მნიშვნელობა, რაც განპირობებულია შემკვრელის გარბილებით, ჯერ ადგილი აქვს მრუდების მონოტონურ ზრდას, აღწევს მაქსიმუმს და შემდგომ უახლოვდება ჰორიზონტალურ ასიმპტოტს.



გრაფიკი 24. კომპოზიტის (3% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 97% ნახერხი) ინდექსორის ნიმუშში ჩაღრმავების (გარბილების ტემპერატურის) დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს მიღებულს 180°C, 2 - 190°C, 3 - 200°C, 4 - 210°C და 5 - 220°C



გრაფიკი 25. კომპოზიტის (5% - ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 95% ნახერხი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს მიღებულს 190°C, 2 - 180°C, 3 - 200°C, 4 - 210°C და 5 - 220°C

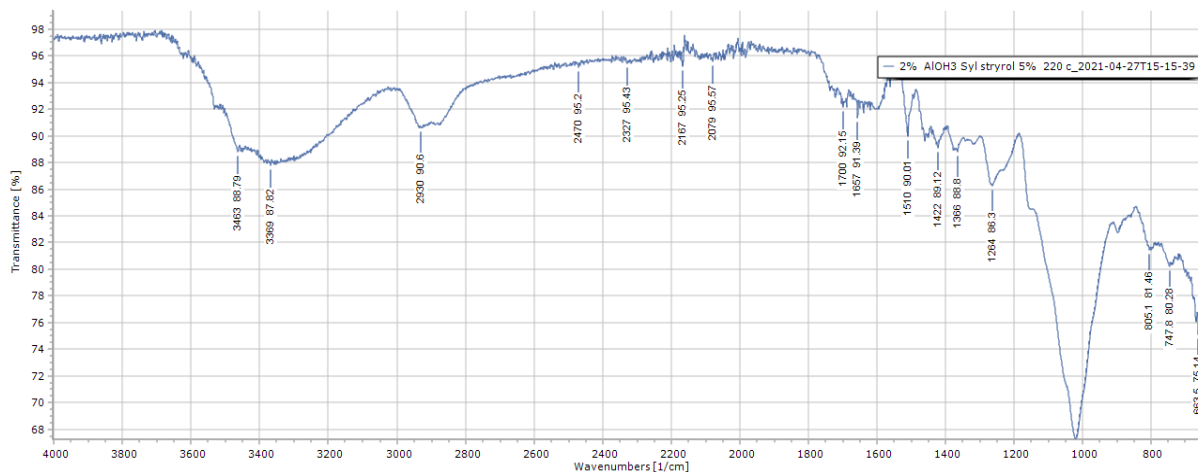


გრაფიკი 26. კომპოზიტის (10% - ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 90% ნახერხი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს მიღებულს 180°C, 2 - 190°C, 3 - 200°C, 4 - 210°C და 5 - 220°C

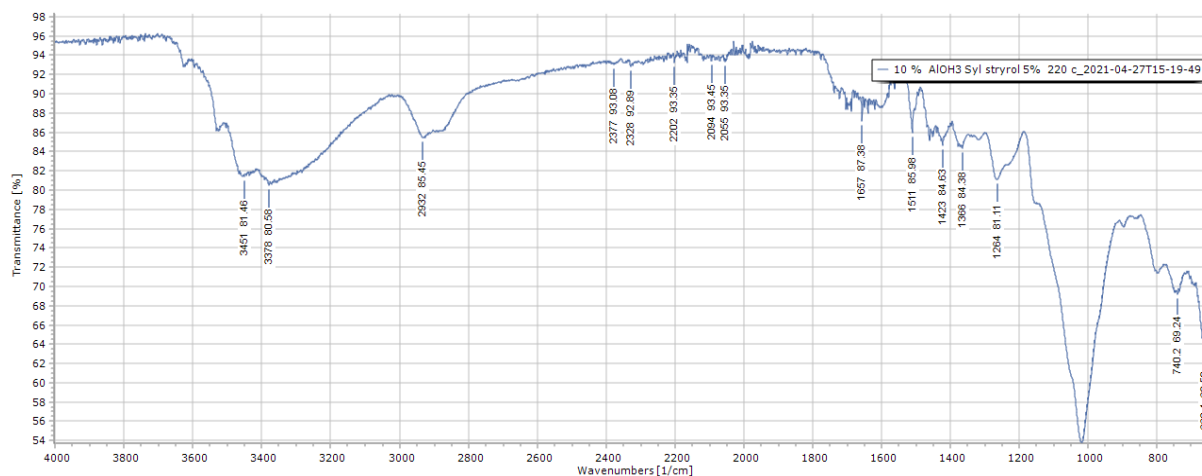
2.9 ანტიპირენის შემცველი კომპოზიტების ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული გამოკვლევები

27-28-ე გრაფიკზე მოცემულია ანტიპირენის შემცველი კომპოზიტის ინფრაწითელი სპექტრი. სპექტრებში შეიმჩნევა შთანთქმის ზოლები 1027 სმ^{-1} უბანში დამახასიათებელი ხაზოვანი $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ ბმის ასიმეტრიული ვალენტური რხევებისათვის. შთანთქმის ეს ზოლი ზედდება $\equiv\text{Si-O-Al=}$ დამახასიათებელ შთანთქმის ზოლთან, რადგან Si-O-Si და Si-O-Al ბმები ახლოს განლაგებულ სფეროებში არიან, ამის გამო მათ შორის შეიძლება იყოს გადაკვეთები და ზოლების თანხვედრა, რაც ართულებს $\equiv\text{Si-O-Al=}$ ბმის ზუსტ იდენტიფიცირებას. შთანთქმის ზოლები 1262 , 1362 , 1410 , 1506 , 1506 , 1656 , 1734 , $2800-3000$ და 3348 სმ^{-1} უბანში შეესაბამება მეთილის ჯგუფს. CH ბმებს ($-\text{C} / \text{C}- / \text{CH}_3$), CH_2 ცელულოზა-ლიგნინი, $\text{C}=\text{C}$ არომატული, $\text{C}=\text{C}$

ალკენი, (C=O ესტერული ზმა), ფენილის და -OH ჯგუფებისათვის შესაბამისად. არომატული, C=C ალკენი, (C=O ესტერული ზმა), ფენილის და -OH ჯგუფებისათვის შესაბამისად.



გრაფიკი 27. XLVI კომპოზიტის (2%-Al(OH)₃ + 5% სილ.სტ. -220°C) იწ სპექტრი

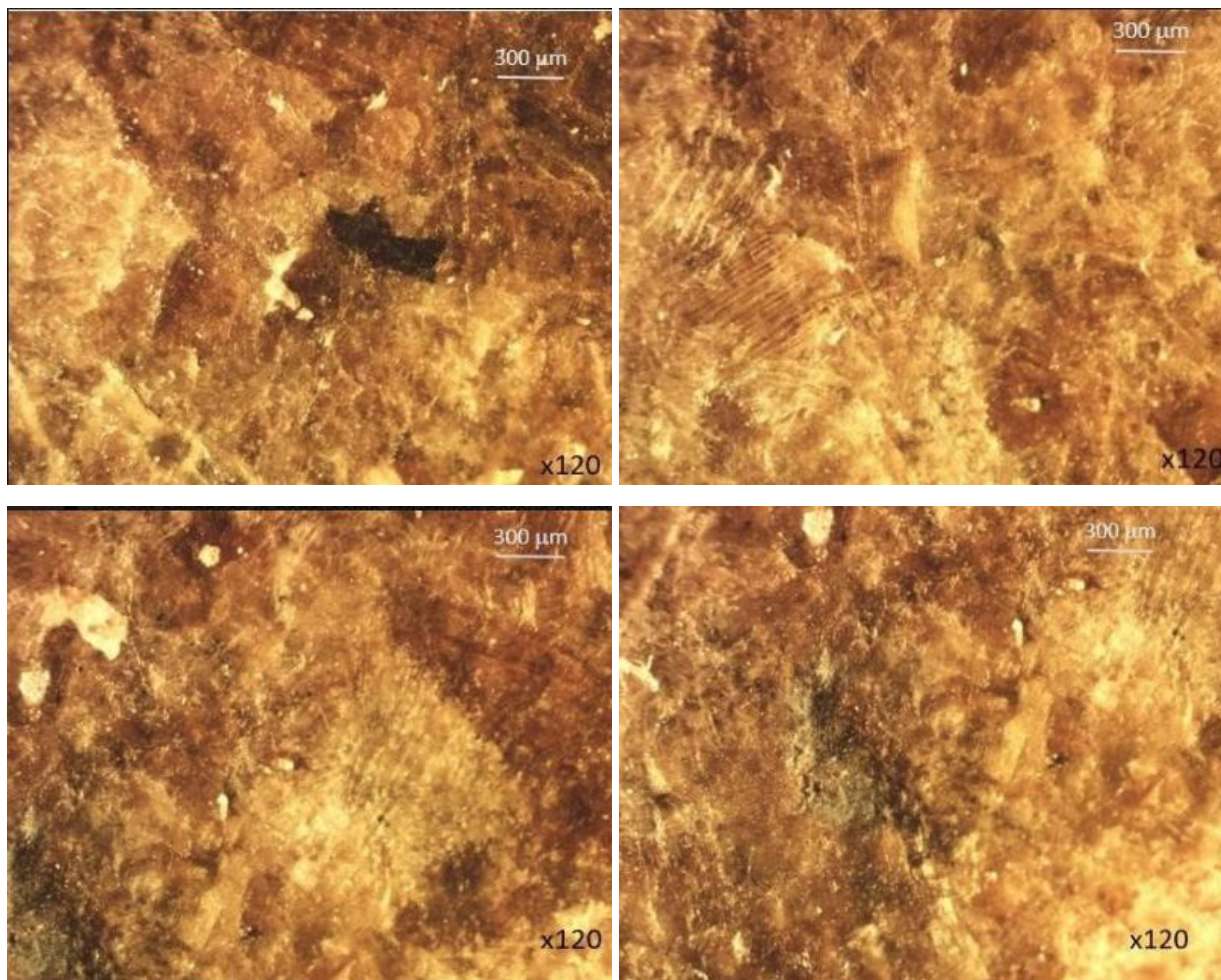


გრაფიკი 28. XLVIII კომპოზიტის (10%-Al(OH)₃ + 5% სილ.სტ. -220°C) იწ სპექტრი

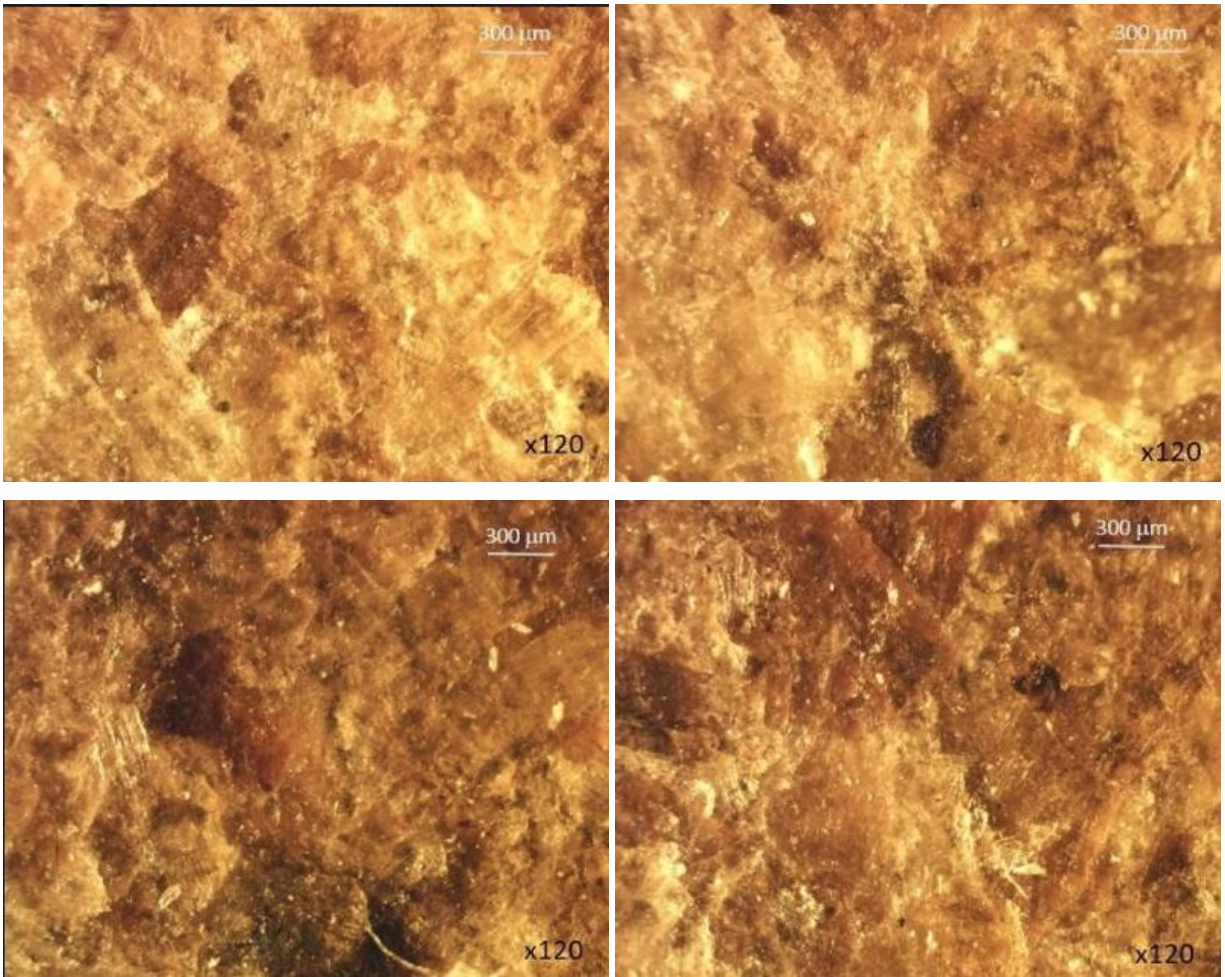
2.10 ანტიპირენის შემცველი კომპოზიტების ოპტიკურ-მიკროსკოპიული კვლევა

ჩატარებულია ანტიპირენის სხვადასხვა რაოდენობის შემცველი კომპოზიტების ოპტიკურ-მიკროსკოპიული გამოკვლევა. 40-41 სურათებზე წარმოდგენილია კომპოზიტების მიკროგრაფები, თითოეული სურათის ზედა მარჯვენა მხარეს

მითითებულია მასშტაბი მიკრომეტრებში, ხოლო ქვედა მარჯვენა მხარეს გადიდების ხარისხი (x120 გადიდება) სხვადასხვა უბანში. მიკროგრაფებზე შეიმჩნევა ამორფული კლასტერები ზომით 50-580 მკმ, ასევე შეიმჩნევა კონცენტრაციული არაერთგვაროვნება. როგორც წინა შემთხვევაში, აქაც მიღებული კომპოზიტები იზოტროპიული სისტემაა. მიკროგრაფიულ სურათებზე შეიმჩნევა სხვადასხვა ზომის ჩანართები 30-580 მკმ ზომით, რომელთა ზომები ადვილად შეიძლება დადგინდეს სურათზე ნაჩვენები მასშტაბის ზოლის გამოყენებით, კომპოზიტებზე ასევე შეიმჩნევა მექანიკური დაწოლის შედეგად წარმოქმნილი ბზარები და გამყოფი ხაზები.



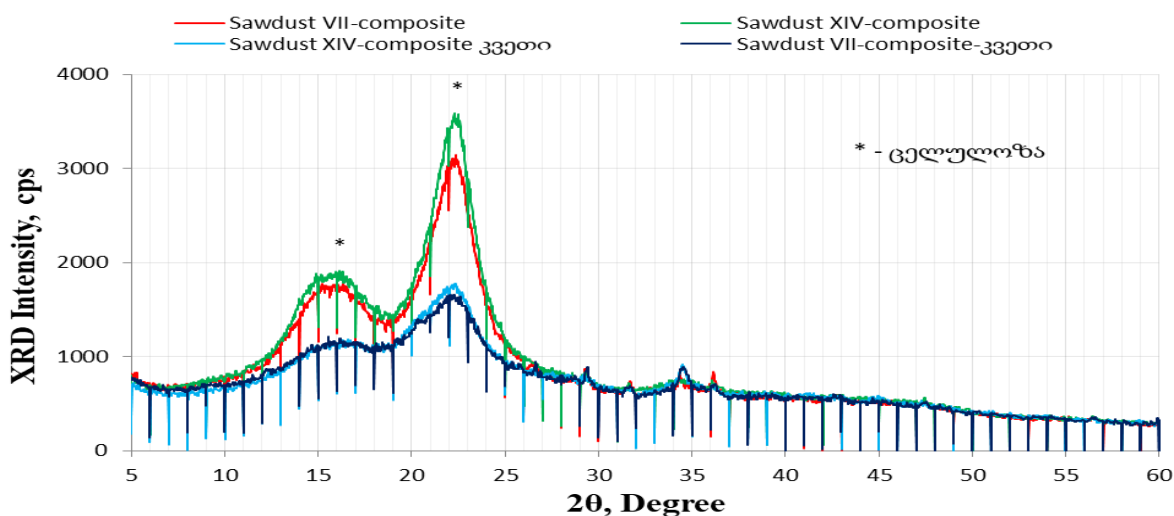
სურათი 40. 1% ანტიპირენის ($\text{Al}(\text{OH})_3$) შემცველი კომპოზიტის XLIV ოპტიკურ მიკროსკოპიული მიკროგრაფები 120-ჯერ გადიდების პირობებში



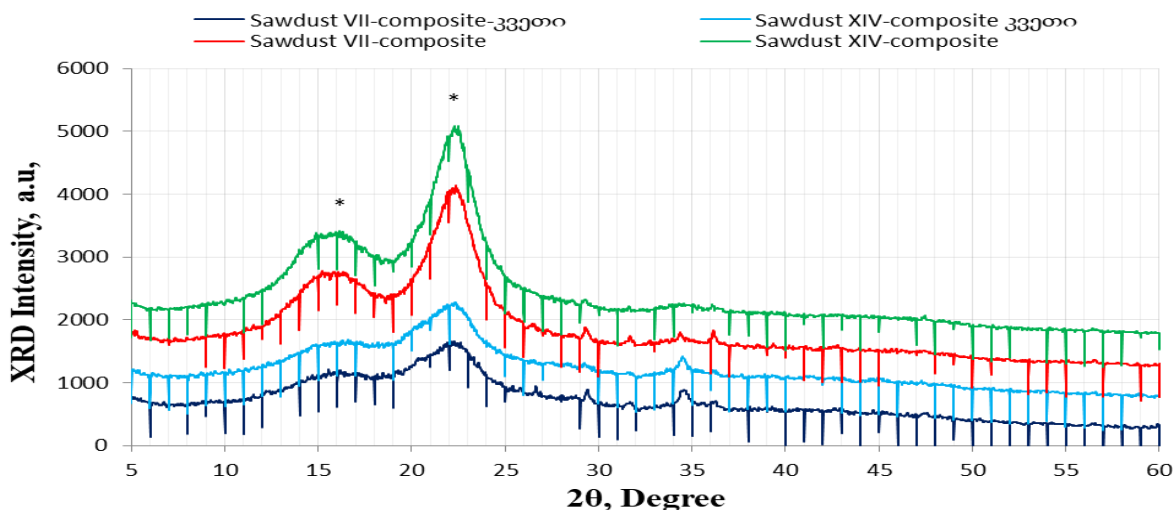
სურათი 41. 2% ანტიპირენის (Al(OH)_3) შემცველი კომპოზიტის XLVI ოპტიკურ მიკროსკოპიული მიკროგრაფები 120-ჯერ გადიდების პირობებში

2.11 რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი

განახლებადი ბუნებრივი წედლეულის ბაზაზე მიღებული მასალების მექანიკური თვისებები მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ცელულოზის კრისტალორობის ხარისხზე. ცელულოზის ბოჭკოს მაღალი კრისტალორობით იზრდება მასალის სიმტკიცე, თუმცა ის უკუპროპორციულ დამოკიდებულებაშია მოქნილობასთან, საბოლოოდ სწორედ კრისტალორობის ხარისხი დიდ გავლენას ახდენს მასალის მექანიკურ მახასიათებლებზე.



გრაფიკი 29ა. Sawdust-VII-Composite და Sawdust-XIV-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამები



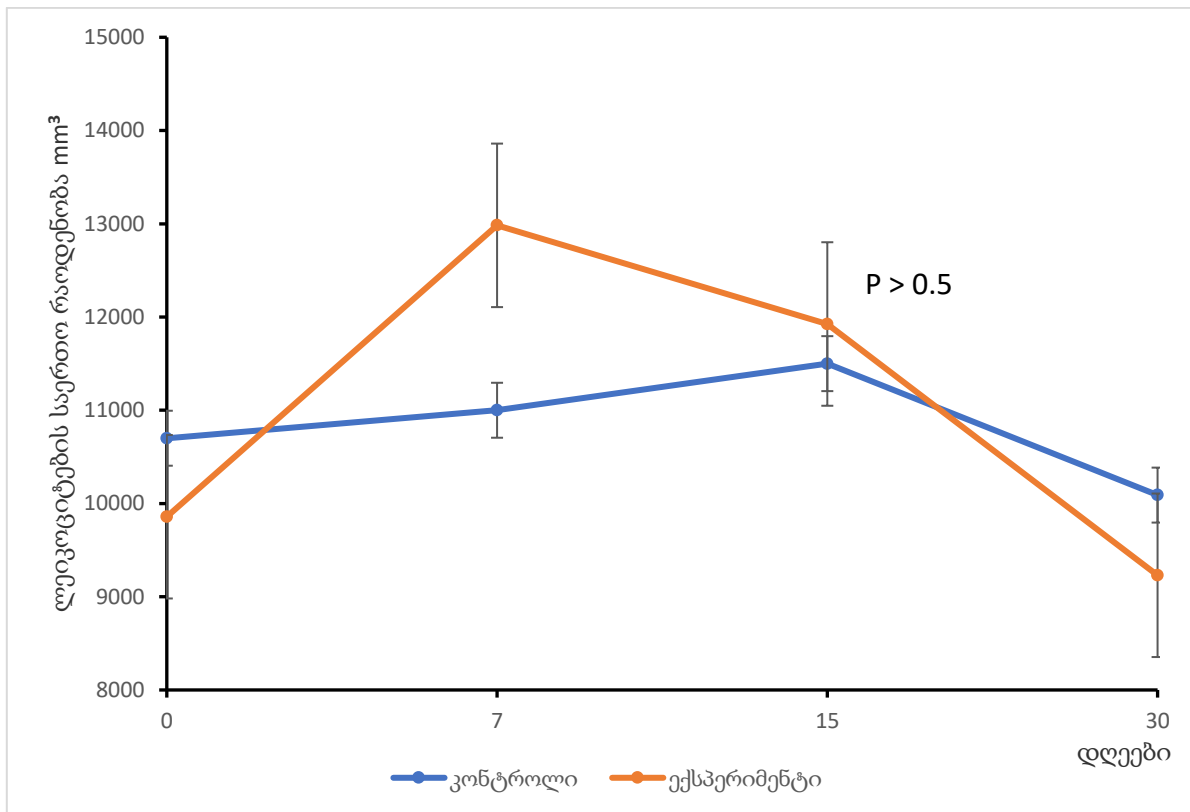
გრაფიკი 29ბ. Sawdust-VII-Composite და Sawdust-XIV-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამა
Sawdust-VII-Composite და Sawdust-XIV-Composite ნიმუშების
დიფრაქტოგრამებზე (გრაფიკი 29ა.) ცელულოზის განიერი დიფრაქციული
მაქსიმუმების ($2\theta \approx 16^\circ$ და $2\theta \approx 22^\circ$ -ზე) გარდა ფიქსირდება შედარებით მკაფიო, მაგრამ
სუსტი დიფრაქციული მაქსიმუმები, რომელთა იდენტიფიკაცია ვერ მოხერხდა
(სავარაუდოდ კომპოზიტის შემადგენელი მინერალია). კვეთის დიფრაქტოგრამებზე
ცელულოზის შესაბამისი დიფრაქციული მაქსიმუმების ინტენსივობა შედარებით
დაბალია, რაც მიუთითებს ნიმუშების უპირატეს ორიენტაციაზე.

2.12 კომპოზიციური მასალების ბიოლოგიური შეფასება

ბიოლოგიის დეპარტამენტის თანამშრომლების მიერ ადრე ნაჩვენები იყო, რომ
ხის კომპოზიტები, რომლებშიც შემკრავ ნივთიერებად გამოყენებული იყო ორგანული
და სილიციუმ-ორგანული პოლიმერები, არ ახდენდა უარყოფით ზეგავლენას
ზრდასრული თაგვების სხვადასხვა ქსოვილის მორფოფუნქციურ აქტიურობაზე
(2019). აქედან გამომდინარე, კვლევის საწყის ეტაპზე ანალოგიური კვლევა ჩატარდა
XXII (10% შემკვრელი) კომპოზიტის მოქმედების ეფექტურობის შესაფასებლად.
ცხოველები დაყოფილი იყო 2 ჯგუფად:

1. საკონტროლო ჯგუფი - ინტაქტური ცხოველები
2. საცდელი ჯგუფი - ცხოველები, რომლებიც 30 დღის განმავლობაში
იმყოფებოდნენ საკვლევი კომპოზიტით დაფარულ გალიებში.

ექსპერიმენტი გრძელდებოდა 30 დღის განმავლობაში. საკვლევ ბიოლოგიურ მასალას
(პერიფერიულ სისხლს) პერიოდულად 5 დღეში იღებდნენ ცხოველების კუდიდან და
გორიანის კამერაში ითვლიდნენ ლეიკოციტების საერთო რაოდენობას. სურათზე 56
წარმოდგენილია საკონტროლო და საცდელი ჯგუფის ცხოველების პერიფერიულ
სისხლში ლეიკოციტების საერთო რაოდენობის ცვლილებების ამსახველი მრუდები.
სურათიდან ნათლად ჩანს, რომ ახალი კომპოზიტი არ იწვევს თეთრი თაგვების
სისხლში ლეიკოციტების საერთო რაოდენობის ცვლილებას. კერძოდ, სისხლში
ლეიკოციტების რაოდენობა ნორმის ფარგლებში მერყეობს.

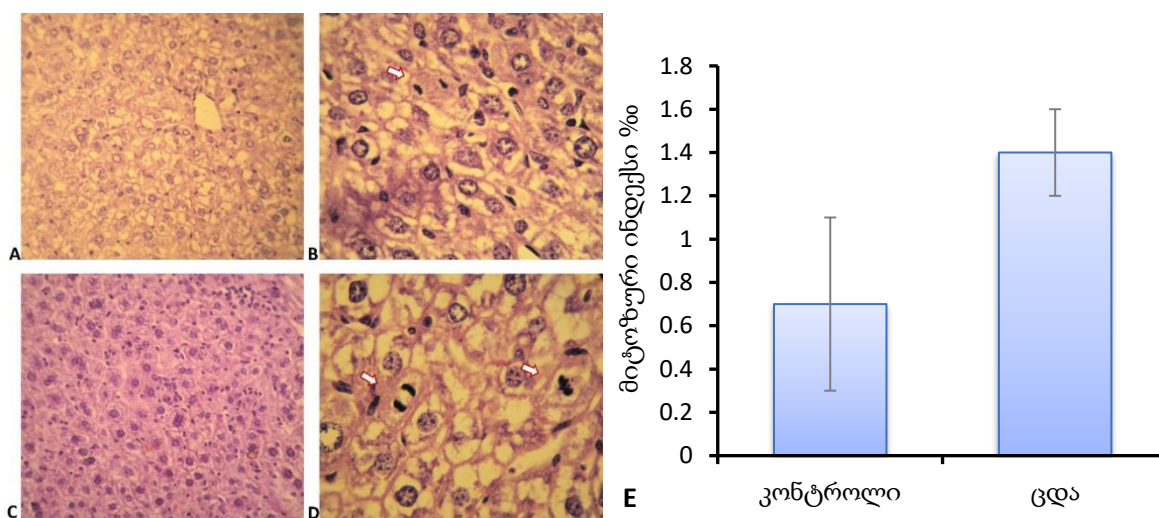


სურათი 42. ზრდასრული თაგვების პერიფერიულ სისხლში ლეიკოციტების საერთო რაოდენობის ცვლილებაზე საკვლევი კომპოზიტის ზემოქმედების შესწავლა

პარალელურად შეფასებული იყო საკონტროლო და საცდელი ჯგუფის ცხოველების საკვლევი ქსოვილის ჰისტოარქიტექტონიკის ცვლილებები. 52-ე სურათზე წარმოდგენილია, როგორც საკონტროლო, ასევე საცდელი ჯგუფის ცხოველების ღვიძლის ჰისტოარქიტექტონიკის ამსახველი მიკროფოტოები. კერძოდ, სურათიდან 43ა და 43ბ, ნათლად ჩანს, ინტაქტური ღვიძლის ქსოვილისთვის დამახასიათებელი ჰისტოარქიტექტონიკა. ცენტრალური ვენისკენ რადიალურად მიმართულ ბაგირაკებში კარგად განირჩევა ინტაქტური თაგვის ღვიძლისთვის დამახასიათებელი დიდი ზომის, ორბირთვიანი ჰეპატოციტები, ბაგირაკებს შორის სინუსოიდური კაპილარები და დისეს სივრცე. ღვიძლის პარენქიმაში შეინიშნება ერთეული მიტოზური ფიგურები. აღსანიშნავია, რომ საცდელი ჯგუფის ცხოველების

ღვიძლის ქსოვილში არ აღინიშნება ღვიძლის ჰისტოასრქიტექტონიკის თვალსაჩინო ცვლილებები (სურ.52ა და 52ბ).

ღვიძლის უჯრედების პროლიფერაციულ აქტიურობაზე კომპოზიტის შესაძლო უარყოფითი ზემოქმედების დასადგენად, ორივე ჯგუფის ცხოველების შეაფასებული იქნა ჰეპატოციტების მიტოზური ინდექსის ცვლილებები. გამოკვლევებით დადგინდა, რომ ახალი კომპოზიტი არ ახდენს გავლენას საცდელი ჯგუფის ცხოველების მიტოზური ინდექსის მაჩვენებელზე. კერძოდ, საცდელი ცხოველების ღვიძლის მიტოზური ინდექსი ($1,4 \pm 0,2$ %) არ იცვლება საკონტროლო ცხოველების შესაბამის მაჩვენებელთან შედარებით ($0,7 \pm 0,4$ %).



სურათი 43. ზრდასრული თეთრი თაგვების ღვიძლის ჰისტოარქიტექტონიკასა და პროლიფერაციულ აქტიურობაზე კომპოზიტის ზემოქმედების შესწავლა ღვიძლის ქსოვილის მიკროფოტოები (ჰემატოქსილინ-ეოზინი, (H&E): A (X400), B (X900) - საკონტროლო ცხოველები, C (X400), D (X900) - საცდელი ცხოველები (მიტოზური ფიგურები მითითებულია ისრით); E - მიტოზური ინდექსის ცვლილება ($p > 0,05$).

მიღებული შედეგებიდან გამომდინარეობს, რომ ექსპერიმენტში გამოყენებული ეკოლოგიურად სუფთა ფიჭვის ხის ნახერხის, ფიჭვის მერქნის და ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ბაზაზე დამზადებული კომპოზიტის ფილები არ ახდენს უარყოფით ზეგავლენას თეთრი ზრდასრული თაგვების ქსოვილების ჰისტოარქიტექტონიკასა და პროლიფერაციულ აქტიურობაზე.

დასკვნა

ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლისა და ფიჭვის მერქნის ბაზაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ფორმირების ტექნოლოგიურ პირობებზე: ტემპერატურაზე, წნევაზე, შემკვრელის კონცენტრაციაზე და შემავსებლის რაოდენობაზე.

ტემპერატურის გაზრდა 220°C -მდე წყალშთანთქმას ამცირებს რამდენიმე რიგით, რაც დაკავშირებულია სილანიზაციის (ეთერიფიკაციის) რეაქციების გააქტიურებასთან. ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლისა და ფიჭვის მერქნის ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების დაბალი წყალშთანთქმა მიღებულია 3-5% TESst პირობებში.

ფიჭვის ხის კომპოზიტებზე წნევის გავლენის შესწავლისას გამოჩნდა, რომ 5-10 მპა წნევაზე წყალშთანთქმა დაბალია, თუმცა 15 მპა-ზე გარკვეულ ნიმუშებში შეინიშნება ამოვარდნები, რაც სავარაუდოდ მიკროდეფექტებისა და შიდა სტრუქტურული ცვლილებების შედეგია.

მექანიკური თვისებები (სიმტკიცე ღუნვაზე, დარტყმითი სიძლიერე, სიხისტე) პირდაპირ არის დამოკიდებული ტემპერატურასა და შემკვრელის კონცენტრაციაზე. 220°C ტემპერატურაზე მიღებულ ნიმუშებში ღუნვაზე სიმტკიცე მნიშვნელოვნად მაღალია, ვიდრე 180°C ტემპერატურაზე დამზადებულ ნიმუშებში.

ანტიპირენის მცირე რაოდენობით (0.1-2%) დამატება არ მოქმედებს უარყოფითად კომპოზიტის მექანიკურ თვისებებზე, ხოლო 10%-ზე მეტი კონცენტრაციის პირობებში მექანიკური მახასიათებლები საგრძნობლად უარესდება.

ეთილსილიკატის დამატება მაღალ ტემპერატურაზე ამცირებს წყალშთანთქმის კოეფიციენტს, ეთილსილიკატის აქტიურ ჯგუფებსა და ბიოპოლიმერების ჰიდროქსილის ჯგუფებს შორის შესაძლო რეაქციებით. აღსაღნიშნავია, რომ ეთილსილიკატს თეორიულად აქვს შესაძლებლობა წარმოქმნას ოთხი ქიმიური ბმა, აქტიური ფუნქციური ჯგუფების ხარჯზე.

სკანირებად-ელექტრონულმა მიკროსკოპიამ და ოპტიკურმა მიკროსკოპიამ დაადასტურა მასალის ზედაპირის ჰეტეროგენურობა, მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში გამოვლინდა ბზარებისა და მიკროდეფექტების წარმოქმნის ტენდენცია.

ინფრაწითელმა სპექტროსკოპიამ ცხადყო $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ ბმის არსებობა კომპოზიტში. თერმოგრავიმეტრიულმა ანალიზმა განსაზღვრა მასალის თერმული სტაბილურობის ზღვარი და დესტრუქციის საწყისი და საბოლოო ტემპერატურა.

გაჭიმვის ტესტის შედეგებით დადასტურდა, რომ მასალა ხისტია და ახასიათებს მცირე პლასტიკურობა, რაც შესაბამისობაშია მერქანბოჭკოვანი კომპოზიტების მექანიკურ ქცევასთან.

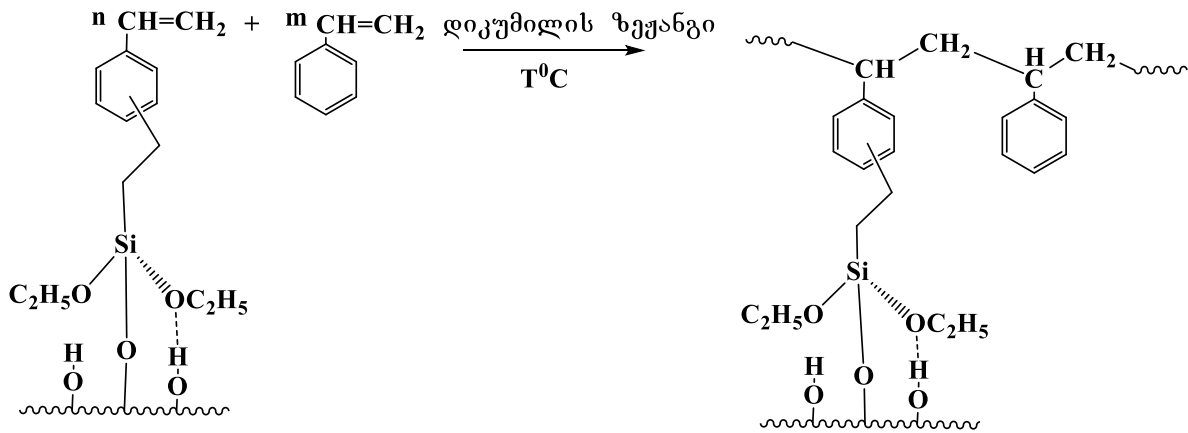
მიღებული მაჩვენებლები მიანიშნებს, რომ განიხილული კომპოზიციური მასალები პერსპექტიულია გამოყენებისთვის ისეთ აპლიკაციებში, სადაც აუცილებელია დაბალი წყალშთანთქმა, მაღალი მექანიკური სიმტკიცე და სტრუქტურული სტაბილურობა.

ჭადრის ფოთლის ფქვილის ბაზაზე მიღებული კომპოზიციური მასალები

2.13 კომპოზიციური მასალების მიღება ჭადრის ფოთლის ფქვილისა და თანაპოლიმერის ბაზაზე

კვლევის მომდევნო ეტაპს წარმოადგენდა კომპოზიციის მიღება, რომელშიც შემავსებლად გამოვიყენეთ გამომშრალი ჭადრის ფოთლის წვრილდისპერსიული ფქვილი ზომებით 0.01-0.05 მმ, ხოლო შემკვრელად ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი და სტიროლის ნარევი სხვადასხვა თანაფარდობებით, რადიკალური კატალიზატორის - დიკუმილის ზეჟანგის თანაობისას, რომელიც თავის მხრივ თანაპოლიმერიზაციის მაინიცირებელ აგენტს წარმოადგენდა. მიღებულ მასას ვურევდით, რის შემდეგაც წარმოქმნილი ერთგვაროვანი ნარევი იტვირთებოდა სტანდარტულ წნეხფორმებში. ყველა კომპოზიტის მიღების მანიპულაცია ერთმანეთის მსგავსი იყო.

კომპოზიტებს ვამზადებდით 150-190°C ტემპერატურულ დიაპაზონში, 10°C მატებით. ესეთ ტემპერატურულ ინტერვალში შესაძლებელია წარიმართოს რამდენიმე კონკურენტული რეაქცია. მათ შორის უმეტესად სააღბათოა, რომ წარიმართოს ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის მოლეკულათშორისი ურთიერთქმედების - ეთერიფიკაციის რეაქციები, შემავსებელში არსებულ ჰიდროქსილის ჯგუფებთან, ასევე სააღბათოა, რომ ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი და სტიროლი დიკუმილის ზეჟანგის თანაობისას განიცდიან რადიკალურ *in-situ* პოლიმერიზაციას. გაკერვის რეაქციები მიმდინარეობს სურათი 51-ის მიხედვით:



სურათი 44. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის და სტიროლის, შესაძლო

ურთიერთქმედება შემავსებლის ბიოპოლიმერებთან, დიკუმილის ზეჟანგის თანაობისას

2.14 ჭადრის ფოთლის ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების მექანიკური თვისებები შესწავლა

კომპოზიტებისათვის ჩატარებულია მექანიკური გამოკვლევები: კერძოდ შესწავლილია დარტყმითი სიბლანტე ჩარპის მეთოდით, სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე და მასალის ზედაპირის სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით და დათვლილია K კოეფიციენტი. კომპოზიციური მასალები მიღებულია მუდმივ წნევაზე, მონომერების სხვადასხვა კონცენტრაციასა და ტემპერატურაზე.

ცხრილი 20. ჭადრის ფოთლი ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების ფიზიკურ-მექანიკური პარამეტრები

#	კომპოზიტი	წნევა P მპა	T°C	R _{ღუნვა} სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე (კგ/სმ ²)	D (კჯ/მ ²) დარტყმითი სიბლანტე
I	3% TESST+3% სტიროლი+94%ფოთოლი	15	150	34.9	26.13
II	3% TESST+3% სტიროლი+94%ფოთოლი	15	160	33.1	26.13
III	3% TESST+3% სტიროლი+94%ფოთოლი	15	170	29.8	24.32
IV	3% TESST+3% სტიროლი+94%ფოთოლი	15	180	29.47	25.68
V	3% TESST+3% სტიროლი+94%ფოთოლი	15	190	27.66	27.02

VI	3% TESST+6% სტიროლი+91%ფოთოლი	15	150	36.27	24.78
VII	3% TESST+6% სტიროლი+91%ფოთოლი	15	160	32.75	25.22
VIII	3% TESST+6% სტიროლი+91%ფოთოლი	15	170	27	26.99
IX	3% TESST+6% სტიროლი+91%ფოთოლი	15	180	30.51	24.34
X	3% TESST+6% სტიროლი+91%ფოთოლი	15	190	23	26.55
XI	3% TESST+9% სტიროლი+88%ფოთოლი	15	150	34.68	25.68
XII	3% TESST+9% სტიროლი+88%ფოთოლი	15	160	33.33	25.46
XIII	3% TESST+9% სტიროლი+88%ფოთოლი	15	170	27.32	28.17
XIV	3% TESST+9% სტიროლი+88%ფოთოლი	15	180	26.3	26.13
XV	5% TESST+5% სტიროლი+90%ფოთოლი	15	150	26.63	25.68
XVI	5% TESST+5% სტიროლი+90%ფოთოლი	15	160	26.56	23.81
XVII	5% TESST+5% სტიროლი+90%ფოთოლი	15	170	27.19	25.58
XVII	5% TESST+5% სტიროლი+90%ფოთოლი	15	180	28.27	21.62
XIX	5% TESST+5% სტიროლი+90%ფოთოლი	15	190	23.84	24
XX	5% TESST+10% სტიროლი+85%ფოთოლი	15	150	18.22	23.61
XXI	5% TESST+10% სტიროლი+85%ფოთოლი	15	160	24.49	24.77
XXII	5% TESST+10% სტიროლი+85%ფოთოლი	15	170	24.84	24.66
XXIII	5% TESST+10% სტიროლი+85%ფოთოლი	15	180	26.74	27.77
XXIV	5% TESST+10% სტიროლი+85%ფოთოლი	15	190	23.21	29.11
XXV	5% TESST+15% სტიროლი+80%ფოთოლი	15	150	16.9	28.57
XXVI	5% TESST+15% სტიროლი+80%ფოთოლი	15	160	21.17	26.57
XXVII	5% TESST+15% სტიროლი+80%ფოთოლი	15	170	24,46	16.06
XXVIII	5% TESST+15% სტიროლი+80%ფოთოლი	15	180	26.08	27.17

როგორც ცხრილი 20-დან ჩანს ტემპერატურის გაზრდისას 150-დან 190°C-მდე სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე მცირდება 34.9-დან 27.6 კგ/სმ²-მდე. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ერთი და იმავე კონცენტრაციის პირობებში, სტიროლის კონცენტრაციის გაზრდა არ ახდენს მნიშვნელოვან გავლენას ღუნვის სიმტკიცის ზღვარზე. კომპოზიტები დავაშადეთ სხვადასხვა ტემპერატურასა და შემკვრელი ნივთიერებების სხვადასხვა რაოდენობების მიხედვით, ნიმუშებს ვამზადებდით 150-190°C-ზე, 10°C-იანი ინტერვალით, აღნიშნული ტემპერატურული შუალედი შეირჩა შემავსებელის ბუნებიდან გამომდინარე. 200-220°C ტემპერატურაზე გაცხელებით კომპოზიტის სტრუქტურა ირღვეოდა, კომპოზიტის პირველადი - ვიზუალური შეფასებით ცხადი იყო, რომ 180-190°C უკვე კრიტიკული ტემპერატურის ზედა ზღვარს წარმოადგენდა. ვიზუალური შეფასებით კომპოზიტებს ჰქონდათ დამახასიათებელი მუქი ფერის შეფერილობა, ამასთანავე დამწვარი მერქნის სუნი და განიერი ბზარები, შეფერილობის გამო მიკროსკოპზე x30 გადიდების პირობებში, გართულებული იყო ზედაპირის მორფოლოგიის შესწავლა - ერთგვაროვნების შეფასება, მექანიკური სიმტკიცეც რამდენიმეჯერ იყო გაუარესებული. 21-ე ცხრილიდან შევძელით გამოგვეტანა გარკვეული დასკვნები რომ, სადაც შემკვრელი ნივთიერებების კონცენტრაციები მცირე იყო (კომპოზიტები I-XIV), ტემპერატურის გაზრდით, სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე შემცირდა, ხოლო დარტმითი ძალის მაჩვენებელი გაიზარდა, შემკვრელი ნივთიერების მაღალი კონცენტრაციების შემთხვევაში (კომპოზიტები XX-XXVIII), ტემპერატურის გაზრდამ გააუმჯობესა ამ ორი მექანიკური მახასიათებლის მნიშვნელობა. შესაბამისად ცდებზე დაყრდნობით შეგვიძლია ვთქვათ რომ, როცა შემკვრელი ნივთიერებების კონცენტრაციები მცირეა, ტემპერატურის ქვედა ზღვარში გვაქვს უკეთესი მნიშვნელობები, ლოგიკურად გამოდის, რომ დაბალ ტემპერატურაზე ეთერიფიკაციის რეაქციები ნაკლებად მიდის, აქედან გამომდინარე შემავსებელის როლი სიმტკიცეში უფრო მეტად არის გაზრდილი, გამოდის, რომ შემავსებელი თავად ქმნის სიმტკიცის ბარიერს, ხოლო მაღალი კონცენტრაციების შემთხვევაში, ეთერიფიკაციის და არმირების რეაქციების ალბათობა

გაზრდილია და შესაბამისად ტემპერატურის გაზრდით გაუმჯობესდა ორივე მექანიკური მახასიათებელის მნიშვნელობები. იგივე შემთვევაა ცხრილი 21-ში წარმოდგენილ მონაცემებშიც, მაღალ ტემპერატურაზე ეთერიფიკაციის სააღბათო რეაქციების გაზრდამ, გაზარდა დარტყმითი სიბლანტისა და სიმტკიცის მაჩვენებლები.

ცხრილი 21. ჭადრის ფოთლის კომპოზიტების ზედაპირის სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით და K-კოეფიციენტის დადგენა

#	კომპოზიტი	წნევა bar	ტემპერატურა °C	d მმ	BHN კგ/მმ ²	K
II	3% TESST+ 3%სტიროლი+ 84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	150	160	2,415	51,15	0,4
VII	3% TESST +6% სტიროლი+ 81% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	150	160	2,254	28,61	1,11
XI	3%TESST+9%სტიროლი +88% ფოთოლი	150	150	2,254	28,61	1,21
XIV	3%TESST+9% სტიროლი +88% ფოთოლი	150	180	2,093	31,79	0,83
XVIII	5% TESST + 5%სტიროლი + 90% ფოთოლი	150	180	2,454	30,17	1,03
XXXIII	5%TESST+10%სტიროლი + 85% ფოთოლი	150	170	2,415	26,06	1,03

ცხრილი 22. ჭადრის ფოთლის, ანტიპირენის 5-10%, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლის „in-situ” პოლიმერიზაციით 15 მპა წნევაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების გამოცდა ღუნვაზე და დარტყმითი სიბლანტე

#	კომპოზიტის მასა (%)	P მპა	T°C	S სმ²	h1-h2 სმ	ღუნვა აპარატზე PC	გამოცდა ღუნვაზე მპა	დარტყმითი სიბლანტე კჯ/მ²
1	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	15	160	1,2525	31	1,49	1,89	24,28
2	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	15	170	1,185	30,5	1,63	2,30	25,24
3	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	15	180	1,095	26	1,97	3,26	23,28
4	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	15	190	1,039	29	2,03	3,73	27,35
5	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	15	160	1,065	29,5	1,65	2,89	25,54
6	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	15	170	1,056	27,5	1,85	3,29	27,15

7	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	15	180	1,053	27,5	1,79	3,18	25,60
12	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	15	190	1,065	30	1,68	2,94	27,63

ცხრილი 23. ჭადრის ფოთლის, ანტიპირენის 5-10%, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლის „in-situ” პოლიმერიზაციით 10 მპა წნევაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების გამოცდა ღუნვაზე და დარტყმითი სიბლანტე

#	კომპოზიტის მასა (%)	P მპა	T°C	S სმ²	h1-h2 სმ	ღუნვა აპარატზე PC	გამოცდა ღუნვაზე მპა	დარტყმითი სიბლანტე კჯ/მ²
1	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	10	160	1,089	27	2,30	3,85	24,32
2	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	10	170	1,088	27,5	2,02	3,68	24,79
3	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	10	180	1,092	26	2,29	3,81	23,34

4	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	10	190	1,101	27,5	1,88	3,08	24,49
5	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	10	160	1,083	23,5	1,78	3,01	21,28
6	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	10	170	1,074	26,5	1,84	3,17	24,19
7	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	10	180	1,065	26,5	1,92	3,36	24,39
12	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	10	190	1,088	28,5	1,77	2,97	25,68

ცხრილი 24. ჭადრის ფოთლის, ანტიპირენის 5-10%, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლის „in-situ” პოლიმერიზაციით 5 მპა წნევაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების გამოცდა ღუნვაზე და დარტყმითი სიბლანტე

#	კომპოზიტის მასა (%)	P მპა	T°C	S სმ²	h1-h2 სმ	ღუნვა აპარატზე PC	გამოცდა ღუნვაზე მპა	დარტყმითი სიბლანტე კჯ/მ²
1	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	160	1,125	26,5	2,07	3,24	23,10
2	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	170	1,112	29	2,05	3,29	25,56
3	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	180	1,125	27,5	1,91	2,99	23,96
4	3% TESST+3%სტიროლი+89% ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	190	1,14	28	2,01	3,07	24,08
5	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	160	1,097	28,5	2,09	3,45	25,49
6	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	170	1,104	27,5	2,23	3,63	24,42

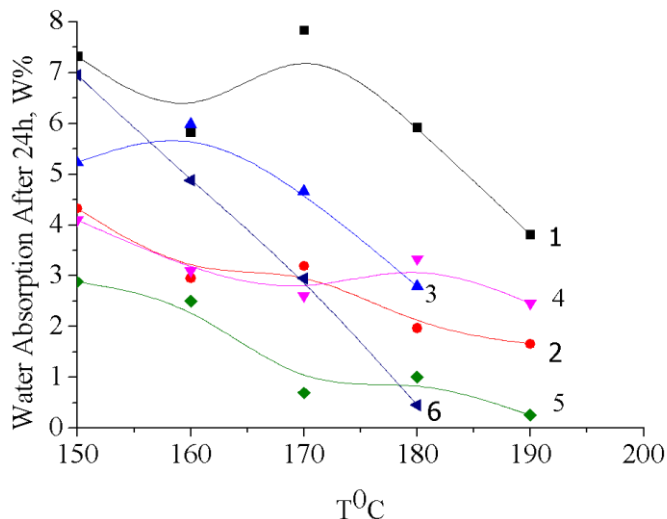
7	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	180	1,098	29	2,08	3,42	25,90
12	3% TESST+3%სტიროლი+84% ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	190	1,106	26	2,29	3,72	23,05

ანტიპირენის 5 და 10% ოდენობით და 5-10-15 მპა წნევაზე მიღებულ კომპოზიციურ მასალებზე ჩატარებული კვლევებით მიღებული საერთო სურათი შემდეგნაირია: 15 მპა წნევის პირობებში, 5% ალუმინის ჰიდროქსიდით მიღებულ კომპოზიტზე, ტემპერატურის მატებისას სიმტკიცე ღუნვაზე საფეხურებრივად იზრდება, დარტყმითი სიბლანტის მაჩვენებელი ახლო ზღვრებში იცვლება, თუმცა აღსაღნიშნავია, რომ დარტყმითი სიბლანტით მაღალი მაჩვენებელი ტემპერატურის ზედა ზღვარშია. განსხვავებული ლოგიკაა კომპოზიციაში 10% ანტიპირენის გამოყენების შემთხვევაში, სიმტკიცე ღუნვაზე ტემპერატურის მატებასთან ერთად იზრდება, თუმცა 190°C-ზე მკვეთრად მცირდება, ესეთივე შემთხვევას ვხვდებით 15 მპა-ზე მიღებულ 10% ანტიპირენის გამოყენებისას 190°C-ზე, სავარაუდოა მექანიკური სიმტკიცის ესეთი არაერთი შემცირება კავშირში იყოს შემავსებლის თემრულ დესტრუქციასთან და არამდგრად სტრუქტურასთან. დარტყმითი სიბლანტეც ტემპერატურის მატებით იზრდება, ტემპერატურის ზედა ზღვარში, ზოგიერთ შემთხვევაში ზემოაღნიშნული მიზეზით მცირდება. შედეგების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება ითქვას, რომ კომპოზიტური მასალებისათვის ყველაზე ოპტიმალურ თერმულ დიაპაზონს 170–180°C წარმოადგენს, სწორედ აღნიშნულ ტემპერატურაზე მიმდინარეობს აქტიური ურთიერთქმედება შემავსებელ (ჰადრის ფოთოლი) და შემკვრელ კომპონენტებს შორის, რაც უზრუნველყოფს მასალის მექანიკური მახასიათებლების გაუმჯობესებას. თავის მხრივ, 190°C წარმოადგენს კრიტიკულ ზედა ზღვარს, რომლის ზემოთაც იკლებს კომპოზიტის სტრუქტურული სტაბილურობა. ამ პირობებში იზრდება შემავსებლის თერმოჟანგვითი დესტრუქციის რისკი, რაც იწვევს მასალის მექანიკური მახასიათებლების (როგორიცაა, ღუნვის მიმართ მედეგობა, სიხისტე, სიმტკიცე ღუნვაზე და დარტყმითი სიბლანტე) გაუარესებას. გამომდინარე იქიდან, რომ ღუნვისას დეფორმაციის ყველაზე ძლიერი ზონა ზედაპირული ფენებია, $Al(OH)_3$ ნაწილაკები აძლიერებენ ამ ფენებს და უზრუნველყოფენ მეტ წინააღმდეგობას, აქედან გამომდინარე 150-180°C-მდე ტემპერატურის მატებისას, ყველა შემთხვევაში გაზრდილია ღუნვის მიმართ

მედეგობა. ანტიპირენის შერევამ კიდევ უფრო მეტად გაზარდა ზოგიერთი მექანიკური მახასიათებელი, რაც დამატებით შესაძლებელია ვივარაუდოთ, რომ შემავსებლის მატრიცასა და ალუმინის ჰიდროქსიდის ჯგუფებს შორის მოხდა გარკვეული ურთიერთქმედება და წარმოიქმნა სხვადასხვა ტიპის, როგორც ქიმიური ისე ფიზიკური კავშირები.

2.15 ჭადრის ფოთლის კომპოზიტების წყალშთანთქმა

მიღებული ნიმუშების წყალშთანთქმის შედეგები მოცემულია ცხრილი 25-ში. როგორც მოცემული ცხრილის მონაცემებიდან და გრაფიკი 30-დან ჩანს ტემპერატურის გაზრდასთან ერთად წყალშთანთქმის კოეფიციენტი მკვეთრად მცირდება, რაც გამოწვეულია მაღალ ტემპერატურებზე შესაძლო ეთერიფიკაციის რეაქციების გაზრდით. წყალშთანთქმა აგრეთვე მცირდება ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის კონცენტრაციის გადიდებით 3%-დან 5%-მდე, სტიროლის კონცენტრაციის 3%-დან 15%-მდე გაზრდასა წყალშთანთქმა მცირდება.



გრაფიკი 30. ჭადრის ფოთლის კომპოზიტის წყალშთანთქმის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

35-ე გრაფიკზე არსებული 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტების I-V (3%ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი, 3% სტიროლი) წყალშთანთქმას, 2 მრუდი VI-X კომპოზიტების (3% ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი, 6% სტიროლი), 3

მრუდი XI-XIV კომპოზიტების (3% ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი, 9% სტიროლი), 4 მრუდი XV-XIX კომპოზიტების (5% ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი, 5% სტიროლი), 5 მრუდი კომპოზიტების XX-XXIV (5% ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი, 10% სტიროლი), 6 მრუდი XXV-XXVIII კომპოზიტების (5% ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი, 15 % სტიროლი) წყალშთანთქმას.

ჭადრის ფოთლის, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლით მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმები, წარმოდგენილია 26-30 ცხრილში. 25-ე ცხრილში წარმოდგენილია მასალების წყალშთანთქმა, რომლებიც მიღებულია სხვადასხვა ტემპერატურის 150-190°C და მორეაგირე ნივთიერებათა - მონომერთა სხვადასხვა კოცენტრაციების შემთხვევაში, მუდმივი წნევის (15მპა) პირობებში, საიდანაც ჩანს შემდეგი ინფორმაცია - 15 მპა წნევაზე დაწნევისას, ტემპერატურის მაღალ ზღვრებში უკეთესი წყალშთანთქმის მაჩვენებლებია. ამ შემთხვევაში გამოსარჩევია XXIV, XXVIII, XXII და XXIII კომპოზიციები, სადაც 24 საათიანი წყალშთანთქმის მაჩვენებელი 1%-მდეა, რაც მასალის ნაკლებ ფორიანობაზე მიუთითებს. ყველა შემთხვევაში 150-180°C ინტერვალში, წყალშთანთქმის მაჩვენებელი მიახლოებით 2-ჯერ მცირდება. კვლევები ასევე ჩატარებულია სხვადასხვა წნევაზე (5-10-15 მპა), ანტიპირენის 5 და 10%-იანი შემცველობის დროს. აღნიშნული კვლევების მონაცემები მოცემულია 26-29 ცხრილში. ცხრილებიდან იკვეთება მაღალი ტემპერატურის დადებითი მნიშვნელობა, ასევე საყურადღებოა, რომ ანტიპირენის დამატება მინიმუმ 1,2-3 ჯერ (ზოგიერთ შემთხვევაში მეტადაც) აუარესებს მასალის წყალშთანთქმას. რაც უფრო მეტად იზრდება ანტიპირენის შემცველობა, მით მეტია წყალშთანთქმის მაჩვენებელი, წნევის ცვლილება, როგორც ფიჭვის კომპოზიციების შემთხვევაში იყო, არ ახდენს რაიმე მნიშვნელოვან ცვლილებას წყალშთანთქმაზე.

ცხრილი 25. ჭადრის ფოთლის, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და სტიროლის „*in-situ*” პოლიმერიზაციით

მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა

#	კომპოზიტი (მას%)	P მპა	T°C	მასა, გ	მოცულობა , სმ³	სიმკვრივე, კგ/მ³	მასა წყალში 3- საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	მასა წყალში 24-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	წყალშთანთქმა, წყალში 24- საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, %
I	3% TESST+3%სტიროლი+94% ფოთოლი + 1% დპ	15	150	3,606	2.36	1520	3.870	3.870	7.32
II	3% TESST+3%სტიროლი+94%ფო თოლი + 1% დპ	15	160	3.712	2.39	1550	3.787	3.917	5.52
III	3% TESST+3%სტიროლი+94%ფო თოლი + 1% დპ	15	170	3.447	2.24	1540	3.533	3.717	7.83
IV	3% TESST+3%სტიროლი+94%ფო თოლი + 1% დპ	15	180	3.314	2.24	1480	3.389	3.477	5.92
V	3% TESST+3%სტიროლი+94%ფო თოლი + 1% დპ	15	190	3.409	2.3	1480	3.472	3.539	3.81
VI	3% TESST+6%სტიროლი+91% ფოთოლი + 1% დპ	15	150	3.031	2.02	1500	3.075	3.162	4.32

VII	3% TESST+6%სტიროლი+91% ფოთოლი + 1% დპ	15	160	3.321	2.35	1410	3,371	3.419	2.95
VIII	3% TESST+6%სტიროლი+91% ფოთოლი + 1% დპ	15	170	3.327	2,24	1490	3.349	3.433	3.19
IX	3% TESST+6%სტიროლი+91% ფოთოლი + 1% დპ	15	180	3.401	2.42	1410	3.405	3.457	1.97
X	3% TESST+6%სტიროლი+91% ფოთოლი + 1% დპ	15	190	3.038	2.19	1390	3.077	3.098	1.65
XI	3% TESST+9%სტიროლი+88% ფოთოლი + 1% დპ	15	150	3.403	1.99	1710	3.469	3.561	5.23
XII	3% TESST+9%სტიროლი+88% ფოთოლი + 1% დპ	15	160	3.530	2.49	1420	3.589	3.741	5.98
XIII	3% TESST+9%სტიროლი+88% ფოთოლი + 1% დპ	15	170	2.762	1.87	1480	2.797	2.839	4.66
XIV	3% TESST+9%სტიროლი+88% ფოთოლი + 1% დპ	15	180	2.466	1.7	1450	2.545	2.581	2.79
XV	5% TESST+5%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	150	3.227	2.14	1510	3.267	3.359	4.1
XVI	5% TESST+5%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	160	3.305	2.26	1460	3.306	3.406	3.1
XVII	5% TESST+5%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	170	3.547	2.5	1420	3.535	3.639	2.6

XVIII	5% TESST+5%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	180	3.156	2.18	1450	3.192	3.261	3.33
XIX	5% TESST+5%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	190	2.725	1.87	1460	2.763	2.792	2.46
XX	5% TESST+10%სტიროლი+85% ფოთოლი + 1% დპ	15	150	3.089	2.07	1490	3.082	3.178	2.88
XXI	5% TESST+10%სტიროლი+85% ფოთოლი + 1% დპ	15	160	2.947	1.98	1490	2.950	3.021	2.5
XXII	5% TESST+10%სტიროლი+85% ფოთოლი + 1% დპ	15	170	2.895	2.07	1400	2.852	2.915	0.69
XXIII	5% TESST+10%სტიროლი+85% ფოთოლი + 1% დპ	15	180	3.633	2.61	1390	3.567	3.669	1
XXIV	5% TESST+10%სტიროლი+85% ფოთოლი + 1% დპ	15	190	2.817	1.94	1450	2.761	2.824	0.25
XXV	5% TESST+15%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	150	3.484	2.44	1430	3.593	3.726	6.95

XXVI	5% TESST+15%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	160	3.526	2.5	1410	3.565	3.691	4.68
XXVII	5% TESST+15%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	170	2.801	2.1	1330	2.744	2.814	2.95
XXVII I	5% TESST+15%სტიროლი+90% ფოთოლი + 1% დპ	15	180	3.360	2.38	1410	3.366	3.459	0.46

ცხრილი 26. ჭადრის ფოთლის, ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის, სტიროლის და ალუმინის ჰიდროქსიდით, „*in-situ*”

მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა

#	კომპოზიტი (მას%)	P მპა	T°C	მასა, გ	მოცულობა, სმ	სიმკვრივე, კგ/მ³	მასა წყალში 3-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	მასა წყალში 24-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	წყალშთანთქმა, წყალში24- საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, %
I	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	15	150	3,515	2,331	1508	3,717	3,843	9,33
II	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	15	180	3,464	2,243	1544	3,550	3,702	6,87
VI	3% TESST+6%სტიროლი+81%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	15	150	3,470	2,296	1511	3,588	3,783	9,02
VII	3% TESST+6%სტიროლი+81%ფოთოლი	15	180	3,185	2,154	1478	3,257	3,330	4,55

	+10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ								
XV	5% TESST+5%სტიროლი+80%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	15	150	3,537	2,314	1529	3,648	3,813	7,8
XVI	5% TESST+5%სტიროლი+80%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	15	180	3,379	2,278	1483	3,450	3,528	4,4
XX	5% TESST+10%სტიროლი+75%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	15	150	3,348	2,154	1554	3,441	3,602	7,59
XXI	5% TESST+10%სტიროლი+75%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	15	180	2,884	2,031	1419	3,000	3,057	5,99

ცხრილი 27. ფოთლის, ტრიეთოქსისილანის, სტიროლის და ალუმინის ჰიდროქსიდით, 15 მპა წნევასა და მორიეაგირე ნივთიერებათა სხვადასხვა კონცენტრაციებზე „*in-situ*” პოლიმერიზაციით მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა

#	კომპოზიტი (მას%)	P მპა	T°C	მასა, გ	მოცულობა, სმ³	სიმკვრივე, კგ/მ³	მასა წყალში 3-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	მასა წყალში 24-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	წყალშთანთქმა, წყალში 24- საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, %
1	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დბ	15	160	3.50	2.252	1554	3.69	4.38	25.14%
2	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დბ	15	170	3.59	2.376	1511	3.68	3.85	7.24%
3	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დბ	15	180	3.38	2.252	1501	3.45	3.57	5.62%
4	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დბ	15	190	3.32	2.217	1498	3.40	3.54	6.63%

5	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დბ	15	160	3.49	2.234	1562	3.58	3.80	8.88%
6	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დბ	15	170	3.30	2.183	1512	3.38	3.46	4.85%
7	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დბ	15	180	3.44	2.225	1546	3.50	3.58	4.07%
8	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დბ	15	190	2.79	1.999	1396	2.89	2.94	5.38%

ცხრილი 28. ფოთლის, ტრიეთოქსისილანის, სტიროლის და ალუმინის ჰიდროქსიდით, 10 მპა წნევასა და მორიეაგირე ნივთიერებათა სხვადასხვა კონცენტრაციებზე „*in-situ*” პოლიმერიზაციით მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა

#	კომპოზიტი (მას%)	P მპა	T°C	მასა, გ	მოცულობა, სმ³	სიმკვრივე, კგ/მ³	მასა წყალში 3-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	მასა წყალში 24-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	წყალშთანთქმა, წყალში 24- საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, %
9	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	10	160	3,590	2.832	1268	3,672	4,061	13,12%
10	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	10	170	3,324	2,283	2577	3,423	3,557	7,01%
11	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	10	180	3,495	2,301	1519	3,571	3,715	6,29%
12	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	10	190	3,471	2,283	1520	3,540	3,698	6,54%
13	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	10	160	3,517	2,283	1541	3,616	3,758	6,85%
14	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	10	170	3,574	2,390	1495	3,674	3,792	6,10%

15	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	10	180	3,414	2,310	1478	3,515	3,608	5,68%
16	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი + 1% დპ	10	190	2,787	1,956	1425	2,884	2,950	5,85

ცხრილი 29. ფოთლის, ტრიეთოქსისილანის, სტიროლის და ალუმინის ჰიდროქსიდით, 5 მპა წნევასა და მორიეაგირე ნივთიერებათა სხვადასხვა კონეცტრაციებზე „*in-situ*” პოლიმერიზაციით მიღებული კომპოზიციური მასალების წყალშთანთქმა

#	კომპოზიტი (მას%)	P მპა	T°C	მასა, გ	მოცულობა, სმ³	სიმკვრივე, კგ/მ³	მასა წყალში 3-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	მასა წყალში 24-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, გ	წყალშთანთქმა, წყალში 24- საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, %
17	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	160	3,546	2,425	1426	3,602	3,717	4,82%
18	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	170	3,731	2,464	1514	3,777	3,895	4,40%
19	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	180	2,940	2,172	1354	3,003	3,117	6,02%
20	3% TESST+3%სტიროლი+89%ფოთოლი +5% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	190	3,279	2,376	1380	3,348	3,474	5,95%
21	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	160	3,546	2,353	1507	3,614	3,736	5,36%
22	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	170	3,638	2,367	1537	3,695	3,815	4,87%
23	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	180	3,353	2,376	1411	3,426	3,520	4,98%
24	3% TESST+3%სტიროლი+84%ფოთოლი +10% ალუმინის ჰიდროქსიდი	5	190	3,393	2,381	1425	3,465	3,580	5,51%

ჭადრის ფოთლის ფქვილის ბაზაზე 5, 10 და 15 მპა წნევის პირობებში მიღებულ კომპოზიტებზე ჩატარდა რიგი კვლევები. 5 მპა წნევაზე მიღებული ნიმუშების წყალშთანთქმის მაჩვენებლები (ტემპერატურის დიაპაზონში 150–190°C შორის) ერთმანეთისგან მცირედით განსხვავდება, 10 მპა-ს შემთხვევაში კომპოზიტების წყალშთანთქმებს შორის სხვაობა შედარებით გაზრდილია, ხოლო 15 მპა-ს ზოგიერთი შემთხვევაში განსხვავება თვალშისაცემია. ამისი მაგალითია ნიმუში 1-ს ქცევა წყალშთანთქმის მიმართ, რა დროსაც 24 საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ, ნიმუშის წყალშთანთქმამ 25% შეადგინა, როცა იგივე კომპოზიციამ 5 და 10 მპა წნევის პირობებში 4-4,5%. თითოეული წნევის შემთხვევაში, ტემპერატურული შუალედი 150-190°C იყო. კომპოზიტის ამგვარი ქმედება გამოწვეულია მაღალ წნევაზე და ტემპერატურაზე მიკრობზარების წარმოქმნით, ჭადრი ფოთლის ფქვილის ნაწილაკები ნაკლებეფექტურად უზრუნველყოფენ დელოკალიზაციის წერტილის გაჩენას, შესაბამისად ბზარების გავრცელება უფრო დიდ ფართობებზე ხდება, რაც ლოგიკურია წყალშთანთქმას ზრდის.

2.16 ფიზიკური კვლევები

2.16.1 ფოთლის მასალების ფურიე გარდაქმნის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიული კვლევა

კომპოზიციური მასალებისათვის ჩატარებულია ინფრაწითელი გამოკვლევები. ინფრაწითელ სპექტრებში (გრაფიკი 31-35) შეიმჩნევა შთანთქმის ზოლები 755 და 776 სმ^{-1} უბანში დამახასიათებელი დიჰანაცვლებული ბენზოლის ბირთვისათვის (B. C. Smith 2016). სპექტრში შეიმჩნევა ასევე შთანთქმის ზოლი დამახასიათებელი სილოქსანური $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ ბმის ასიმეტრიული ვალენტური რხევებისთვის, მაქსიმუმ 1031 სმ^{-1} უბანში. შთანთქმის ზოლი 1150 1236, 1363, 1419, 1507, 1610-1653, 1710 და 2800-2950 სმ^{-1} , რომლებიც შეესაბამება Si-O-C და C-O-C ბმებისათვის დამახასიათებელ ასიმეტრიულ შთანთქმის ზოლებს, აქ ადგილი აქვს შთანთქმის ზოლების გადაფარვას; მეთილის ჯგუფებს, CH ბმული შთანთქმის ($-\text{C} / \text{C} - / \text{CH}_3$), CH_2 ცელულოზას - ლიგნინს, $\text{C} = \text{C}$ ჯგუფებს შესაბამისად. შთანთქმის ზოლები 1363 და 1449 სმ^{-1} შეესაბამება $\equiv\text{Si-OC}_2\text{H}_5$ ჯგუფს. სპექტრში ფიქსირდება Si-O-C ბმისთვის დამახასიათებელი შთანთქმის ზოლ(ებ)ი – ძირითადად 1112–1030 სმ^{-1} უბანში, ეს დამატებით ამყარებს $\equiv\text{Si-OC}_2\text{H}_5$ ბმის არსებობას.

ყველა შემთხვევაში ცელულოზის სხვადასხვა ტემპერატურაზე გახურების და ქიმიური დამუშავების შემდეგ გადაღებულმა ინფრაწითელმა სპექტრებმა გვიჩვენა, რომ თერმული დამუშავება არ ახდენს გავლენას არცერთი ცელულოზის სტრუქტურაზე. აქ ყველა ნიმუშის იწ სპექტრი ერთნაირია, უმნიშვნელოა ზოლების სიხშირეების ცვლილება, რაც გვამღევს ასეთი დასკვნის გაკეთების უფლებას.

სილიციუმორგანულ ნაერთის ინფრაწითელ სპექტრებში რხევის ზოლების სიხშირეები ემთხვევა ცელულოზის რხევის სიხშირის ზოლებს გარდა ინტენსიური ზოლისა $\approx 470\text{სმ}^{-1}$ -ზე (Si-O-Si, Si-O-C ბმის შესაბამისი), რადგან სილიციუმორგანული ნაერთის წილი გადასაღებ ნიმუშში მინიმალურია, ამიტომ ის გავლენას ვერ ახდენს სპექტრის საერთო სურათზე. გამონაკლისს წარმოადგენს დაბალი ინტენსივობის პიკი

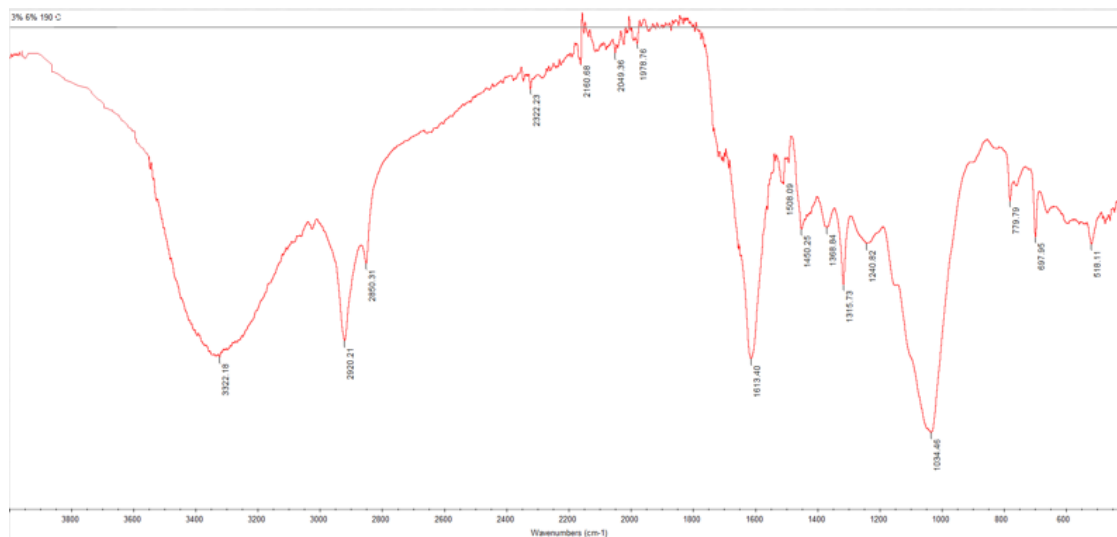
$\approx 472\text{cm}^{-1}$ -ზე, რომელიც ცელულოზის საწყის ნიმუშში არ აღინიშნებოდა და მხოლოდ მათი სილიციუმორგანიკით დამუშავების შემდეგ გამოჩნდა.



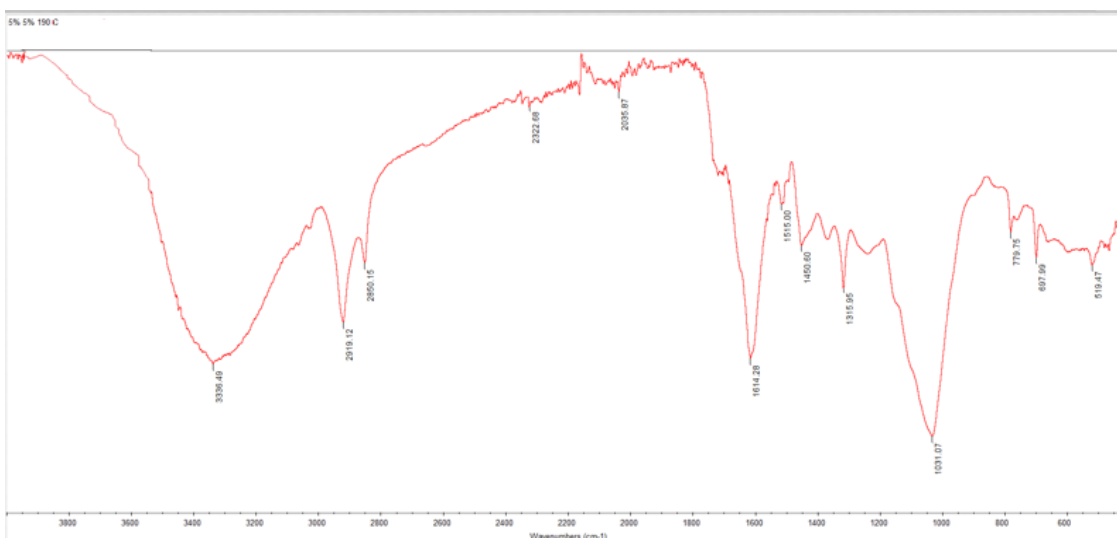
გრაფიკი 31. კომპოზიციური მასალის I (3% სილ.სტიროლი , 3% სტიროლი - 150°C) იწ სპექტრი



გრაფიკი 32. კომპოზიციური მასალის V (3% სილ.სტიროლი , 3% სტიროლი - 190°C) იწ
სპექტრი



გრაფიკი 33. კომპოზიციური მასალის X (3% სილ.სტიროლი , 6% სტიროლი - 190°C) იწ
სპექტრი



გრაფიკი 34. კომპოზიციური მასალის XIX (5% სილ.სტიროლი , 5% სტიროლი - 190°C) იწ
სპექტრი

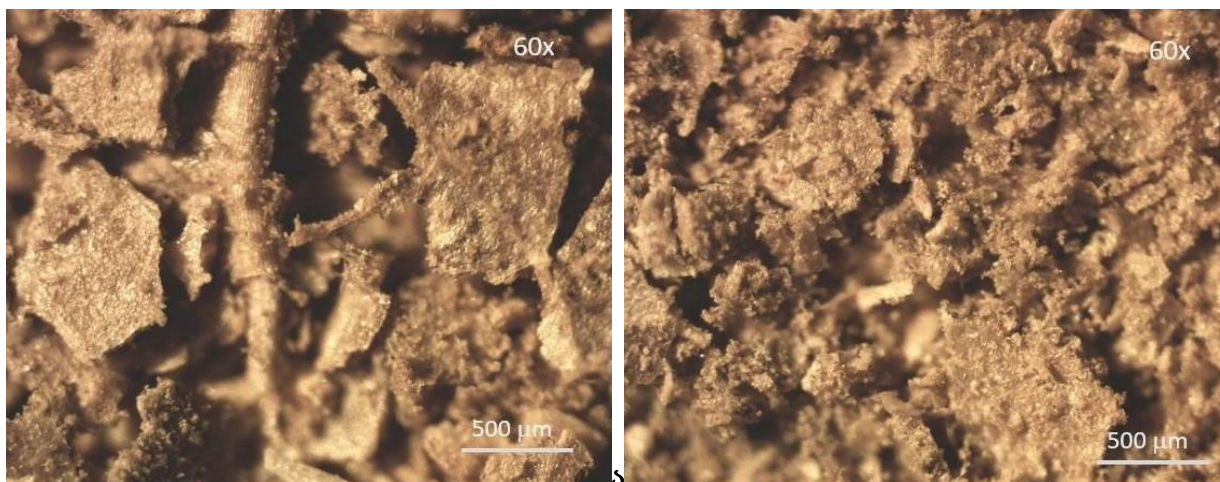


გრაფიკი 35. კომპოზიციური მასალის XXIV (5% სილ.სტიროლი , 10% სტიროლი - 190°C) იწ სპექტრი

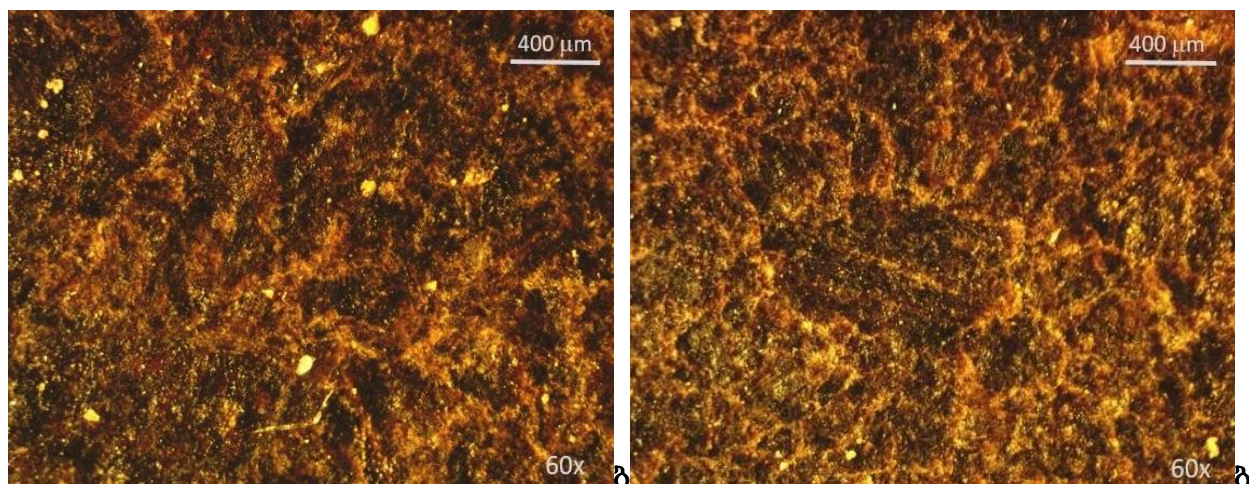
2.17 ოპტიკური კვლევა

2.17.1 მასალის ზედაპირის მიკროსკოპიული კვლევა

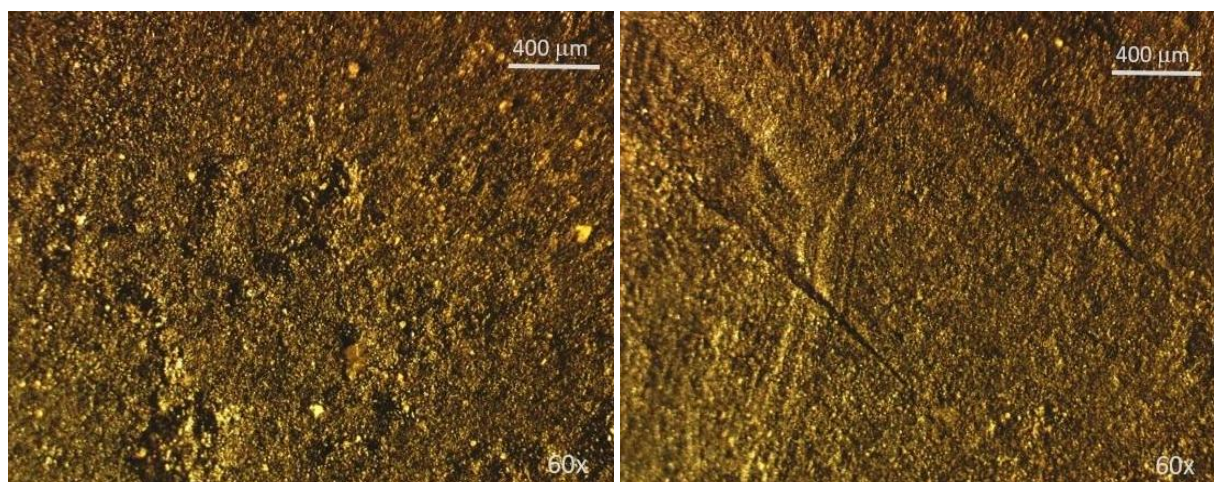
ფოთლის კომპოზიციური ნიმუშების მიკროსტრუქტურა შევისწავლეთ NMM-800RF / TRF ტიპის ოპტიკური მიკროსკოპზე. მიკროგრაფები გადავიღეთ სხვადასხვა გადიდების პირობებში (იხილეთ სურათები 54-57) ფოთლის ფანტელების შემთხვევაში ეს ზომები შემცირებულია, რომელიც 0.01-0.05 მმ ფარგლებშია. (ნაწილაკების ზომები 11-54 მკმ და ნაპრალის ზომა figure 4-ში არის 222,528 მკმ)



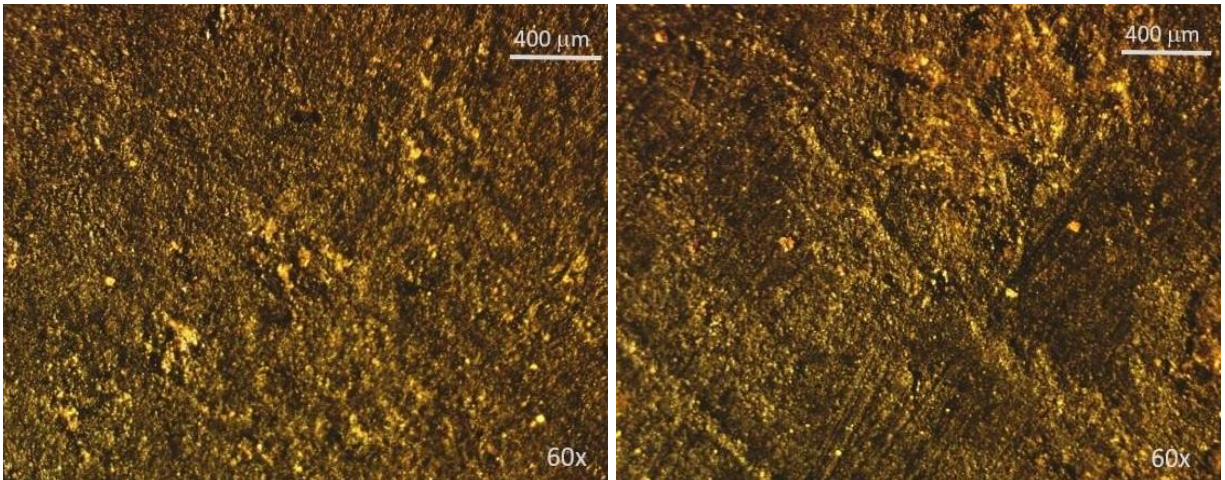
სურათი 45. ჭადრის ფოთლი გაცრილი ა და დაფქვილი ბ



სურათი 46. 150°C-ზე მიღებული 3% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი და 3% სტიროლის შემცველი კომპოზიტის I ზედაპირი 60-ჯერ გადიდების პირობებში



სურათი 47. 190°C-ზე მიღებული 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი და 5% სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XIX ზედაპირი 60-ჯერ გადიდების პირობებში



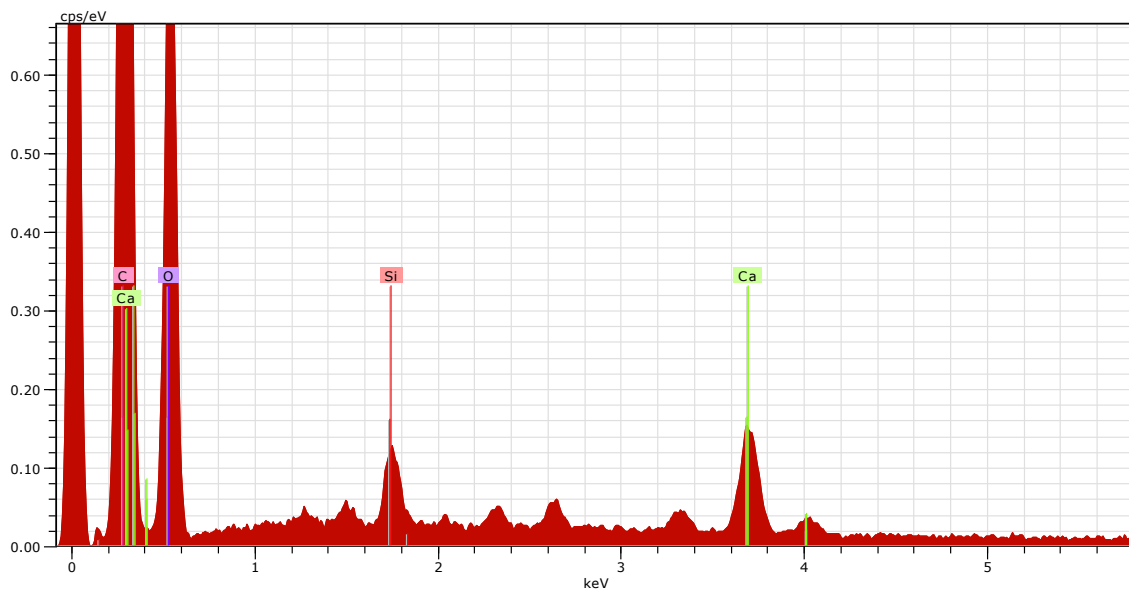
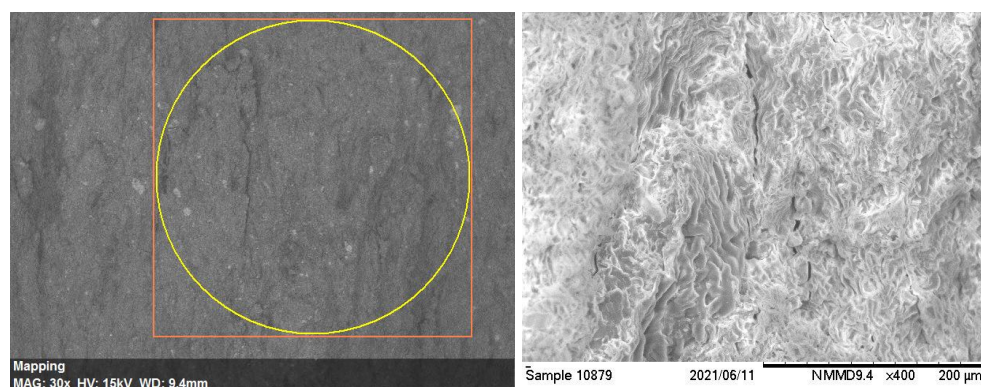
სურათი 48. 190°C-ზე მიღებული 5% ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი და 10% სტიროლის შემცველი კომპოზიტის XXIV ზედაპირი 60-ჯერ გადიდების პირობებში როგორც სურათებიდან ჩანს ზედაპირზე დაიმზირება სხვადასხვა ზომის დომენების თანაბარი განაწილება მატრიცაში, თუმცა შეინიშნება მცირე ზომის ნაპრალები და ჩაღრმავებები.

2.17.2 ენერგო დისპერსიული X-სხივური ანალიზი

ჭადრის ფოთლის ნიმუშებისთვის ოპტიკური კვლევები ჩატარდა TM3030Plus სამაგიდე მიკროსკოპზე, აღნიშნული მიკროსკოპი წარმოადგენს დაბალვაკუუმურ მასკანირებელ ელექტრონულ მიკროსკოპს (SEM) და საშუალებას იძლევა მარტივი დაკვირვებით შესრულდეს ანალიზი ნიმუშის წინასწარი მომზადების გარეშე, თუნდაც არაგამტარი მასალებისა ან წყლის / ზეთის შემცველი მასალებითვის. მიკროსკოპი ასევე აღჭურვილი იყო (EDX) ენერგიის დისპერსიული რენტგენის სპექტრომეტრით, უახლესი SDD (სილიციუმის დრიფტის დეტექტორით), გამოვლენის დიდი არეალით (30 mm²) და მრავალი ელემენტარული ანალიზით, როგორიცაა წერტილოვანი/არეული ანალიზი, ხაზის სკანირება და რუკების შედგენა (კარტოგრამა), რამაც საშუალება მოგვცა უფრო დეტალურად შეგვესწავლა საკვლევი მასალების მორფოლოგია.

გადიდების დიაპაზონი: 15-დან 60,000x (ციფრული მასშტაბირებით 240,000x).
ძაბვის დაჩქარება 5 კვ, 15 კვ. დაკვირვების რეჟიმი: BSE; SE & MIX. ნიმუშის ზომა: 70 მმ
დiameterით და 50 მმ სისქით. ძაბვა 5 კვ & 15 კვ.

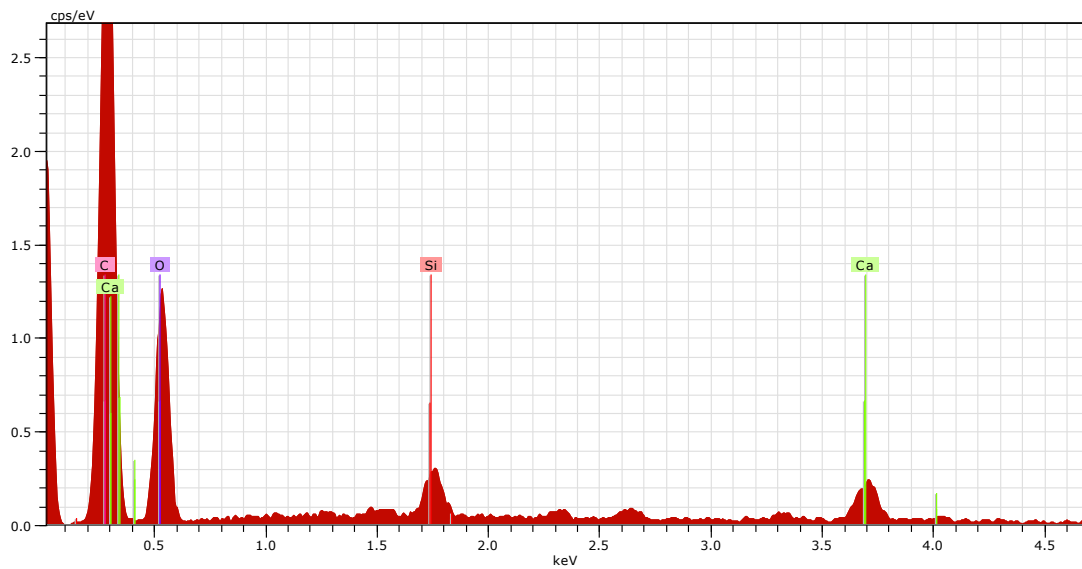
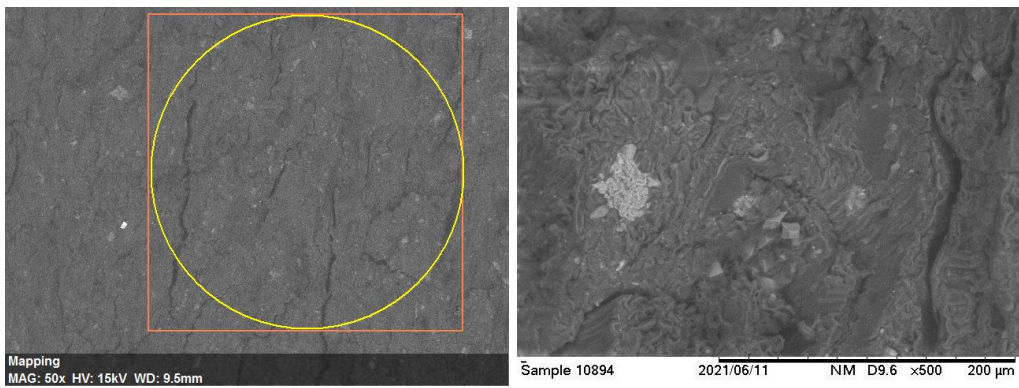
ცხრილი 30. I კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი
სურათზე მოცემულია I კომპოზიტის სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპიით
მიღებული მიკროგრაფები.



ცხრილი 31. I კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი 400x
გადიდების პირობებში

Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Carbon	6	K-series	51.54	59.72
Oxygen	8	K-series	44.62	38.81
Calcium	20	K-series	2.95	1.02
Silicon	14	K-series	0.89	0.44
Total:			100.00	100.00



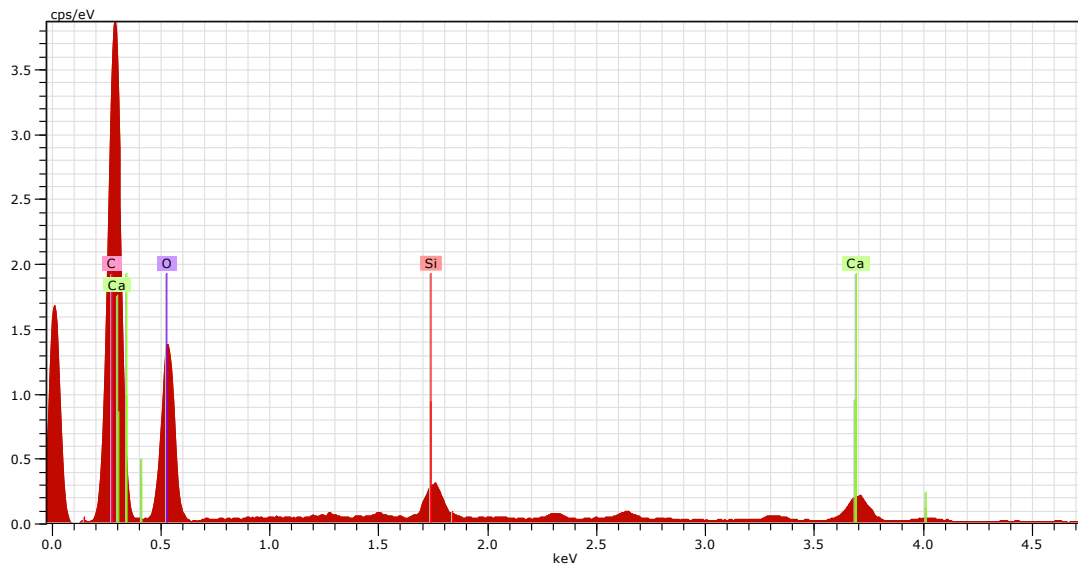
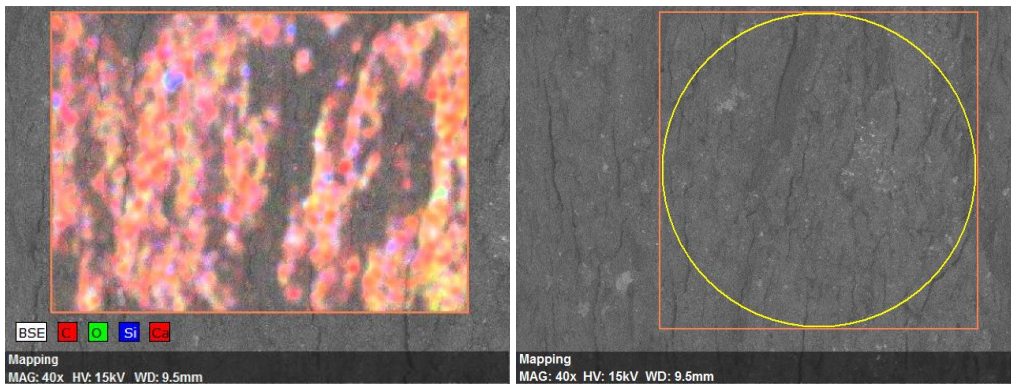
ცხრილი 32. XXIV კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი 500x გადიდების პირობებში

Spectrum: Point

Element AN Series norm. C Atom. C
[wt.%) [at.%)

Carbon	6	K-series	56.03	64.12
Oxygen	8	K-series	39.88	34.27
Calcium	20	K-series	2.67	0.92
Silicon	14	K-series	1.42	0.70

Total: 100.00 100.00



ცხრილი 33. XV კომპოზიტის ენერგო დისპერსიული X-სხივური მიკროანალიზი 200x გადიდების პირობებში

Spectrum: Point

Element AN Series norm. C Atom. C
[wt.%) [at.%)

Carbon	6	K-series	55.68	63.66
Oxygen	8	K-series	40.64	34.88
Calcium	20	K-series	2.31	0.79
Silicon	14	K-series	1.36	0.67

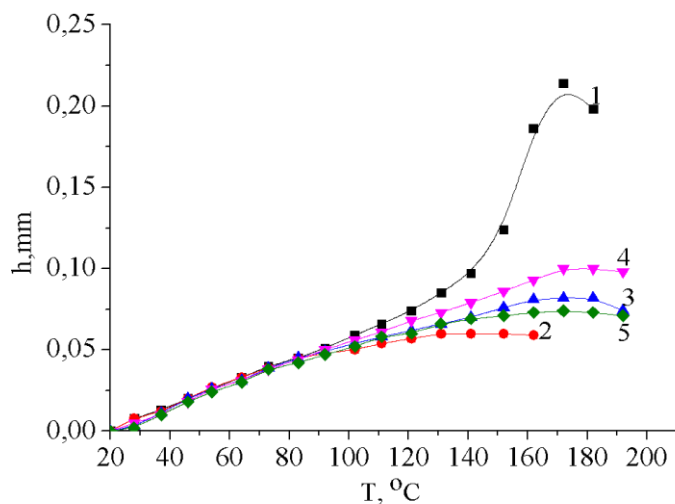
Total: 100.00 100.00

I-XXIV-XV კომპოზიტებზე 400-ჯერ, 500-ჯერ და 200-ჯერ გადიდების პირობებში დაიშორება დაახლოებით 10-100 მკმ ზომის ნაპრალები და არათანაბარი ზედაპირი, კომპოზიტის ზედაპირზე ელემენტური განაწილება თანხვედრაშია სხვა უბნებზე არსებულ ელემენტურ შემადგენლობასთან, რაც კიდევ უფრო ზუსტად მიუთითებს, ნიმუშში ელემენტების ერთგვაროვან განაწილებაზე.

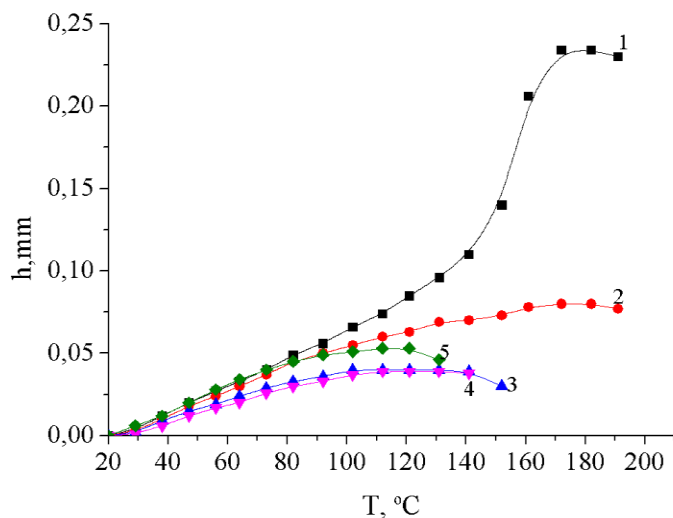
2.18 თერმული თვისებების შესწავლა

2.18.1 გარბილების ტემპერატურის განსაზღვრა ვიკას მეთოდით

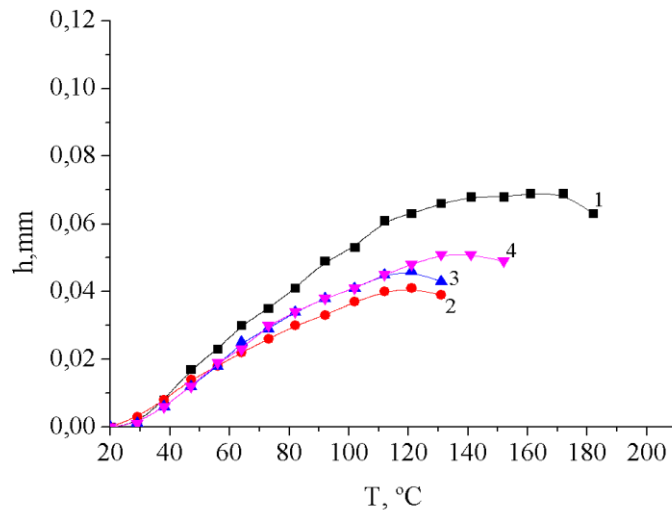
მიღებული კომპოზიტებისათვის შესწავლილია თერმული თვისებები, კერძოდ კომპოზიტის გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით. 36-40-ე გრაფიკებზე მოცემულია კომპოზიტების გარბილების ტემპერატურის ცვლილება ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით. როგორც ნახაზებიდან ჩანს ტემპერატურის გაზრდასთან ერთად იზრდება h - გარბილების ტემპერატურის მნიშვნელობა. ვიკა საშუალებას იძლევა გავიგოთ, რომელ ტემპერატურაზე რბილდება კომპოზიტში არსებული პოლიმერი, რომელიც დიდწილად პასუხისმგებელია მასალის მექანიკურ სიმტკიცეზე. ნიმუშების გრაფიკიდან ჩანს, რომ ჯერ ადგილი აქვს მრუდების მონოტონურ ზრდას, 160°C-დან ირღვევა მონოტონურობა და იწყება მაქსიმალური ჩაღრმავების დაფიქსირება, რის შემდეგაც უახლოვდება ჰორიზონტალურ ასიმპტოტს.



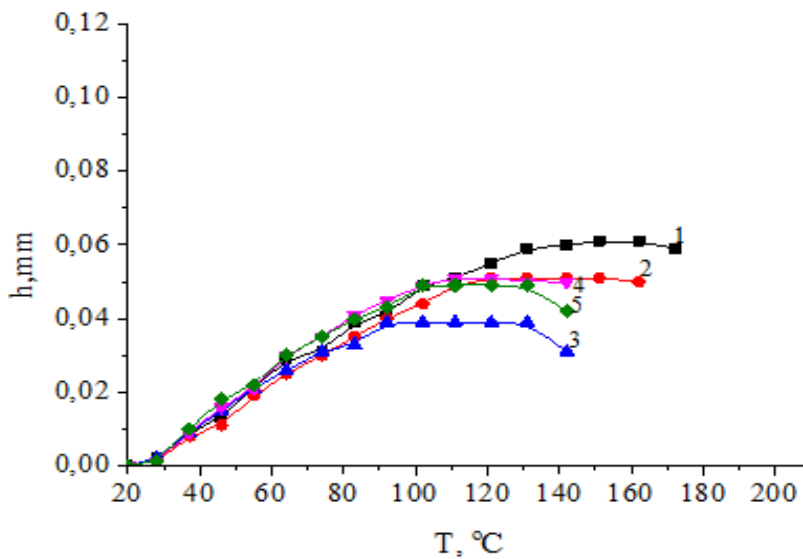
გრაფიკი 36. კომპოზიტის (3% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 3 % სტიროლი +94% ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით
სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს I მიღებულს 150°C, 2 – II (160°C), 3 - III (170°C), 4 - IV (180°C) და 5 - V (190°C).



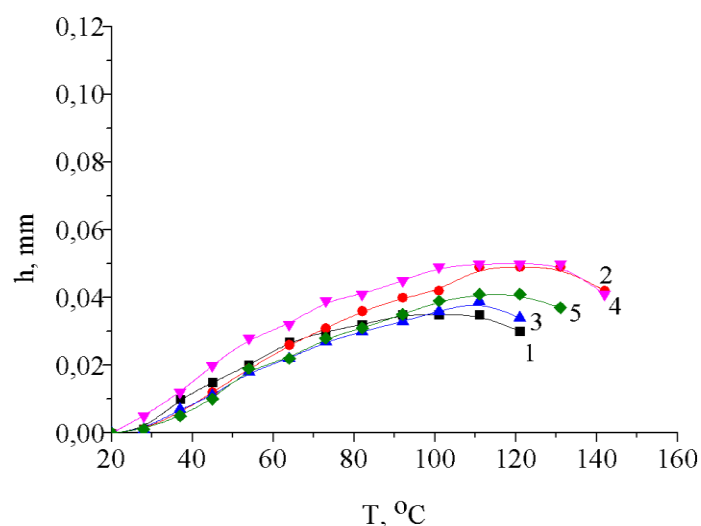
გრაფიკი 37. კომპოზიტის (3% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 6% სტიროლი +91%ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით
სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს VI მიღებულს 150°C, 2 – VII (160°C), 3 - VIII (170°C), 4 - IX (180°C) და 5 - X (190°C).



გრაფიკი 38. კომპოზიტის (3% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 9 % სტიროლი +88% ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით
სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს XI მიღებულს 150°C, 2 – XII (160°C), 3 - XIII (170°C), 4 - XIV (180°C)

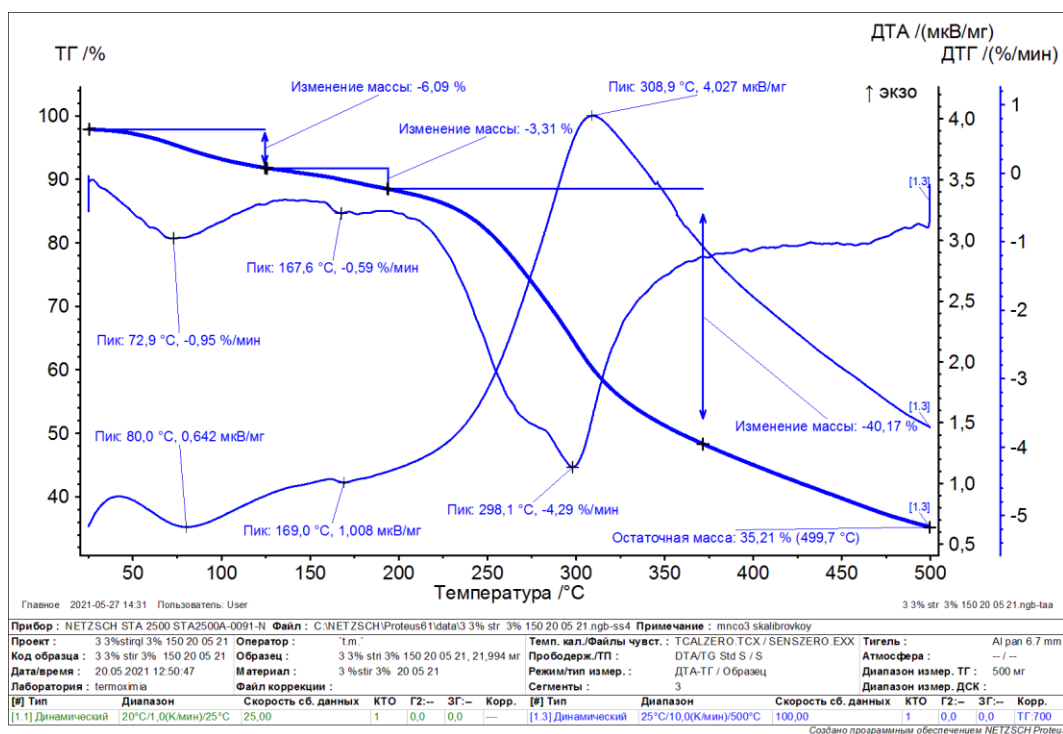


გრაფიკი 39. კომპოზიტის (5% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 5 % სტიროლი +90% ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით
სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს XV მიღებულს 150°C, 2 – XVI (160°C), 3 - XVII (170°C), 4 - XVIII (180°C) და 5 - XIX (190°C).

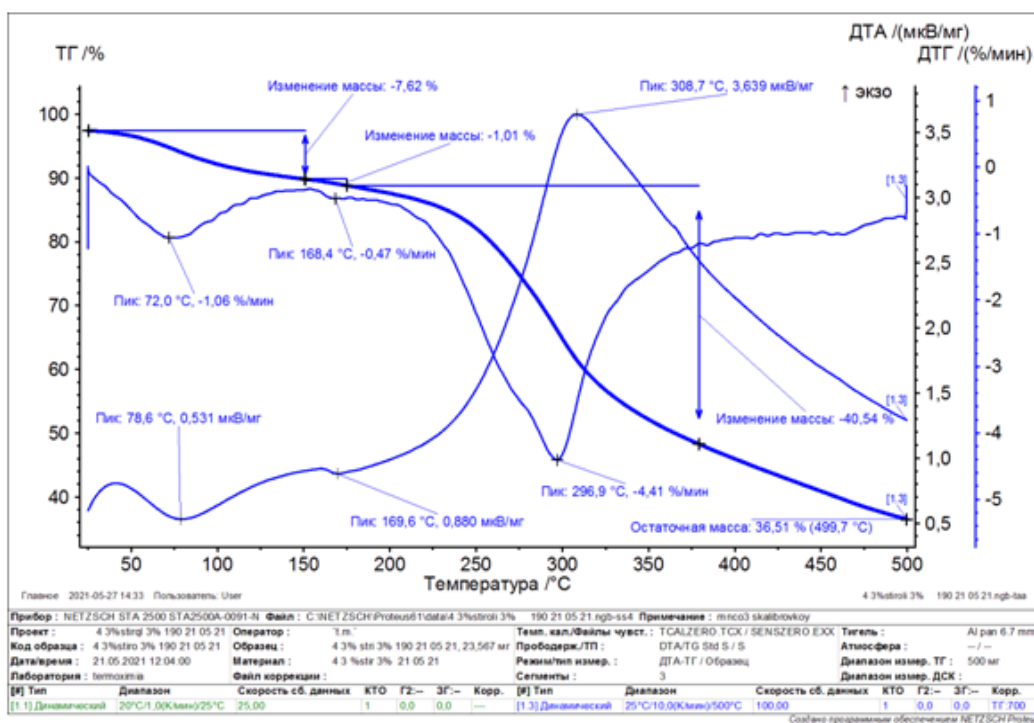


გრაფიკი 40. კომპოზიტის (5% ტრიეთიოქსისილილირებული სტიროლი + 10 % სტიროლი +90% ფოთოლი) გარბილების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ვიკას მეთოდით, სადაც 1 მრუდი შეესაბამება კომპოზიტს XX მიღებულს 150°C, 2 – XXI (160°C), 3 - XXII (170°C), 4 - XXIII (180°C) და 5 - XXIV (190°C)

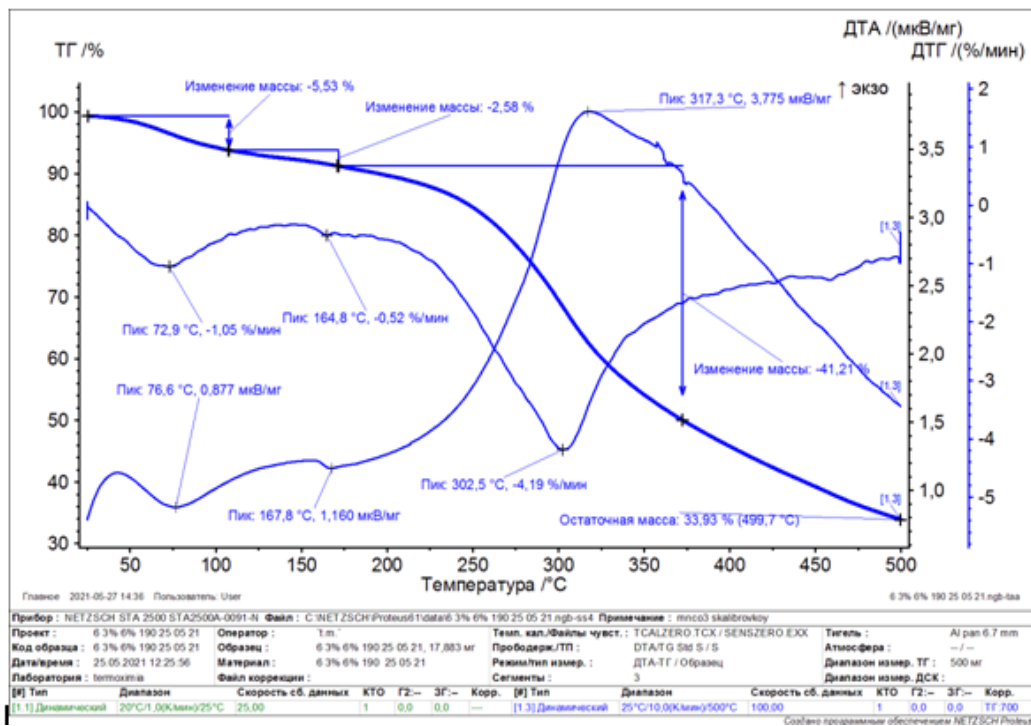
2.18.2 ფოთლის ფეკილის კომპოზიტების თერმოგრაფიკული კვლევა



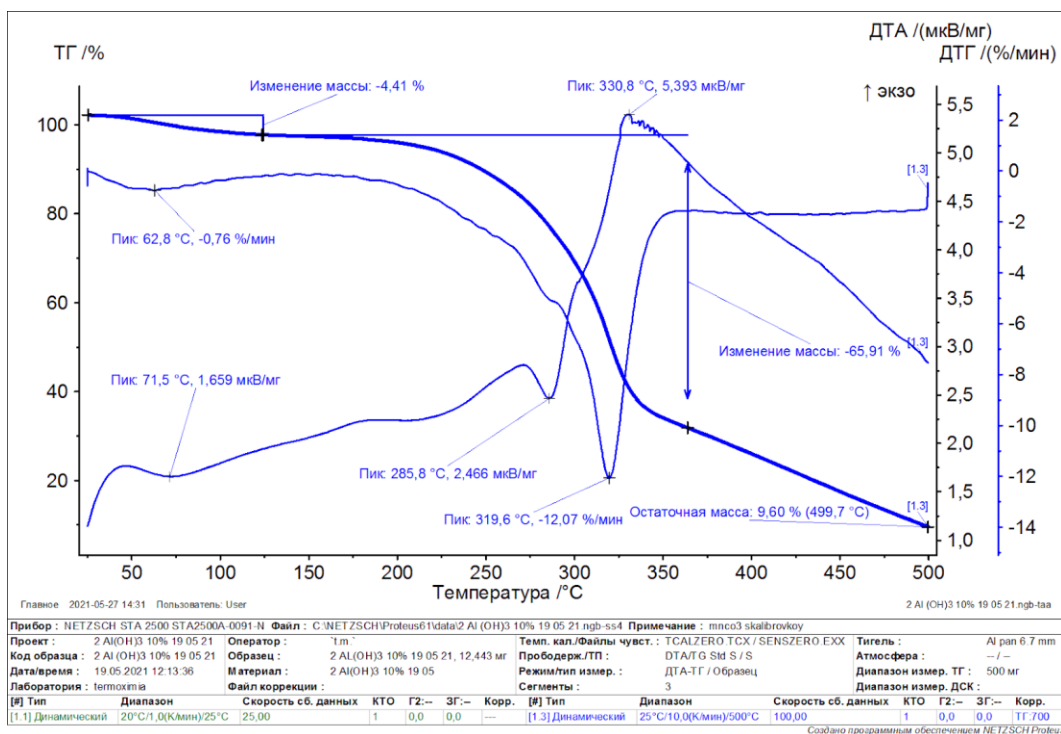
გრაფიკი 41. (I) 3% TESST, 3% სტიროლი, 94% ფოთოლი 150°C



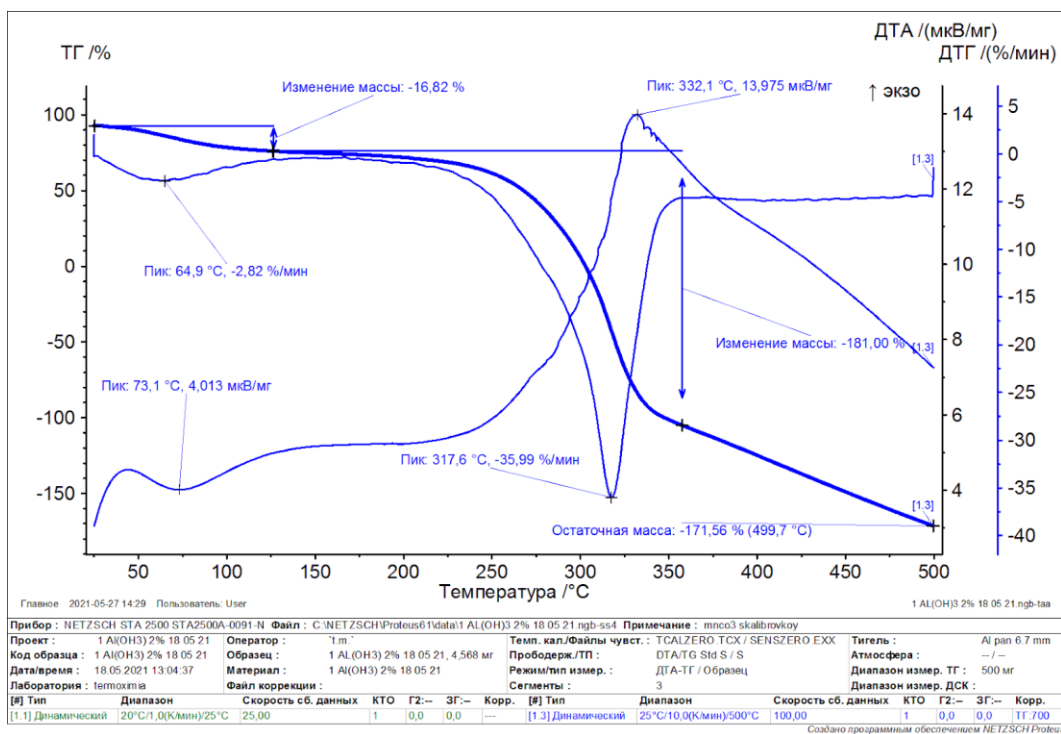
გრაფიკი 42. (V) 3% TESST, 3% სტიროლი, 94% ფოთოლი, 190°C



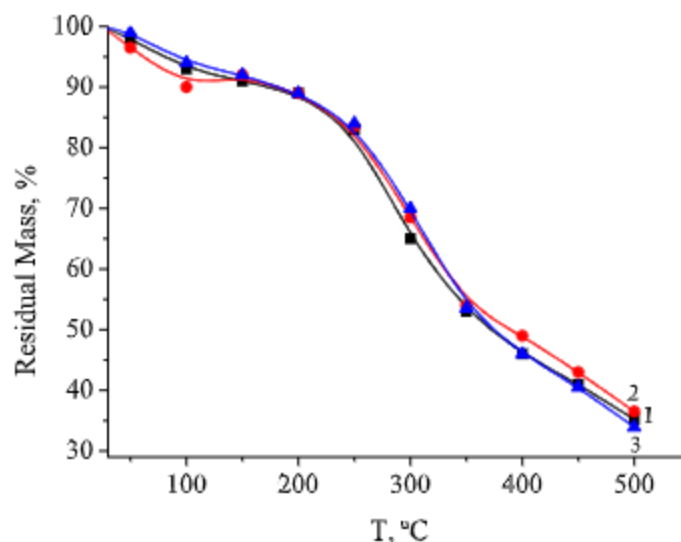
გრაფიკი 43. 3% სილ.სტიროლი, 6% სტიროლი, ჯადრის ფოთოლი 91%, 190°C



გრაფიკი 44. ალუმინის ჰიდროქსიდი 10%, სილ.სტიროლი 5%, ჯადრის ფოთოლი 85% 220°C



გრაფიკი 45. ალუმინის ჰიდროქსიდი 2%, სილ.სტიროლი 5%, ჯადრის ფოთოლი 93% 220°C



გრაფიკი 46. ფოთოლის ბაზაზე მიღებული პოლიმერული კომპოზიტების თერმოგრავიმეტრული მრუდები, ატმოსფერული ჰაერის არეში, გაცხელების სიჩქარე 10°C/წუთი

სადაც 1 (შავი) მრუდი შეესაბამება I კომპოზიტს, 2(წითელი) მრუდი – V კომპოზიტს და 3 (ლურჯი) მრუდი- X კომპოზიტს.

TGA-თერმოგრავიმეტრული გამოკვლევები ჩავატარეთ 1-ლი, მე-5 და მე-10 კომპოზიტებისთვის. ნიმუშების გახურება დაიწყო ოთახის ტემპერატურიდან 25°C-დან 500°C-მდე, სამივე ნიმუშზე მასის 5-7%-ის კლება დაფიქსირდა 100-150°C დიაპაზონში. პირველი DTG მრუდი 64-72°C ტემპერატურის ამ ინტერვალში მასის კლება აიხსნება კომპოზიტების მაღალი ფორიანობით და ბიომეცხელების ჰიგროსკოპიული ბუნებით, ამ მიზეზებიდან გამომდინარე, შესაძლოა მასის კლება გამოეწვიოს ჰაერიდან შთანთქმული ტენის ან დაწნეხის პროცესისას კომპოზიტში დარჩენილი აქროლადი ნივთიერებების, ძირითადად ეთილის სპირტის აორთქლებას, რომლებმაც ცხლად დაწნეხისას ვერ დააღწიეს თავი სისტემას. II ეტაპზე აშკარა თერმოჟანგვითი დესტრუქციაა, რაც გამოისახა მკაფიო ეგზოთერმული მრუდით 332°C-ზე, 250-370°C-ზე კომპოზიტის საწყისი მასის დაახლოებით 70%-ის დანაკარგი გვაქვს, რაც შეგვიძლია ავხსნათ ორგანული ნივთიერებების დაბალი მედეგობით მაღალი ტემპერატურის მიმართ. III საბოლოო ეტაპი, ყველა კომპოზიტის შემთხვევაში

დარჩენილი მასა დაახლოებით 20-25% შეადგენს, რომელიც შესაძლოა იყო ნარჩენი ლიგნინი, ვინაიდან ცნობილია, რომ ლიგნინის თავისი სტრუქტურიდან გამომდინარე თერმოჟანგვითი დესტრუქციის საკმაოდ დიდი დიაპაზონი აქვს, მისი აქტიური დაშლა 250-450°C მიმდინარეობს, ხოლო გამოყოფილი ნივთიერებების წვა >450°C ტემპერატურაზე. (Li, et al. 2025)

I კომპოზიტის თერმოგრავიმეტრული მრუდიდან ჩანს (გრაფიკი 41.), რომ ტემპერატურის მატებისას, 50 დან 200°C მასის დანაკარგმა შეადგინა 6%, რისი შემდგომი გაცხელებით 350°C-მდე, ნიმუშმა განიცადა მასის მკვეთრი შემცირება, რაც ასახულია TG და dTG მრუდებით 298,1°C-ზე, სადაც ნაჩვენებია ძირითადი მასის დაახლოებით 47% მასის შემცირება. 500°C -ზე მასის ჯამურმა დანაკარგმა 65% შეადგინა, რის შემდეგაც შევწყვიტეთ ანალიზის ჩატარება.

V კომპოზიტის თერმოგრავიმეტრული მრუდიდან ჩანს (გრაფიკი 42), რომ ნიმუშის თერმოგრავიმეტრული გრაფიკი წინა კომპოზიტის მსგავსია. ამ შემთხვევაშიც თავდაპირველი მასის დანაკარგი 50°C-დან 200°C-მდე ინტერვალშია, ხოლო 200°C-დან 350°C-მდე მასის კლების მრუდის მკვეთრი ცვლილების მიხედვით შეგვიძლია აღვნიშნოთ თუ ტემპერატურის რა დიაპაზონშია მასის კლება მაქსიმალური - დაახლოებით 46%.

X კომპოზიტის თერმოგრავიმეტრული მრუდიდან ჩანს (გრაფიკი 43), რომ ტემპერატურის მატებისას, 165°C - დან 317°C-მდე დიაპაზონში ვიღებთ დაღმავალ მრუდს, სწორედ ამ ინტერვალშია მასის კლება ყველაზე მაღალი, რაზეც მასის კლების წარმოებულის (dTG) მრუდიც მეტყველებს, რისი მიხედვითაც 302,5°C-ზე, მასის კლების სიჩქარის ნიშნულმა მიაღწია უმაღლეს მაჩვენებელს. აღნიშნული კომპოზიტის მასის დანაკარგმა 500°C-ზე 66% შეადგინა, რაც როგორც უკვე აღვნიშნეთ ბიოორგანული პოლიმერების დაბალი მედეგობით აიხსნება მაღალი ტემპერატურის მიმართ.

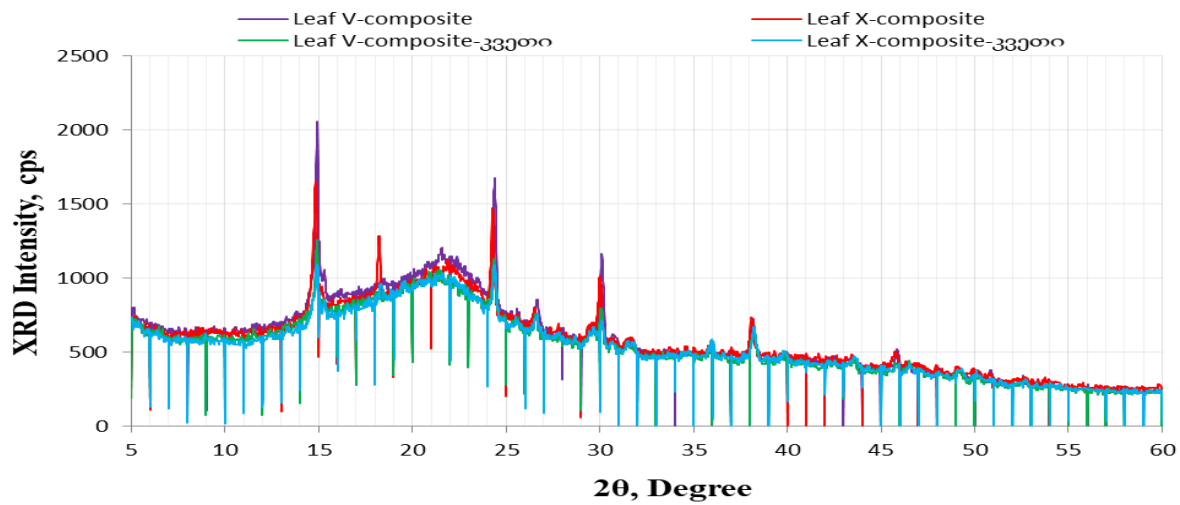
საბოლოოდ შეიძლება ითქვას, რომ ჩვენს მიერ მიღებული V, IX, X და სხვა დანარჩენი კომპოზიტების ძირითადი შემადგენლობა ბიოპოლიმერული

შემავსებლებისგან შედგება, საშუალოდ 80–90%-ის ფარგლებში. სწორედ ამ მიზეზით მათი თერმოგრაფიმეტრული (TG) მრუდები ერთმანეთის მსგავსია, მცირედი განსხვავებები შეინიშნება მხოლოდ c-DTA მრუდების ფართობებში, რაც მიუთითებს ენთალპიური ცვლადების სხვაობაზე. კერძოდ, კომპოზიტებში, სადაც ბიოპოლიმერული შემავსებლის შემცველობა მაღალია, თერმოჟანგვითი ეგზოთერმული ეფექტის დროს გამოყოფილი სითბური ენერგიაც მეტია. აღნიშნული კანონზომიერება ლოგიკურია, რადგან ბიოპოლიმერები, თერმოდესტრუქციისას გამოყოფენ მეტ სითბოს, შემკვრელთან შედარებით, რაც მჭიდროდ უკავშირდება რეაქციის ნეგატიურ ენთალპიურ ცვლილებას ($\Delta H < 0$).

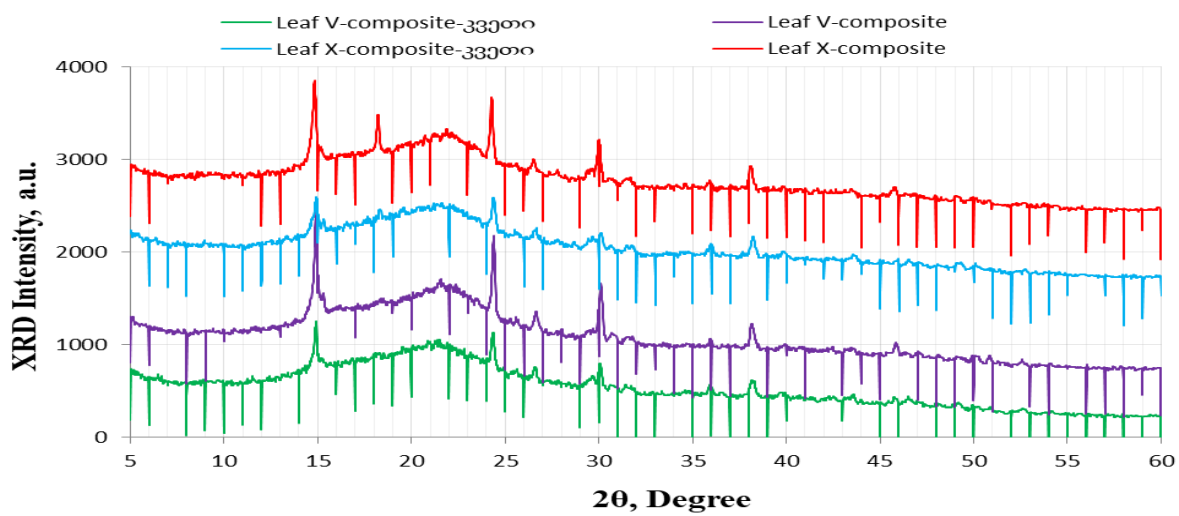
2.19 რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი

2.19.1 ფოთლის ფქვილის კომპოზიტების რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი

Leaf-V-Composite და Leaf-X-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამებზე (გრაფიკი 47.) ფიქსირდება ცელულოზის მხოლოდ ერთი ძალიან განიერი დიფრაქციული მაქსიმუმი $2\theta \approx 22^\circ$ -ზე (სავარაუდოდ ცელულოზის კრისტალური სტრუქტურა ძალიან დეფორმირებულია). დიფრაქტოგრამებზე მკაფიოდ ფიქსირდება დიფრაქციული მაქსიმუმები, რომლებიც სავარაუდოდ შეესაბამება ვეველიტის (კალციუმის ოქსალატის მონოჰიდრატი - $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Whewellite (Tazzoli and Domeneghetti 1980) კრისტალურ სტრუქტურას. Leaf-X-Composite ნიმუშის ზედაპირის დიფრაქტოგრამაზე ფიქსირდება ($2\theta = 18.2^\circ$) γ -ალუმინის ჰიდროქსიდის დიფრაქციული მაქსიმუმიც - Gibbsite (Saalfeld and Wedde 1974)], მაშინ როცა კვეთში და ასევე Leaf-V-Composite ნიმუშში ეს მაქსიმუმი ძალიან სუსტია. ამ ნიმუშებში უპირატესი ორიენტაცია (ტექსტურა) არ შეიმჩნევა.



გრაფიკი 47ა. Leaf-V-Composite და Leaf-X-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამები



გრაფიკი 47ბ. Leaf-V-Composite და Leaf-X-Composite ნიმუშების დიფრაქტოგრამები

დასკვნა

ჭადრის ფოთლის ფქვილის ბაზაზე მიღებულ კომპოზიტებში სტიროლისა და ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის მონომერების თანაპოლიმერიზაციამ ხელი შეუწყო კომპოზიციის ერთგვაროვანი სტრუქტურის ფორმირებას და მექანიკური თვისებების გაუმჯობესებას. სტატისტიკური ტიპის თანაპოლიმერმა - LL2 მნიშვნელოვნად გააძლიერა შემკვრელის და შემავსებლის ურთიერთქმედება.

150–190°C ტემპერატურის ფარგლებში ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ტემპერატურის ზედა ზღვართან (180–190°C) კომპოზიტის მექანიკური თვისებები მნიშვნელოვნად უარესდება, რაც ვლინდება ფერის ცვლილებაში, ბზარების განვითარებაში და მორფოლოგიურ ასპექტებში. 200-220°C-ზე სტრუქტურული მთლიანობა ირღვევა, რაც მასალის მექანიკურ თვისებებს და გამოყენებას ზღუდავს.

ჭადრის ფოთლის ფქვილის ბაზაზე მიღებული კომპოზიტები ხასიათდებიან დაბალი წყალშთანთქმით, განსაკუთრებით მორეაგირე მონომერების მაღალი კონცენტრაციის პირობებში. გამორჩეულია XXVIII და XVII 24-საათიანი წყალთანთქმის მაჩვენებელი, რამაც 0,3–0,5% შეადგინა.

მცირე ზომის ფანტელების გამო, ფოთლის ფქვილი ქმნის მყარ და ძლიერ სტრუქტურას, ამავე დროს ამცირებს მოქნილობას. ფოთლის ღეროს უფრო მსხვილი ნაწილაკები კომპოზიციაში მოქმედებენ, როგორც დელოკალიზაციის ცენტრები და ხელს უშლიან ბზარების გავრცელებას, რისი ერთობლიობაც საბოლოო ჯამში ზრდის მექანიკურ მდგრადობას.

ანტიპირენის არსებობა კომპოზიციაში, განსაკუთრებით მაღალი კონცენტრაციების დროს (10%), იწვევს წყალშთანთქმის მაჩვენებლის ზრდას (მაგ. 3,81%-დან 6,87%-მდე), რაც მასალის სიმკვრივის შემცირებითაა გამოწვეული.

ვიკას გარბილების ტემპერატურით დადგინდა, რომ კომპოზიტები 150°C-მდე ინარჩუნებენ სტრუქტურულ მთლიანობას.

თერმოგრავიმეტრიულმა ანალიზმა აჩვენა, რომ ძირითადი თერმოჟანგვითი დესტრუქცია მიმდინარეობს 275–350°C-ის ფარგლებში. მასის დანაკარგი 250°C-მდე არ

აქარბებს 5–7%-ს, რაც მიუთითებს შემავსებლის თერმულ მდგრადობაზე, ყველა კომპოზიტის თერმული ქცევა მსგავსი იყო, 350°C -დან იწყება თერმოჟანგვითი დესტრუქცია, 500°C-ზე მხოლოდ ნახშირბადი და არაორგანული ელემენტებია დარჩენილი.

ოპტიკური და სკანირებადი ელექტრონული მიკროსკოპიული კვლევებით დადასტურდა კომპოზიციის ზედაპირის ერთგვაროვნება და ელემენტთა თანაბარი განაწილება.

X-სხივურმა დიფრაქციულმა ანალიზმა აჩვენა, რომ ნიმუშებში ცელულოზის კრისტალური სტრუქტურა ძლიერ დეფორმირებულია. გამოვლინდა ცელულოზის კრისტალური სტრუქტურის დეფორმაცია და ბიოგენური მინერალების (ბუნებრივად არსებული - კალციუმის ოქსალატის მონოჰიდრატის და ხელოვნურად შეტანილი - გიბსიტი) არსებობა, შედეგებმა მიუხედავად იმისა, რომ ხის ბოჭკოები ბუნებრივად ანიზოტროპული სტრუქტურით ხასიათდებიან, კომპოზიტში მათი შემთხვევითი განაწილების გამო XRD ანალიზით უპირატესი ორიენტაცია არ შეინიშნება, შესაბამისად, მიღებული მასალა მიკროსტრუქტურულ დონეზე იზოტროპულია.

თავი III

ექსპერიმენტული ნაწილი

3.1 გამოყენებული ნივთიერებები

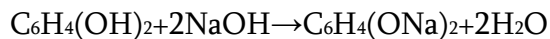
ყველა ნივთიერება: ჰექსანი, ტოლუოლი, ტეტრაჰიდროფურანი, ტრიეთოქსი ჰიდროსილანი, დიკუმილის ზეჟანგი, ბენზოილის ზეჟანგი, ვინილტრიეთოქსისილანი, ნატრიუმის ტუტე, ალუმინის ქლორიდი, კარსტედტის კატალიზატორი, ტრიქლორსილანი და დივინილბენზოლი შეძენილი იყო Sigma-Aldrich-დან, ხოლო სტიროლი და ტრიეთილამინი დისტილირებული.

3.2 სტიროლის ინჰიბიტორისგან გასუფთავება

საჭირო ინვენტარი: 500 მლ ერლენმეიერის კოლბა, გამყოფი ძაბრი, ინდიკატორის ქაღალდი.

ცნობილია, რომ სტიროლი არასტაბილური ნაერთია და მარტივად განიცდის პოლიმერიზაციას, ამის გამო საჭიროებს ინჰიბიტორის დამატებას. სტიროლის შესანახად ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული ინჰიბიტორი ჰიდროქინონია.

სტიროლიდან ჰიდროქინონის მოცილებისთვის, დავამზადე NaOH-ის 10%-იანი ხსნარი 500 მლ ოდენობით. სტიროლის გარეცხვისთვის გამოვიყენე გამყოფი ძაბრი, 100 მლ სტიროლი გადავიტანე გამყოფ ძაბრში და დავუმატე 25 მლ NaOH 10%-იანი ხსნარი, შერევის შემდეგად ორი ფაზა წარმოიქმნა, ზედა - ორგანული, სტიროლის მოყვითალო გამჭირვალე და ქვედა - დინატრიუმის დიჰიდროქინონატის მუქი ფერის ფენა.



რის შემდეგაც, ტუტით გავრეცხე 5-6 ჯერ, მანამ სანამ ხსნარიდან არ გაქრა მუქი ფერის ფენა. ამის შემდგომ რეცხვა გავაგრძელე გამოხდილი წყლით, დროდადრო ინდიკატორის ქაღალდის საშუალებით ვამოწმებდი ჩამოდინებული წყლის pH-ს. რეცხვა გავაგრძელე ნეიტრალური არის მიღებამდე. ნეიტრალური არის მიღების შემდეგ სითხე გადავიტანეთ ერლენმეიერის კოლბაში და დავამატე გლაუბერის მარილი - წყლის მოსაშორებლად. რამდენიმე საათის შემდეგ გამოვხადე წყლის ვაკუუმზე ობობა გადამყვანის და დუღილის ცენტრის საშუალებით. ორი ფრაქცია

გამოიხადა, პირველი დაახლოებით 48°C -ზე, რომელიც არასასურველი ფრაქციაა, ხოლო სტიროლმა გამოიხდა დაიწყო დაახლოებით 76°C -ზე.

*ხსნარის დიდი რაოდენობიდან გამომდინარე, გაშრობის შემდგომი სითხე გავყავი 4 ნაწილად, თითოეული ნაწილის გამოხდისას დამჭირდა ახალი დუდილის ცენტრის გამოყენება.

3.3 სილილირებული სტიროლის მონომერის სინთეზი

3.3.1 სტიროლის და ვინილტრიეთოქსი სილანის ურთიერთქმედება (I გზა)

საჭირო ინვენტარი: კოლბაგამახურებელი, სამყელა კოლბა, მექანიკური სარეველა, საწვეთი ძაბრი, უკუმაცივარი, ყინულიანი აბაზანა.

სამყელა კოლბა, რომელსაც მორგებული ჰქონდა სარეველა, საწვეთი ძაბრი და უკუმაცივარი, მოვათავსე 14,5 მლ სტიროლი და 0,507 გ ალუმინის ქლორიდი. მუდმივი მორევის პირობებში, საწვეთი ძაბრიდან ვამატებდი 26,434 მლ ვინილტრიეთოქსი სილანს. სრულად დამატების შემდეგ, მუდმივი მორევის პირობებში ნარევი გავაცხელე 3 საათის განმავლობაში. 3 საათის შემდეგ დავამატე 1.318 მლ ტრიეთილამინი (სხვა შემთხვევაში პირიდინიც გამოვიყენეთ) - AlCl_3 დეაქტივაციისთვის (წარმოიქმნება კომპლექსი $\text{AlCl}_3 + \text{Et}_3\text{N} \rightarrow [\text{AlCl}_3 \cdot \text{Et}_3\text{N}]$, ამისგამო რეაქცია ჩერდება და აღარ მიდის გვერდითი პროცესები) და მორევის პირობებში გავაციე ყინულის აბაზანაზე. გაციებისას კოლბის კედლებზე გამოიყო ნალექი (ალუმინის ქლორიდის და ტრიეთილამინის კომპლექსი), დარჩენილი ხსნარი დეკანტაციით გადავიტანე სხვა კოლბაში, დარჩენილ ნალექს გამოვავლე გამხსნელი - აბსოლუტური ტოლუოლი და შემდეგ ისიც გადავიტანე გამოსახდელად. წყლის ვაკუუმზე გამოსახდელად საჭიროა ობობას ფორმის გადამყვანი. გამოხდისას პირველი ფრაქციის გამოხდა დაიწყო $28-29^{\circ}\text{C}$ -ზე, მეორე ფრაქციის - $84-105^{\circ}\text{C}$ -მდე, მესამე ფრაქცია $>105^{\circ}\text{C}$.

*გაფრთხილება: 1) ალუმინის ქლორიდის ერთიანად დამატება არ შეიძლება, ვინაიდან რეაქცია ძლიერ ეგზოთერმულია, ამის შედეგად ტემპერატურა ზემოთ იწევს და ხდება სტიროლის სწრაფი პოლიმერიზაცია, რის შედეგადაც წარმოიქმნება შავი ფისი.

2) სტიროლზე ალუმინის ქლორიდის დამატებით წარმოიქმნება მყარი ნალექი მასა, რისი მორევაც მაგნიტური სარეველათი შეუძლებელია, ამიტომ აუცილებელია მექანიკური მომრევის გამოყენება. ნიმუში გადავითანე დეკანტაციით, გავფილტრე ბიუხნერის ძაბრში ჩაფენილი ფილტრის ქაღალდით.

3.3.2 დივინილბენზოლის ჰიდროსილილირების რეაქცია ტრიეთოქსისილანთან

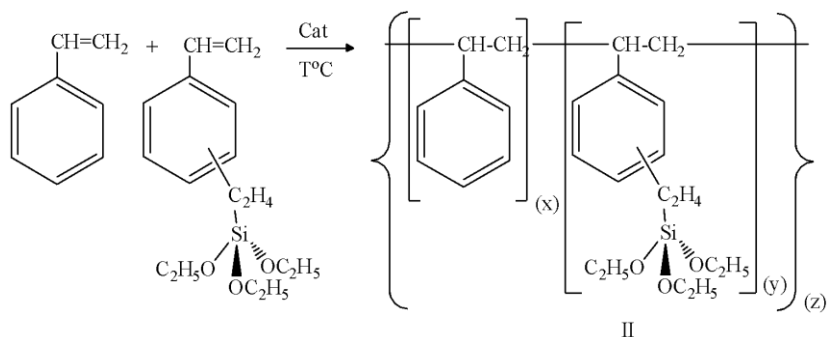
რეაქცია ჩატარდა სამყელა კოლბაში, რომელსაც მორგებული ჰქონდა სარეველა და საწვეთი ძაბრი, მოვათავსეთ 50 გრამი (0,48 მოლი) ორთო და პარა დივინილბენზოლის ნარევი. საწვეთი ძაბრის საშუალებით, წვეთწვეთობით დავამატეთ 91,3 გრამი (0,48 მოლი) ტრიეთოქსისილანი და 2-3 წვეთი კარსტედტის კატალიზატორი, მუდმივი მორევის პირობებში. ნარევი გავახურეთ კოლბაგამახურებელზე 3 საათის განმავლობაში, დაახლოებით 50-60°C პირობებში. რეაქციის მიმდინარეობა შევაჩერეთ მას შემდეგ, რაც FTIR სპექტზე გაქრა Si-H ბმის დამახასიათებელი შთანთქმის ზოლი. ამის შემდგომ დავამატეთ გააქტივებული ნახშირი 2-3 გრამის ოდენობით, გავფილტრეთ და გამოვხადეთ წყლის ვაკუუმზე დაახლოებით 65-70°C-ზე. გაფილტვრის შედეგად მივიღეთ 90 გრამი გამჭირვალე ფერის სითხე, რომლის გამოხდის შემდეგ დაგვრჩა 45 გრამის ოდენობით (50%) ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი.

3.4 სტიროლის და სილილირებული სტიროლის თანაპოლიმერიზაცია

3.4 თანაპოლიმერის - LL2 სინთეზი

ჩატარებულია ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის სტიროლთან თანაპოლიმერიზაციის რეაქცია მორეაგირე კომპონენტების 1:9 მასური თანაფარდობით, ინიციატორის დიკუმოლის ზეჟანგის 1 მას% თანაობისას, 100-120°C ტემპერატურულ ინტერვალში, გამხსნელის გარეშე. დადგენილია, რომ თანაპოლიმერიზაციის რეაქცია მიმდინარეობს ძალიან სწრაფად და მიიღება სტატისტიკური ტიპის თანაპოლიმერი, რომელიც გამჭვირვალე ელასტიკური პოლიმერია $\eta_{\text{sp}}=0.187$ სიბლანტით, რომელიც ხსნადია ჩვეულებრივ ორგანულ გამხსნელებში: ბენზოლი, ტოლუოლი, ქლოროფორმი და სხვა.

ავიღე 2,7 გრამი სტიროლი და 0,3 გრამი სილილირებული სტიროლი, კატალიზატორად დიკუმილის ზეჟანგი 1% (0,03 გრამი) 100°C-ზე, მაგნიტური სარეველით მუდმივი მორევის პირობებში. სიბლანტეს ვსაზღვრავდით ერთ საათიანი ინტერვალით, გამხსნელად გამოყენებული გვქონდა აბსოლუტური ტოლუოლი. სამ საათში ხვედრიტმა სიბლანტემ $\eta_{sp}=0,116$ შეადგინა, ამის შემდეგ ტემპერატურა 120°C-მდე გავზარდე, 1 საათში ხვედრიტმა სიბლანტემ $\eta_{sp}= 0,187$ შეადგინა. რეაქცია მიმდინარეობს შემდეგი სურათი 49 მიხედვით:



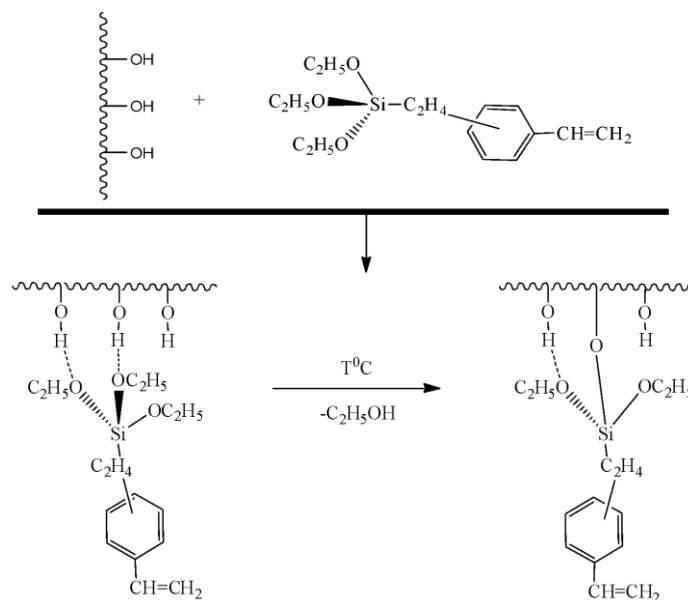
სურათი 49. ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის სტიროლთან თანაპოლიმერიზაციის რეაქცია

კომპოზიციური მასალები

3.5 მასალების მიღება - შემავსებლის და შემკვრელის ურთიერთქმედება

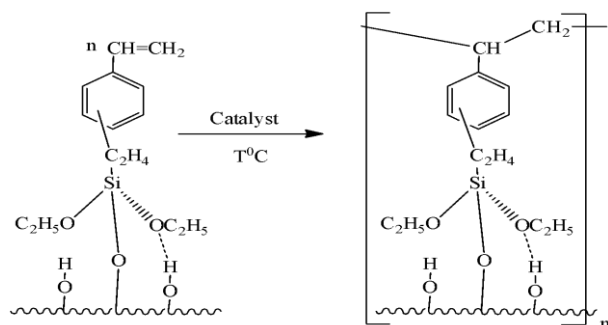
შესწავლილია ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ჰომოპოლიმერიზაციის რეაქციები დიკუმილის ზეჟანგის და აზობისებომჟავას დინიტრილის თანაობისას, როგორც გამხსნელში ასევე გამხსნელის გარეშე, ინიციატორის 0.1-1.0 მას% რაოდენობისას სხვადასხვა ტემპერატურულ ინტერვალში. დადგენილია, რომ ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ჰომოპოლიმერიზაცია აღნიშნული ინიციატორების დროს არ წარიმართება. ლიტერატურიდან ცნობილია (Guy, Pevero and Vidal 2012) (Swanson, POLYBUTADIENE GRAFT COPOLYMERS AS COUPLING AGENTS IN RUBBER 2016), რომ მხოლოდ ბენზოილის ზეჟანგის თანაობისას მიმდინარეობს ნაწილობრივ ჰომოპოლიმერიზაცია პოლიმერის 12%-იანი გამოსავლით.

ვინაიდან ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლი პოლიმერიზაციას განიცდის მხოლოდ ბენზოილის ზეჟანგის თანაობისას, ამიტომ ფიჭვის ხის კომპოზიტები მივიღეთ ბენზოილის ზეჟანგის 1 მას% რაოდენობისას. მიღებულ სილილირებულ სტიროლს ვუმატებდით ბენზოილის ზეჟანგს, რომელიც ცხლად დაწნების დროს გამოიწვევდა სტიროლის ვინილური ჯგუფის პოლიმერიზაციის ინიცირებას *in-situ* მდგომარეობაში. საცდელი რაოდენობა სილილირებული სტიროლით ვჟღინთავდით ფიჭვის ხის ნახერხს, რაზეც ვფიქრობდით, რომ ცხლად დაწნების მომენტში, ქიმიურ ბმას წარმოქმნიდა ცელულოზის-ჰემიცელულოზის-ლიგნინის ჰიდროქსილი ჯგუფთან, რა დროსაც წარიმართებოდა შემდეგი რეაქციები, კერძოდ მოსალოდნელია შემკვრელისა და შემავსებლის აქტიურ ჯგუფებს შორის მოხდეს ეთერიფიკაციის რეაქციები, რის შედეგადაც წარმოიქმნას პოტენციურად სამი ახალი კოვალენტური ბმა, ეთილის სპირტის გამოყოფით ან მოხდეს ნაწილობრივი ეთერიფიკაციის რეაქციები და დამატებით შემავსებლის ჰიდროქსილის ჯგუფებთან წარმოიქმნას წყალბადური ბმები, როგორც ეს მე-20 სურათზეა გამოსახული:



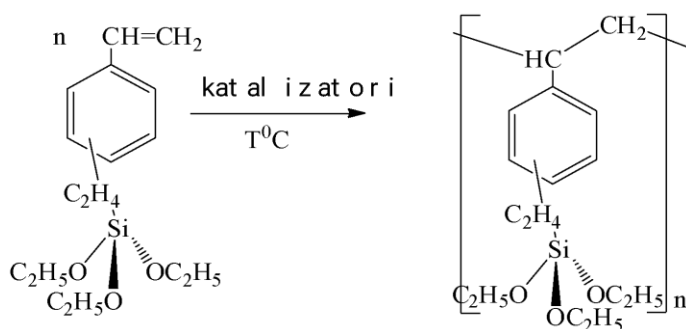
სურათი 50. ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის და ცელულოზის მოლეკულათშორის ურთიერთქმედებისა და ეთერიფიკაციის რეაქციები

აღნიშნული სქემის მიხედვით ვფიქრობთ, რომ მიმდინარეობს შემავსებლის გაკერვისა და არმირების პროცესები. არ არის გამორიცხული, რომ ამ შემთხვევაში შემავსებლის მატრიცასთან დაკავშირებულმა შემკვრელმა ვინილის ჯგუფის ხარჯზე განიცადოს პოლიმერიზაცია სურათი 51-ის მიხედვით:



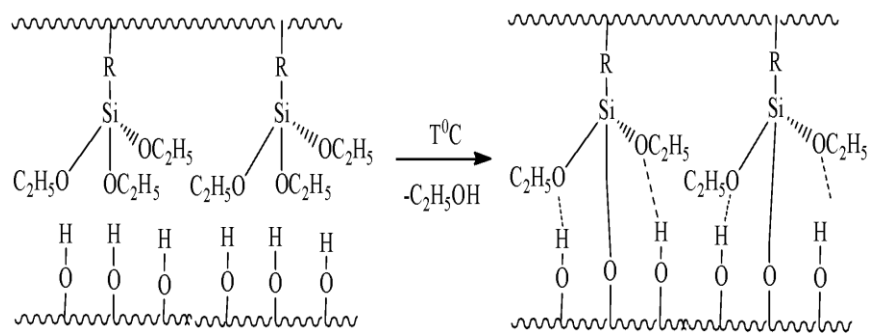
სურათი 51. შემავსებელთან დაკავშირებული ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის in situ პოლიმერიზაცია

გარდა ამისა ვფიქრობთ, რომ ცელულოზის ზედაპირთან ურთიერთქმედებს ასევე პოლიმერი, რომელიც წარმოიქმნება ადგილზე - in situ პოლიმერიზაციის დროს სურათი 52-ის მსგავსად:



სურათი 52. ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის მატრიცაში in situ პოლიმერიზაცია აღნიშნული პოლიმერული ჯაჭვიც ანალოგიურად მონომერული ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლის მსგავსად შემავსებელში არსებულ ბიოპოლიმერების ჰიდროქსილის ჯგუფებთან შედიან რეაქციაში, რა დროსაც წარმოქმნიან, როგორც დონორულ-აქცეპტორულ ბმას, ასევე შედიან ეთერიფიკაციის

რეაქციაში, რაც განაპირობებს შემავსებლის და გამკვრავ აგენტს შორის ქიმიური - კოვალენტური ბმის წარმოქმნას. რეაქციები მიმდინარეობს შემდეგი სურათი 53-ის მიხედვით:



სურათი 53. ტრიეთოქსისილილირებული პოლისტიროლის ეთერიფიკაციის და მოლეკულათშორისი ურთიერთქმედების რეაქციები შემავსებელთან

როგორც უკვე აღვნიშნეთ ბენზოილის ზეჟანგის გამოყენება ცხლად დაწნების დროს აინიცირებს ვინილური ჯგუფის პოლიმერიზაციას, რაც გარკვეულწილად კომპოზიციას მექანიკურ სიმტკიცეს მატებს, შესაბამისად მარმირებელი აგენტის როლს ასრულებს.

3.6 კომპოზიტების მიღების მანიპულაციები

კომპოზიტები მიიღებოდა მანიპულაციების შემდეგი თანმიმდევრობით: 1. კომპონენტების აწონვა ანალიზური სასწორით; 2. კომპონენტების მშრალი შერევა; 3. ნარევის ჩატვირთვა სტანდარტულ წნეხფორმებში; 4. ნარევის გაცხელება წნეხფორმებში საცდელ ტემპერატურაზე განსაზღვრული დროის განმავლობაში; 5. ნიმუშების ამოღება წნეხფორმებიდან.

აღნიშნული კვლევები ჩავატარეთ სხვადასხვა კონცენტრაციებზე, წნეკასა და ტემპერატურის ფართო ზღვრებში. მორეაგირე ნივთიერებათა თანაფარდობები შეირჩა ისეთი სიფრთხილით, რომლითაც ახლოს ვიქნებოდით დღეისათვის ბაზარზე არსებული კომპოზიციური მასალებისთვის წაყენებულ მოთხოვნებთან.

ნიმუშებს ვამზადებდით ცხლად დაწნების მეთოდით, სადაც ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანი აიღებოდა კომპოზიტის საერთო მასის 3, 5, 10,

15. 20% და 25% რაოდენობით. კომპოზიტების მშრალად შერევისას ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანს ვურევდით ბენზოილის პეროქსიდს ერთგვაროვანი მასის მიღებამდე და შემდგომ ვუმატებდით ფიჭვის ხის ნახერხს და ვურევდით ელექტრო შემრევით 30 წამის განმავლობაში, ერთგვაროვანი მასის მიღებამდე. მიღებულ კომპოზიციურ ნარევს ვათავსებდით სპეციალურ წნეხფორმებში, ჯერ ცივად ვწნეხავდით, რათა მასის გადანაწილება მაქსიმალურად ერთგვაროვანი ყოფილიყო და შემდგომ ვწნეხავდით ცხლად 5, 10 და 15 მპა წნევის ქვეშ, 140°C-დან 220°C ტემპერატურებზე. ტემპერატურის თანმიმდევრული 10°C -იანი მატებით.

3.7 ნიმუშების ფორმირებისას გამოყენებული წნეხფორმების გეომეტრია და ტემპერატურის გაზომვა

კომპოზიციური მასალების კვლევისთვის გამოვიყენეთ ზეთზე მომუშავე 10 ტონიანი სიმძლავრის ჰიდრავლიკური სამრეწველო წნეხი. კვლევებში წარმოდგენილი წნეხფორმები დამზადებულია ფოლადი 45-დან, ცნობილი როგორც AISI 1045 steel, რომელიც წარმოადგენს მაღალი სიმტკიცის ფოლადს, აღნიშნული მასალა ადვილად ხელმისაწვდომია და გამოირჩევა კარგი მექანიკური თვისებებით, ცვეთამდეგობით, თერმოგამტარობით და თერმოსტაბილურობით (Carbon Steel Grade 1045 Fact Sheet n.d.). ნიმუშების წყალშნატქმისთვის გამოვიყენეთ ცილინდრული ფორმის წნეხფორმა - ფიქსირებული 1,5 სმ დიამეტრით, ხოლო მექანიკური მახასიათებლების განსაზღვრისთვის - მართკუთხა პარალელეპიპედის ფორმის წნეხფორმა, ნიმუშის სიგრძით 12 სმ, ხოლო სიგანით 1,5 სმ.

ტემპერატურის გასაზომად ვიყენებდით ე.წ „XK“ - ქრომელ-კოპელის ტიპის თერმოწყვილს, რომელიც ინგლისურ ენაზე არსებულ ლიტერატურაში ცნობილია, როგორც Type K Thermocouple, აღნიშნულ თერმოწყვილს აქვს უნარი იმუშაოს -200°C-დან +1200°C-მდე მაღალი სიზუსტით, ცდომილება დაახლოებით $\pm 3^{\circ}\text{C}$ არის. (SIREN, et al. 2001)

3.8 მექანიკური გამოკვლევები - მეთოდика

3.8.1 სიმტკიცის განსაზღვრა სტატისტიკური ღუნვის დროს

ცდა ჩავატარეთ ხელსაწყოთი, რომელსაც აქვს მოწყობილობა ისრის გადაღუნვის განსაზღვრავად, რომელიც საშუალებას იძლევა დამაბულობის გამოთვლის 1% სიზუსტით. ფიზიკურ-მექანიკური მაჩვენებლების შესწავლისთვის ვამზადებდით სტანდარტულად 20 გრამიან ნიმუშებს, იგივე თანმიმდევრობით, როგორც წყალშანთქმის შემთხვევაში იყო, აქაც შემკვრელის რაოდენობა 3%, 5%, 10%, 15%, 20% და 25% იყო, ხოლო ბენზოილის ზეჟანგი 0,1-1% შეადგენდა. დაწნეხილი ნიმუშის თავისთავადი გაციების შემდეგ, ვზომავდით ნიმუშის სიმაღლეს და ვითვლიდით განივკვეთის ფართობს. ამის შემდეგ ნიმუშს ვუტარებდი გამოცდას ღუნვაზე, კათედრაზე არსებული აპარატის Force Gauge Model M3-20 Mark-10, Series 3-ის საშუალებით.

მექანიკური გამოკვლევები ჩატარებულია სხვადასხვა ტემპერატურაზე და შემკვრელის სხვადასხვა კონცენტრაციაზე მიღებულ ნიმუშებზე. სიმტკიცე ღუნვაზე ჩატარებულია მერქნის კომპოზიციური მასალებისათვის ცნობილი სტანდარტით EN 319.

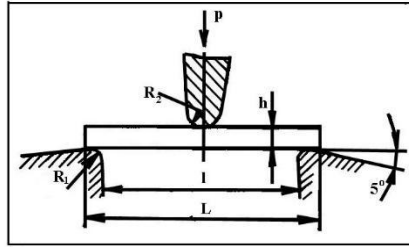
სიმტკიცის ტესტირება ღუნვაზე ჩატარდა პარალელეპიპედებზე, რომელთა სიგრძეა 10 სმ, ხოლო განივი კვეთის ფართი 1სმ x 2სმ. თითოეული ნიმუში მოთავსდა ორ პრიზმაზე, პრიზმებს შორის 9 სმ დაშორებით. ტესტირება ჩატარდა ლითონის ცილინდრულ (დიამეტრი 10 მმ) ზედაპირიანი ინდენტორით (რომელიც ნიმუშს აწვებოდა ზემოდან) ნიმუშის შუა უბანში. სიმტკიცე ღუნვაზე განისაზღვრება ფორმულით:

$$R_{\text{ღ}} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

სადაც, $R_{\text{ღ}}$ - სიმტკიცე ღუნვაზე (კგ/სმ²) ან MPa, F -

ნიმუშზე მოქმედი ძალაა გატეხვის მომენტში (კგძ), L - ნიმუშის სიგრძე საყრდენ

წერტილებს შორის (სმ), b - ნიმუშის სიგანე (სმ), h - ნიმუშის სიმაღლე (სმ).



სურათი 54. ნიმუშის მდებარეობა სტატიკური გაღუნვის გამოცდის დროს ხელსაწყო კონსტრუქციაში გათვალისწინებულია ხელსაწყო მოძრავი თავის მოძრაობის სიჩქარის ცვლილების შესაძლებლობა და მანძილი საყრდენებს შორის. დაშლის დაძაბულობა სტატისტიკური გაღუნვის დროს ისაზღვრება სტანდარტულ ნიმუშებზე, დამზადებული საკვლევი მატერიალისაგან და იზომება კგ/სმ².

3.8.2 დარტყმითი ძალის გასაზღვრა

დარტყმითი სიბლანტე ეწოდება დარტყმის მუშაობას, რომელიც საჭიროა ნიმუშების ერთეულოვანი განივკვეთის ფართობის დასაშლელად. დარტყმითი სიბლანტე ისაზღვრება საცდელი მასალისგან დამზადებულ სტანდარტულ ნიმუშებზე და იზომება კგ*სმ/სმ² ან SI- სისტემაში კჯ/მ².

დარტყმითი ძალის გასაზომად იყენებენ ძირითადად ორ მეთოდს, ესენია ჩარპის (Charpy) და იზოდის (Izod) მეთოდი (Sobieraj and Rimnac 2012). დარტყმითი ძალის განსაზღვრა ორივე მეთოდით ხდება, თუმცა გარკვეული შეზღუდვებით (Saba, Jawaid and Sultan 2019). ჩვენს შემთხვევაში დარტყმამდეგობის კვლევები ჩავატარეთ ჩარპის მეთოდით. კონკრეტული კვლევის ჩატარებისთვის ვამზადებდით 10x15x120 მმ ზომის კომპოზიტებს, ცდას ვატარებდით მინიმუმ 2 ნიმუშზე და ვითვლიდით ფორმულით:

$$D = \frac{mg(h_1 - h_2)}{S}$$

სადაც D არის დარტყმითი ძალა (ზოგჯერ საშუალო ძალადაც ითვლება), m - პენდულუმის მასა, g - მიზიდულობა, h₁ - საწყისი სიმაღლე დარტყმამდე, h₂ - სიმაღლე დარტყმის შემდეგ, S ნიმუშის დეფორმაციის მანძილი.

3.8.3 წყალშთანთქმა

კომპოზიციური მასალებისთვის წყალშთანთქმის შესასწავლად ვამზადებდით 4 გრამიან ნიმუშებს და ვსწავლობდით მათ ქცევას გამოხდილწყლიან გარემოში. მიღებულ უკვე მზა კომპოზიტებს ვათავსებდით წყალში, აღნიშნული ცდით ვსწავლობდით ნიმუშის წყალშთანთქმას, ანათვალს ვიღებდით 3 საათისა და 24 საათის შემდეგ, EN 317-1993 სტანდარტის შესაბამისად.

წყალშთანთქმა ისაზღვრება ნიმუშის მასის მატებით, როდესაც იგი ჩაშვებულია გამოხდილ წყალში 24 საათის განმავლობაში. მასის სხვაობა გამოისახება მილიგრამებში ან პროცენტებში. **წყალშთანთქმა x** (პროცენტებში) გამოითვლება ფორმულით:

$$\text{წყალშთანთქმა(\%)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

სადაც:

m_1 არის ნიმუშის საწყისი მასა,

m_2 არის ნიმუშის საბოლოო მასა, წყალში 24 საათიანი გაჯერების შემდეგ,

100 არის პროცენტში გადასაყვანი კოეფიციენტი,

3.8.4 სიმკვრივე

კომპოზიციური მასალების ხარისხისა და ერთგვაროვნების შესაფასებლად მნიშვნელოვანი მახასიათებელია სიმკვრივე, რომელთანაც დაკავშირებულია მასალების ბევრი სხვა ძირითადი თვისებაც. ნაკეთობების სიმკვრივის გაზრდასთან ერთად, პროპორციულად იზრდება სიმტკიცეც, გარკვეული შეზღუდვებით. მასალების სიმკვრივის ხარისხი ხასიათდება წყალშთანთქმით, მოჩვენებითი სიმკვრივით, ღია და მოჩვენებითი ფორიანობით. მოჩვენებითი სიმკვრივე არის მშრალი ნიმუშის მასის ფარდობა ნიმუშის მთლიან მოცულობასთან, მისი ყველა ფორის მოცულობის ჩათვლით, რაც ისაზღვრება გ/სმ³.

3.8.5 სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით

სიხისტე არის მასალის უნარი, წინააღმდეგობა გაუწიოს მასში უფრო მტკიცე მასალის შეღწევას. სიხისტის განსაზღვრისას ინდენტორის ფორმა და ზომა განსხვავდება სხვადასხვა მეთოდებში, თუმცა ყველა შემთხვევაში გამოყენებული პრინციპი ერთნაირია: ინდენტორი მოქმედებს მასალის ზედაპირზე ცნობილი ძალით, რის შედეგადაც მასალის ზედაპირზე ჩაზნექვის კვალი წარმოიქმნება. სწორედ წარმოქმნილი კვალის ზომაზეა დამოკიდებული მასალის სიხისტის განსაზღვრა. სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით ტარდება ASTM E10 სტანდარტის შესაბამისად (Moore and Booth 2015).

ჩვენს შემთხვევაში სიხისტის დასადგენად გამოყენებული იყო ბრინელის მეთოდი, რომელშიც ინდენტორად გამოიყენება 5მმ დიამეტრის ფოლადის ბურთულა. ინდენტორს ვუთავსებთ 250კგ ძალას და ვზემოქმედებთ მასალის ზედაპირზე, ჩაჭყლეთის (კვალის) დიამეტრი - d იზომება მიკროსკოპით მილიმეტრებში.

ბრინელის სიხისტე გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

სადაც P - ინდენტოროზე მოდებული ძალაა - კგმ, D - ინდენტორის დიამეტრი - მმ, d - მასალაზე დატოვილი კვალი - მმ.

ბრინელის რიცხვიდან და ღუნვის მიმართ სიმტკიცეიდან შეგვიძლია გავიგოთ K ემპირული კოეფიციენტი, რომელიც არ არის კლასიკური ფიზიკური სიდიდე. აღნიშნული კოეფიციენტი აქტიურად გამოიყენება ინჟინერიასა და მასალათმცოდნეობაში, ამ ორი სიდიდის ფარდობით ვიგებთ მასალის შიდა სტრუქტურულ სიმტკიცესა და ზედაპირის სიხისტეს შორის კავშირს, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ ფორმულა მართებულია მეტალებისთვის და ნაკლებ მართებულია მერქან-პოლიმერული კომპოზიტებისთვის, რაც გამომდინარეობს იქიდან, რომ მერქან-პოლიმერული კომპოზიციური მასალები იზოტროპულია და ჰეტეროგენული სტრუქტურა აქვს, ამის გამო ზედაპირის სიხისტე და შიდა სტრუქტურული სიმტკიცე

ერთმანეთთან პროპორციული ნაკლებადაა. K კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულით: $k = R_{\phi} / \text{BHN}$.

3.8.6 გაჭიმვაზე სიმტკიცე

გაჭიმვაზე სიმტკიცე (ინგლ. Tensile Strength, ასევე ცნობილი, როგორც აბსოლუტური გაჭიმვითი სიმტკიცე — Ultimate Tensile Strength, UTS) არის მასალის უნარი გაუძლოს გაჭიმვისას (გაწვდენით) დატვირთვას გაწყვეტამდე. ეს არის ერთ-ერთი ძირითადი მექანიკური მახასიათებელი, რომელიც განსაზღვრავს, თუ რა მაქსიმალურ გაჭიმვას შეუძლია გაუძლოს მასალამ გატეხვამდე ან დაზიანებამდე.

გაჭიმვის სიმტკიცე გამოითვლება ფორმულით: $\sigma_{\max} = F / A$ სადაც: σ - არის გაჭიმვა (მპა ან ნ/მმ²), F - ძალა ნიმუშის გაწყვეტის მომენტში (ნიუტონი ან კგძ), A - მასალის განივკვეთის ფართობი (მმ² ან სმ²). (Pal, et al. 2022)

3.9 ნიმუშების ზედაპირის მორფოლოგია

3.9.1 ელექტრონული მიკროსკოპიული კვლევა

ნიმუშების ზედაპირის მორფოლოგია შევისწავლეთ რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპით (რემ), რომელიც წარმოადგენს ელექტრონული მიკროსკოპის ერთერთ სახეობას. გაზომვები ჩატარდა მიკროსკოპზე - TESCAN VEGA 3, LMU, LaB 6-ის კათოდით. მაქსიმალური ამაჩქარებელი ძაბვა 30000V, გარჩევისუნარიანობა 2 ნმ. რემ მიკროსკოპი აღჭურვილი იყო აგრეთვე ელექტრონული სხივით, ნიმუშში აღძრული რენტგენული გამოსხივების ენერგოდისპერსული სპექტრომეტრით (ედს, Oxford Systems). ოპტიკური მიკროსკოპისგან განსხვავებით, რასტრული მიკროსკოპით ნიმუშის შესწავლისას ხდება არამარტო მისი ზედაპირის გადიდებული გამოსახულების ანალიზი, არამედ მისი შედგენილობის შესწავლაც. რისი მეშვეობითაც გაკეთდა ნიმუშის ზედაპირის შედგენილობის ანალიზი. ამ მეთოდის მგრძნობელობა საშუალოდ 0.1 ატ.%-ს შეადგენს.

3.9.2 ოპტიკური მიკროსკოპიული კვლევა

კომპოზიციური მასალების ოპტიკურ მიკროსკოპიული გამოკვლევები გაკეთდა OMAX ტიპის პოლარიზებულ მიკროსკოპზე, რომელსაც მორგებული ჰქონდა

მაღალი გარჩევითობის ციფრული კამერა A35140U3 14 MP. დავაკვირდით საკვლევი კომპოზიტების ზედაპირს ოთხივე მხრიდან.

3.10 კომპოზიტების თერმული ანალიზი

3.10.1 თერმოგრავიმეტრული ანალიზი

კომპოზიტების თერმოგრავიმეტრულ ანალიზს საფუძვლად უდევს საკვლევი ნივთიერების ტემპერატურის დაფიქსირება მისი გახურების ან გაცივებისას, რომელიც თვითჩამწერით ფიქსირდება ტემპერატურული, დიფერენციალური ან წარმოებული მრუდების სახით. ჩვენს მიერ შერჩეულ კომპოზიციურ მასალებზე თერმოგრავიმეტრული ანალიზი განხორციელდა NETZSCH A 2500 STA2500-A0091-N-ზე ატმოსფერული ჰაერის პირობებში, ტემპერატურის მატების დიაპაზონი იყო 10°C/წთ, თერმოინერტულ ნივთიერებად - კორუნდი - $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

3.10.2 გარბილების ტემპერატურა - ვიკას მეთოდი

მიღებული მასალების გარბილების თვისებები შევისწავლეთ ვიკას მეთოდით, რომელიც საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ დეფორმაციის (ჩაღრმავების სიმაღლე - h) ანუ სიმტკიცის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. მეთოდის არსი მდგომარეობს იმ გარბილების ტემპერატურის განსაზღვრაში, რომელზეც ხელსაწყოს ბუნიკი, რომელსაც ცილინდრული ფორმა აქვს, თავისი მრგვალი ბოლოთი, 1 მმ² განივი კვეთით ჩაეშვება ნიმუშში 1 მმ სიღრმეზე მუდმივი დატვირთვის მოქმედებისას 10 ან 50 ნიუტონი დატვირთვის ძალის მოქმედებისას.

3.11 რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი

ნიმუშების ფაზური შედგენლობის დასადგენად ჩატარდა რენტგენოსტრუქტურული ფაზური ანალიზი რენტგენოდიფრაქტომეტრ ДРОН-3М-ის გამოყენებით. ექსპოზიციის რეჟიმი იყო შემდეგი: ნიკელის ფოლგით გაფილტრული $\text{CuK}\alpha$ გამოსხივება ($\lambda=1.54178\text{\AA}$); მილაკი – БСВ-28 სპილენძის ანოდით; ძაბვა – 40კვ; დენი – 20მა; სკანირების სიჩქარე – 2°/წთ; დროის მუდმივა – 1წმ. ექსპოზიციის დროს ნიმუში ბრუნავდა საკუთარ სიბრტყეზე სპეციალური მოწყობილობის – ГП-13-ის საშუალებით. ცელულოზისათვის, ასევე ზოგადად,

დაწნეხილი მასალებისთვის დამახასიათებელია ე.წ. ტექსტურა (მარცვლების, კრისტალების უპირატესი ორიენტაცია რომელიმე კრისტალოგრაფიული მიმართულებით). ამიტომ ნიმუშების ექსპოზიცია განხორციელდა ორი მიმართულებით – დაპრესვის პარალელურად და მართობულად (ზედაპირზე და კვეთზე).

3.12 ქიმიური კომპოზიტების ბიოლოგიური გავლენის შეფასება

3.12.1 ფიჭვის ნახერხის, სტიროლისა და ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ) სილანის ბაზაზე შექმნილი ახალი კომპოზიციური მასალის ცოცხალ სისტემებზე შესაძლო უარყოფითი ზემოქმედების შესწავლა

წარმოდგენილი კვლევების მიზანი იყო ჩვენს მიერ “*in-situ*” პოლიმერიზაციით მიღებული მასალების შესაძლო უარყოფითი გავლენის შესწავლა მოზარდი და ზრდასრული ვირთაგვების ქსოვილებზე.

კვლევის ობიექტად შერჩეული იყო თეთრი ზრდასრული თაგვები (25-30გ). საკვლევ მასალად გამოყენებული იყო: ფიჭვის ხის ნახერხის, სტიროლისა, ტრიეთოქსი(ვინილფენეთილ)სილანის ბაზაზე დამზადებული კომპოზიტი და ზრდასრული თაგვების სხვადასხვა ქსოვილი (სისხლი, ღვიძლი). საკვლევი ქსოვილების ჰისტოარქიტექტონიკის ცვლილებების შეფასება ჩატარდა პარაფინის ანათლებზე მიკროსკოპული დაკვირვების გზით. პროლიფერაციული აქტიურობის შესაფასებლად განისაზღვრა მიტოზური ინდექსი. სისხლში ლეიკოციტების საერთო რაოდენობის დასათვლელად გამოყენებული იყო გორიაევის კამერა. ექსპერიმენტების ხანგრძლივობამ შეადგინა 30 დღე.

დიეტთილეთერით ანესთეზირებული ცხოველების კუდიდან აღებული 20 მკლ სისხლი გადაიტანებოდა 400 მკლ 3%-იან ძმარმჟავას ხსნარში და ყოვნდებოდა 20 წთ-ით ოთახის ტემპერატურაზე. სინჯის გარკვეული მოცულობა თავსდებოდა გორიაევის კამერაში და სინათლის მიკროსკოპის საშუალებით (მცირე გადიდებაზე, ობიექტივი 20, ოკულარი 10) ხდებოდა ლეიკოციტების რაოდენობის დათვლა სტანდარტული პროტოკოლის მიხედვით.

დასკვნა

ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლისა და ფიჭვის მერქნის ბაზაზე მიღებული კომპოზიციური მასალების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ფორმირების ტექნოლოგიურ პირობებზე: ტემპერატურაზე, წნევაზე, შემკვრელის კონცენტრაციაზე და შემავსებლის რაოდენობაზე.

ტემპერატურის გაზრდა 220°C -მდე წყალშთანთქმას ამცირებს რამდენიმე რიგით, რაც დაკავშირებულია სილანიზაციის (ეთერიფიკაციის) რეაქციების გააქტიურებასთან. ტრიეთოქსისილილირებული სტიროლისა და ფიჭვის მერქნის ბაზაზე მიღებული კომპოზიტების დაბალი წყალშთანთქმა მიღებულია 3-5% TESst პირობებში.

ფიჭვის ხის კომპოზიტებზე წნევის გავლენის შესწავლისას გამოჩნდა, რომ 5-10 მპა წნევაზე წყალშთანთქმა დაბალია, თუმცა 15 მპა-ზე გარკვეულ ნიმუშებში შეინიშნება ამოვარდნები, რაც სავარაუდოდ მიკროდეფექტებისა და შიდა სტრუქტურული ცვლილებების შედეგია.

მექანიკური თვისებები (სიმტკიცე ღუნვაზე, დარტყმითი სიძლიერე, სიხისტე) პირდაპირ არის დამოკიდებული ტემპერატურასა და შემკვრელის კონცენტრაციაზე. 220°C ტემპერატურაზე მიღებულ ნიმუშებში ღუნვაზე სიმტკიცე მნიშვნელოვნად მაღალია, ვიდრე 180°C ტემპერატურაზე დამზადებულ ნიმუშებში.

ანტიპირენის მცირე რაოდენობით (0.1-2%) დამატება არ მოქმედებს უარყოფითად კომპოზიტის მექანიკურ თვისებებზე, ხოლო 10%-ზე მეტი კონცენტრაციის პირობებში მექანიკური მახასიათებლები საგრძნობლად უარესდება.

ეთილსილიკატის დამატება მაღალ ტემპერატურაზე ამცირებს წყალშთანთქმის კოეფიციენტს, ეთილსილიკატის აქტიურ ჯგუფებსა და ბიოპოლიმერების ჰიდროქსილის ჯგუფებს შორის შესაძლო რეაქციებით. აღსაღნიშნავია, რომ ეთილსილიკატს თეორიულად აქვს შესაძლებლობა წარმოქმნას ოთხი ქიმიური ბმა, აქტიური ფუნქციური ჯგუფების ხარჯზე.

სკანირებად-ელექტრონულმა მიკროსკოპიამ და ოპტიკურმა მიკროსკოპიამ დაადასტურა მასალის ზედაპირის ჰეტეროგენურობა, მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში გამოვლინდა ბზარებისა და მიკროდეფექტების წარმოქმნის ტენდენცია.

ინფრაწითელმა სპექტროსკოპიამ ცხადყო $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ ბმის არსებობა კომპოზიტში. თერმოგრავიმეტრიულმა ანალიზმა განსაზღვრა მასალის თერმული სტაბილურობის ზღვარი და დესტრუქციის საწყისი და საბოლოო ტემპერატურა.

გაჭიმვის ტესტის შედეგებით დადასტურდა, რომ მასალა ხისტია და ახასიათებს მცირე პლასტიკურობა, რაც შესაბამისობაშია მერქანბოჭკოვანი კომპოზიტების მექანიკურ ქცევასთან.

მიღებული მაჩვენებლები მიანიშნებს, რომ განიხილული კომპოზიციური მასალები პერსპექტიულია გამოყენებისთვის ისეთ აპლიკაციებში, სადაც აუცილებელია დაბალი წყალშთანთქმა, მაღალი მექანიკური სიმტკიცე და სტრუქტურული სტაბილურობა.

დასკვნები

1) მიღებულია ახალი ეკოლოგიურად უსაფრთხო პოლიმერული კომპოზიტები განახლებადი მცენარეული ნედლეულის ბაზაზე, ახალი შემკვრელისა და ანტიპირენის გამოყენებით. კვლევის ფარგლებში დამზადებულია 326 პოლიმერული კომპოზიტის ნიმუში. მიღებულ კომპოზიციურ მასალებზე ჩატარებული მექანიკური გამოცდები, რომელიც მოიცავდა ხუთ ძირითად პარამეტრს: (1) სიმტკიცის ზღვარს სტატიკური ღუნვის დროს, (2) დატყმითი ძალის განსაზღვრა ჩარპის მეთოდით, (3) ზედაპირის სიხისტის განსაზღვრა ბრინელის მეთოდით, (4) სიმტკიცეს გაჭიმვაზე და (5) შიდა სტრუქტურულ სიმტკიცეს. შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ მიღებული კომპოზიტების მექანიკური მახასიათებლები სრულ შესაბამისობაშია თანამედროვე სტანდარტებით დადგენილ ტრადიციული ლიგნინო-ცელულოზური მასალების მექანიკურ თვისებებთან, რაც ადასტურებს მათი გამოყენების პოტენციალს, როგორც ალტერნატიული, ეკოლოგიურად უსაფრთხო და ტექნოლოგიურად კონკურენტუნარიანი მასალების.

2) მექანიკური მახასიათებლების ანალიზის საფუძველზე შესწავლილია ცხლად დაწნეხვის ტექნოლოგიური პარამეტრების (ტემპერატურა, წნევა, შემკვრელი ნივთიერების კონცენტრაცია) გავლენა ლიგნინო-ცელულოზურ კომპოზიტებზე და დადგენილია შემდეგი კანონზომიერებები:

i. ტემპერატურა: ფიჭვის მერქნის ნახერხის ბაზაზე მიღებულ კომპოზიტებში საუკეთესო მექანიკური მაჩვენებლებია მაღალი ტემპერატურის (200–220°C) პირობებში, რაც განპირობებულია შემკვრელსა და შემავსებელს შორის ძლიერი ურთიერთკავშირების ჩამოყალიბებით, ჭადრის ფოთლის ფქვილის შემცველი ნიმუშებისთვის

ოპტიმალურია დაბალი ტემპერატურული რეჟიმი (150–170°C), რაც მიუთითებს მათ უფრო დაბალ თერმულ სტაბილურობაზე.

ii. წნევა: წნევის ზრდა 5-დან 15 MPa-მდე არ ახდენს მნიშვნელოვან გავლენას კომპოზიტების წყალშთანთქმაზე, ხოლო მექანიკური თვისებების შემთხვევაში უმჯობესდება ყველა მექანიკური მახასიათებელი რამდენიმე რიგით, რაც გამოწვეულია შემკვრელსა და შემავსებელს შორის შიდაფაზური ადჰეზიის გაძლიერების გამო.

iii. შემკვრელის კონცენტრაცია: დადგენილია, რომ შედარებით დაბალი კონცენტრაციის მქონე შემკვრელი 3-5% უზრუნველყოფს უკეთეს მექანიკურ მახასიათებლებს, რადგან ბიოშემავსებელი ასრულებს მნიშვნელოვან როლს სტრუქტურული სიმტკიცისეში.

3. ანალიზების შედეგად შესწავლილია ანტიპირენის - გამა-ალუმინის ოქსიდის გავლენა კომპოზიციური მასალების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე და დადგენილია, რომ მისი 5% დამატება მნიშვნელოვნად ამცირებს მასალის ყველა ფიზიკურ-მექანიკურ მაჩვენებელს. მიღებული უარყოფითი ეფექტი დაკავშირებულია ანტიპირენის ნაწილაკების მატრიცაში არაერთგვაროვან განაწილებასა და მასალის სიმკვრივის შემცირებასთან.

4. თერმოგრაფიმეტრული ანალიზების საფუძველზე შესწავლილია კომპოზიციური მასალების თერმული სტაბილურობისა და დესტრუქციის დინამიკა. დადგენილია, რომ მასალები იწარჩუნებენ თერმოსტაბილურობას საშუალოდ 250°C-მდე. თერმო-ჟანგვითი დესტრუქციის ინტენსიური ეტაპი და მასის ძირითადი დანაკარგი აღინიშნება 250–400°C-ის ინტერვალში, რაც ასახავს კომპოზიტების სტრუქტურულ და ქიმიურ თავისებურებებს და მიუთითებს მათი შემადგენელი კომპონენტების თერმულ მდგრადობაზე.

5. შესწავლილია ბიო-დამცავი - გამჟღენთავი აგენტის გავლენა მასალის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე, დადგენილია, რომ ტეტრაეთოქსისილანის 1-3% დამატებამ დადებითად იმოქმედა მასალის

წყალშთანთქმასა და მექანიკურ თვისებებზე, რაც აიხსნება მასალის ზედაპირის ჰიდროფობურობის გაზრდით, ამასთანავე შესაძლებელია, ეთილსილიკატი რეაქციაში შესულიყო შემავსებლის ჰიდროქსილის ჯგუფებთან და წარმოქმნილიყო ქიმიური კავშირები.

6. ჩატარებული ბიოლოგიური კვლევებით დადასტურდა, რომ ჩვენს მიერ მიღებული მასალები არ ახდენენ უარყოფით გავლენას თეთრი თაგვების ჰისტოარქიტექონიკასა და პროლიფერაციულ აქტივობაზე.

გამოყენებული ლიტერატურა

n.d.

22, ASTM E1333 –. 2022. *Standard Test Method for Determining Formaldehyde Concentrations in Air and Emission Rates from Wood Products Using a Large Chamber*1.

<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/113151/98f79fb101a64aae9beaeea67d783e89/ASTM-E1333-22.pdf>.

Andrey Pereira Acosta, Ezequiel Gallio, Henrique Romer Schulz, Paula Zanatta, Kelvin Techera Barbosa, Rafael De Avila Delucis, Darci Alberto Gatto. 2020. "Wood-polymer composites produced by in situ polymerization of styrene into juvenile and mature pine woods." *International Wood Products Journal* <https://doi.org/10.1080/20426445.2020.1776486>.

Aravanopoulos, F.A. November 2010. "Breeding of fast growing forest tree species for biomass production in Greece." *Biomass and Bioenergy* 34 (11): 1531-1537.

Athanassiadou, Eleftheria, and Martin Ohlmeyer. 2009. *Emission of Formaldehyde and VOC from Wood-based Panels*.

BAUMAN. 1985. *COMBUSTION CHEMISTRY AND TOXICITY OF PHENOLICS*. New York: COMBUSTION CHEMISTRY AND TOXICITY OF PHENOLICS.

BOOGH, L., and R MEZZENEGA. 2000. "Processing Principles for Thermoset Composites." In *Comprehensive Composite Materials*, 671-699. DOI:10.1016/B0-08-042993-9/00221-7.

BRODE, L G. 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons 1982. "Phenolic resins. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology." *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* 384-416.

C. Merlatti, François Xavier Perrin, E. Aragon, A. Margailan. 2008. "Natural and artificial weathering characteristics of stabilized acrylic-urethane paints." *Polymer Degradation and Stability* 896-903 <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.02.008>.

n.d. "Carbon Steel Grade 1045 Fact Sheet." <https://www.mwcomponents.com>.
https://www.mwcomponents.com/uploads/Resource-Center/Elgin-Material-Sheets/Carbon-Steel-Grade-1045-Fact-Sheet_Elgin-Website.pdf?srsId=AfmBOop2PrObr8WTZ7IgYDCT-Y4GquZaeCm5p1Giv1BTNHNiZDTkH1Et.

Castanié, B, A Peignon, C Marc, F Eyma, A Cantarel, J Serra, R. Curti, et al. 2024. *Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review*. Vol. 329. Composite Structures.

n.d. *ChemBioDraw Ultra 12*. https://www.perkinelmer.com/Product/chemoffice-plus-cloud-chemofficepc?fbclid=IwAR2M_sx_7vTofwMAugXMb0M4xbyylkyHa4xt0jcRdrETOC8qDtpmSHjdu dA.

- Chen, Hongzhang. 2015. "3 - Lignocellulose biorefinery feedstock engineering." In *Lignocellulose Biorefinery Engineering Principles and Applications*, 37-86.
- Chunxiang Ding, and Wang Yi De. 2022. "Flame-retardant wood plastic composites." In *Advances in the Toxicity of Construction and Building Materials, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 117-136.
- Chunxiang Ding, De-Yi Wang. 2022. "6 - Flame-retardant wood plastic composites." *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* 117-136.
- compositepanel. n.d. "<https://www.compositepanel.org/>." <https://www.compositepanel.org/sustainability/ecc/>.
- Dias Indrasti, Nuri Andarwulan, Eko Hari Purnomo, Nur Wulandari. 2018. "Stability of Chlorophyll as Natural Colorant: A Review for Suji (*Dracaena Angustifolia* Roxb.) Leaves' Case." In *Current Research in Nutrition and Food Science*. <https://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.6.3.04>.
- E1333-22, ASTM. 2022. "Standard Test Method for Determining Formaldehyde Concentrations in Air and Emission Rates from Wood Products Using a Large Chamber." 8 1. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/113151/98f79fb101a64aae9beaeea67d783e89/ASTM-E1333-22.pdf>.
- Engineering, AI generated definition based on: Advances in Chemical. 2016. *Oxidative Pyrolysis*. Advances in Chemical Engineering.
- Engineering, AI generated definition based on: Advances in Chemical. 2016. *Oxidative Pyrolysis*. Advances in Chemical.
- epa. 2025. "<https://www.epa.gov/>." 1 23. <https://www.epa.gov/formaldehyde/formaldehyde-emission-standards-composite-wood-products>.
- Friedrich, Daniel. 2021. "Thermoplastic moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A review on physical and mechanical behaviour under hot-pressing technique." In *Composite Structures*.
- G. Titvinidze, T. Tatrishvili, O. Mukbaniani. 2006. "Chemical Modification of styrene with vinyl containing organosiloxane via Diels-Alder reactions." *Abstracts of Communications of International Conference Enikolopov's Readings*,. Erevan, Armenia. 74.
- Gommes, R. 2002. *openknowledge*. July. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/23e07be8-a040-456f-8ee6-fe0b6ebb14bb/content>.
- Guy, L, V Pevere, and V Vidal. 2012. Use of a Specific Functionalised Organosilicon Compound as a Coupling Agent in an Isoprene Elastomer Composition Including a Reinforcing Inorganic Filler. USA Patent U.S. Patent 0,225,233 A1.

- He Hu, Jie-yan Xu, Hong Yang, Jie Liang, Shiping Yang *, Huixia Wu. 2011. *Morphology-controlled hydrothermal synthesis of MnCO₃ hierarchical superstructures with Schiff base as stabilizer*. Shanghai: Department of Chemistry, Shanghai Normal University.
2018. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hay>. Wikipedia. ივლისი 9. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hay>.
- Kamke, Frederick A, and John A Nairn. 2023. "Advances in structural wood products adhesive bonding." In *Advances in Structural Adhesive Bonding (Second Edition)*, 417-455. Woodhead Publishing in Materials.
- Karol Ronewicz, Jacek Kluska, Lukasz Heda, Dariusz Kardas. 2016. "Chemical and Physical Properties of Pine Wood during Pyrolysis." 11 15. doi:10.5552/drind.2017.1617.
- Kirste, Burkhard. 2016. *Applications of Density Functional Theory to Theoretical Organic Chemistry*, Chem Sci J. doi:10.4172/2150- 3494.1000127.
- La Mantia, F P, and M Morreale. 2011. "Green composites: A brief review." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 579-588.
- Laikov D.N., Ustynyuk Yu. A. 2005. "PRIRODA-04: A quantum-chemical program suite. New possibilities in the study of molecular systems with the application of parallel computing." 820-826. Russia.
- Lever, L. 2001. "Polymer chemistry - polymerization reactions." <http://faculty.uscupstate.edu/llever/polymer%20resources/synthesis>.
- Li, Jian, Wen Fu, Xiaowei Bai, Xiangrui Lin, Heping Yang, Mengfei Wang, Guangxuan Liu, and Zhenghua Dai. 2025. "Oxidative pyrolysis characteristics and exothermic heat release effects of cellulose, hemicellulose, and lignin." *Fuel* 386.
- Li, Tan, Jing Su, Cong Wang, Atsushi Watanabe, Norio Teramae, Ohtani Hajime, and Kaige Wang. 2022. "Advances in the development and application of analytical pyrolysis in biomass research: A review." *Energy Conversion and Management* 271.
- Liu, Haowen. 2018. "One-pot synthesis and characterization of MnCO₃ hierarchical micro/nano twin-spheres with superior lithium storage performances." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 29(12).
- M.M. El-Awady, N.I. El-Awady. 2003. "Non-toxic preservatives for wooden objects in sea water. I. Styrene monomer polymerised using gamma irradiation." *Plastics, Rubber and Composites* <https://doi.org/10.1179/146580103225004081>.
- Malte Pries, Carsten Mai. 2013. "Fire resistance of wood treated with a cationic silica sol." *European Journal of Wood and Wood Products* 71: 237-244.

- Md. Saiful Islam, Sinin Hamdan, Azman Hassan, Zainal Abidin Talib, HR Sobuz. 2013. "The chemical modification of tropical wood polymer composites." *International Wood Products Journal* 204-210, <https://doi.org/10.1177/0021998313477894>.
- Moore, Philippa, and Geoff Booth. 2015. "9 - Mechanical testing of welds." In *The Welding Engineer's Guide to Fracture and Fatigue*, 113-141. <https://doi.org/10.1533/9781782423911.2.113>.
- Mukbaniani, Omar, Levan Londaridze, Zaza Pachulia, Tamar Tatrishvili, and Eliza Markarashvili. 2021. "Diels-Alder reaction of Vinyltriethoxysilane with Styrene." *Academya Journal Scientific Research*.
- Myers, V.R. 2022. *Species of Pine Trees and Shrubs*. <https://www.thespruce.com/pine-trees-from-around-the-world-3269718>.
- Najafi, Saeed Kazemi. 2013 September. "Use of recycled plastics in wood plastic composites - a review." In *Waste Management*, 1898-1905. doi:10.1016/j.wasman.2013.05.017.
- O.Mukbaniani, J. Aneli, G. Buzaladze, T. Tatrishvili, E. Markarashvili. 2017. "Biocomposite on the basis of leaves." *Oxidation Communications* 430-440, <https://scibulcom.net/en/home?gd=2017&bk=1>.
- O.Mukbaniani, J. Aneli, G. Buzaladze, T. Tatrishvili, E. Markarashvili,. 2015. "Composites on the Basis of Renewable Raw Materials." *Proceedings of the 6th Nordic Wood Biorefinery Conference*. Helsinki, Finland. 467-473.
- O.Mukbaniani, W. Brostow, Haley E. Hagg Lobland, J. Aneli, T. Tatrishvili, E. Markarashvili, D. Dzidziguri, G. Buzaladze. 2017. "Composites Containing Bamboo with Different Binders." *Abstracts of communications of 25th Polychar 2017*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Organization, World Health. 2022. *Concise International Chemical Assessment Document 40*. Geneva: Organization, World Health.
- Organization, World Health. 2022. *Formaldehyde*. Geneva: World Health Organization.
- Pal, Tanvi, Sumit Pramanik, Verma Dev Kapil, Shania Zehra Naqvi, Manna P K, and Kammal K Kar. 2022. "6 - Fly ash-reinforced polypropylene composites." In *Handbook of Fly Ash*, 243-270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817686-3.00021-9>.
- Pereira, Paulo, and Henrique Fernandes. 2015. "Vegetal fibers in polymeric composites: a review." <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1722>.
- Qiang Yuan, Zanquin Liu, Keren Zheng, Cong Ma. 2021. *Chapter 5 - Wood*. Civil Engineering Materials.
- Ramage, Michael H., Henry Burrridge, Martha Busse-Wicher, George Fereday, Thomas Reynolds, Darshil U Shah, Guanglu Li, et al. 2017. "The wood from the trees: The use of timber in construction." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 333-359.

- Roig, Inma. 2018. "Biocomposites for interior facades and partitions to improve air quality in new buildings and restorations." In *Reinforced Plastics*, 270-274.
- Roig, Inma. 2018. "Biocomposites for interior facades and partitions to improve air quality in new buildings and restorations." In *Reinforced Plastics*, 270-274. AIMPLAS, Spain: Composites department.
- Roksana Wałęsa, Teobald Kupka & Małgorzata A. Broda. 2015. "Density functional theory (DFT) prediction of structural and spectroscopic parameters of cytosine using harmonic and anharmonic approximations." *Structural Chemistry* <https://doi.org/10.1007/s11224-015-0573-0> 1083-1093 .
- Ronewicz, Karol, Jacek Kluska, Łukasz Heda, and Dariusz Kardaś. 2016. "Chemical and Physical Properties of Pine Wood during Pyrolysis." <https://hrcak.srce.hr/file/263368>. 11 15.
doi:10.5552/drind.2017.1617.
- Saalfeld, H, and M Wedde. 1974. "Refinement of the crystal structure of gibbsite, Al(OH)₃." In *Zeitschrift für Kristallographie*, 129-135. Hamburg: Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität Hamburg.
- Saba, N, M Jawaaid, and M.T.H. Sultan. 2019. *1 - An overview of mechanical and physical testing of composite materials*. Composites Science and Engineering.
- Sam Kubba Ph.D., LEED AP. 2010. *Chapter 6 - Choosing Materials and Products*. Green Construction Project Management and Cost Oversight.
- SIREN, KAI, GUNNAR ROSÉN, PETER V NIELSEN, and JÁNOS VAD. 2001. "12 - EXPERIMENTAL TECHNIQUES." In *Industrial Ventilation Design Guidebook*, 1105-1195.
<https://doi.org/10.1016/B978-012289676-7/50015-1>.
- Smith, B. C. 2016. "Distinguishing Structural Isomers: Mono- and Disubstituted Benzene Ring." In *Spectroscopy*, 36-39.
- Smith, Brian C. 2016. "Distinguishing Structural Isomers: Mono- and Disubstituted Benzene Rings." *Spectroscopy* 36-39.
- Smith, Brian C. 2016. "Distinguishing Structural Isomers: Mono- and Disubstituted Benzene Rings." In *Spectroscopy*, 36-39.
- Sobieraj, Michael C, and Clare M Rimnac. 2012. *Chapter 5 - Fracture, Fatigue, and Notch Behavior of PEEK*. PEEK Biomaterials Handbook.
- Stark, Nicole M, Laurent M Matuana, and Craig M Clemons. 2003. "Effect of Processing Method on Accelerated Weathering of Woodflour-HDPE Composites." *The Seventh International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*.

- Swanson, Nicole. 2016. *POLYBUTADIENE GRAFT COPOLYMERS AS COUPLING AGENTS IN RUBBER*. Dissertation, Akron: The Graduate Faculty of The University of Akron.
- Swanson, Nicole. 2016. "Polybutadiene graft copolymers as coupling agents in rubber compounding." A dissertation PhD, Graduate Faculty of the University of Akron, Akron, USA.
- Tazzoli, Vittorio, and Chiara Domeneghetti. 1980. "The crystal structures of whewellite and weddellite: re-examination and comparison." In *American Mineralogist*, 327-334. Pavia: http://www.minsocam.org/ammin/AM65/AM65_327.pdf.
- Toia, Patrizia. 2017. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-8-2017-004321_EN.pdf.
- Torres, Fernando G, and M L Cubillas. 2005. "Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene." In *Polymer Testing*, 694-698. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.05.004>.
- Vale, Brenda, Emina Kristina Petrovic, and Maibritt Pedersen Zari. 2017. *3 - Building materials*. Materials for a Healthy, Ecological and Sustainable Built Environment.
- Vanli, Anil Akdoganm Ali Serdar. 2017. "Wood-Reinforced Polymer Composites." In *Wood in Civil Engineering*, 150-170. <http://dx.doi.org/10.5772/66336>.
- Washington Luiz Esteves Magalhães, Renato Romano da Silva. 2003. "Treatment of Caribbean pine by in situ polymerization of styrene and furfuryl alcohol." *Journal of Applied Polymer Science* 1763-1769, <https://doi.org/10.1002/app.13252>.
- Waters, Christopher L., Rajiv R. Janupala, Richard G. Mallinson, and Lance L. Lobban. 2017. "Staged thermal fractionation for segregation of lignin and cellulose pyrolysis products: An experimental study of residence time and temperature effects." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 126: 380-389.
- Wei-Dan Ding, Ahmed Koubaa, Abdelkader Chaala. 2013 April. "Mechanical properties of MMA-hardened hybrid poplar wood." In *Industrial Crops and Products*, 304-310. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.02.004>.
- who.int. n.d. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/42430/a73769.pdf>.
2023. *woodwideweb*. February 14. <https://woodwideweb.be/en/atlas/2256.html>.
- www.regulations.gov. 2016. "www.regulations.gov." 12 12. <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPPT-2016-0461-0001>.
- Wypych, George. 2016. "FILLERS – ORIGIN, CHEMICAL COMPOSITION, PROPERTIES, AND MORPHOLOGY." In *Handbook of Fillers (Fourth Edition)*, 13-266. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-91-1.50004-X>.

Zhao, Yan, and Donald G. Truhlar. 2011. "Density Functional Theory for Reaction Energies: Test of Meta and Hybrid Meta Functionals, Range-Separated Functionals, and Other High-Performance Functionals." *J.Chem.Theory Comput* 669-675. <https://doi.org/10.1021/ct1006604>.

К.А. Андрианов, А.А. Жданов, В.А. Одинец. 1961. "XXXXXXX." *Журнал Общей Химии*,.

К.А. Андрианов, А.А. Жданов, В.А. Одинец. 1962. "XXXXXXX." *Журнал Общей Химии*.

К.А. Андрианов, А.А. Жданов, И.В. Карпова, В.А. Одинец. 1967. "Синтез и исследование свойств бис(трихлорсилил)бензола и некоторые его производны." *Журнал Общей Хими* 627-631.

2022. ბიბლიოვიკი. საქართველოს პარლამენტის ეროვნული ბიბლიოთეკა. 11 3.
<https://www.nplg.gov.ge/wikidict/index.php/%E1%83%AD%E1%83%90%E1%83%93%E1%83%90%E1%83%A0%E1%83%98>.

2022. ბიბლიოვიკი. ივლისი 28.
<https://www.nplg.gov.ge/wikidict/index.php/%E1%83%A4%E1%83%98%E1%83%AD%E1%83%95%E1%83%98>.

მიქელაძე. 1987. "ქართული საბჭოთა ენციკლოპედია." 375. თბილისი.