

## მიკროკაფსულირების სხვადასხვა ასპექტისათვის

მამუკა მაცაბერიძე<sup>1</sup>, ინგა ჯანელიძე<sup>2</sup>

<sup>1</sup>პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიის და მეტალურგიის ფაკულტეტი Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-3228-1447>

<sup>2</sup>ასოცირებული პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიის და მეტალურგიის ფაკულტეტი Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-9961-7638>

### აბსტრაქტი

მიკროკაფსულირება, როგორც სისტემების შექმნის პრინციპი ნივთიერებების მიზნობრივი მიწოდებისათვის ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა პროდუქტებისა და პრეპარატების წარმოებაში. მიკროკაფსულირების პრობლემებისადმი სამეცნიერო და პრაქტიკული ინტერესი ძალზე მაღალია, რაზეც მოწმობს მიკროკაფსულირების საერთაშორისო საზოგადოების შექმნა. მიკროკაფსულირებული და გელის მსგავსი ფორმების პროდუქციისა და პრეპარატების შექმნა სამეცნიერო და ტექნიკური საქმიანობის სხვადასხვა სფეროს საინოვაციო სეგმენტს წარმოადგენს.

**საკვანძო სიტყვები:** მიკროკაფსულირება, პროგრამირებული და პროლონგირებული მოქმედების ფარმაცევტული საშუალებები, ცეცხლმქრობი პოლიმერული კომპოზიციური მასალები, ანტიპირენები, კოაცერვაცია, პესტიციდების მიკროკაფსულირებული ფორმები, ეპოქსიდური მიკროკაფსულირება, კონსერვაცია მიკროკაფსულირებით.

მიკროკაფსულირება წარმოადგენს სისტემის შექმნის პრინციპს ნივთიერებების მიზნობრივი მიწოდებისათვის სხვადასხვა პროდუქტებისა და პრეპარატების წარმოების პროცესის თანამედროვე უზრუნველყოფისათვის. აღნიშნული განეკუთვნება შემდეგ დარგობრივ სფეროებს:

- პროგრამირებული და პროლონგირებული მოქმედების ფარმაცევტული საშუალებები, რომლებიც იცავს კუჭის წველის ზემოქმედებისგან პოლიპეპტიდებს, ვაქცინებს და სხვა პრეპარატებს, აგრეთვე პარენტერალურ სისტემებს ბიოდეგრადირებად გარსში პერორალური მიღებისას.
- სოფლის მეურნეობის პროდუქტები (პესტიციდები, ფერომონები).
- ქიმიური ტექნოლოგიის, სხვადასხვა დანიშნულების, პროდუქტები (საღებავები, არანახშირბადიანი ასლის გადასაღები ქაღალდი, ტონერები, ანტიპირენები პოლიმერული კომპოზიციებისათვის, ანაერობული „ჰერმეტიკები“ და სხვა).
- საკვების და ცხოველთა საკვების ბიოაქტიური დანამატები.
- კოსმეტიკური საშუალებების ინგრედიენტები და ა.შ.

პოლიმერულ გარსში ჩაშენებული, მყარი და თხევადი სუბსტანციების მიკრონაწილაკები, სხვადასხვა ფუნქციონალური დანიშნულების პრეპარატებს ანიჭებენ სრულიად ახალ თვისებებს.

### ცეცხლმქრობი პოლიმერული კომპოზიციური მასალების მიკროკაფსულირების გადაუდებელი აუცილებლობის მსაზღვრელი ფაქტორი

ტექნიკურად ღირებული, ზოგჯერ უნიკალური ფუნქციური თვისებების მთელ კომპლექსთან ერთად, პოლიმერულ მასალებს აქვთ ისეთი მნიშვნელოვანი ნაკლი, როგორცაა მათი აალება. მასალების წვადობის შემცირების ყველაზე ფართოდ გამოყენებული მეთოდია სხვადასხვა ანტიპიროგენების (ანუ იმ ნივთიერებების, რომლებიც შეიცავენ ფოსფორს და ჰალოგენებს) პოლიმერულ მატრიცაში შეყვანა.

ცეცხლმქრობ პოლიმერულ კომპოზიტურ მასალებს აქვთ უნარი აქტიურად აღკვეთონ აალების პროცესის ინიცირება, ე.ი. ნახსენებ, ცეცხლმქრობ პოლიმერულ კომპოზიტურ მასალებს, შეუძლიათ შეასრულონ ხანძრის მქრობი, დამოუკიდებელი ავტომატური სისტემის ფუნქცია.

ცეცხლმქრობი პოლიმერული კომპოზიტური მასალები პერსპექტიულია სხვადასხვა ობიექტების დაცვისთვის, კერძოდ:

- ყველაზე დაუცველი კვანძები და აგრეგატები სატრანსპორტო მანქანათმშენებლობაში (ავიამშენებლობა, გემთმშენებლობა, ვაგონ-მშენებლობა).
- ხანძარსაწინააღმდეგო და ფეთქებადი ტვირთები მათი შენახვისა და ტრანსპორტირების დროს.

- განსაკუთრებით ღირებული ტვირთები (ხელოვნების ნაწარმოებები, დოკუმენტები, ფულის ბანკნოტები შენახვისა და ტრანსპორტირების დროს).
- ელექტრონული მოწყობილობების და ელექტროსადგურების ყველაზე დაუცველი კვანძები და ენერგეტიკული აგრეგატები (ბირთვული, თერმული და ა.შ.).

ამავე დროს აღსანიშნავია, რომ ანტიპირენების საერთო მოხმარებაში დანამატების წილი მუდმივად მცირდება, რაც განპირობებულია მათი უნარით, დროთა განმავლობაში „გამოიყონ“ მასალის ზედაპირზე სითხის ან კრისტალების სახით, რომლის შეჩერების ეფექტური მეთოდია მიკროკაფსულირება.

ზოგადად ანტიპირენებს ანუ ხანძარსაწინააღმდეგო ნივთიერებებს მიეკუთვნება ჰალოგენის, ფოსფორის, ბორის, აზოტის ატომების შემცველი ნივთიერებები, ცვლადი ვალენტობის ლითონები, დაჯგუფებები ამ ელემენტების სხვადასხვა კომბინაციით და ქიმიურად ბმული წყალი.

### სამკურნალო ნივთიერებების მიკროკაფსულირების დასაბუთებისათვის

ცნება „ნივთიერების მიწოდება“ ძირითადად ეხება სამკურნალო საშუალებებს და ნიშნავს წამლის მიზანმიმართულ ტრანსპორტირებას ორგანიზმში უშუალოდ მისი მოქმედების ადგილზე. ასეთი პრეპარატების შექმნის ყველაზე მნიშვნელოვანი მეთოდებია მიკროკაფსულირება და გელირება (გელის პროდუცირება).

ეს ტექნოლოგიები შესაძლებელს ხდის წამლების მიღებას ხანგრძლივი, დაპროგრამებული და ტრანსდერმული ეფექტით. ასეთი პრეპარატების გამოყენება ნიშნავს მათი თერაპიული დოზების და საერთო ტოქსიკურობის შემცირებას, აქტიური ნივთიერების მოქმედების მდგრადობას და უზრუნველყოფს ღვიძლისა და თირკმელების დაცვას.

ფარმაცევტული საშუალებების უმეტესობა წყალში ხსნადია. აქედან გამომდინარე, წყალხსნარიდან **კოაცერვაციის**<sup>1</sup> მეთოდი მათი მიკროკაფსულირებისათვის არ არის შესატყვისი და სასურველი.

<sup>1</sup> **coacervatio** - "ერთად თავმოყრა", "დაგროვება"; გახსნილი ნივთიერებით გამდიდრებული წვეთების მაღალმოლეკულური ნაერთების წარმოქმნა ხსნარში.

<http://www.nplg.gov.ge/gwdict/index.php?a=list&d=3&t=dict&w1=%E1%83%99&w2=%E1%83%9D&w3=%E1%83%90>

## პესტიციდების მიკროკაფსულირებული ფორმები

ქიმიის განვითარების თანამედროვე მიმართულება მცენარეთა დაცვის საშუალებების პრეპარატიული ფორმების შექმნაზეა ორიენტირებული, რომლებიც უზრუნველყოფენ აქტიური ნივთიერების ბიოლოგიური პოტენციალის რეალიზაციის ოპტიმალურ პირობებს, მის მიზანმიმართულ და შერჩევით მოქმედებას და ამავე დროს მინიმუმამდე დაყავთ პესტიციდების უარყოფითი გავლენა გარემოზე და ადამიანზე. ამ მოთხოვნების განხორციელების ერთ-ერთი გზაა პესტიციდების პრეპარატიული ფორმების შექმნა მიკროკაფსულების სახით და აქტიური ნივთიერების კონტროლირებადი გამოყოფით.

### საარქივო და არქეოლოგიური მასალის კონსერვაცია მიკროკაფსულირებით

მატერიალური კულტურის ობიექტების შენარჩუნების პრობლემა, რომლებიც განადგურების ტერმინალურ სტადიაშია, მოითხოვს კონსერვაციის არატრადიციული მეთოდების გამოყენებას [1]. საარქივო და არქეოლოგიური მასალების კონსერვაციისა და რესტავრაციისათვის ნაჩვენებია, რომ ამისთვის ამ მიზნით შესაფერისია მიკროკაფსულირების მეთოდი, რომელიც ხორციელდება **ჰ-ქსილილენის**<sup>2</sup> დიმერის გაზფაზური პოლიმერიზაციით საკონსერვაციო/სარესტავრაციო ობიექტების ზედაპირზე.

საინტერესოა, რომ ეპოქსიდური ფისების მიკროკაფსულირება და მიკროკაფსულირების სხვადასხვა მეთოდები, თანამედროვე მასალათა მიღების გამორჩეული აქტუალობით ხასიათდება. გარდა აღნიშნულისა ძალზე მნიშვნელოვანია ახლად მიღებული მიკროკაფსულების მორფოლოგიის შესწავლა მიკროსტრუქტურული ანალიზით.

მიკროსტრუქტურული ანალიზის შედეგებზე დაყრდნობით, დგინდება ფაქტორები, რომლებიც თავის მხრივ გავლენას ახდენენ მასალების ხარისხზე. საინტერესოა, რომ მიკროკაფსულების გამოყენებით მიიღება **თვითაღდგენადი პოლიმერული კომპოზიტი**.

---

<sup>2</sup> პოლი-პარა-ქსილილენი, პარილინი - **ჰ-ქსილილენის** წრფივი პოლიმერი, პიროლიზური პოლიმერიზაციით მიღებული თერმოპლასტი. მას აქვს საინტერესო თვისებები: გამხსნელებისა და მჟავებისადმი გამძლეობა, დნობის მაღალი წერტილი, კარგი დიელექტრიკული და ბარიერული თვისებები. პოლიმერი და მისი წარმოებულები გამოიყენება, როგორც ზედაპირული დანაფარი სხვადასხვა პროდუქტებისთვის, ძირითადად ელექტრონიკაში. კომერციული დასახელება - **Parylene N, C, D**, ბენზოლის რგოლში შემცვლელის მიხედვით.

განვაზოგადოდ ამ თვითაღდგენადი პოლიმერული კომპოზიტის ნიმუშის მიკროსტრუქტურული ანალიზის გამოყენებით ჩატარებული კვლევის ზოგადი ტოპოლოგია და მოვახდინოთ ამ კვლევის შედეგების ანალიტიკური კონცეპტუალიზება.

ნაირგვარი ინდივიდუალური ნივთიერებისა და მათი ნარევების მიკროკავსულირებამ ფართო გამოყენება ჰპოვა მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების სხვადასხვა დარგში [2], კერძოდ მიკროკავსულირება ფართოდ გავრცელდა კომპოზიტური მასალების [3] და მედიცინის, ბიოლოგიის და ფარმაციის სფეროში [4].

კომპოზიტური მასალების სფეროში, მიკროკავსულირება გამოიყენება როგორც შემავსებლების, ასევე დანამატების შესაქმნელად, რომლებიც აუმჯობესებენ მიკრობზარისადმი წინააღმდეგობას მასალის დაბზარვის ენერჯის გაფანტვით, მზარდი ბზარის წვერზე [5] და ასევე მიკროკავსულებზე დაფუძნებული თვითაღდგენადი პოლიმერული მასალების [6] შესაქმნელად.

თანამედროვე ტექნოლოგიებში, მიკროკავსულირების გამოყენებით მნიშვნელოვანი ამოცანებია გადაჭრილი, მაგალითად უნიკალური პროდუქტის - თვითაღდგენადი მასალების [7] შექმნა.

ამრიგად, მიკროკავსულის ბირთვში მოთავსებული „სამკურნალო“ აგენტი, როდესაც კავსულის კედლის მთლიანობა ირღვევა, გამოიყოფა (ეს „სამკურნალო“ აგენტი) წარმოქმნილ სიცარიელებში და ხსნის პოლიმერს თავის ირგვლივ გამხსნელის გამოყენებით [8], ან იწყებს გამკვრივებას ინიციატორი/გამამკვრივებელის [9] ზემოქმედების დროს, რითაც ნაწილობრივ ან მთლიანად აღადგენს დაზიანებულ ადგილს.

ასეთი თვითაღდგენადი მასალები ძალზე მნიშვნელოვანია თვითმფრინავების მშენებლობის [10-12] სფეროში, რადგან ისინი საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ დრო და ფინანსური ხარჯები ამგვარი პროდუქციის (ე.ი. თვითაღდგენადი მასალების) ნაკეთობის ტექნიკური მომსახურებისათვის და გავახანგრძლივოთ მასალის ექსპლოატაციის [13-15] ვადა.

ეპოქსიდური ფისების აქტიური გამოყენების გათვალისწინებით კომპოზიციური მასალების წარმოებისთვის თვითმფრინავმშენებლობისთვის, დიდი ყურადღება ეთმობა მიკროკაფსულების წარმოებას [16-17], რომლებიც სავსეა ეპოქსიდური ფისებით და შეუძლია აღადგინოს კომპოზიციური მასალების თვისებები ნარჩენი გამამაგრებლის გამოყენებით.

ყველაზე პერსპექტიული საწყისი მასალა ასეთი მიკროკაფსულების გარსის მისაღებად არის **კარბამიდ-ფორმალდეჰიდური ოლიგომერი** [18-20], რომლის გამოყენების უპირატესობა არის მისი დაბალი ღირებულება, ხელმისაწვდომობა და ინერტულობა შემავსებლის მიმართ. აღნიშნულზე მსჯელობისას უნდა განისაზღვროს შემდეგი სტრატეგიები:

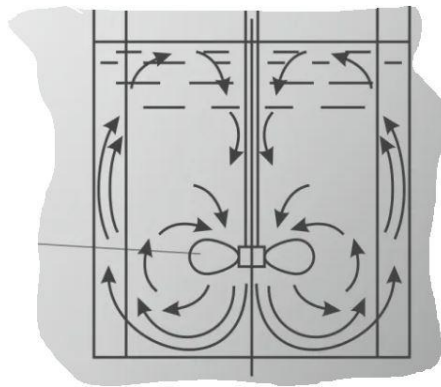
- ეპოქსიდური ფისებით სავსე მიკროკაფსულების მიღება სხვადასხვა მეთოდით.
- მიკროკაფსულების თვისებებზე გავლენის მომხდენი პირობები.
- მიკროკაფსულების სინთეზის ამოცანები.
- მიკროკაფსულების თვითაღდგენადი კომპოზიციური მასალების მისაღებად განსაზღვრული ეპოქსიდური ფისები.

### **ეპოქსიდური ფისის მიკროკაფსულირება ორსაფეხურიანი მეთოდიკით**

შარდოვანა-ფორმალდეჰიდის ოლიგომერის მისაღებად, 100 გ შარდოვანა და 125 გ პარაფორმალდეჰიდი უნდა ჩავასხათ 500 მლ-იან მრგვალ ფსკერიან, სამყელიან კოლბაში, რომელიც აღჭურვილი უნდა იყოს ზედა შემრევით, თერმომეტრით და უკუმაცივრით, რის შემდეგაც 150 მლ გამოხდილი წყალი უნდა დაემატოს და ხსნარის **pH** უნდა დავარეგულიროთ ნეიტრალურ (**pH=7-7,1**) გარემოზე, კალიუმის ჰიდროქსიდის (10% (მასით) და ძმარმჟავას (10% (მასით) წინასწარ მომზადებული ხსნარების გამოყენებით. მიღებული ნარევი უნდა შევათბოთ 60°C-მდე მუდმივი მორევით და გავაგრძელოთ გათბობა შარდოვანას და პარაფორმალდეჰიდის სრულ დაშლამდე.

ამის შემდეგ, შარდოვანას მეთილოლის წარმოებულების წარმოქმნის დასასრულებლად, ხსნარს უნდა ვუვლით 60°C ტემპერატურაზე 30 წუთის განმავლობაში. რეაქციის დასრულების შემდეგ, ხსნარის **pH** უნდა დავიყვანოთ 4,5-მდე ძმარმჟავას ხსნარით. შემდეგ ტემპერატურა უნდა ავწიოთ 80°C-მდე და გაცხელება გავაგრძელოთ კიდევ 1,5-2 სთ, რათა წარმოიქმნას შარდოვანა-ფორმალდეჰიდის ოლიგომერი. მიღებული გამჭვირვალე ხსნარის გაგრილების შემდეგ, მისი **pH** უნდა დავარეგულიროთ ნეიტრალურ (**pH=7**) გარემოზე.

მიღებული ოლიგომერით ეპოქსიდურ-ფისოვანი მიკროკაფსულირება ჩატარდა შემდეგი სქემით: 150 გ კარბამიდ-ფორმალდეჰიდის ოლიგომერის წყალხსნარი და 250 მლ წყალი დაემატა 700 მლ ჭიქაში, რომელიც აღჭურვილი იყო „პროპელერურ“/ფრთიანი ამრევით და გამახურებული პერანგით; ხსნარის pH დარეგულირდა მჟაუნ მჟავას 10% ხსნარით pH-ის 6,0–6,5 მნიშვნელობებამდე, რის შემდეგაც, მორევით (250 ბრ/წთ), ეპოქსიდური ფისი DER-330 თბება 70°C-მდე და ემატება 4,95 გ სალიცილის მჟავა, რომელიც გამოიყენება მიღებული კაფსულების სტაბილიზაციისთვის; შემდეგ ტემპერატურა უნდა დავიყვანოთ 30°C-მდე და ვურიოთ 10 წუთის განმავლობაში - შემრევის ბრუნვის სიჩქარით 250 ბრ/წთ. ამის შემდეგ, ხსნარის pH ვაქვეითებდით 4,0–4,5 მნიშვნელობებამდე და ამ ტემპერატურაზე მორევას ვაგრძელებდით 2,5–3 საათის განმავლობაში, რის შემდეგაც ხსნარის pH მცირდებოდა 2,5–2,8 მნიშვნელობებამდე, დავამატეთ 7,5 გ შარდოვანა და შევათბეთ 50°C-მდე და გავაგრძელებთ რეაქცია მიკროკაფსულის გარსის წარმოქმნამდე 1,5-2 სთ განმავლობაში. მიღებული ნარევის ვაგრილებთ, ვფილტრავთ, ვრეცხავთ დისტილირებული წყლით და ვაშრობთ ჰაერზე 48 საათის განმავლობაში.



პრინციპული სქემა: „პროპელერურ“/ფრთიანი ამრევი გამახურებული პერანგით

### in situ<sup>3</sup> ეპოქსიდური მიკროკაფსულირება

500 მლ-იან ქიმიურ ჭიქაში, „პროპელერურ“/ფრთიანი ამრევით და გამათბობელი პერანგით ჩავასხით 117 გ წყალი, 7,2 გ შარდოვანა, 0,3 გ რეზორცინოლი, 0,3 გ NaCl, 27 გ პოლივინილის სპირტის (PVA) 5%-იანი ხსნარი წყალში და 30 გ DER-330 ეპოქსიდური ფისი. ემულსიის შესაქმნელად მიღებული ნარევი უნდა დასტაბილიზდეს 10-15 წუთის განმავლობაში ამრევის სიჩქარით 700-900 ბრ/წთ, რის შემდეგაც ტემპერატურა უნდა გაიზარდოს 60°C-მდე, რეაქციის pH-ი რეგულირდება 2,5-3,5-მდე და რეაქტორში უნდა დაემატოს 19,2 გრ პარაფორმალდეჰიდისგან წინასწარ მომზადებულ ფორმალდეჰიდის 37,5%-იანი წყალხსნარი.

<sup>3</sup> ექსპერიმენტის ტიპი, რომელიც საკვლევი ობიექტის წარმოშობის ადგილზე ტარდება.

ფორმალდეჰიდის პოლიკონდენსაციის რეაქცია შარდოვანასთან ემულსიის წვეთების ზედაპირზე ტარდება 4 საათის განმავლობაში, რის შემდეგაც მიღებული ნარევი უნდა გაგრილდეს ოთახის ტემპერატურამდე, ვფილტრავთ ბუხნერის ძაბრით და მონაცვლეობით ვრეცხავთ წყლით და აცეტონით.

კარბამიდ-ფორმალდეჰიდის პოლიმერისგან **კაფსულის გარსების სინთეზი** ერთ-ერთი ადვილად განხორციელებადი მეთოდია წყალში ხსნადი დაბალმოლეკულური ოლიგომერის მიღება მისი შემდგომი პოლიმერიზაციით კაფსულის გარსის ფორმირებით. ამისათვის პირველ რიგში საჭიროა დაბალმოლეკულური და შესანახად მდგრადი კარბამიდ-ფორმალდეჰიდის ოლიგომერის მიღება. ასეთი ოლიგომერის მიღების პირველ ეტაპზე ხდება კარბამიდის რეაქცია ფორმალდეჰიდთან, რის შედეგადაც შესაძლოა წარმოიქმნას კარბამიდის მონო-, დი- და ტრიმეთილოლ წარმოებულები. ოლიგომერის მიღების პროცესის შემდგომი გაგრძელებით, მიმდინარეობს ზემოთნახსენები წარმოებულების (კარბამიდის მონო-, დი- და ტრიმეთილოლ წარმოებულები) პოლიკონდენსაციის რეაქცია მჟავა გარემოში საჭირო ოლიგომერის წარმოქმნით.

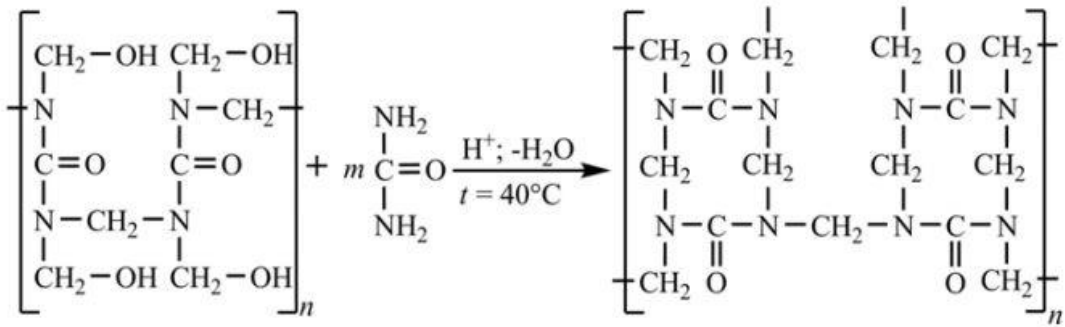
წყალში ხსნადი შარდოვანა-ფორმალდეჰიდის ოლიგომერის მიღების პროცესის შესწავლისას დადგინდა, რომ მეთილოლის წარმოებულების მიღებისას ძალიან მნიშვნელოვანია გარემოს pH-ის მონიტორინგი, რადგან ეს რეაქცია კარგად მიმდინარეობს ნეიტრალურ და ტუტე გარემოში. მჟავა გარემოში ეს რეაქცია ჩერდება და იწყება რეაქცია მეთილოლის ჯგუფებსა და აზოტთან მდებარე წყალბადის თავისუფალ ატომებს შორის, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს თავდაპირველად შერჩეული, "ფორმალდეჰიდი/კარბამიდი", სტექიომეტრიული თანაფარდობის ცვლილება.

ოლიგომერს ვღებულობთ „ფორმალდეჰიდი/კარბამიდის“ მოლური თანაფარდობით 2:1 და 2,5:1. არ არის მიზანშეწონილი ფორმალდეჰიდის უფრო მცირე რაოდენობით გამოყენება, რადგან ეს წარმოქმნის ჰიდროქსილის ჯგუფების ძალიან მცირე რაოდენობას, რომლებიც ხელს უწყობენ წყალში ხსნადი ოლიგომერის წარმოქმნას.

ყველაზე მარტივად მისაღები და სტაბილური აღმოჩნდა ოლიგომერის ხსნარი, რომელიც მიღებულია მოლური თანაფარდობით [21] "ფორმალდეჰიდი /კარბამიდი" - 2.5: 1, რაც დროთა განმავლობაში ინარჩუნებს თავის თვისებებს და ოპტიმალურია მისი გამოყენება, როგორც წინამორბედი/პრეკურსორისა მიკროკაფსულების გარსის მისაღებად. მისი სტაბილურობა განპირობებულია ჰიდროფილური ჯგუფების საკმარისი არსებობით და NH-სარეაქციო ცენტრების ამოწურვით, მეთილოლის წარმოებულების ერთმანეთთან რეაქციის დროს.



შარდოვანასთან რეაქციის დროს, მოლეკულური მასის ზრდის და ჰიდროფილური ჯგუფების რაოდენობის შემცირების გამო დისპერგირებულ სისტემაში გაფანტული ეპოქსიდური ფისის ზედაპირზე წარმოიქმნება პოლიმერული ფირი, რომლის სისქე და სიმტკიცე დროთა განმავლობაში იზრდება:



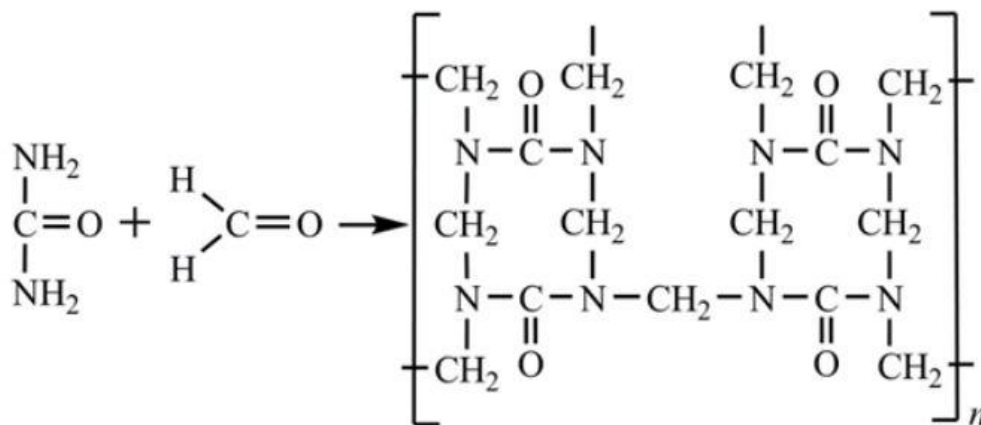
**მიკროკაფსულების გარსის პოლიმერული ფირის წარმოშობის პრინციპული სქემა**

დადგენილია, რომ ოლიგომერის კონცენტრაცია ხსნარში უნდა შემცირდეს 20-30%-მდე, ვინაიდან მიკროკაფსულების წარმოქმნის პროცესში უფრო მაღალი კონცენტრაციის გამოყენებისას მიიღება ძალიან მაღალი სიბლანტის მქონე ნარევები, რომლებიც უარყოფითად მოქმედებს მიღებულ ნაწილაკებზე. ისიც დადასტურდა, რომ სალიცილის მჟავის დამატებით 3-5% ოდენობით, ხდება აგლომერაციის (შეცხობის) მნიშვნელოვანი შემცირება და უფრო ერთგვაროვანი ფირების ფორმირება, მისი ჩამოყალიბების და ოლიგომერული ფაზის თვისებების გაუმჯობესების წყალობით.

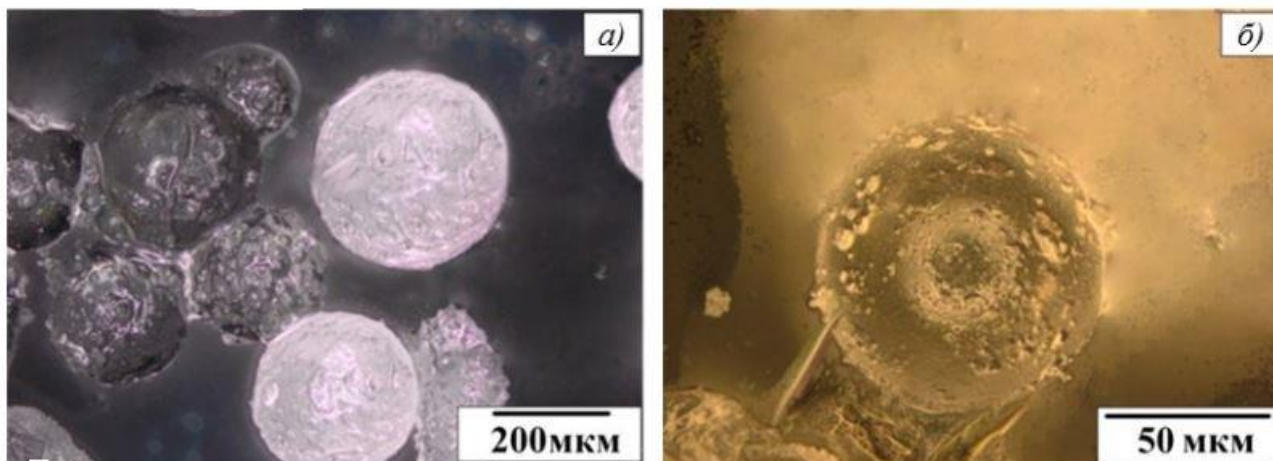
pH-ის გარემოს გავლენის შესწავლისას, ეპოქსიდური ფისიდან, მიკროკაფსულების წარმოქმნის პროცესზე გამოვლინდა, რომ როდესაც ძალზე დაბალია pH მნიშვნელობები (ან მაღალია პროცესის ტემპერატურა) უხსნადი პოლიმერის წარმოქმნა ძალიან აქტიურდება და კაფსულის გარსის ფორმირების ნაცვლად, ის გამოილექება ცალკეულ ფაზაში. შედეგად, პოლიმერის მნიშვნელოვანი ნაწილი ხსნარიდან გამოიყოფა მყარი ნაწილაკების სახით, რომელთა მოშორება თითქმის შეუძლებელია.

ეპოქსიდური ფისის შემცველი მიკროკაფსულების ორეტაპიანი წარმოებისას გამოვლინდა, რომ წარმოქმნილი ნაწილაკების ზომაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს შემრევის ბრუნვის სიჩქარე; ასე მაგალითად, ბრუნვის სიჩქარით 250 ბრ/წთ მიიღება დიდი კაფსულები დიამეტრით 200–400 მიკრომეტრი (იხილე სურათი. 1, a), ხოლო ბრუნვის სიჩქარე 400 ბრ/წთ საშუალებას იძლევა მივიღოთ პატარა მიკროკაფსულები - 200 მკმ-მდე დიამეტრით (სურათი. 1, b), სურათი 1-ზე წარმოდგენილი ფოტო გადაღებული ოპტიკური მიკროსკოპით.

მიკროკაფსულირების მეთოდი, რომელიც მიმდინარეობს ერთ ეტაპად, ეფუძნება კარბამიდ-ფორმალდეჰიდის ოლიგომერის წარმოებას *in situ* წყალი-ფისი ფაზების საზღვარზე. კარბამიდის და ფორმალდეჰიდის პოლიკონდენსაციის რეაქცია ამ შემთხვევაში მიმდინარეობს შემდეგი სქემის მიხედვით:



ზემოთმოყვანილი სქემა საშუალებას გვაძლევს თავიდან ავიცილოთ აღწერილი მეთოდის ნაკლოვანებები. ამრიგად, დროისა და ენერჯის ხარჯები მნიშვნელოვნად შემცირდება პროცესის საფეხურების რაოდენობის შემცირებით, მარტივდება pH-ის რეგულირება გარემოში "ოლიგომერი-ფისი" და არ არსებობს პრობლემები პოლიმერის გამოლექვასთან ოლიგომერის ხსნარიდან ცალკე ფაზაში ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში შენახვისას.



სურათი 1. მიკროკაფსულების ფოტოები DER-330 ეპოქსიდური ფისით, შემრევის ბრუნვის სიჩქარით 250 ბრ/წთ (a) და 400 ბრ/წთ (b). ინფორმაციის წყარო: [21]

ეპოქსიდის შემცველი მიკროკაფსულების მიღების ერთსაფეხურიანი პროცედურის შესწავლილის საფუძველზე (იხ. იქვე), განისაზღვრა მორევის სიჩქარის და პოლივინილის სპირტის მახასიათებლების გავლენა მიკროკაფსულირების პროცესზე - ყველაზე ოპტიმალური აღმოჩნდა პოლივინილის სპირტი ჰიდროლიზის უმაღლესი ხარისხით, ხოლო მორევის ოპტიმალური სიჩქარეა - 600-700 ბრ/წთ.

### გამოყენებული ლიტერატურა

1. Development of microencapsulated and gel-like products and materials for various industries // M. S. Vilesova, N. I. Aizenshtadt, M. S. Bosenko, A. D. Vilesov, E. P. Zhuravsky, A. G. Klimov, V. A. Marey, V. B. Moshkovsky, V. E. Mukhin, A. S. Radilov, L. A. Rubinchik, N. N. Saprykina, R. P. Stankevich, B. I. Tkachev, Yu. I. Trulev. Ros. chem. and. (J. Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev), 2001, v. XLV, No. 5-6; page 9.
2. Monodispersed Sirolimus-Loaded PLGA Microspheres with a Controlled Degree of Drug-Polymer Phase Separation for Drug-Coated Implantable Medical Devices and Subcutaneous Injection. CS Appl. Bio Mater. 2022, 5, 8, 3766–3777; Publication Date: July 16, 2022, <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00319>.
3. Rule J.D., Brown E.N., Sottos N.R., et al. Wax-protected catalyst microspheres for efficient self-healing materials // Advanced Materials. 2005. Vol. 17. P. 205–208.

4. Menshutina N.V. Encapsulation technologies // *Pharmaceutical technologies and packaging*. 2014. No. 5. pp. 30–33.
5. Giannakopoulos G., Masania K., Taylor A.C. Toughening of epoxy using core-shell particles // *Journal of Materials Science*. 2011. Vol. 46. P. 327–338.
6. Liao L.P., Zhang W., Xin Y., et al. Preparation and characterization of a microcapsule containing epoxy resin and its self-healing performance of anticorrosion covering material // *Chinese Science Bull*. 2011. Vol. 56. P. 439–443.
7. Chowdhury R.A., Hosur M.V., Nuruddin M. Self-healing epoxy composites: preparation, characterization and healing performance // *Journal of Materials Research and Technology*. 2015. Vol. 4. P. 33–43.
8. Caruso M.M., Delafuente D.A., Ho V. Solvent-promoted self-healing materials // *Macromolecules*. 2007. Vol. 40. P. 8830–8832.
9. Rule J.D. The chemistry of self-healing polymers // *Education in Chemistry*. 2005. Vol. 42 (5). P. 130–132.
10. Kablov E.N. New generation materials as the basis for innovation, technological leadership, and Russia's national security // *Intellect & Technologies*. 2016. №2, pp. 41–46.
11. Kuznetsova V.A., Deev I.S., Zheleznyak V.G., Silaeva A.A. Wear-resistant paint coating with quasi-crystalline filler // *Proceedings of VIAM: electron. scientific and technical magazine* 2018. №3. Art. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-8-8.
12. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2012. V. 82. No. 6, pp. 520–530.
13. Raskutin A.E., Khrulkov A.V., Yazvenko L.N. Polymer film coating for PCM structures (review) // *Proceedings of VIAM: electron. scientific and technical magazine* 2017. No. 2 (50). Art. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (date of access: 06/13/2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-5-5.
14. Kablov E.N. Aerospace materials science // *All materials. Encyclopedic reference book*. 2008. No. 3. pp. 2–14.
15. Solovyanchik L.V., Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Marakhovskiy P.S., Soldatov M.A. A new approach for imparting functional properties to PCM // *Proceedings of VIAM: electron. scientific and technical magazine* 2017. No. 4 (52). Art. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-5-5.
16. Grebeneva T.A., Terekhov I.V., Chursova L.V., Shlensky V.A. Microencapsulation in self-healing composite materials // *Klei. Sealants. Technology*. 2016. No. 10. pp. 40–45.
17. Liu X., Sheng X., Lee J.K., Kessler M.R. Synthesis and Characterization of Melamine-Urea-Formaldehyde Microcapsules Containing ENB-Based Self-Healing Agents // *Macromolecular Materials Engineering*. 2009 Vol. 294. P. 389–395.
18. Grebeneva T.A., Terekhov I.V., Chursova L.V., Shlensky V.A. Microencapsulation in self-healing composite materials // *Klei. Sealants. Technology*. 2016. No. 11. pp. 39–46.

19. Yin T., Rong M.Z., Zhang M.Q., Yang G.C. Self-healing epoxy composites – Preparation and effect of the healing consisting of microencapsulated epoxy and latent curing agent // Composites Science and Technology. 2007 Vol. 67. P. 201–212.
20. Wang R., Li H., Hu H. et al. Preparation and characterization of self-healing microcapsules with poly(urea-formaldehyde) grafted epoxy functional group shell // Journal of Applied Polymer Science. 2009 Vol. 113. R. 1501-1506.
21. I.V. Terekhov, V.A. Shlensky, E.V. Kurshev, S.L. Lonsky, V.A. Dyatlov. Study Of Factors Affecting The Formation Of Epoxy-Containing Microcapsules For Self-Healing Compositions DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-27-34. Aviation Materials And Technologies №3 (52) 2018, p. 27-34.

## **For various aspects of microencapsulation**

Mamuka Matsaberidze<sup>1</sup>, Inga Janelidze<sup>2</sup>

Professor, Faculty of Chemical Technology and Metallurgy of Georgian Technical University

Association Professor, Faculty of Chemical Technology and Metallurgy of Georgian Technical University

---

### **Abstract**

Microencapsulation as a principle of creating systems for targeted delivery of substances is widely used in the production of various products and preparations. The scientific and practical interest in the problems of microencapsulation is very high, as evidenced by the creation of the international community of microencapsulation. The creation of products and preparations in microencapsulated and gel-like forms is an innovative segment of various fields of scientific and technical activity.

**Key words:** *microencapsulation, programmed and prolonged action pharmaceuticals, flame retardant polymer composite materials, flame retardants, coacervation, microencapsulated forms of pesticides, epoxy microencapsulation, preservation by microencapsulation.*