Junior researchers

ახალგაზრდა მკვლევარები

Vol. 4 Issue 2, 2026

https://doi.org/10.52340/jr.2026.04.02.14



ჩიტოზანზე დაფუძნებული საინჟინრო ფილტრაციის სისტემა მიკროფიბერების შესაკავებლად

მარეხ მაზანაშვილი, ანა თოდრია, გიორგი სურმავა

[1]საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკის და მართის სისტემების ფაკულტეტის საინჟინრო დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი, საინჟინრო ფიზიკის დოქტორი.577091442; marekhi1978@gmail.com

[2]სსიპ ვლადიმირ კომაროვის თბილისის ფიზიკა-მათემატიკის №199 საჯარო სკოლის მე-12 კლასის მოსწავლე. 595887916; anatodria358@gmail.com

[3]სსიპ ვლადიმირ კომაროვის თბილისის ფიზიკა-მათემატიკის №199 საჯარო სკოლის მე-12 კლასის მოსწავლე. 555337703; gsurmava17@gmail.com

აბსტრაქტი

მიკროფიბერები მცირე ზომის ნაწილაკებია (სიგრძეში 1μm-დან 5mm-მდე), რომლებიც ყოველდღიურობაში გვხდებიან. ისინი გამოიყოფიან სინთეტიკური ტანისამოსის ხმარებისა და გარეცხვის პროცესში. ერთ ცალ ტანსაცმელს, ერთი გარეცხვის პროცესში შეუძლია 700,000-მდე მიკროფიბერი გამოყოს.

ისინი საბოლოოდ ხვდებიან ოკეანეში, კვების ჯაჭვსა და ადამიანის ორგანიზმში, შემდგომ კი უკავშირდებიან ანთებით პროცესებს, ენდოკრინულ დარღვევებსა და ონკოლოგიურ რისკებს. ჩვენი კვლევა გვთავაზობს ალტერნატიულ მიდგომას, მიკროფიბერების ზომაში ხელოვნურ გაზრდას ბუნებრივი ბიოკოაგულანტის, ჩიტოზანის, დახმარებით მათი შემდგომი ფილტრაციის გასამარტივებლად. ძმარმჟავაში გახსნილი ჩიტოზანი პროტონირდება და დადებითად იმუხტება, რაც ელექტროსტატიკურად აკავშირებს მას მიკროფიბერების უარყოფითად დამუხტულ ზედაპირთან და წარმოქმნის მსხვილ, ადვილად გასაფილტრ აგრეგატებს.

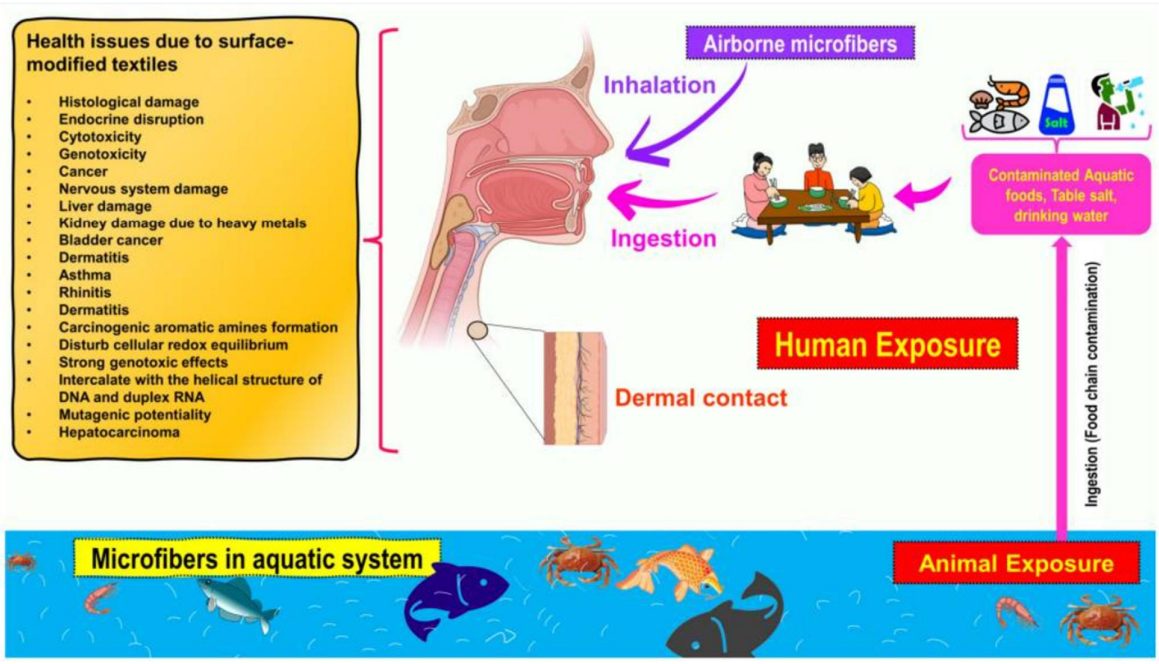
ჩატარდა რამდენიმე ექსპერიმენტი: ჩატარებული ექსპერიმენტები სუფთა წყალსა და ხელოვნურად შექმნილ დანაბინძურებელზე, უშედეგო აღმოჩნდა მოცულობითი და დროითი პარამეტრების უზუსტობის გამო; სარეცხი მანქანიდან გამომდინარე რეალურ ჩამდინარე წყალზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტმა კი დაადასტურა ჰიპოთეზა. მასების აწონვამ აჩვენა, რომ ჩიტოზან-ძმრის ხსნარით დამუშავებულ ნიმუშში ფილტრზე დარჩენილი ნალექის მასა მნიშვნელოვნად აღემატებოდა საკონტროლო ნიმუშებისას. შედეგების საფუძველზე დამუშავდა საინჟინრო მაკეტი Arduino Uno-ზე, პერისტალტიკურ დოზირების ტუმბოსა და ფილტრაციის ბადეზე დაფუძნებული, რომელიც უზრუნველყოფს ჩიტოზანის ავტომატურ დოზირებას სარეცხი მანქანის ციკლის დასრულებისას. გამოთვლილია აგრეთვე

ნივთიერებების უსაფრთხო, გარემოსდაცვითი ნორმების შესაბამისი დოზირება საქართველოს მასშტაბით. კვლევა აჩვენებს, რომ ეკოლოგიური პრობლემის მოგვარება შესაძლებელია იაფი, არატოქსიკური და ბიოდეგრადირებადი საშუალებებით, უშუალოდ დაბინძურების წყაროსთან.

საკვანძო სიტყვები: მიკროფიბერები, ჩიტოზანი, ჩამდინარე წყლების გაწმენდა, კოაგულაცია, ფილტრაცია, მიკროპლასტმასით დაბინძურება, ზეტა პოტენციალი, ბიოპოლიმერები, მოლეკულური მასა, საყოფაცხოვრებო რეცხვის სტატისტიკა, ეკოლოგიური უსაფრთხოება.

შესავალი

მიკროფიბერების შესახებ ცნობიერება გაიზარდა მას შემდეგ რაც გამოაშკარავდა, რომ მიკროფიბერებმა ცხოველების პოპულაციაზე გავლენა მოახდინა. ცნობილია, რომ საკვები ითვლება ადამიანებში მიკროფიბერების მოხვედრის მთავარ წყაროდ, რადგან მარილი, წყალი, ზღვის პროდუქტები და სხვა საკვები ნივთიერებები მათ შეიცავენ. ჩვენს ორგანიზმში მოხვედრის შემდეგ, ისინი იწვევენ ჯანმრთელობის პრობლემებს, როგორიცაა: ანთებითი პროცესები, გენოტოქსიკურობა, ინტერსტიციული ფიბროზი, სიმსივნე (რადგან აზიანებენ დნმ- სა და ხელს უწყობენ სიმსივნეების ზრდას), ასთმა და სხვა მრავალი. აღსანიშნავია, ისიც რომ 2020 წელს მეცნიერებმა ადამიანის პლაცენტაშიც აღმოაჩინეს მიკროფიბერები. (სურათი 1) ეს ყოველივე განპირობებულია ოკეანის დაბინძურებით, რომლის მთავარი წყაროც სარეცხი მანქანებიდან გამომავალი, მიკროფიბერებით სავსე წყალია.



სურათი 1 - მიკროფიბერებთან კონტაქტი ხდება სამი გზით: ჩაყლაპვით, შესუნთქვით და კანთან კონტაქტით. ასევე წარმოდგენილია პოტენციური ჯანმრთელობის რისკები კვების ჯაჭვის და კვების გზით ამ რისკებში შედის: სიმსივნე, ასთმა, ენდოკრინული დარღვევა და სხვა.

ჩვენი პროექტის უნიკალურობა არის აქამდე უცდელი მიდგომა მიკროფიბერების ოკეანეში ჩადინების პრევენციისთვის. ამ მიზნით ჩვენ ვაზავებთ ჩიტოზანს და ძმარს, რომლებიც მიიზიდავენ სარეცხი მანქანაში არსებულ მიკროფიბერებს, გაზრდიან ზომაში და გაამარტივებენ მათი გაფილტვრის პროცესს.

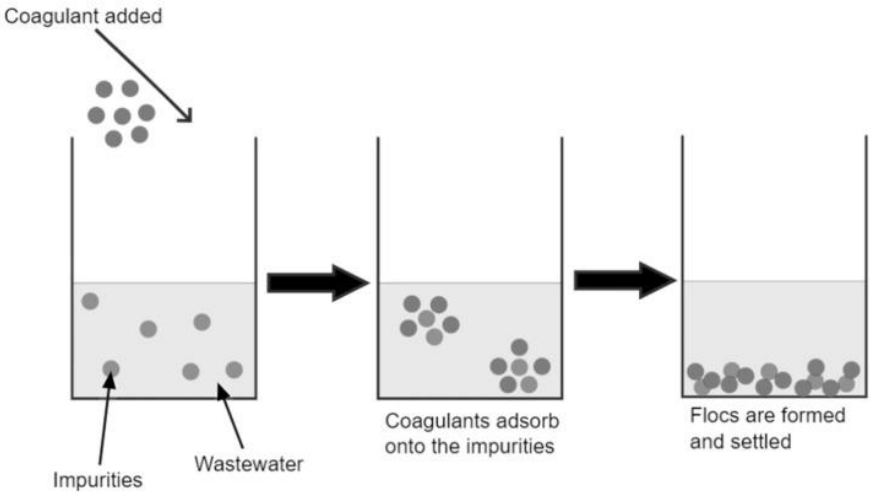
ჩიტოზანი არის ბუნებრივი პოლიმერი, რომელიც ნეიტრალურ pH ზე წყალში არ იხსნება, რადგან მისი მოლეკულური სტრუქტურა მყარია და წყალბადური ბმებითაა შეკრული.

აქედან გამომდინარე ჩვენ ვქმნით ჩიტოზანის გასააქტიურებლად შესაბამის გარემოს. ძმარმჟავას წყალში დამატებით ჩნდება წყალბადის იონები. ჩიტოზანის მოლეკულაში არსებული ამინო ჯგუფები მიითვისებენ ამ იონებს და გარდაიქმნებიან დადებითად დამუხტულ იონებად. შედეგად დადებითად დამუხტული ჯგუფები ერთმანეთს ელექტროსტატიკურად განიზიდავენ, პოლიმერული ჯაჭვები იხსნება, ჩიტოზანი გადადის თხევად ფაზაში და ხდება ბიო-კოაგულანტი ბუნებრივი ბიოდეგრადირებადი ნივთიერება რომელიც სითხეში არსებულ ნაწილაკებს ერთამენთთან შეწებებისკენ უბიძგებს, რათა მათ დალექვა შეძლონ. როდესაც აქტივირებული ჩიტოზანის ხსნარი ერევა სარეცხი მანქანიდან გამომავალ წყალს, ხდება მიკროფიბერების შეერთება

1) დადებითად დამუხტულ ჩიტოზანს სარეცხის წყალში არსებული სინთეტიკური და ბუნებრივი ბოჭკოების უარყოფითად დამუხტული ზედაპირი ეწებება და იწყება შეჯგუფება.

2) ჩიტოზანის გრძელი პოლიმერული ჯაჭვები ერთდროულად ებმება რამდენიმე მიკროფიბერს, ის მოქმედებს როგორც წებო, რომელიც აერთიანებს მათ და ქმნის შედარებით დიდ გროვებს.

3) გარდა ელექტროსტატიკური მიზიდულობისა, ჩიტოზანის ჰიდროქსილის ჯგუფები წარმოქმნიან წყალბადურ ბმებს ბოჭკოების ზედაპირებთან. (სურათი 2) ცალკეული მიკროფიბერის დიამეტრი ძალიან მცირეა, რის გამოც სტანდარტულ ბადეებს უჭირს მათი შეკავება. ჩიტოზანით შექმნილი გროვები კი გაცილებით დიდი ზომისაა, რაც საშუალებას იძლევა გაიფილტროს უკეთესად.



სურათი 2 - კოაგულანტის მუშაობის პრინციპი

რადგან ჩვენი პრიორიტეტია, გადავჭრათ უკვე არსებული პრობლემა ეკოლოგიურად სუფთად უცილებელი იყო გაგვეთვალისწინებინა ჩიტოზანისა და ძმრის ჩადინებული რაოდენობა ოკეანეში, რათა მათ არ შეექმნათ სხვა პრობლემები.
ამ ეტაპზე ჩვენ განვიხილეთ მათი უსაფრთხო დოზა მხოლოდ საქართველოსთვის. GeoStat - ის ყოველწლიური სარეცხი მანქანიდან გამოყოფილი წყლის ინფორმაციის საფუძველზე გამოვიანგარიშეთ ჩიტოზანის რაოდენობის ნორმა. წყაროს მიხედვით ძმარში გახსნილი ჩიტოზანი არის არატოქსიკური და აუცილებელია გათვალისწინებული იქნას მხოლოდ ძმრის ოკეანეში ჩაშვებული რაოდენობა. ECHA-ს მიერ დადგენილი ნორმა 0.306 მგ/ლ ნიშნავს, რომ 1 მილიონ ლიტრ (1000 მ³) საზღვაო წყალში უსაფრთხო მაქსიმალური რაოდენობა არის 306 გრამი სუფთა (100%-იანი) ძმარმჟავა. ვინაიდან ჩვენი გამოყენებული ძმარი მხოლოდ 30%-იანია, 306 გრამი სუფთა მჟავას მისაღებად საჭიროა დაახლოებით 1.02 ლიტრი 30%-იანი ძმარი. მონაცემების მიხედვით საქართველოს 92% - ს აქვს სარეცხი მანქანა და საშუალოდ დღეში 472000 რეცხვის პროცესი მიმდინარეობს. საშუალოდ ოჯახი კვირაში სამჯერ იყენებს სარეცხ მანქანას, ეს ნიშნავს დღიურად 0,49. რადგან 3.94 მილიონის 92 პროცენტი არის 3,6 მილიონი და ოჯახი საშუალოდ მოიცავს 3.3 დამიანს, გამოდის დაახლოებით 1.19 მილიონი ოჯახი. 1.19 მილიონი გამრავლებული საშუალო დღიურ რეცხვის რაოდენობაზე გვაძლევს დაახლოებით 472000 რეცხვის პროცესს. ჩვენ თითოეული პროცესისთვის ვიყენებთ 0.5 მლ ძმარს რაც საბოლოოდ გვაძლევს 236 ლიტრ ძმარს. ეს რიცხვები ჯდება ნორმებში. განვიხილოთ თბილისის მაგალითი, თბილისის დაბინძურებული წყალი ჩაედინება გარდაბნის ჩამდინარე წყლების გამწმენდ ნაგებობაში. სადაც დღური გატარებული წყლის რაოდენობა არის ნახევარი მილიარდი ლიტრი, ზემოდ ნახსენები ფორმულიდან გამომდინარე ეს აწესებს ძმრის 510 ლიტრიან ლიმიტს, ჩვენი გამოყენებული ძმრის რაოდენობა აკმაყოფილებს ამ ნორმას.

მეთოდოლოგია

კვლევის განმავლობაში ჩავატარეთ რამდენიმე ექსპერიმენტი, რათა დაგვედასტურებინა ჩიტოზანის გამოყენების სიზუსტე. პირველი ექსპერიმენტი რომელიც წარუმატებლად შესრულდა მოიცავდა რამდენიმე ეტაპს.

გამოთვლების შედეგად მიღებული მონაცემების საფუძველზე ექსპერიმენტის ჩასატარებლად გამოვიყენეთ 200 მლ წყალი, 1 მლ ძმარი, 2.18 გ ჩიტოზანი, 1.9 მლ სარეცხი ნივთიერება და მიკროფიბერები წყლის დასაბინძურებლად. ექსპერიმენტის განმავლობაში გამოვიყენეთ სხვადასხვა ზომის სინჯარები, სასწორი და ორი ქილა.

პირველ რიგში წყალში მოვათავსეთ ჩვენს მიერ შეგროვებული მიკროფიბერები. მიკროფიბერების გამოყოფა კი მოხდა სინთეტიკური ნაჭრის, სახეხით დანაწევრებით. (სურათი 3)



სურათი 3 - მიკროფიბერების ხელოვნურად შექმნა

ამის შემდეგ ჩვენ უკვე ვიმუშავეთ უშუალოდ ჩიტოზანის ხსნარის დამზადებაზე. როგორც სხვადასხვა კვლევებიდან ჩანს მიკროფიბერები არიან უარყოფითად დამუხტულები, ხოლო ჩიტოზანის ნაწილაკები დადებითად. სწორედ ამის გამო გადავწყვიტეთ ჩიტოზანის გამოყენება რათა მან შეძლოს ნაწილაკების ზომაში გაზრდა მათი მიერთებით, რაც შემდგომ ფილტრაციის პროცესს გაამარტივებს. ჩიტოზანს აქტივიზაციისთვის სჭირდება PH < 6.5 -ის დონე, რადგან წყლის PH არის 7 ჩვენ გადავწყვიტეთ რომ გამოვიყენოთ ორგანული ნივთიერება ძმარი, რომელიც გააქტიურებს ჩიტოზანს.

გამოთვლების ჩატარების შემდგომ ჩვენ წყალს ჩავამატეთ 1 მლ ძმარი რათა Ph-ის დონე შეგვემცირებინა 4.10-მდე.

შემდეგი ნაბიჯები მოიცავდა გამოგვეთვალა რამდენი ჩიტოზანი გვჭირდებოდა ექსპერიმენტისთვის. აღსანიშნავია, რომ ჩიტოზანთან რეაქციაში შედის უშუალოდ ძმარმჟავას მოლეკულები და არა წყალი. ამის გამო აუცილებელია გამოვითვალოთ სუფთა ძმარმჟავას მოცულობა, რადგან ვიპოვოთ რეალურად რამდენი მოლი მჟავა გვაქვს ჩიტოზანის გასააქტიურებლად.

$$v_{pure} = v_{solution} \cdot c$$

V_{pure} - სუფთა ნივთიერება, ძმარმჟავა

$V_{solution}$ - ხსნარის (ძმარის) მოცულობა

C - ნივთიერების კონცენტრაცია (ამ შემთხვევაში 30%)

მოპოვებული რიცხვებით კი გამოვითვალეთ ძმარმჟავას მასა ხსნარში:

$$m_{pure} = v_{pure}\,\mu$$

m_{pure} - ძმარმჟავას მასა ხსნარში

V_{pure} - სუფთა ნივთიერება, ძმარმჟავა

μ -სიმკვრივე

ამ მასის შესაბამისი მოლების რაოდენობის გასაგებად გამოვიყენეთ კიდევ ერთი ქიმიური ფორმულა:

$$n = \frac{m_{pure}}{M}$$

n - მოლების რაოდენობა

M - ძმარმჟავას მოლური მასა

m_{pure} - ძმარმჟავას მასა ხსნარში

1 მოლ ძმარმჟავას შეუძლია გააქტიუროს მხოლოდ 1 მოლი ჩიტოზანი, ამისთვის საჭიროა მათი რაოდენობა ერთმანეთს გავუტოლოთ რათა გავიგოთ ჩიტოზანის მაქსიმალური რაოდენობა რისი გახსნაც შეუძლია ძმარმჟავას.

ამისთვის საჭიროა გამოვითვალეთ ჩიტოზანის მოლური მასა, რადგან ჩიტოზანის ჯაჭვი შედგება ორი ტიპის რგოლისგან დეაცეტილირებული და აცეტილირებული, ამის გამო ჩიტოზანის მოლური მასის გამოსათვლელად აუცილებელია გამოვითვალოთ მათი საშუალო. ამისთვის სხვა უკვე არსებულ კვლევაში მოვიძიეთ ფორმულა:

$$M_{av} = \frac{DDA}{100} M_{gl} + \frac{(100 - DDA)}{100} M_n$$

M_{gl} = 161.16 გ/მოლი

M_n = 203.19 გ/მოლი

DDA - დეაცეტილირების ხარისხი (ჩვენი ჩიტოზანი იყო 85%)

საბოლოოდ კი ჩიტოზანის რაოდენობა გამოისახება ამ ფორმულით

$$M_{\max} = M_{av} \times n$$

მეორე ექსპერიმენტი უკვე ჩავატარეთ არა სუფთა წყალში, არამედ სარეცხი მანქანიდან გამომავალი წყლის მეშვეობით რომელიც შეიცავს სხვადასხვა ქიმიურ ნივთიერებებს. გამოვიყენეთ იგივე გამოთვლები ცვლილება მოიცავდა მხოლოდ რაოდენობებს და მოცულობას, რადგან სარეცხი მანქანიდან გამომავალ წყალს აქვს განსხვავებული Ph. სარეცხი საშუალების რაოდენობა კი გამო ვთვალეთ შემდეგი ფორმულებით:

ISO (International Organization for Standardization) სტანდარტების მიხედვით სარეცხი მანქანაში წყლისა და ქიმიური საშუალებების კონცენტრაცია 1 გ/ლ შეადგენს

$$M_D = c_d \times V_s$$

$$V_D = \frac{M_d}{\mu_d}$$

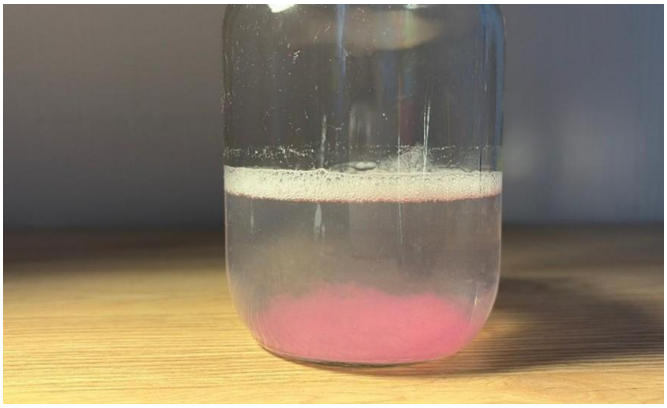
V_D - ქიმიური საშუალების მოცულობა

M_d - ხსნარის მასა

μd - ხსნარის სიმკვრივე

ექსპერიმენტის განმავლობაში ყველა დეტალის სიზუსტისა და რამდენიმე ცდის მიუხედავად ვერ შევძელით დაგვემტკიცებინა ჩიტოზანისა და ძმრის ეფექტურობა. (სურათი 4, 5, 6)

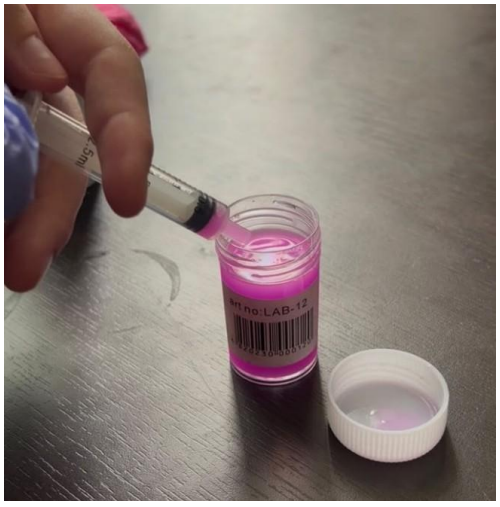
მიზეზს წარმოადგენდა ზედმეტად დიდი ნაწილაკებით დაბინძურებულ წყალს, რის გამოც, ჩვენი პირობების გათვალისწინებით შეუძლებელი იყო მივმხვდარიყავით ჩიტოზანი იზიდავდა თუ არა მიკროფიბერებს რადგან ორივე შემთხვევაში (ჩიტოზანისა და უჩიტოზანო ქილის) ნაწილაკები ილექებოდა. ნაწილაკებს სიდიდის გამო კი ფილტრში გავლა ჩიტოზანის გარეშეც შეეძლოთ. ჩვენი ცდის წარუმატებლობა ასევე განპირობებული იყო სითხის შეყოვნების დროით. თავდაპირველი ექსპერიმენტისთვის სითხე შევაყოვნეთ 5 წუთით. თუმცა შემდგომი მოძიებული ინფორმაციით დავადგინეთ, რომ ჩიტოზანს ძმართან გასახსნელად სჭირდებოდა 6-24 საათი, რის გამოც მივიღეთ გადაწყვეტილება, რომ ჩიტოზანის და ძმრის ხსნარი წინასწარ გაგვეკეთებინა და შემდეგ ჩაგვეწვეთებინა დაბინძურებულ სითხეში.



სურათი 4 - დალექილი ჩიტოზანი და მიკროფიბერები



სურათი 5 - ჩიტოზანის ზუსტი მასის გათვლა ექსპერიმენტისთვის



სურათი 6 - ქიმიური საშუალების ზუსტი რაოდენობის აღება

პრობლემის აღმოსაფხვრელად, გადავწყვიტეთ, რომ უფრო ზუსტი სუბიექტი, დაბინძურებული წყალი გამოგვეყენებინა. სარეცხი მანქანის გამომავალი მილიდან ჩვენ შევძელით რომ ამოგვეღო 500 მლ წყალი. წყალი თანაბრად გადავანაწილეთ ორ ქილაში (250 მლ), ერთი (ქილა 1) ქილა დავტოვეთ ხელუხლებელი (გამოთვლების შესაბამისი რაოდენობა), ხოლო მეორეში (ქილა 3) ჩავყარეთ წინასწარ გამზადებული ძმარი და ჩიტოზანი. ასევე ექსპერიმენტის სიზუსტისთვის გამოვიყენეთ მესამე ქილა (ქილა 2) სადაც სრულიად სუფთა წყალში ჩავყარეთ ჩიტოზანისა და ძმრის ნაზავი.

წყლის გარემოში არსებული ბუნებრივი თუ სინთეზური მიკროფიბერები ხასიათდებიან მაღალი სპეციფიკური ზედაპირის ფართობით და სპეციფიკური ზედაპირული მუხტით. წყალთან კონტაქტისას, მიკროფიბერების ზედაპირზე არსებული ფუნქციური ჯგუფების დეპროტონირების (მაგალითად, კარბოქსილის -COOH → -COO^- ან სულფონის ჯგუფების) ან იონების სელექციური მიღების შედეგად, მიკროფიბერები იძენენ მყარ უარყოფით მუხტს. ეს ზედაპირული მუხტი სითხეში იზიდავს საპირისპიროდ დამუხტულ იონებს (კატიონებს) და მათ გარშემო აყალიბებს ე.წ. ელექტრულ ორმაგ ფენას (Electrical Double Layer - EDL). ამ ფენის ფარგლებში არსებულ ჰიდროდინამიკურ სიბრტყეს გააჩნია ელექტრული პოტენციალი, რომელსაც კოლოიდურ ქიმიაში ზეტა პოტენციალი (ζ) ეწოდება.

მოცემულ სისტემაში, მიკროფიბერების უარყოფითი ზეტა პოტენციალი მოქმედებს როგორც სტაბილიზაციის მთავარი ფაქტორი: მუხტების ერთგვაროვნების გამო, ბოჭკოები ერთმანეთს ელექტროსტატიკურად განიზიდავენ.ეს განზიდვის ძალა მნიშვნელოვნად აღემატება ბუნებრივ მიზიდულობის ძალებს, რაც ხელს უშლის ბოჭკოების ბუნებრივ კოაგულაციას და ანარჩუნებს მათ სტაბილურ, გაფანტულ მდგომარეობაში. დაბინძურებული წყლიდან ამ მიკროფიბერების მოსაცილებლად აუცილებელია აღნიშნული კოლოიდური სტაბილურობის დარღვევა (დესტაბილიზაცია), რაც მიიღწევა ელექტროსტატიკური მუხტის სრული ნეიტრალიზაციით.

მიკროფიბერების უარყოფითი მუხტის კომპენსირების მიზნით, კვლევაში გამოყენებულია ბუნებრივი, გარემოსთვის უსაფრთხო ბიოპოლიმერული კოაგულანტი ჩიტოზანი (85%-იანი დეაცეტილირების ხარისხით). ჩიტოზანი არის ხაზოვანი პოლისაქარიდი. ნეიტრალურ ან ტუტე წყალში ჩიტოზანი არაპროტონირებულია და წყალში უხსნადია. თუმცა, განზავებულ მჟავე გარემოში მოხვედრისას (სადაც pH < 6.5), ხსნარში არსებული თავისუფალი წყალბადის იონები (H^+) უკავშირდებიან ამინოჯგუფებს, რის შედეგადაც ხდება ჩიტოზანის მაკრომოლეკულის ქიმიური აქტივაცია და პროტონირება დადებითად დამუხტულ ამონიუმის იონებად. ვინაიდან მოცემული ჩიტოზანის დეაცეტილირების ხარისხი არის 85%, ეს ნიშნავს, რომ პოლიმერული ჯაჭვის ყოველი 100 მონომერული რგოლიდან 85 ატარებს პოტენციურ დადებით მუხტს მჟავე არეში. ეს თვისება მას ანიჭებს მაღალ კატიონურ მუხტის სიმკვრივეს. ასეთი მაღალი დადებითი მუხტი უზრუნველყოფს იმას, რომ პოლიმერის მოლეკულები მყისიერად და მყარად მიეკროს უარყოფითად დამუხტულ მიკროფიბერებზე "მუხტის დაკერების" (charge patching) და ნაწილაკთაშორისი ხიდების წარმოქმნის (bridging) მექანიზმებით.ჩიტოზანით მიკროფიბერების ნეიტრალიზაციის პროცესი ეფუძნება 1:1

სტოქიომეტრული მუხტის ბალანსის კანონს. სისტემაში კატიონური პოლიმერისა და ანიონური ბოჭკოების ურთიერთქმედება რაოდენობრივად აღიწერება მუხტების შერევის უნივერსალური მოდელით

$$Z = \frac{n_+}{n_-} = \frac{q_{ჩიტოზანი} \times M_{ჩიტოზანი}}{q_{ბოჭკო} \times M_{ბოჭკო}}$$

სადაც: Z წარმოადგენს მუხტების ჯამურ ფარდობით კოეფიციენტს სისტემაში.n_+ და n_- არის შესაბამისად დადებითი და უარყოფითი მუხტების საერთო რაოდენობა მოლებში (ექვივალენტებში). $M_{ჩიტოზანი}$ არის სისტემაში შეყვანილი აქტივირებული ჩიტოზანის მშრალი მასა (მგ). $q_{ჩიტოზანი}$ ჩიტოზანი არის 85%-იანი დეაცეტილირებული ჩიტოზანის სპეციფიკური კატიონური მუხტის სიმკვრივე მჟავე არეში. $M_{ბოჭკო}$ არის დაბინძურებულ წყალში არსებული მიკროფიბერების მასა (მგ). $q_{ბოჭკო}$ არის მიკროფიბერების სპეციფიკური ზედაპირული ანიონური მუხტის სიმკვრივე. როდესაც Z < 1: სისტემაში დადებითი მუხტების დეფიციტია. მიკროფიბერების ზედაპირზე არსებული უარყოფითი მუხტები მხოლოდ ნაწილობრივ კომპენსირდება. ზეტა პოტენციალი რჩება უარყოფითი (< 0 mV), ელექტროსტატიკური განზიდვა კვლავ ძლიერია და ბოჭკოები ინარჩუნებენ სტაბილურობას.როდესაც Z > 1: ხდება ე.წ. "ზედოზირება" ანუ მუხტის ცვლილება. ჩიტოზანის ჭარბი მასა მთლიანად ფარავს ბოჭკოს ზედაპირს, რის შედეგადაც სისტემის ჯამური ზეტა პოტენციალი ხდება მკვეთრად დადებითი (> +30 mV). ბოჭკოები ახლა უკვე დადებითი მუხტებით განიზიდავენ ერთმანეთს, ხდება მათი რესტაბილიზაცია და კლასტერები კვლავ იშლება.როდესაც Z = 1: სისტემა აღწევს იზოელექტრულ წერტილს. ამ მომენტში ჩიტოზანის დადებითი იონების რაოდენობა მათემატიკურად და ფიზიკურად უტოლდება მიკროფიბერების უარყოფით იონებს. ამ ბალანსის დროს ელექტროსტატიკური ველები მთლიანად ქრება და სისტემის ჯამური ზეტა პოტენციალი ხდება ზუსტად 0 mV. კოლოიდური განზიდვის ძალების გაქრობის გამო, მიზიდულობა ხდება დომინანტური, მიკროფიბერები მყისიერად უკავშირდებიან ერთმანეთს, ქმნიან მსხვილ კლასტერებს (აგრეგატებს) სწრაფად ილექებიან წყალში.

მცირე მოცულობის მქონე ექსპერიმენტებში ჩიტოზანის მიკროგრამული მასების პირდაპირი აწონვა იწვევს დიდ ცდომილებებს. სიზუსტის მაქსიმალური დაცვის მიზნით, კვლევაში გამოიყენება საფეხურებრივი დოზირების მეთოდი წინასწარ მომზადებული ხსნარის მეშვეობით, რომლის კონცენტრაციაც არის 1 მგ/მლ.ექსპერიმენტებისთვის საჭირო 15 მგ აქტივირებული ჩიტოზანის მისაღებად, გაანგარიშება ხდება შემდეგნაირად:საჭირო წყლის მოცულობა: 1 მგ/მლ კონცენტრაციის მისაღებად, 15 მგ მშრალი ფხვნილისთვის საჭიროა ზუსტად 15 მლ დეიონიზებული წყალი.ძმარმჟავას საჭირო რაოდენობა: 0.5 მლ.

$$V_1 = \frac{V_2 \times C_2}{C_1}$$

C1 - საწყისი მჟავას პროცენტულობა(30%)

V1 - დასამატებელი 30% - იანი მჟავას მოცულობა(მლ)

C2 - ხნარში მჟავას სასურველი საბოლოო კონცენტრაცია

V2 - ხნარის საერთო საბოლოო მოცულობა

სასწორზე აიწონება ზუსტად 15 მგ მშრალი ჩიტოზანის (85% DD) ფხვნილი და თავსდება ჭიქაში. ჭიქაში ჯერ ისხმება წყალი, ხოლო შემდეგ ემატება 0.5 მლ 30% იანი მმარმჟავა. ხდება მიღებული ნარევის არევა ოთახის ტემპერატურაზე 1.5 - 2 საათის განმავლობაში, პოლიმერის სრულ ჰომოგენიზაციამდე და ამინოჯგუფების მაქსიმალურ პროტონირებამდე. მიღებული სამუშაო ხსნარის ყოველი 1 მლ შეიცავს ზუსტად 1 მგ აქტივირებულ ჩიტოზანს.

ჩიტოზანისა და ძმრის ნაზავში ელემენტების ოდენობა უკვე არსებული ფორმულებით გამოვთვალეთ. 30% 0.5 მლ ძმარი გავაზავეთ 15 მგ ჩიტოზანთან და 15 მლ წყალთან.



სურათი 7 15 წუთიანი დაყოვნების შემდეგ კი ქილები ასე გამოიყურებოდა (სურათი 8)



სურათი 8

ექსპერიმენტის შემდეგი ეტაპი მოიცავდა ქილების ფილტრში გატარებას. ჩვენ ფილტრისთვის გამოვიყენეთ სამედიცინო ბინტი.

ქილაში სადაც მხოლოდ დაბინძურებული წყალი იყო მოთავსებული (ქილა 1) სითხემ ბოლომდე გაიარა რაც ნიშნავს იმას, რომ სარეცხი მანქანიდან გამომავალ წყალში მიკროფირები იმდენად მცირეა, რომ ფილტრმა მათი შეჩერება ვერ შეძლო. (სურათი 9)



სურათი 9 - ქილა 1-ის შემთხვევაში ფილტრზე დარჩენილი ნალექი და გაფილტრული წყალი

მეორე ქილის შემთხვევაში (ქილა 2) სადაც სუფთა წყალი და ძმარში გახსნილი ჩიტოზანი მოვათავსეთ, ფილტრზე მცირე რაოდენობის ნალექი დარჩა, დანარჩენი კი ფილტრმა გაატარა. (სურათი 10)



სურათი 10 - ქილა 2-ის შემთხვევაში ფილტრზე დარჩენილი ნალექი და გაფილტრული წყალი

ქილაში სადაც დაბინძურებული წყალი და ჩიტოზანი იყო (ქილა 3), ფილტრმა თვალნათლივ შეასრულა მისი დანიშნულება, წყალი გაიფილტრა. მეორე ქილის (ქილა 2) და მისი შედეგის (სურათი 10) გამომდინარე შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ფილტრზე დარჩენილი ნალექი არ არის მხოლოდ ჩიტოზანი რადგან, მხოლოდ ჩიტოზანის შეჩერება ფილტრმა ვერ შეძლო. ნალექი მიკროფიბერებისა და ჩიტოზანის ერთობლივი მასაა.



სურათი 11 - ქილა 3-ის შემთხვევაში ფილტრზე დარჩენილი ნალექი და გაფილტრული წყალი რათა დავრწმუნებულიყავით ჩვენი ექსპერიმენტის სიზუსტეში ჩვენ არ დავეყრდენით მხოლოდ ვიზუალურ ნაწილს. ჩიტოზანის საწყისი მასა ორივე, ქილა 2-სა და ქილა 3-ის შემთხვევაში შეადგენდა ~ 15 მგ- ს. (სურათი 12)



სურათი 12 - ორივე ქილაში ჩაიყარა თანაბარი რაოდენობის ჩიტოზანი

საწყისი ჩიტოზანისა და საბოლოო, ფილტრზე დარჩენილი ნალექის მასების შესადარებლად, პირველ რიგში ჩვენ ავწონეთ თითოეული ფილტრის მასა. პირველი ქილის (ქილა 1) გაფილტრვამდე სამედიცინო ბინტის წონა შეადგენდა 6.65გ, მეორე ქილის (ქილა 2) 7.1გ და მესამესას (ქილა 3) 7.550გ . ამის შემდეგ ჩვენ ავწონეთ ფილტრები ქილების გაფილტვრის შემდეგ. ქილა 1-ის ფილტრის მასამ შეადგინა 14.850გ, ქილა 2-ის. 19.69გ და ქილა 3-ის 25.84გ. მეორე შემთხვევისას მოცემული მასები შეადგენს ფილტრის, ფილტრზე დარჩენილი წყლისა და ნალექის მასას. ჩვენ თუ ამ მასას გამოვაკლებთ თავდაპირველად მოცემული ფილტრების მასას მივიღებთ დარჩენილი ნალექისა და წყლის მასას პირველი ქილის შემთხვევაში მათი მასა გამოვიდა 8.2 გ, მეორე ქილის შემთხვევაში 12.59გ ხოლო მესამე შემთხვევაში 15.44გ. რადგან ქილა 2 - შიც დარჩა ნალექი ეს მიგვანიშნებს იმას, რომ სუფთა წყალშიც არის მიკროფიებრები და რადგან მესამე ქილის მასა იყო ყველაზე დიდი მასზე დარჩა როგორც ბევრი მიკროფიბერი დაბინძურებული წყლისგან და მათთან შეერთებული ჩიტოზანიც, ეს ყველაფერი კი ადასტურებს, რომ ჩიტოზანისა და ძმრის ხნარმა ნამდვილად მიიერთა მიკროფიბერები.

შედეგი

ჩვენი კვლევის მთავარი მიზანია ეკოლოგიურად სუფთად, გარემოს დაზიანების გარეშე შევძლოთ მიკროფიბერების შემცირება ოკეანეში. ამ ნივთიერებების ერთმანეთთან შეზავებით როგორც ვხედავთ მივიღეთ დადებითი შედეგი, რაც იმას ნიშნავს, რომ კვლევითი ნაწილიდან შეგვიძლია გადავიდეთ საინჟინრო ეტაპებზე.

თვეების განმავლობაში ჩვენ აქტიურად ვმუშაობდით საინჟინრო ნაწილის გამოკვლევაზე, წავიკითხეთ არაერთი კვლევა. ჩვენი თავდაპირველი ვერსია იყო შემდეგი: degasser-ის გამოყენებით ვაცალკევებდით ქაფს წყლისგან, რათა შემდგომ გამოყენებულ ულტრაბგერით ტალღებს ეფექტურად ემუშავათ. ამის შემდეგ წყალს ემატებოდა კოაგულანტი ჩიტოზანი, რომელიც მიკროფიბერებს ერთიან, მძიმე მასად გარდაქმნიდა. სისტემის მთავარი ნაწილი იყო აკუსტიკური კამერა, სადაც ულტრაბგერითი ტალღები ნაწილაკებს ნაკადის ცენტრში აქცევდა, საბოლოოდ კი ისინი ჰიდროციკლონში ხვდებოდნენ სადაც წყლის ნაკადს გამოეყეფოდნენ. პროცესს მართავდა არდუინო, რომელიც რეცხვის ბოლოს ააქტიურებდა ელექტროსარქველს და ნარჩენებს ავტომატურად დევნიდა ჰერმეტულ კაფსულაში.

ამ ნაწილზე მუშაობის შემდეგ აღმოვაჩინეთ ძალიან ბევრი პრობლემა, რაც შეუძლებელს ხდიდა ამ პროექტის განხორციელებას. ესენი იყო degasser - ის დიდი ზომა და არაზუსტი გამოყენება, რაც შეუძლებელს გახდიდა მის სარეცხი მანქანაში ჩამონტაჟებას. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად და ფიქრის შედეგად გადავწყვიტეთ, რომ გამომავალი მილის შიდა ზედაპირზე დაგვემონტაჟებინა ბადე, რომელიც შეამცირებდა ქაფის რაოდენობას, და არ შეაკავებდა მიკროფიბრებსა და ჩიტოზანს.

ჩვენი მუშაობის შემდეგი ეტაპი მოიცავდა ჰიდროციკლონის გამოკვლევას. წავიკითხეთ სხვადასხვა სტატიები და კარგად შევისწავლეთ ჰიდროციკლონის მუშაობის პრინციპი. სამწუხაროდ წავაწყდით ბევრ უსიამოვნო ინფორმაციაც რაც მოიცავდა იმას, რომ

ჰიდროციკლონს არ შეეძლო მცირე ნაწილაკების სითხისგან განცალკევება. ამის შემდგე ჩვენ მცირე ზომის ჰიდროციკლონებიც მოვიძიეთ, თუმცა მის გამოყენებას შესაძლოა გამოეწვია ჩიტოზანისა და მიკროფიბერების გაერთიანებული მასის დაშლა, რაც ჩვენ მიზანს არ შეესაბამებოდა.

როგორც ჩვენი თავდაპირველი ჩიტოზანის ექსპერიმენტის უშედეგო სურათმა არ დაგვხია უკან, და ექსპერიმენტი ჩავატარეთ 10-15 ჯერ რათა დავრწმუნებულიყავით ჩვენ სიზუსტესა და აღმოგვეჩინა თუ რა გვაბრკოლებდა. ჩვენ ინჟინრულ მოდელშიც არაერთი ცვლილება შევიტანეთ. შეიცვალა ჩვენი საბოლოო სტრუქტურა, თუმცა ჩიტოზანის წარმატებით მუშაობისა და ჩვენი ინჟინრული შესაძლებლობების გათალისწინებით შევძელით, რომ შეგვექმნა სისტემა, რომელიც იქნებოდა ეკოლოგიურად სუფთა, გადაჭრიდა არსებულ პრობლემას და გაამტკიცებდა ჩიტოზანზე არსებულ კვლევებს.

Arduino Uno, მოტორ-დრაივერი, 12V პერისტალტიკური დოზირების ტუმბო, 12V/2A კვების ბლოკი , მავთულები, ბრედბორდი, სამაგრების და სილიკონის მილაკის დახმარებით ჩვენ შევძელით, რომ შეგვექმნა ინოვაციური საინჟინრო მაკეტი, რომელმაც გააერთიანა ჩიტოზანზე კვლევები, გაამტკიცა ჩვენი ექსპერიმენტი და გააუმჯობესა არსებული ფილტრაციის სისტემები.

ჩვენს კვლევაში ასევე აუცილებელია გათვალისწინებული იქნას პოტენციური პრობლემა, პოტენციური პრობლემა, რომელიც მოიცავს ჩიტოზანის ხსნარის არასწორ დოზირებას, დოზირების ცდომილებამ შეიძლება გამოიწვიოს ჩიტოზანის არასრული აქტივიზაცია, რაც ცხადია შედეგებზე გავლენას მოახდენს.

დასკვნა

ჩვენს გამოგონებას პირდაპირი, გარდამტეხი გავლენა აქვს კვებით ჯაჭვზე. მიკროფიბერების ეფექტური მართვა საგრძნობლად შეამცირებს წყლისა და საკვების მიკროფიბერებით დაბინძურებას, ხოლო ორგანიზმში ტოქსიკური ნივთიერებების კონცენტრაციის შემცირება ხელს შეუწყობს ადამიანების ჯანმრთელობისა და სიცოცხლის ხარისხის გაუმჯობესებას. გარდა ამისა, პროექტი ცვლის თავად მიდგომას საყოფაცხოვრებო ტექნიკის მიმართ. ის აჩვენებს, რომ ეკოლოგიური საფრთხეების მოგვარება შესაძლებელია უშუალოდ საწყის ფაზაში, ნივთიერებების გამოყოფის ადგილას.

ჩვენი კვლევა ასევე ხაზს უსვამს, რომ ინდუსტრიული პრობლემების მოგვარება შესაძლებელია ქიმიკატების გარეშე, ბუნებრივი და ბიოდეგრადირებადი შემადგენლობით. ეს ქმნის ახალ სტანდარტს, სადაც ტექნოლოგიური პროგრესი გარემოს დაზიანების ხარჯზე არ მიიღწევა, არამედ ბუნებრივი რესურსების გონივრულ და უსაფრთხო გამოყენებით. შედეგად ვიღებთ ეკონომიურად ხელმისაწვდომ გამოსავალს, რომელიც მარტივად ინტეგრირდება არსებულ საყოფაცხოვრებო სისტემებში

გამოყენებული ლიტერატურა

Aranaz, I.; Alcántara, A.R.; Civera, M.C.; Arias, C.; Elorza, B.; Heras Caballero, A.; Acosta, N. Chitosan: An Overview of Its Properties and Applications. Polymers 2021, 13, 3256.

Brodde, K. (2019, November 6). What are microfibers and why are our clothes polluting the oceans? Greenpeace International.

Periyasamy AP. Microfiber Emissions from Functionalized Textiles: Potential Threat for Human Health and Environmental Risks. Toxics. 2023 Apr 24;11(5):406. doi: 10.3390/toxics11050406. PMID: 37235219; PMCID: PMC10221355.

Thermo Fisher Scientific. (2023, September 29). Chitosan Safety Data sheet (revision 6) (Safety Data Sheet Revision 6). Thermo Fisher Scientific.

Aranaz I, Alcántara AR, Civera MC, Arias C, Elorza B, Heras Caballero A, Acosta N. Chitosan: An Overview of Its Properties and Applications. Polymers (Basel). 2021 Sep 24;13(19):3256. doi: 10.3390/polym13193256. PMID: 34641071; PMCID: PMC8512059.

Coleman, C.K.; Oza, H.H.; Bailey, E.S.; Sobsey, M.D. A Review of Chitosan as a Coagulant of Health-Related Microorganisms in Water and Wastewater. Environments 2024, 11, 211.

Nice, S. (2024, August 5). Best mushroom Chitosan: Eco-friendly water treatment - 2025. Chitosan Global.

Why microfiber is a cleaning revolution? (2018, October 26). IPC.

Yan D, Li Y, Liu Y, Li N, Zhang X, Yan C. Antimicrobial Properties of Chitosan and Chitosan Derivatives in the Treatment of Enteric Infections. Molecules. 2021 Nov 25;26(23):7136. doi: 10.3390/molecules26237136. PMID: 34885715; PMCID: PMC8659174.

Aranaz I, Alcántara AR, Civera MC, Arias C, Elorza B, Heras Caballero A, Acosta N. Chitosan: An Overview of Its Properties and Applications. Polymers (Basel). 2021 Sep 24;13(19):3256. doi: 10.3390/polym13193256. PMID: 34641071; PMCID: PMC8512059.

Hui, Q., Xiuling, S., Xuedi, Z., Chao, Y., & Peiyue, L. (2010). Calculation of pH values for mixed waters. Journal of Chemistry, 8(2), 657–664. https://doi.org/10.1155/2011/391396

Amamou O, Denis JP, Heinen É, Boubaker T, Cardinal S. A New and Rapid HPLC Method to Determine the Degree of Deacetylation of Glutaraldehyde-Cross-Linked Chitosan. Molecules. 2023 Oct 27;28(21):7294. doi: 10.3390/molecules28217294. PMID: 37959714; PMCID: PMC10647662.

Hong, M. (n.d.). What is Zeta Potential? -1: Introduction to Zeta Potential Measurement. Malvernpanalytical.Com. Retrieved October 28, 2026

Melro, E.; Antunes, F.E.; da Silva, G.J.; Cruz, I.; Ramos, P.E.; Carvalho, F.; Alves, L. Chitosan Films in Food Applications. Tuning Film Properties by Changing Acidic Dissolution Conditions. Polymers 2021, 13, 1