

ნინო მხეიძე, რაულ გოცირიძე, რუსლან დავითაძე, ანა ხახუტაიშვილი

*ნავთობით დაბინძურებული წყლების გაწმენდის
კომპლექსური ტექნოლოგიები*

ბათუმი

2026

ანოტაცია

მონოგრაფიაში განხილულია ნავთობითა და ნავთობპროდუქტებით დაბინძურების ეკოლოგიური ასპექტები, ნავთობის დაღვრის ლიკვიდაციის გზები, აგრეთვე საწარმოო და ჩამდინარე წყლების გაწმენდის ტრადიციული და თანამედროვე მეთოდები. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ნავთობნახშირწყალბადების მდგრადი ემულსიების გაწმენდას, რომლის ეფექტური დამუშავება მნიშვნელოვან ტექნოლოგიურ სირთულეს წარმოადგენს.

კვლევის სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს კომპლექსური „მწვანე“ ტექნოლოგიის შემუშავებასა და ექსპერიმენტულ კვლევაში, რომელიც აერთიანებს სორბციულ წინასწარ გაწმენდასა და ბარომემბრანულ პროცესს. პირველ ეტაპზე გამოყენებულია ადგილობრივი მცენარეული ნარჩენის — ხის ნახერხისა და მეორადი პოლიმერული ნარჩენის — პოლიურეთანის საფუძველზე მიღებული სორბენტები, ხოლო მეორე ეტაპზე მემბრანული ფილტრაციისთვის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტის აგრარული და მემბრანული ტექნოლოგიების ინსტიტუტის მემბრანული ტექნოლოგიების განყოფილებაში სინთეზირებული პოლიმერული ულტრაფილტრაციული მემბრანები.

კვლევა დაფუძნებულია ისეთ მაღალტექნოლოგიურ და სტანდარტიზებულ მეთოდებზე, როგორიცაა გაზქრომატოგრაფია (GC Thermo TRACE 1310), ფურიე-ტრანსფორმაციის ინფრაწითელი სპექტროსკოპია (FTIR Shimadzu IRSpirit, ASTM D7575-11 არაექსტრაქციული მეთოდი), კაპილარული ნაკადის ფორომეტრია (POROLUX 500, ASTM Standard F316-03) და მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპია (SEM Phenom XL).

წარმოდგენილია ღირებული ექსპერიმენტული მონაცემები 13-ზე მეტი სახეობის ხის ნახერხის, მეორადი პოლიმერების (პოლიურეთანი, პოლისტიროლი და ა.შ.) და სინთეზირებული პოლიმერული მემბრანების (პოლისულფონი PSU, პოლიოქსადიაზოლი POD, კომპოზიტები გრაფენის ოქსიდით GO) ფიზიკურ-ქიმიური და ფილტრაციული პარამეტრების შესახებ.

მიღებული შედეგების მიხედვით, შემოთავაზებული კომბინირებული ტექნოლოგია უზრუნველყოფს წყლის ღრმა გაწმენდას ნავთობპროდუქტებისგან (**99,8%-ზე მეტი ეფექტურობით**) ნარჩენი კონცენტრაციით **<0,1 მგ/ლ**.

მონოგრაფიის პრაქტიკული მნიშვნელობა მდგომარეობს ნავთობით დაბინძურებული წყლების მრავალსაფეხურიანი გაწმენდისათვის რესურს დამზოგავი და ეკოლოგიური ტექნოლოგიური სქემის შემუშავებაში, რომელიც ამცირებს მემბრანაზე დამაბინძურებლების დატვირთვას, ხელს უწყობს დაბინძურების (Fouling) შემცირებას და ამაღლებს საბოლოო გაწმენდის ხარისხს.

მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სამრეწველო საწარმოების დაპროექტებისა და ჩამდინარე წყლების გაწმენდის სისტემების შექმნისას, აგრეთვე ნავთობპროდუქტებით წყლისა და ნიადაგის დაბინძურების პრევენციისა და გარემოსდაცვითი ღონისძიებების დაგეგმვისათვის.

აღნიშნული პროექტი განხორციელდა შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური ხელშეწყობით (გრანტი **FR 22-2857** „ეკოლოგიურად სუფთა, უნარჩუნო ტექნოლოგიის შემუშავება ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლის გაწმენდისათვის“). წინამდებარე პუბლიკაციაში გამოთქმული ნებისმიერი აზრი ეკუთვნის ავტორებს და შესაძლოა არ ასახავდეს შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის შეხედულებებს.

რეცენზენტები

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის გარემოსდაცვითი ინჟინერიისა და ეკოლოგიის დეპარტამენტის პროფესორი, საქართველოს საინჟინრო აკადემიის წევრ-კორესპონდენტი ჯიმშერ ქერქაძე.

ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ტექნოლოგიური ფაკულტეტის ტექნოლოგიებისა და საინჟინრო მენეჯმენტის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, პროფესორი დავით ჩხეიძე.

სარჩევი

შესავალი

1. ნავთობი და ეკოლოგია

2. ნავთობის და ნავთობპროდუქტების შემცველი ტექნოლოგიური წყლების გაწმენდის მეთოდები

3. შესავალი მემბრანულ ფილტრაციაში

3.1 მემბრანებისა და მემბრანული პროცესების ძირითადი მახასიათებლები

3.2 მემბრანული ფილტრაციის ტიპები

3.3 ფილტრაციის ჩატარების ხერხები

3.4 პოლიმერული მემბრანების ფორმირება ფაზათა ინვერსიის მეთოდით

3.5 მოთხოვნები პოლიმერული მემბრანებისადმი

3.6 მემბრანების ფორების დაბლოკვა (membrane blocking) და მისი თავიდან აცილების გზები

3.7 პოლიმერული მემბრანების ფლორენობა და ფორების ზომების განსაზღვრა

გამოყენებული ლიტერატურა

4. სამეცნიერო ლიტერატურის მიმოხილვა

4.1 ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების (ნ/პ) შემცველი წყლების გაწმენდა

4.2 ჩამდინარე წყლების ნავთობისა და ნ/პ-დან სორბციული გაწმენდის თანამედროვე მიდგომები

4.3 მეორადი პოლიმერული მასალების გამოყენება სორბენტის სახით

4.4 ნავთობის დაღვრის ლიკვიდაცია სორბენტების გამოყენებით

4.5 ნავთობით და ნ/პ -ით დაბინძურებული წყლების გაწმენდა მემბრანული ფილტრაციის მეთოდებით.

4.6 მემბრანების მოდიფიცირება

გამოყენებული ლიტერატურა

5. ექსპერიმენტული ნაწილი

5.1 კვლევის მეთოდები

5.2 მცენარეული სორბენტების გამოცდა

5.3 სორბცია მეორად პოლიმერულ ნარჩენებზე

5.4 ნავთობნახშირწყალბადებით დაბინძურებული წყლების გაწმენდა მემბრანული ფილტრაციის მეთოდით

6. დასკვნები და რეკომენდაციები

დანართები

დანართი 1. ტექსტში გამოყენებული შემოკლებები

დანართი 2. პოლიმერული მემბრანების კვლევის შედეგები

შესავალი

საწარმოებისა და სატრანსპორტო საშუალებების მკვეთრმა მატებამ გამოიწვია ნავთობპროდუქტებზე მოთხოვნილების გაზრდა, რაც ზრდის ამ პროდუქტებით ჰაერის და განსაკუთრებით წყლის დაბინძურების ალბათობას. წყლის ნავთობპროდუქტებით დაბინძურების ძირითად წყაროს წარმოადგენს: მომპოვებელი და ნავთობგადამამუშავებელი საწარმოები, ნავთობპროდუქტების გადაქაჩვის და ტრანსპორტირების სისტემები, მაგისტრალები, ტანკერები, ტერმინალები და ნავთობის ბაზები, ნავთობპროდუქტების საცავები, ავტოგასამართი კომპლექსები და სადგურები.

ნავთობპროდუქტებით დაბინძურების პოტენციური წყაროებია ნავთობის მილსადენი და ენერგომატარებლის ტერმინალები, კერძოდ, ნავთობის მაგისტრალური მილსადენი „ბაქო-სუფსა“, რომელიც საქართველოში აზიის ნავთობის ევროპის ქვეყნებში ტრანსპორტირების პრობლემის გადასაჭრელად აშენდა და ფუნქციონირებს.

სუფსის საზღვაო ტერმინალის გარდა რეგიონში ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების ტერმინალი განლაგებულია და ფუნქციონირებს ყულევში- „შავი ზღვის ტერმინალი“ („Black Sea Terminal“), ბათუმში-„ბათუმის ტერმინალი“ („Batumi Oil Terminal“) და ფოთში „ჩენელ ენერჯი“ („Channel Energy“).

ნავთობისგან ჩამდინარე წყლების გაწმენდა სიძნელეებთან არის დაკავშირებული, რადგანაც ნავთობპროდუქტი იმყოფება ემულგირებულ მდგომარეობაში და წარმოადგენს საკმაოდ მდგრად ემულსიას - „ნავთობი წყალში“.

დღეისათვის ნავთობპროდუქტებიდან წყლის გასუფთავების მეთოდებიდან ძირითადად გამოიყენება მექანიკური და ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდები: კოაგულაცია, ფილტრაცია, ადსორბცია, მიკრო- და ულტრაფილტრაცია. საყურადღებოა ასევე ბიოლოგიური და ქიმიური მეთოდებიც, რომელთა უმრავლესობა ეფექტურია, მაგრამ ამ მეთოდების ნაკლია დანადგარების არაეკოლოგიურობა, სორბენტის და გამფილტრავი მასალის უტილიზაციის პრობლემა, გაწმენდის შედეგად მიღებული ადსორბენტი იწვევს წყლების და ნიადაგის შემდგომ დაბინძურებას, ე. ი. ხდება გარემოს მეორადი დაბინძურება.

გამოსავალი ახალი ეფექტური ტექნოლოგიების შემუშავება და დანერგვაა, რომელიც უზრუნველყოფს ნავთობით და ნავთობპოდუქტებით დაბინძურებული წყლის გაწმენდას მინიმალური დანახარჯებით.

კვლევის სიახლეა კომპლექსური „მწვანე“ ტექნოლოგიების შემუშავება. პირველ ეტაპზე ხორციელდება ჩამდინარე წყლების წინარე გაწმენდა ადგილობრივი მცენარეული (ხის ნახერხი) და მეორადი პოლიმერული ნარჩენებისგან (პოლიურეთანის ქაფი) მიღებული ფილტრ-სორბენტებით.

კვლევის მეორე ეტაპზე, ემულგირებული ნავთობფრაქციებისგან წყლის ღრმა გაწმენდის მიზნით, სინთეზირებული იქნა ულტრაფილტრაციული მემბრანები ფაზათა ინვერსიის მეთოდით ქიმიურად და თერმულად მდგრადი პოლიმერული მასალისაგან.

გაუქრომატოგრაფიული და ფურიე ტრანსფორმაციის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიის კვლევების საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ შემოთავაზებული კომბინირებული სისტემა უზრუნველყოფს წყლის ღრმა გაწმენდას ნავთობპოდუქტებისგან 99.8%-ზე მაღალი ეფექტურობით (ნარჩენი კონცენტრაცია <0.1 მგ/ლ), რაც სრულად აკმაყოფილებს საერთაშორისო ეკოლოგიურ სტანდარტებს.

კვლევის მიზანია ნავთობითა და ნავთობპოდუქტებით დაბინძურებული წყლის გაწმენდა მინიმალური დანახარჯებით კომპლექსური ტექნოლოგიების გამოყენებით, რომელიც დაფუძნებულია სორბციასა და ბარომემბრანულ პროცესებზე, ეფექტური პოლიმერული მასალების გამოყენებაზე. კერძოდ, ნაშრომში განხილულია კვლევის შედეგები, რომლის დროსაც სორბციის პროცესში სორბენტების სახით გამოყენებულია ადგილობრივი საწარმოო მეორადი ბუნებრივი და სინთეზური მასალები, ხოლო მემბრანული ფილტრაციისთვის ბსუ-ს აგრარული და მემბრანული ტექნოლოგიების ინსტიტუტის მემბრანული ტექნოლოგიის განყოფილებაში სინთეზირებული პოლიმერული ულტრაფილტრაციული მემბრანები.

1. ნავთობი და ეკოლოგია

გარემოს დაცვა ნავთობისა და მისი გადამუშავების მრავალრიცხოვანი პროდუქტებით დაბინძურებისაგან ეკოლოგიის ერთერთი უმნიშვნელოვანესი ამოცანაა [Fingas, 2013; National Research Council, 2003].

გარემოს გაჭუჭყიანება ნავთობით და ნავთობპროდუქტებით (ნ/პ) რჩება ეკოსისტემებზე ანთროპოგენური ზემოქმედების ერთ-ერთ ყველაზე დამანგრეველ ფორმად. მიუხედავად იმისა, რომ განვითარდა ნავთობის მოპოვების, ტრანსპორტირებისა და გადამუშავების ტექნოლოგიები, ავარიები კვლავ ხდება როგორც ზღვის, ისე სახმელეთო პირობებში [Chen et al., 2019; Jernelov, 2010].

ნავთობპროდუქტებით (ნ/პ) დაბინძურებული წყლები ძირითადად წარმოიქმნება ნავთობის შემნახველი მოცულობების დაცლის ან გამორეცხვის შემდეგ, ნავთობის გადაქაჩვის და ტრანსპორტირების დროს დაღვრების შემთხვევაში. ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებულ წყლებს წარმოქმნის ტანკერების ე.წ. ტრიუმის წყლები, ბენზინგასამართი სადგურების ჩამდინარე წყლები [Etkin, 2001; Fingas, 2013].

სამეცნიერო ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ ნავთობი და ნავთობპროდუქტები გამოირჩევიან მაღალი ტოქსიკურობით, მდგრადობით და ბიოსფეროში ხანგრძლივი ცირკულაციის უნარით [Aguilera et al., 2010; Jernelov, 2010; National Research Council, 2003].

ნავთობი წყლის ზედაპირზე სწრაფად ვრცელდება და წარმოქმნის ზედაპირულ აფსკს. ერთ ტონა ნავთობს შეუძლია თხელი აპკის სახით დაფაროს დაახლოებით 12 კმ² წყლის ზედაპირი. ნავთობის აორთქლება დამოკიდებულია ნახშირწყალბადების მოლეკულურ მასაზე, ტემპერატურასა და ქარის სიჩქარეზე. პირველი 24 საათის განმავლობაში აორთქლდება მსუბუქი ფრაქციების მნიშვნელოვანი ნაწილი, ხოლო შემდგომ დღეებში მიმდინარეობს უფრო მძიმე ფრაქციების ნაწილობრივი აორთქლება და დარჩენილი მასის დალექვა [Fingas, 2013; National Research Council, 2003].

ოკეანის ზედაპირზე წარმოქმნილი ნავთობის ფენა მნიშვნელოვნად ამცირებს აირების გაცვლას და არღვევს სითბოს მიმოცვლას ატმოსფეროსა და ჰიდროსფეროს შორის, მცირდება სინათლის შეღწევა წყალში, რაც უარყოფითად მოქმედებს ფოტოქიმიურ და ბიოქიმიურ პროცესებზე და იწვევს წყლის ეკოსისტემების დეგრადაციას [Beyer et al., 2016].

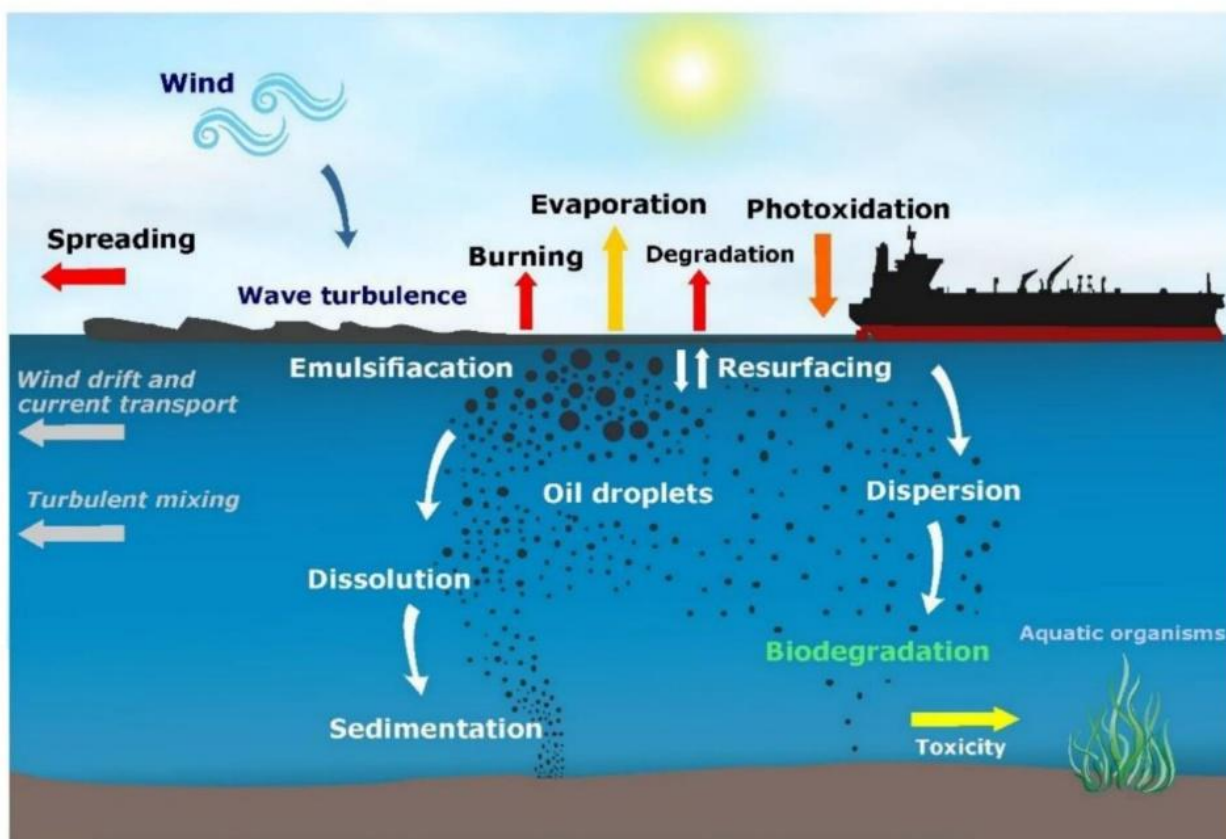
დიდი რაოდენობით წყალთან შერევისას ნავთობი წარმოქმნის ემულსიას. ასეთი ტიპის ემულსია (ე.წ. „შოკოლადის მუსი“) დიდხანს ძლებს და გადაიტანება დიდ მანძილზე წყლის დინებით. მაღალმოლეკულური ნაერთები (მმნ) განაპირობებენ ემულსიის სტაბილურობას. ზოგი ჰიდროფობი მათ იყენებს ტივტივად. თუ ამ გამკვრივებებს აქვთ უფრო მაღალი სიმკვრივე, ვიდრე წყალს, ისინი ილექებიან ფსკერზე, რითაც

ბენტოსს აყენებენ ზიანს. რაც შეეხება დაბალმოლეკულურ ნაერთებს, ისინი ნაკლებად იხსნებიან წყალში და ზედაპირიდან სწრაფად ორთქლდებიან [Aguilera et al., 2010].

ნავთობით დაბინძურებას მოსდევს პლანქტონის, მცენარეებისა და ფრინველების მასობრივი დაღუპვა. ნადგურდება ფიტოპლანქტონიც, რომელიც ჟანგბადის ბალანსის ერთ-ერთი ძირითადი წყაროა [Beyer et al., 2016; Hong et al., 2014; Peterson et al., 2003] .

განსაკუთრებით საშიშია ზღვის ზრდასრული ორგანიზმებისთვის წყალში გახსნილი არომატული ნახშირწყალბადები, 10^{-2} – 10^{-4} % კონცენტრაცია იწვევს სიკვდილს, ხოლო ლარვებისა და კვერცხებისთვის აღნიშნული ზღვარი მნიშვნელოვნად დაბალია. კარცინოგენული პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადების დაგროვება საკვებ მოლუსკებსა და თევზებში მნიშვნელოვან საფრთხეს უქმნის ადამიანის ჯანმრთელობას მათი საკვებად გამოყენების შემთხვევაში [Kim et al., 2009; Prince, 2015].

ჩაღვრის შემდეგ ნავთობი დროთა განმავლობაში ნაწილობრივ ორთქლდება, განიცდის ემულსიფიკაციას, ბიოდეგრადაციას, ფოტოქიმიურ დეგრადაციას, ნაწილობრივ გადადის დანალექებში.



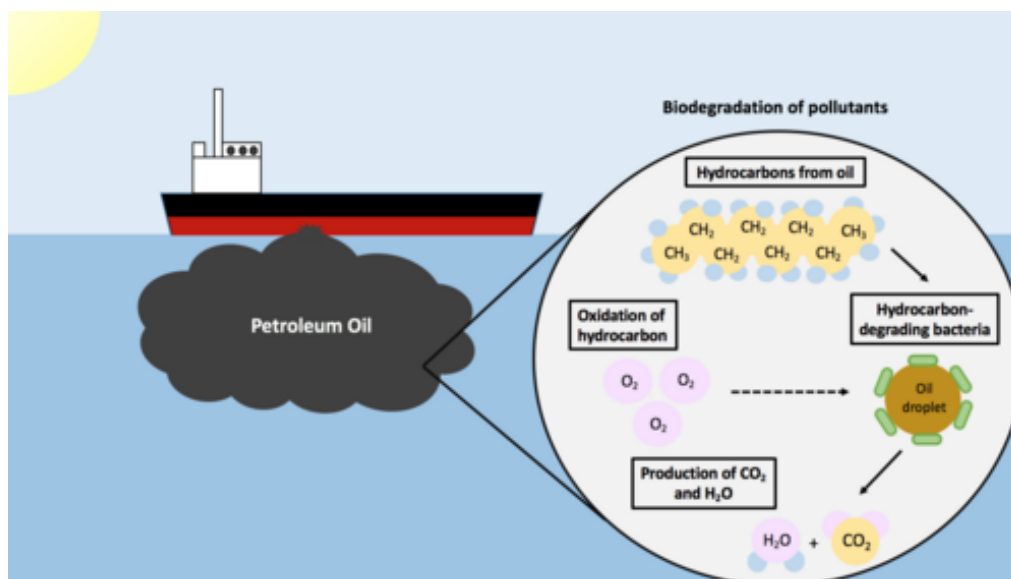
სურათი 1. ნავთობის გავრცელება, დაშლა და დეგრადაცია გარემოში მოხვედრის შემდეგ.

ოკეანის თვით გაწმენდის პროცესში მნიშვნელოვანია ჟანგვით რეაქციები, რის შედეგად წარმოქმნილი პროდუქტები წყალში ხსნადია. ჟანგვის სიჩქარე მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია წყალში გახსნილი ჟანგბადის კონცენტრაციაზე.

ზედაპირზე ჟანგვის ინტენსივობა შეადგენს დაახლოებით 0.3 ტ/კმ^2 დღელამეში, ხოლო სიღრმეში 1 ლიტრი ნავთობის დასაჟანგად საჭიროა დაახლოებით 400 მ^3 წყალში გახსნილი ჟანგბადი [Fingas, 2013; National Research Council, 2003].

მნიშვნელოვან როლს ასრულებს გარემოში ნავთობის ბიოდეგრადაციის პროცესი. ოკეანეში გავრცელებულია დაახლოებით 200-მდე სახეობის ნავთობის დამშლელი ბაქტერია და სოკო, რომელთაც შეუძლიათ დღელამეში 1 მ^3 წყალში არსებული დაახლოებით 1 გ ნავთობის ბიოდეგრადაცია. თუმცა ნავთობის სრული ბიოქიმიური დაშლა ძალიან ნელა მიმდინარეობს, რადგან ბუნებაში არ არსებობს მიკროორგანიზმი, რომელსაც შეუძლია ნავთობის ყველა კომპონენტის ერთდროული დაშლა. აღნიშნული პროცესისთვის საჭიროა სხვადასხვა ტიპის მიკროორგანიზმების თანმიმდევრული მოქმედება, აგრეთვე შუალედური პროდუქტების შემდგომი დაშლა სპეციალური მიკროფლორის მონაწილეობით [Atlas & Hazen, 2011; Das & Chandran, 2011; Leahy & Colwell, 1990].

მიკრობიოლოგიურ დაშლას ყველაზე უფრო ექვემდებარება პარაფინები; შედარებით მდგრადია ციკლოპარაფინები, ხოლო ყველაზე მდგრადია პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები, რომლებიც ხანგრძლივად ინარჩუნებენ სტაბილურობას [Das & Chandran, 2011]. ულტრაიისფერი გამოსხივება აჩქარებს ნავთობის კომპონენტების დესტრუქციას, თუმცა ფოტოლიზის პროდუქტები მაღალი ტოქსიკურობით ხასიათდება, ამიტომაც ეკოლოგიური თვალსაზრისით ეს არასასურველი პროცესია.



სურათი 2. ნავთობის ტრანსფორმაცია გარემოში მიკროორგანიზმების ზეგავლენით

ზღვის წყალში ნავთობის მძიმე ფრაქციები პრაქტიკულად არ იშლება და წყალთან ერთად წარმოქმნის მდგრად ემულსიებს, დროთა განმავლობაში ეს ემულსიები კოაგულირდება და გარდაიქმნება ფისოვან, ნახევრადმყარი მასების სახით, რომლებიც წყლის ზედაპირზე ცურავს და სანაპირო ზოლებში გადაადგილებისას იწვევს პლაჟებისა და ბინძურებას [Fingas, 2013; Jernelov, 2010].

წყლის გარემოში ნავთობის ქიმიური დაჟანგვის სიჩქარე შეადგენს ბიოქიმიური დაჟანგვის სიჩქარის დაახლოებით 10–15%-ს. დაბალი ტემპერატურის პირობებში ნავთობის დაშლის პროცესი კიდევ უფრო ნელდება, რის გამოც არქტიკულ ზღვებში დაღვრილი ნავთობი შეიძლება ათწლეულების განმავლობაში (დაახლოებით 50 წელი) შენარჩუნდეს და დაარღვიოს ბიოცენოზის ნორმალური ფუნქციონირება [WWF Arctic Programme, 2021].

ნიადაგში მოხვედრილი ნავთობის ტრანსფორმაცია კიდევ უფრო ნელა მიმდინარეობს, ვიდრე წყლის ეკოსისტემებში, რაც განპირობებულია სუსტი აერაციით. ნავთობი აღწევს ნიადაგის ღრმა ფენებში, სადაც ჟანგბადთან კონტაქტი შეზღუდულია. გარდა ამისა, მისი მდგრადობა იზრდება ტორფზე, ჰუმუსზე და ორგანულ-მინერალურ ნაწილაკებზე სორბციის გამო [Das & Chandran, 2011; Leahy & Colwell, 1990].

ნიადაგის თვითგაწმენდის სიჩქარე დამოკიდებულია ნავთობის ქიმიურ შემადგენლობაზე და ბიოკლიმატურ პირობებზე (ტემპერატურა, მიკროფლორა და სხვ.). გარდაქმნებში ყველაზე აქტიურად მონაწილეობენ პარაფინები, მაშინ როდესაც არომატული, განსაკუთრებით პოლიციკლური ნაერთები, გამოირჩევიან მაღალი მდგრადობით. აერირებულ ნიადაგებში გავრცელებულია სპეციალიზებული ბაქტერიები, რომლებიც ახორციელებენ დაბალი რიგის პარაფინების დაჟანგვას, ხოლო ნავთობით დაბინძურებულ ნიადაგებში გვხვდება მიკროორგანიზმები, რომლებიც მაღალმოლეკულურ პარაფინებსაც იყენებენ საკვებად. აღსანიშნავია, რომ ნიადაგის თვითგაწმენდის ეფექტურობა მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული მის ტიპზე [Russell, 2023].

ნავთობისა და ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული ნიადაგების გასაწმენდად შემუშავებულია სხვადასხვა მეთოდი, მათ შორის რადიკალური მიდგომა — ნიადაგის თერმული დამუშავება (გამოწვა). თუმცა აღნიშნული მეთოდი გამოირჩევა მაღალი შრომატევადობით და იწვევს ნიადაგის ჰუმუსის განადგურებას, რის გამოც პრაქტიკაში უფრო ფართოდ გამოიყენება ბიორემედიაციის მეთოდები.

ნავთობის მოპოვებისა და გადამუშავების რეგიონებში აღინიშნება ნიადაგის მორფოლოგიური და ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების ინტენსიური ტრანსფორმაცია: სტრუქტურის გაუარესება, ფერის ცვლილება და პროდუქტიულობის შემცირება. რიგ შემთხვევებში სასოფლო-სამეურნეო დანიშნულების მიწები ხდება გამოუსადეგარი. ნავთობის ხანგრძლივი ზემოქმედება იწვევს ნიადაგის მიკრობიოლოგიურ ცვლილებებს — განსაკუთრებით უარყოფითად მოქმედებს მანიტრიფიცირებელ ბაქტერიებზე და თრგუნავს ცელულოზის დამშლელი მიკროორგანიზმების განვითარებას.

ამავე დროს, ხანგრძლივი ზემოქმედების შედეგად შეიძლება განვითარდეს სპეციფიკური მიკროორგანიზმები, რომლებიც მონაწილეობენ პარაფინებისა და არომატული ნახშირწყალბადების დაჟანგვის პროცესებში.

რეგლამენტირებულია ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების შემცველობა გარემოს ობიექტებში. სასმელ წყლებში მათი ზღვრული დასაშვები კონცენტრაცია (**ზღვ**) შეადგენს **0.1 მგ/ლ-ს** [საქართველოს მთავრობა, 2014], ხოლო თევზმეურნეობისათვის განკუთვნილ წყლებში — **0.05 მგ/ლ-ს**. ნიადაგში დასაშვებია ნავთობის შემცველობა **1 გ/კგ-მდე** [Pinedo et al., 2013].

მნიშვნელოვანია სისტემური მონიტორინგის განხორციელება ნავთობგადამამუშავებელ რეგიონებში, მათ შორის ჩამდინარე წყლების, სატუმბი და საცავი სადგურების ტერიტორიებზე. გარემოს ნავთობით დაბინძურების ხარისხის შეფასებისათვის რეკომენდებულია ისეთი კომპონენტების განსაზღვრა, როგორიცაა მსუბუქი ფრაქციები (დუღილის ტემპერატურა $<200^{\circ}\text{C}$), პარაფინები და გოგირდშემცველი ნაერთები.

გარემოს დაცვის საერთაშორისო ორგანიზაციების მიერ შემუშავებული ნორმატიული დოკუმენტაციის მიხედვით, ნავთობითა და ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებულ ნიადაგსა და წყალში აუცილებელია რიგი ინდიკატორული კომპონენტების განსაზღვრა, რომლებიც განსაზღვრავს დაბინძურების დონესა და ეკოლოგიურ რისკებს.

ნავთობის დაღვრის ლიკვიდაციის მეთოდები

ზღვების ოკეანეების გაქუჩყიანების ერთერთი მიზეზია ტანკერებიდან ნ/პ ჩაღვრა, ამიტომაც გაქუჩყიანების არე აღინიშნება ნავთობგადატანის ტრასებზე და პორტებთან [Chen et al., 2019; International Tanker Owners Pollution Federation, 2020].

ნავთობის დაღვრის მთავარი მიზეზებია:

- ტანკერების ავარიები,
- ნავთობსადენების დაზიანება,
- შეღფზე მოპოვებისას გაჟონვები,
- ცისტერნების რეცხვის და გემების უკანონო ნარჩენების ჩამონადენი,
- სტიქიური უბედურებები და საომარი მოქმედებები.

საერთაშორისო ენერგეტიკული სააგენტოს მონაცემებით, ყოველწლიურად მსოფლიო ოკეანეში ხვდება დაახლოებით **1,3–1,5 მილიონი ტონა ნავთობი**, რაც მოიცავს როგორც ქრონიკულ, ისე კატასტროფულ დაბინძურების შემთხვევებს

ნავთობპროდუქტებით დაბინძურების პოტენციური წყაროებია ნავთობის მილსადენი და ენერგომატარებლის ტერმინალები, კერძოდ, საქართველოში „ბაქო-სუფსა“-ს ნავთობის მაგისტრალური მილსადენი, რომლის ფუნქციაა აზიის ნავთობის ევროპის ქვეყნებში ტრანსპორტირება.

ნავთობით დაბინძურებასთან ბრძოლის მეთოდებია: დაღვრის პრევენცია, ტექნოლოგიური პროცესების სრულყოფა, დაღვრის შემთხვევაში- დაღვრის დროული ლოკალიზება [Etkin & Nedwed, 2021; Fingas, 2013; Farahani & Zheng, 2022].

ზღვის გარემოში დაღვრილი ნავთობის ლიკვიდაციისათვის ძირითადად გამოიყენება მექანიკური შეგროვება, სორბციული მეთოდებით გასუფთავება ან დაწვა. მექანიკური მეთოდებიდან აღსანიშნავია ე.წ. „მტვერსასრუტის“ პრინციპი, რომლის დროსაც ნავთობი შეიწოვება ძლიერი ტუმბოების საშუალებით, გროვდება ტანკერებში და წყლის მოცილების შემდეგ შესაძლებელია მისი შემდგომი გამოყენება.

ნავთობის გავრცელების შეზღუდვისა და შეგროვების მიზნით გამოიყენება მცურავი ბარიერები (ბუმები), რომლებიც ნავთობის ლაქის ლოკალიზაციის საშუალებას იძლევა. თუმცა აღნიშნული მეთოდი ეფექტურია მხოლოდ მშვიდი ჰიდრომეტეოროლოგიური პირობებისას და გამოირჩევა შრომატევადობით [Etkin & Nedwed, 2021; Fingas, 2013].

ახლად დაღვრილი ნავთობის ლიკვიდაცია შესაძლებელია მისი დაწვის გზით, (ე.წ. კონტროლირებადი დაწვა- IN SITU BURNING). თუმცა ამ მეთოდის გამოყენება დაკავშირებულია რიგ ტექნიკურ სირთულეებთან. პროცესი უნდა განხორციელდეს მოკლე დროში (დაღვრიდან დაახლოებით 20–30 წუთში), როდესაც ნავთობის ლაქა ჯერ კიდევ ლოკალიზებულია დაბინძურების ზონაში .

ნავთობის დაღვრის დროს ახდენენ ასევე ნავთობის ლაქის დისპერგირებას. ჰაერიდან საფრენი საშუალებით დისპერგატორების გაზნევა შესაძლებელია დიდ ფართობზე. დისპერგატორები შლიან ნავთობს მცირე ნაწილაკებად და შემდგომ გარემოში ადვილად მიმდინარეობს ნავთობის ფოტოდაჟანგვა და მიკროორგანიზმებით დეგრადაცია [Farahani & Zheng, 2022; Prince, 2015; Zhang et al., 2021].

საინტერესო და ეფექტურ მეთოდს წარმოადგენს სორბციული შეგროვება, რომლის დროსაც გამოიყენება როგორც ბუნებრივი (ნახერხი, ტორფი), ისე სინთეზური (ქაფპოლიურეთანი, ფენოლპლასტმასები) მასალები. განსაკუთრებით ეფექტურია ქაფპოლიურეთანის ფხვნილი, რომელსაც შეუძლია საკუთარი მასაზე დაახლოებით 18-ჯერ მეტი ნავთობის შთანთქმა. შთანთქმული ნავთობი შეიძლება გამოეყოს მექანიკური გამოწურვით, რის შემდეგაც შესაძლებელია სორბენტის განმეორებითი გამოყენებაც [Wang et al., 2021].

ბიოდეგრადაცია წარმოადგენს ნავთობის დაღვრების ლიკვიდაციის პერსპექტიულ და უსაფრთხო მეთოდს. ზღვის ბაქტერიებს შეუძლიათ ნავთობისა და დიზელის საწვავის საკვებ წყაროდ გამოყენება, რაც მნიშვნელოვნად აჩქარებს მათ დაშლას, მათ შორის არქტიკის მკაცრ პირობებშიც [Atlas & Hazen, 2011; Das & Chandran, 2011]. ინდოელმა

მეცნიერებმა დაადგინეს, რომ არატოქსიკურ აგრონარჩენებზე დაფიქსირებული ბაქტერიები 10 დღის განმავლობაში ნავთობის 84%-ს შლიან, მაშინ როდესაც ჩვეულებრივი ბაქტერიების ეფექტიანობა მხოლოდ 60%-ს აღწევს.

ბაქტერიების გარდა, ნავთობით დაბინძურებული გარემოს გასაწმენდად წარმატებით გამოიყენება სოკოებიც და სპეციალური ბიოპრეპარატებიც, რომლებიც ადგილობრივი მიკროორგანიზმების აქტივობას ზრდის [Das & Chandran, 2011].

თუნდაც უახლესი მეთოდები— სკიმერები, სორბენტები, ბიორემედიაცია და ე.წ კონტროლირებადი წვა მხოლოდ დაბინძურების ნაწილის მოცილებას ახერხებს. ლიტორალურ ზონებში ნავთობის ნარჩენები შეიძლება ათწლეულებით დარჩეს და შტორმების დროს კვლავ გარემოში გამოჩნდეს [Barron et al., 2020; Jernelov, 2010; Peterson et al., 2003].

ნავთობის დაღვრა მხოლოდ ადგილობრივი დარღვევა კი არა, არამედ ეკოსისტემების დეგრადაციისა და მოსახლეობის ჯანმრთელობისთვის ხანგრძლივი საფრთხის გამომწვევი ფაქტორია [Aguilera et al., 2010; Barron et al., 2020]. ცნობილია ნავთობის დიდი რაოდენობით დაღვრის და მათგან გამოწვეული ეკო კატასტროფების მნიშვნელოვანი შემთხვევები:

- ✓ **Deepwater Horizon (2010, აშშ, მექსიკური ყურე)** – ~780 ათასი ტონა ნავთობის გაჟონა აფეთქების შედეგად. შედეგად, დაიღუპა მრავალი ზღვის ბინადარი, ლანდშაფტები დაბინძურდა და BP-ის ჯარიმა >60 მლრდ აშშ დოლარი [Beyer et al., 2016; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2016, 2025].
- ✓ **Prestige (2002, ესპანეთი/ფრანსა/პორტუგალია)** – 63 000 ტონა მძიმე ნავთობის გაჟონა, ზიანი 3 000 კმ სანაპიროს, ბიორესურსების განადგურება 230 000 ტონამდე [International Tanker Owners Pollution Federation, 2003; Pérez et al., 2008].
- ✓ **ExxonMobil, ნიგერია (1998–2020)** – წლიურად 10 000–40 000 ბარელამდე გაჟონვა; შედეგები: ნიგერის დელტას ქრონიკული დაბინძურება და ნიადაგის დეგრადაცია [Amnesty International, 2020; United Nations Environment Programme, 2011].
- ✓ **MT Hebei Spirit (2007, სამხრეთ კორეა)** – 10 800 ტონა ნავთობის გაჟონა, 375 კმ სანაპიროს დაბინძურება და აკვაკულტურის მნიშვნელოვანი ზარალი [Hong et al., 2014; International Tanker Owners Pollution Federation, 2007].
- ✓ **Norilsk Diesel Spill (2020, არქტიკა, რუსეთი)** – 21 000 ტონა დიზელის გაჟონა, ეკოსისტემების მძიმე დაზიანება და სირთულეები ლიკვიდაციაში უკიდურეს პირობებში [Rosprirodnadzor, 2020; WWF Arctic Programme, 2021].
- ✓ სხვა შემთხვევები მოიცავს **MV Wakashio (მავერიკი, 2020)**, **Jebel Ali Oil Spill (OAЭ, 1998–2005)**, **Norco & Bay Marchand (აშშ, 2005–2015)** და **Kolva River (რუსეთი, 1994–2012)** [UNEP, 2020; UNESCO/ROPME, 2006; U.S. Environmental Protection Agency & U.S. Coast Guard, 2005–2015].

პრობლემა მოითხოვს კომპლექსურ მიდგომას: ადჟურვილობის მოდერნიზაციას, მკაცრ კონტროლს, თანამედროვე გაწმენდის მეთოდების დანერგვას და, რაც ყველაზე მნიშვნელოვანია — ნავთობზე დამოკიდებულების შემცირების პოლიტიკის გატარებას.

სამეცნიერო მონაცემები ადასტურებს, რომ ნავთობით გაჭუჭყიანების მასშტაბები პირდაპირ კავშირშია ინფრასტრუქტურის მდგომარეობასთან და რეგულაციის ხარისხთან. გაუარესებული ინჟინრული კონდიცია, სტიქიური მოვლენები და კონტროლის ნაკლებობა ზრდის კატასტროფებს, რაც ცხადი ხდება როგორც ეკოლოგიურ, ისე ეკონომიკურ ზიანში [Chen et al., 2019].



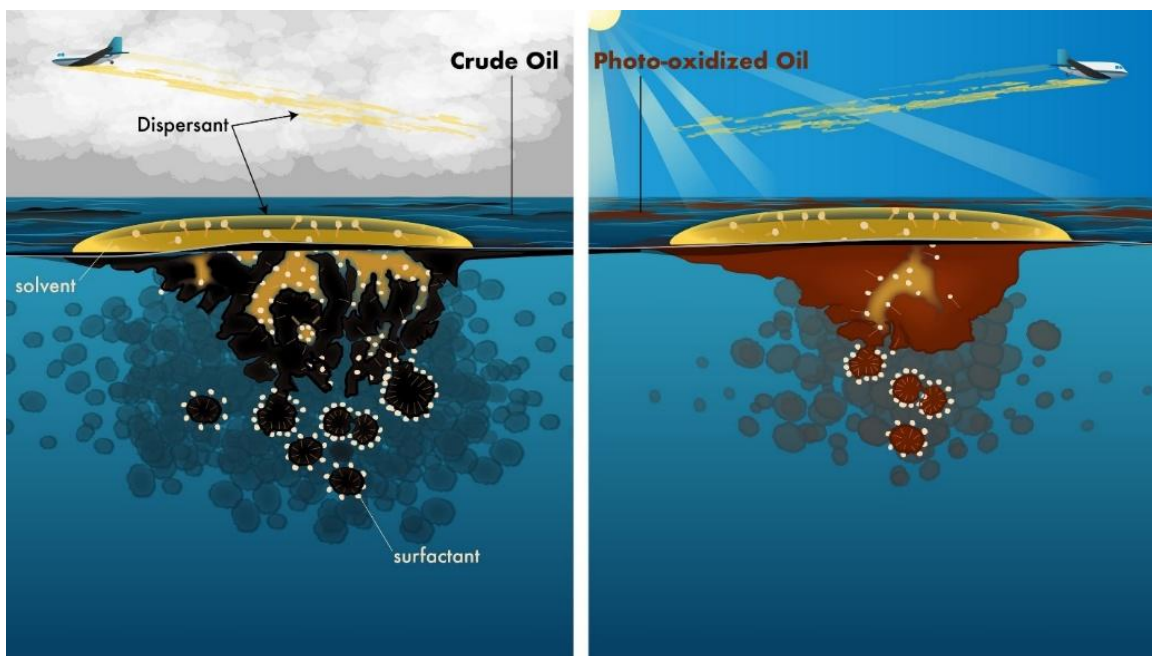
სურათი 3. დაღვრილი ნავთობის მექანიკური შეგროვება მცურავი სკიმერების გამოყენებით



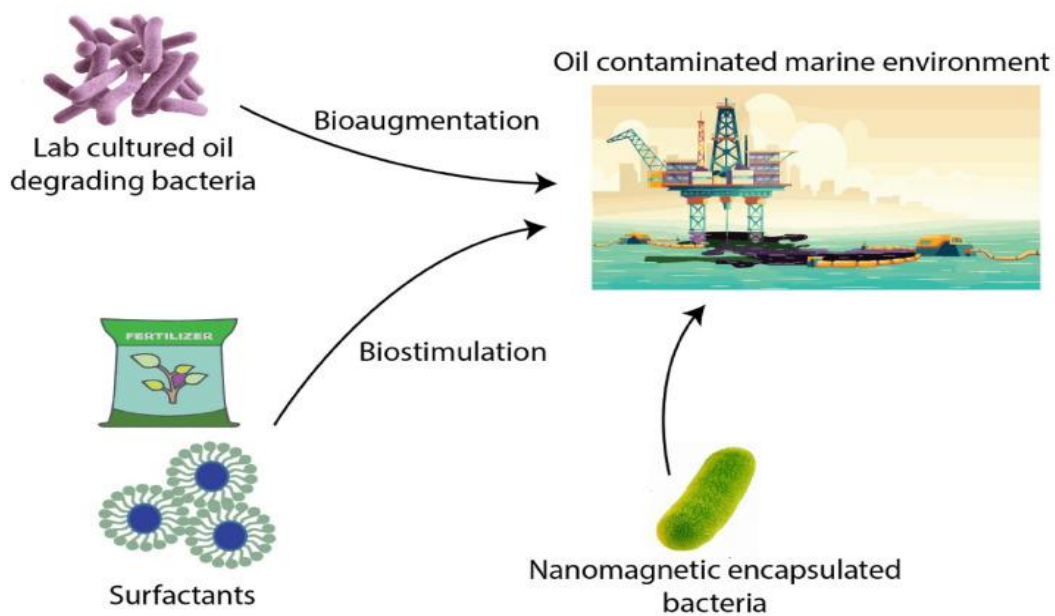
სურათი 4. ნავთობის გავრცელების შეზღუდვა ბონური ბარიერების გამოყენებით



სურათი 5. დაღვრილი ნავთობის შეგროვება ბუნებრივი სორბენტების გამოყენებით



სურათი 6. ნავთობის ლაქის დამუშავება დისპერგატორების გამოყენებით



სურათი 7. დაღვრილი ნავთობის დაშლა ლაბორატორიაში კულტივირებული მიკროორგანიზმების გამოყენებით



სურათი 8. დაღვრილი ნავთობის კონტროლირებადი დაწვა

2. ნავთობის და ნავთობპროდუქტების შემცველი ტექნოლოგიური წყლების გაწმენდის მეთოდები

ნავთობშემნახველი მოცულობების დაცლის ან გამორეცხვის შემდეგ მიღებული ტექნოლოგიური წყალი, შეიცავს ნ/პ-ს, გამრეცხ საშუალებებს და ნავთობშლამს და ეს ტექნოლოგიური წყალი გასაწმენდად მიეწოდება ნავთობდამლექავ მოწყობილობას ან გაწმენდის გარეშე ჩაედინება კანალიზაციაში, მდინარეში ან ზღვაში. ნავთობპროდუქტების შემცველი ჩამდინარე წყალი წარმოადგენს მზარდ ეკოლოგიურ საშიშროებას.

წყლის ნავთობპროდუქტებით დაბინძურება წარმოადგენს მნიშვნელოვან ეკოლოგიურ პრობლემას, რომლის გადაჭრა მოითხოვს სხვადასხვა ფიზიკური, ქიმიური და ბიოლოგიური მეთოდების კომპლექსურ გამოყენებას. ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების წყლიდან მოცილება ეფუძნება მათ ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებს, როგორიცაა სიმკვრივე, დისპერსიულობა და ქიმიური სტაბილურობა [Adetunji et al., 2021].

ზოგადად ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნის საწარმოო წყლების გასუფთავება მიმდინარეობს შემდეგი სქემით: ქვიშის ფილტრები, ნავთობდამჭერები, დასაყოვნებელი რეზერვუარები, ბიოგასუფთავება ბიორექტორებზე, საბოლოო გასუფთავება ფლოტატორებზე და ბიოტბორებზე [Lawan et al, 2023].

გრავიტაციული დაყოფა

ერთ-ერთი ფართოდ გავრცელებული მეთოდია გრავიტაციული დაყოფა, რომელიც ეფუძნება წყლისა და ნავთობის სიმკვრივეთა განსხვავებას. აღნიშნული პროცესის დროს ნავთობი, როგორც ნაკლებად მკვრივი ფაზა, გროვდება წყლის ზედაპირზე, რაც შესაძლებელს ხდის მის მექანიკურ მოცილებას. ეს მეთოდი განსაკუთრებით ეფექტურია თავისუფალი ნავთობის გამოყოფისას.

ფლოტაცია

ფლოტაციის პროცესის დროს წყალში შეყვანილია ჰაერის მიკრო ბუშტულები. ფლოტაცია გამოიყენება როგორც თავისუფალი, ისე ემულგირებული ნავთობპროდუქტების მოსაშორებლად.

ბიოლოგიური გაწმენდა

დიდი მოცულობის ჩამდინარე წყლების დამუშავებისას, მექანიკური და ქიმიური გაწმენდის შემდეგ, ხშირად გამოიყენება ბიოლოგიური გაწმენდა ბიორექტორებში.

მიკროორგანიზმები ახორციელებენ გახსნილი ნახშირწყალბადების ბიოდეგრადაციას, რაც უზრუნველყოფს წყლის საბოლოო გაწმენდას და ეკოლოგიური ნორმების დაკმაყოფილებას.

დაჟანგვითი პროცესები

დამატებით გამოიყენება დაჟანგვითი პროცესები, რომლებიც ეფუძნება ძლიერი დამჟანგველების გამოყენებას, როგორცაა ოზონი (O_3), წყალბადის ზეჟანგი (H_2O_2), ოზონი ულტრაიისფერ გამოსხივებასთან კომბინაციაში (O_3/UV), აგრეთვე მოწინავე დაჟანგვითი პროცესები (AOPs) და ფენტონის რეაქცია. აღნიშნული მეთოდები უზრუნველყოფენ მდგრადი ნავთობპროდუქტების დაშლას და ამავე დროს აძლიერებენ მათ ბიოდეგრადაციას.

სორბციული გაწმენდა

მარტივი და ეფექტურია მჟონავი გაფილტვრა სორბენტის შრეში, რისთვისაც შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა ტიპის სორბენტები. ნავთობპროდუქტებით გაჭუჭყიანებული წყლების გასაწმენდად გამოყენებულია ხის ბოჭკო, ნახშირი, ბენტონიტები, ცეოლიტები [Bandura et al., 2015].

მემბრანული ფილტრაცია

ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული საწარმოო წყლების საბოლოო გაწმენდისთვის ხშირად ბოლო საფეხურზე მიმართავენ მემბრანულ პროცესებს: ულტრაფილტრაციას, ნანოფილტრაციას და უკუოსმოსს [Munirasu et al., 2016; Mousa et al., 2022; Dmitrieva et al., 2022]. მემბრანებზე დატვირთვის შესამცირებლად, აგრეთვე მეტი ეფექტურობისთვის ახდენენ წყლების წინარე დამუშავებას სხვადასხვა ფიზიკურ-ქიმიური და ბიოლოგიური მეთოდით (კოაგულაცია, ფლოტაცია და ბიოდაჟანგვა ბიოტბორებში).

კომბინირებული ტექნოლოგიები

- თავისუფალი ნავთობის მოსაშორებლად გამოიყენება დამლექები (API-სეპარატორები) და ჰაერის ფლოტაცია (DAF) [Thorat & Sonwani, 2022; Adetunji & Olaniran, 2021].
- მდგრადი ემულსიების დამუშავებისთვის ეფექტურია კოაგულაციისა და ულტრაფილტრაციის (UF) კომბინირებული გამოყენება [Thorat & Sonwani, 2022; Lawan et al., 2023; Adetunji & Olaniran, 2021].

- ღრმა გაწმენდის (პოლირების) ეტაპზე გამოიყენება მემბრანული პროცესები: ულტრაფილტრაცია (UF), შემდგომ ნანოფილტრაცია (NF) ან უკუოსმოსი (RO) [Ahmad et al. , 2021].
- რთულად დაჟანგვადი ნახშირწყალბადების დაშლისთვის გამოიყენება მოწინავე დაჟანგვითი პროცესები (AOPs), მათ შორის ფენტონის რეაქცია და ოზონირება[Elmobarak et al., 2021; Lawan et al., 2023; Adetunji & Olaniran, 2021].
- დიდი მოცულობის წყლების ეკონომიურად დამუშავებისთვის მიზანშეწონილია ბიოლოგიური მეთოდების გამოყენება, მექანიკურ-ქიმიური გაწმენდის შემდგომ ეტაპზე [Thorat & Sonwani, 2022; Lawan et al., 2023; Das & Chandran, 2011].

ამრიგად, ნავთობით დაბინძურებული წყლების ეფექტური გაწმენდა შესაძლებელია მხოლოდ მრავალსაფეხურიანი მიდგომით, რომელიც აერთიანებს მექანიკურ, ფიზიკურ-ქიმიურ და ბიოლოგიურ მეთოდებს (იხ.ცხრილი 1)

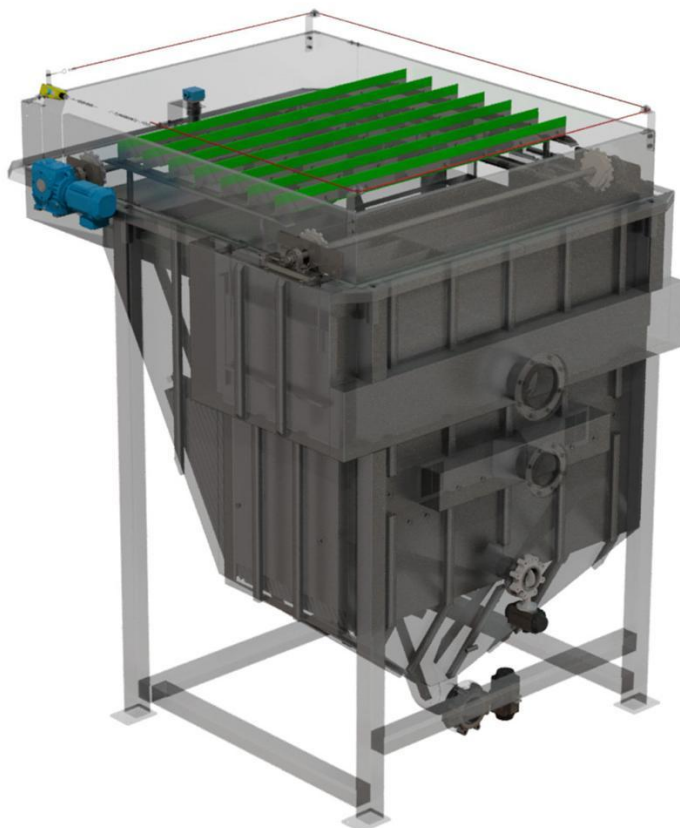
ცხრილი 1: ნავთობისა და ნავთობპროდუქტებისგან ჩამდინარე წყლების გაწმენდის ეფექტურობა

მეთოდი	მოცილებული ნავთობის ფრაქცია	საშუალო ეფექტურობა, %	უპირატესობები	შეზღუდვა
გრავიტაციული დაყოფა დამლქავებში	თავისუფალი ნავთობი(>150 მკმ წვეთები)	40–70 %	სიმარტივე, დაბალი თვითღირებულება, არ საჭიროებს რეაგენტებს	არ აშორებს ემულგირებულ და გახსნილ ნავთობს
ფლოტაცია	თავისუფალი და ნაწილობრივ ემულგირებული ნავთობი (20–150 მკმ)	70–95 %	მაღალი წარმადობა, სტაბილურობა სხვადასხვა დატვირთვის დროს	ცუდად მუშაობს ზან-ის შემცველ მდგრად ემულსიებთან

კოაგულაცია - ფლოტაცია	მდგრად ემულსიები, წვრილ დისპერსული წვეთები (1–20 მკმ)	70–98 %	შლის მდგრად ემულსიებს, დაბლა წევს ჟქმ-ს	საჭიროებს რეაგენტებს. ტოვებს დიდი რაოდენობის შლამს.
სორბცია(ნახშირი, ცეოლიტი, პოლიმერები)	ნარჩენი და გახსნილი ნავთობი	60–95 %	მაღალი სელექტიურობა, სწრაფი საბოლოო გაწმენდა	საჭიროებს სორბენტის რეგენერაციას ან გამოცვლას
ქვიშიან-ნახშირიანი ფილტრები	წვრილ დისპერსული წვეთები, პოლიციკლური არომატული ნაერთები	40–80 %	კარგია წინარე/ საბოლოო გასუფთავებისთვის	სწრაფი გაჭედვა/ ხშირი გამორეცხვა
ულტრაფილტრაცია (UF)	ემულგირებული ნავთობი (0.01–1 მკმ)	90–99 %	სტაბილური მუშაობა, გამოდგება მდგრადი ემულსიების დასაყოფად.	მემბრანების გაჭუჭყიანება, საჭიროა გადარეცხვა
ნანოფილტრაცია (NF)	გახსნილი ნავთობნახშირწყალბადები, პოლიარომატული ნაერთები, ზანი	80–95 %	გაწმენდის მაღალი ხარისხი, ამცირებს ჟქმ-ს	მაღალი ღირებულება, მაღალი წნევა 8-25 ბარი
უკუოსმოსი (RO)	პრაქტიკულად ყველა ნარჩენ ფრაქციას	95–99.5 %	პერმეატი სასმელი წყლის ხარისხის	მგრძნობელობა გაჭუჭყიანებისადმი, მაღალი ენერგოტევადობა
ბიოლოგიური გასუფთავება (აერობული/ანაერობული)	გახსნილი ნახშირწყალბადები	50–90 %	იაფი ექსპლუატაცია, ეფექტური	ნავთობის ტოქსიკურობა, საჭიროა წინარე

			მინერალიზაც ია	დამუშავება სხვა მეთოდებით
დაჟანგვა (ოზონი, ზეჟანგი, ფენტონი ,UV/O ₃)	მდგრადი ნახშირწყალბადები პოლიარომატული ნაერთები, ზანი	70–99 %	შლის რთულ ორგანულ ნაერთებს	მაღალი ღირებულება, რეაგენტების/ ენერგიის
ადსორბცია ბიოსორბენტებზე (ტორფი, ცელულოზა, ქიტოზანი)	ნარჩენი ნავთობი, პოლიარომატული ნაერთები,	50–90 %	იაფი ბუნებრივი მასალები	დაბალი მდგრადობა დიდი დატვირთვის დროს

სურათებზე 9–14 წარმოდგენილია საწარმოებში ნავთობითა და ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული ტექნოლოგიური წყლების გასაწმენდად გამოყენებული სხვადასხვა ტიპის მოწყობილობა.



სურათი 9. ნავთობ-წყლის სეპარატორი წყლიდან თავისუფალი (არაემულგირებული) ნავთობპროდუქტებისა და შეწონილი მყარი ნაწილაკების გრავიტაციული განცალკევებისთვის



სურათი 10. ნავთობ-წყლის ნარევის ფლოტაციური გაწმენდის სისტემა ჰაერის ბუშტულების გამოყენებით.



სურათი 11. კოაგულაცია-ფლოტაცია -დალექვის კომბინირებული გამწმენდი სისტემა



სურათი 12. ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლის ბიოლოგიური გაწმენდა აეროტენკში.



სურათი 13. სამრეწველო ულტრაფილტრაციული წყლის გამწმენდი სისტემა.



სურათი 14. ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლის მრავალსაფეხურიანი გაწმენდის სისტემა სორბენტების გამოყენებით

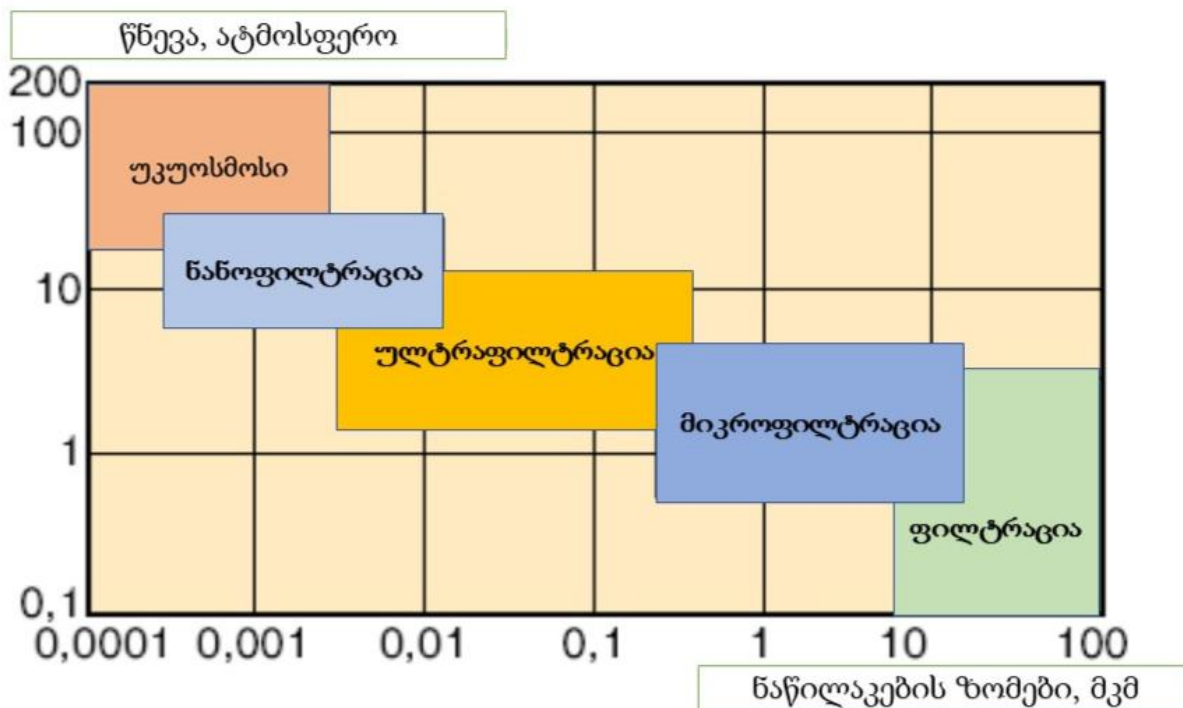
3. შესავალი მემბრანულ ფილტრაციაში

მემბრანული ტექნოლოგია დაფუძნებულია თხევადი და აირადი ნარევების დაყოფის სხვებისგან პრინციპულად განსხვავებულ ხერხზე - მოლეკულურ ფილტრაციაზე ნახევრადგამტარი მემბრანების გავლით. დღეისათვის დაყოფის ამ ხერხმა, მცირე ენერგოდანახარჯების, ურეაგენტობის და ფაზური გადასვლების არქონის გამო დამსახურებული აღიარება მოიპოვა მრეწველობის ათეულობით დარგში [Baker, 2012].

მემბრანა - ეს სელექტიური გამტარი ბარიერია ორ ფაზას შორის. მასის გადატანას მემბრანის გავლით ასევე უწოდებენ შეღწევადობას და ბუნებრივია, ის მიმდინარეობს მხოლოდ მაშინ, როცა არსებობს მამოძრავებელი ძალა ან სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, პოტენციალის გრადიენტი რაიმე ზემოქმედებისა სისტემაზე მემბრანის ორივე მხარეს [Mulder, 1996], სახელდობრ კი:

- ΔP - წნევათა სხვაობა მემბრანის ორივე მხარეს;
- ΔT - ტემპერატურათა სხვაობა მემბრანის ორივე მხარეს;
- ΔC - კონცენტრაციათა სხვაობა მემბრანის ორივე მხარეს ;
- ΔE - ელექტრული პოტენციალის სხვაობა მემბრანის ორივე მხარეს.

ბარომემბრანული პროცესების კლასიფიკაცია შეიძლება მოხდეს დასაყოფი ნაწილაკების ზომის მიხედვით.



სურათი 15. მიკროფილტრაციის, ნანოფილტრაციის, ულტრაფილტრაციისა და უკუოსმოსის შედარებითი დიაპაზონები დასაყოფი ნაწილაკების ზომის მიხედვით.

მემბრანული პროცესები შეიძლება გამოყენებულ იქნას მრავალი მნიშვნელოვანი ამოცანის გადაჭრისას, მაგალითად:

- გამტკნარებული და გაუსნებოვნებული წყლის მიღება;
- ნარევების ფრაქციონირება;
- პროდუქტების გაწმენდა თანმხლები მინარევებისაგან;
- პროდუქტის კონცენტრირება;
- ფასეული კომპონენტების რეკუპერაცია ხელმეორედ გამოყენებისათვის;
- ცივი სტერილიზაცია.

ამ და სხვა ტექნოლოგიური ამოცანების გადასაწყვეტად აუცილებელია რაციონალური და ოპტიმალური არჩევანის გაკეთება ამა თუ იმ მემბრანულ პროცესზე, გარკვეული სახის მემბრანის გამოყენება.

სამრეწველო მემბრანების ასორტიმენტი საკმაოდ დიდია, მაგრამ ბევრი მათგანი არ პასუხობს ტექნოლოგიური პროცესების ჩატარების თანამედროვე მოთხოვნებს: არ უზრუნველყოფს საკმარის სელექტიურობას, არ გააჩნიათ საჭირო მექანიკური და თერმული სიმტკიცე, ქიმიური მდგრადობა. ამიტომ აუცილებელია ახალი ეფექტური მემბრანული მასალების ინტენსიურ ძიება და ცნობილი მემბრანული მასალების მოდიფიცირება, ნანოკომპოზიტების შექმნა.

3.1 მემბრანებისა და მემბრანული პროცესების ძირითადი მახასიათებლები

მემბრანის ეფექტურობა განისაზღვრება ორი პარამეტრით, რომლებიც ყოველთვის კონკრეტულია განსაზღვრული მემბრანისა და განსაზღვრული ნივთიერებისათვის.

მემბრანაში გატარებული ნაკადი ხასიათდება **წარმადობის** (მემბრანაში გასული ნივთიერების ნაკადი) სიდიდით - ეს არის ნივთიერების რაოდენობა (მოცულობა ან მასა), რომელიც გაივლის მემბრანის ერთეულ ფართს, ერთეულ დროში, ერთეული მამოძრავებელი ძალით.

$$J = \frac{V}{A \cdot T}$$

სადაც J- წარმადობაა, ლ/მ²·სთ; V-პერმეატის მოცულობა; A-მემბრანის აქტიური ფართობი; T-დრო, სთ.

ბარომემბრანულ პროცესებში მემბრანაში გასული ნივთიერების ნაკადი J პირდაპირპროპორციულია მოდებული წნევისა (ΔP):

$$J = K \cdot \Delta P$$

წყალხსნარებისათვის ბარომემბრანულ პროცესებში გამყოფი უნარი ხასიათდება გახსნილი ნივთიერების შეკავების (R) სიდიდით და გამოითვლება განტოლებით:

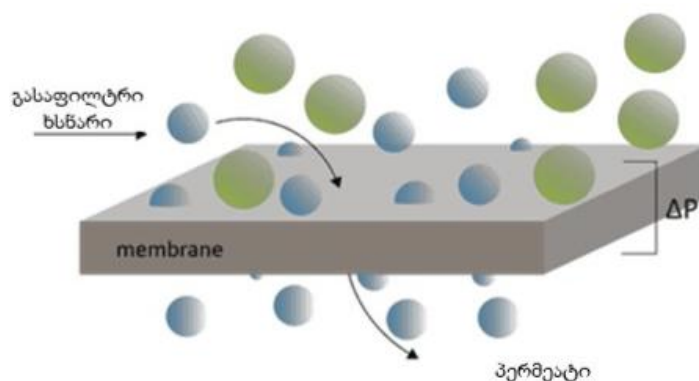
$$R = \left[1 - \frac{C_p}{C_f} \right] \times 100\%$$

სადაც C_p - მემბრანაში გატარებული ხსნარის კონცენტრაციაა, C_f - ფილტრატის კონცენტრაცია.

რეალურ პროცესებში ცდილობენ გამოიყენონ მაღალი შეღწევადობისა და მაღალი სელექტიურობის მემბრანები. როგორც წესი, მაღალი შეღწევადობისას მემბრანას გააჩნია დაბალი სელექტიურობა, და პირიქით, მაღალი სელექტიურობის მქონე მემბრანა იძლევა დაბალ ნაკადებს.

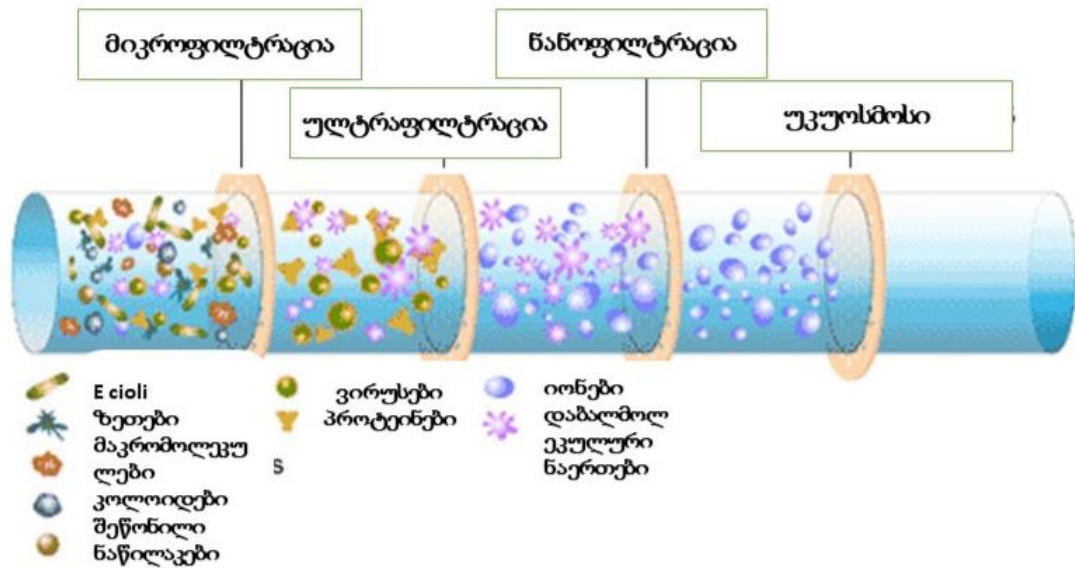
3.2 მემბრანული ფილტრაციის ტიპები

წყალხსნარების გაწმენდის ან კონცენტრირებისთვის ფართოდ გამოიყენება ბარომემბრანული პროცესები, რომლებიც ხორციელდება მემბრანაზე წნევის ზემოქმედებით. მამოძრავებელი ძალების გავლენით გამხსნელი და ზოგიერთი გახსნილი ნივთიერების მოლეკულები გაივლიან მემბრანას, მაშინ როცა სხვა მოლეკულები ან ნაწილაკები სხვადასხვა ხარისხით შეკავდება [Baker, 2012].



სურათი 16. ბრტყელფირფიტოვანი მემბრანა

ბარომემბრანული პროცესების კლასიფიკაცია (მიკროფილტრაცია, ულტრაფილტრაცია, ნანოფილტრაცია და უკუოსმოსი) ხდება დასაყოფი ნაწილაკების ზომის მიხედვით და შესაბამისად, გამოყენებული მემბრანის სტრუქტურით:



სურათი 17. ბარომემბრანული პროცესების კლასიფიკაცია: მიკროფილტრაცია, ულტრაფილტრაცია, ნანოფილტრაცია და უკუოსმოსი.

მიკროფილტრაციიდან ულტრაფილტრაციაზე და უკუოსმოსზე გადასვლისას მემბრანის მიერ შეკავებული ნაწილაკების/მოლეკულების ზომები მცირდება, რაც განისაზღვრება მემბრანის ფორების ზომებით.

ცხრილი 2. სხვადასხვა ბარომემბრანული პროცესების შედარება

	მიკროფილტრაცია	ულტრაფილტრაცია	უკუოსმოსი
დასაყოფი ობიექტები	შეწონილი და კოლოიდური ნაწილაკები, ბაქტერიები, საფუარი(ზომა >0,01 მკმ)	მაკრომოლეკულები (ცილები) ზომა > 0,001მკმ	დაბალმოლეკულური გახსნ.ნივთიერებები ($M \geq 200$) მარილები,შაქრები
წნევა	ძალიან დაბალი (0,05 მპა)	დაბალი (0,5 მპა)	მაღალი (5 მპა)

მიკროფილტრაცია

მიკროფილტრაცია - ეს არის პროცესი, რომელიც ხორციელდება მემბრანაზე წნევის ზემოქმედებით და გამოიყენება სუსპენზიების და ემულსიების დასაყოფად. მიკროფილტრაციული მემბრანების დასამზადებლად გამოიყენება სხვადასხვა მასალა, რომელთა შორის უფრო მნიშვნელოვანს წარმოადგენს პოლიმერები და კერამიკა [Alammar et al. 2020].

სინთეზური პოლიმერული მემბრანები შეიძლება დაიყოს ორ კლასად:

- **ჰიდროფობური** (პოლიტეტრაფტორეთილენი-იგივე ტეფლონი, პოლივინილიდენფტორიდი, პოლიპროპილენი);
- **ჰიდროფილური** (ცელულოზის ეთერები, პოლიკარბონატები, პოლისულფონ / პოლი (ეთერსულფონი), პოლიიმიდ/ პოლი(ეთერიმიდი), პოლიამიდი).

კერამიკული მემბრანების საფუძველს ძირითადად შეადგენს ორი მასალა - ალუმინის (Al_2O_3) და ცირკონის (ZrO_2) ოქსიდები, ასევე ტიტანის ოქსიდი (TiO_2).

სხვა მასალები: მინა (SiO_2) და მეტალები (პალადიუმი, ვოლფრამი, ვერცხლი) ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნას მიკროფილტრაციული მემბრანების დასამზადებლად.

ულტრაფილტრაცია

ულტრაფილტრაცია- ეს არის მემბრანული პროცესი, რომელიც თავისი ბუნებით იკავებს შუალედურ ადგილს უკუოსმოსსა და მიკროფილტრაციას შორის. ულტრაფილტრაციასა და უკუოსმოსს შორის შუალედურ პროცესს ეწოდება **ნანოფილტრაცია**.

ულტრაფილტრაციული მემბრანების ფორების ზომებია 0,05 მკმ-დან 1 ნმ-მდე. ულტრაფილტრაცია ჩვეულებრივ გამოიყენება მაკრომოლეკულების ფრაქციონირებისათვის. გამოსაყოფი გახსნილი ნივთიერების მასის ქვედა ზღვარი შეესაბამება რამდენიმე ათასს.

სამრეწველო წარმოების ულტრაფილტრაციული მემბრანების უმეტესობა მზადდება პოლიმერული მასალებისგან ფაზათა ინვერსიის გზით. სამეცნიერო და საპატენტო ლიტერატურა აღწერს მემბრანების წარმოებას პოლიმერების ფართო სპექტრისგან:

- პოლისულფონ / პოლიეთერსულფონი / სულფირებული პოლისულფონი
- პოლივინილიდენფტორიდი;
- პოლიაკრილონიტრილი (და შესაბამისი ბლოკ - თანაპოლიმერები);
- ცელულოზის წარმოებულები (მაგ. ცელულოზის აცეტატი);
- პოლიიმიდი / პოლი (ეთერიმიდი);
- ალიფატური პოლიამიდი.

გარდა აღნიშნული პოლიმერული მასალებისა, ულტრაფილტრაციული მემბრანების სახით გამოიყენება არაორგანული (კერამიკული) მასალები.

ულტრაფილტრაციული მემბრანების ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს მოლეკულურ - მასური კვეთის ნიშნული **MWCO (Molecular Weight Cut-Off)**. აღნიშნულ მონაცემში იგულისხმება უმცირესი მოლეკულური მასა (დალტონი Da) ნივთიერებისა, რომელსაც 90%-ით აკავებს მემბრანა. საკალიბრაციო ნივთიერების სახით გამოიყენება გლობულარული ცილები, დრეკად ჯაჭვიანი პოლიმერები - პოლიეთილენგლიკოლები, დექსტრანები და პოლივინილპიროლიდონი.

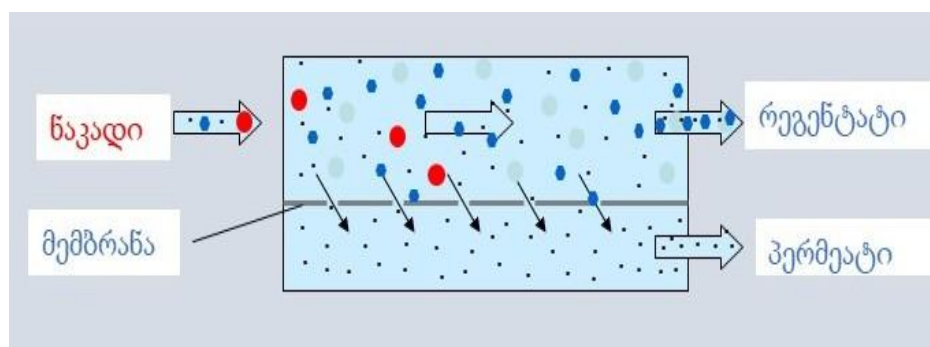
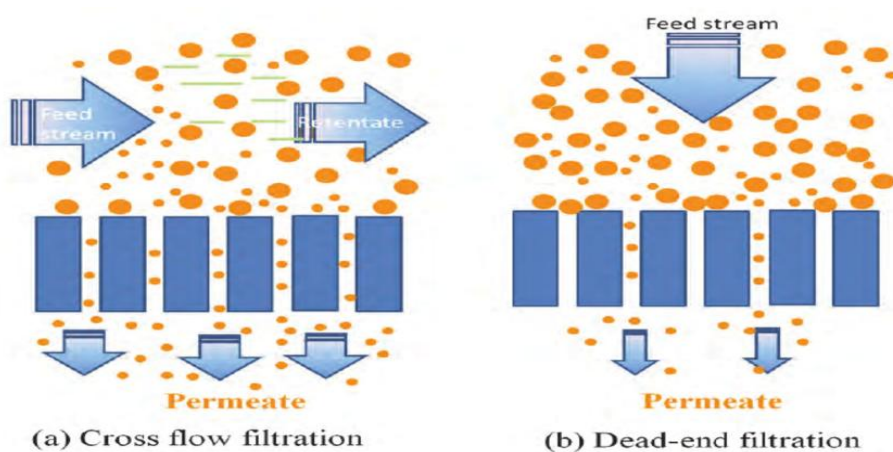
უკუოსმოსი

უკუოსმოსი გამოიყენება მაშინ, როცა საჭიროა გამხსნელისაგან გამოიყოს დაბალმოლეკულური გახსნილი ნივთიერება, არაორგანული მარილები ან ორგანული მოლეკულები, მაგალითად გლუკოზა. უკუოსმოსის პროცესი მიმდინარეობს მაღალ წნევაზე, ამრიგად საჭიროა უფრო მკვრივი მემბრანები, რომელთაც გააჩნიათ გაცილებით მაღალი ჰიდროდინამიური წინაღობა. მიკრო- და ულტრაფილტრაციული მემბრანები ხშირად გამოიყენება სადების სახით კომპოზიციურ მემბრანებში უკუოსმოსის დროს, აირების დაყოფისა და პერვაპორაციისათვის.

3.3 ფილტრაციის ჩატარების ხერხები

არსებობს მემბრანული პროცესის ჩატარების ორი ტიპი: ე.წ. ტანგენციალური (Cross Flow) ფილტრაცია (a), რომლის დროსაც ნაკადი მიმართულია მემბრანის ზედაპირის პარალელურად და ე.წ. ჩიხური (Dead End) ფილტრაცია (b). ჩიხური ფილტრაციისას მემბრანაზე მიმართული ნაკადი პერპენდიკულარულია მისი ზედაპირის, რაც ქმნის წანამძღვრებს მემბრანით შეკავებული ნაწილაკების დაგროვებისთვის ზედაპირზე მყარი ფენის წარმოქმნით. ამ ფენის სისქე იზრდება ფილტრაციის დროსთან ერთად და როგორც შედეგი, სისქის გაზრდით მცირდება ფილტრაციის სიჩქარე [Baker, 2012].

ტექნოლოგიის მეორე ტიპის შემთხვევაში ხსნარის შემავალი ჭავლი მიეწოდება მემბრანის ზედაპირის გასწვრივ და მხოლოდ გახსნილი ნივთიერების მემბრანაში გაუსვლელი ნაწილი გროვდება ზედაპირზე.



a) Cross Flow ფილტრაციის პროცესი

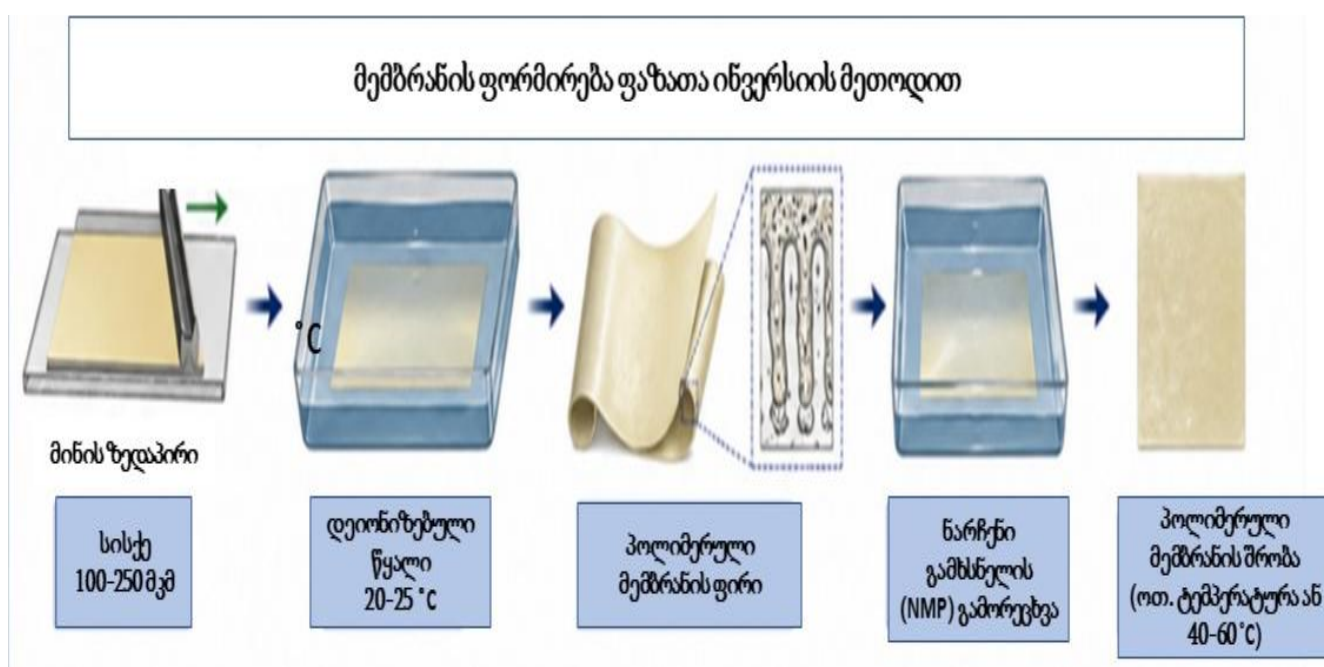
სურათი 18. მემბრანული ფილტრაციის რეჟიმები: a) ტანგენციალური (Cross Flow) ფილტრაცია; b) ჩიხური (Dead End) ფილტრაცია.

3.4 პოლიმერული მემბრანების ფორმირება ფაზათა ინვერსიის მეთოდით

ფაზათა ინვერსია - ეს არის მემბრანების ფორმირების პროცესი, რომლის შედეგადაც პოლიმერი გადადის ხსნარიდან მყარ მდგომარეობაში. ფაზური გადასვლის საწყისი სტადიის კონტროლის დახმარებით შეიძლება მიღებულ იქნას საჭირო მორფოლოგიის მემბრანა.

ფაზათა ინვერსიის კონცეფცია მოიცავს სხვადასხვა მეთოდების ფართო წრეს, ისეთს, როგორიცაა დალექვა კონტროლირებადი აორთქლებით, თერმული დალექვა, დალექვა ორთქლის ფაზის ზემოქმედებით, დალექვა ჩაძირვის გზით [Smolders et al., 1992].

მრეწველობაში წარმოებული პოლიმერული მემბრანების უმეტესობა დამზადებულია არაგამხსნელში (წყალში) ჩაძირვის გზით დალექვით: პოლიმერის კოლოიდური ხსნარი (პოლიმერი + გამხსნელი) ისხმება შესაბამის მატარებელზე (სუპორტზე) და იძირება კოაგულაციურ აბაზანაში. დალექვა მიმდინარეობს გამხსნელისა და არაგამხსნელის მიმოცვლის საშუალებით. ამასთან მიღებული მემბრანის სტრუქტურა წარმოადგენს მასის გადატანისა და ფაზური დაყოფის კომბინაციის შედეგს.



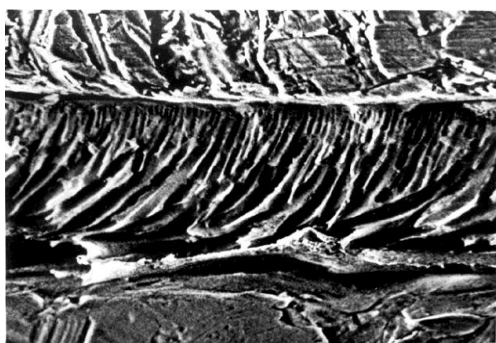
სურათი 19. პოლიმერული მემბრანის ფორმირების სქემა ფაზური ინვერსიის მეთოდით.



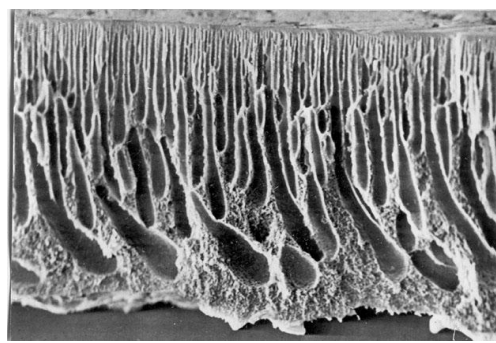
სურათი 20. პოლიმერული ფირის დასაფენი მოწყობილობა MemCast™ (Porometer NV)

მემბრანის ფირის ფორმირებისთვის მშრალ-სველი ფორმირების მეთოდით, ლაბორატორიულ პირობებში იყენებენ პოლიმერული ფირის დასაფენ მოწყობილობას (Automatic Coating Mashine), რომელზედაც შესაძლებელია ე.წ. ფილიერის ჭრილის სიდიდის (მმ) და ფირის დაფენის სიჩქარის (სმ/წმ) შესაბამისად დარეგულირდეს ფირის სისქე, ასევე ფირის დაფენის ტემპერატურაც (ოპციურად).

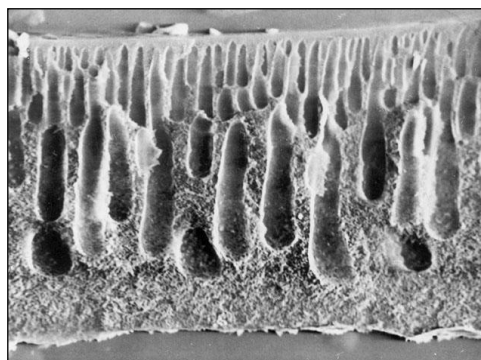
დაყოვნების შემდეგ მინის ზედაპირზე (სუპორტზე) დაფენილი ფირი კოაგულირებისთვის თავსდება (იძირება) წყალში. ფორმირებული მემბრანები ირეცხება და ინახება დისტილირებულ წყალში. მშრალ-სველი ფორმირების მეთოდით ძირითადად მიიღება ასიმეტრიული ფოროვანი მემბრანები [Li et al. 1996].



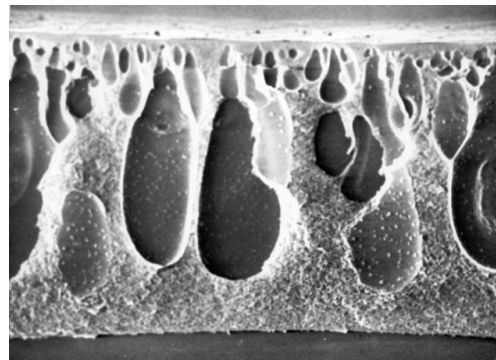
ა



ბ



გ



დ

სურათი 21. სხვადასხვა კონცენტრაციის პოლისულფონის ხსნარებიდან მიღებული მემბრანების განივი კვეთის მიკროფოტოგრაფიები: ა) 15%; ბ) 20%; გ) 25%; დ) 30% PSU გადიდება $\times 600$.

3.5 მოთხოვნები პოლიმერული მემბრანებისადმი

მემბრანებისადმი წაყენებული მრავალრიცხოვანი მოთხოვნებიდან ყველაზე მნიშვნელოვანია დაყოფის მაღალი უნარი, მაღალი პროდუქტიულობა, სტაბილურობა, მდგრადობა დასაყოფი ნარევისა და კომპონენტების მიმართ, თვისებების სტაბილურობა დროში, დაბალი ღირებულება და სხვა სპეციალური მოთხოვნები [Baker, 2012; Mulder, 1996].

მემბრანული ფილტრაციის ხარისხობრივი მაჩვენებლების შენარჩუნება მუდმივ დონეზე შეუძლებელია. ექსპლუატაციის დროს მემბრანების ზედაპირზე მიმდინარეობს სხვადასხვა ნივთიერებების სორბირება, ნალექის წარმოქმნა, გამოყოფილი ნაწილაკების დალექვა და მემბრანის ფორმის თანდათანობითი გაბინდვა, რის შედეგადაც იზრდება აპარატის ჰიდრავლიკური წინაღობა, მკვეთრად უარესდება დაყოფის პროცესის

ძირითადი მახასიათებლები – წარმადობა და მემბრანების სელექტიურობა [Mulder, 1996; Alammar et al., 2020].

ნავთობიანი ჩამდინარე წყლების შემთხვევაში ნავთობის წვეთებსა და მემბრანის ზედაპირს შორის ურთიერთქმედებამ შეიძლება გამოიწვიოს ზედაპირზე ნავთობის ფენის წარმოქმნა, ფორების ბლოკირება და პერმეატის ნაკადის შემცირება [Dickhout et al., 2020; Sutrisna et al., 2022].

იმისათვის, რომ თავიდან იქნეს აცილებული მემბრანების შეუქცევადი გაბინდვა და პროცესის განმავლობაში შენარჩუნებული იქნეს მემბრანების საწყის წარმადობასთან მაქსიმალურად მიახლოებული შეღწევადობა, ხორციელდება მათი რეგენერაცია ქიმიური მეთოდით.

ქიმიური მდგრადობა მემბრანების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მაჩვენებელია. ქიმიური მდგრადობა მნიშვნელოვანია, როგორც ნარევის კომპონენტების მიმართ, ასევე იმ ნივთიერებების მიმართ, რომლებიც გამოიყენება რეგენერაციისთვის მემბრანების მახასიათებლების შესანარჩუნებლად. აგრესიული არეების (მჟავების, ფუძეების და სხვა ნაერთების) ზემოქმედება, როგორც წესი, გამოიხატება მაკრომოლეკულების ჯაჭვის ბმების გაწყვეტაში, რაც იწვევს მემბრანების თვისებების ცვლილებას (მექანიკური სიმტკიცის დაკარგვა, სტრუქტურის ცვლილება და სხვა) [Mulder, 1996; Baker, 2012].

ქიმიური მდგრადობა ძირითადად დამოკიდებულია პოლიმერის ბუნებაზე და მემბრანების სინთეზისას პოლიმერის მასალის არჩევაზე. ამ შემთხვევაში მემბრანების ქიმიური და თერმული მდგრადობა მთლიანად დამოკიდებულია პოლიმერის თერმო- და ქიმიურ მდგრადობაზე. მემბრანა კარგავს თავის ფუნქციურ თვისებებს სელექტიური შრის განადგურების ან ტრანსფორმაციის გამო.

ამრიგად, პოლიმერული მემბრანების ქიმიური მდგრადობის შესწავლას აქვს თავისი სპეციფიკა და მოითხოვს ხანგრძლივ ექსპერიმენტებს, პირველ რიგში მემბრანების არა მექანიკური, არამედ სატრანსპორტო (ნივთიერებათა გადატანა) თვისებების ცვლილების გათვალისწინებით.

თხევადი ნარევების ფილტრაციისას სწრაფად ხდება მემბრანების გაბინდვა (დაბინძურება), სარეგენერაციო ხსნარების გამოყენებით წარმადობის აღდგენა საშუალებას იძლევა ასეთი მემბრანები გამოყენებული იქნას მრავალჯერადად, რაც ზრდის პროცესის ეკონომიურობა.

ცხრილი 3: პოლისულფონის მემბრანების ქიმიური მდგრადობა (თავსებადობა)

ქიმიური ნაერთები	თავსებადობა (პოლისულფონთან)	კომენტარი
წყალი და მარილების წყალხსნარები	ძალიან კარგი	ინარჩუნებს თვისებებს ხანგრძლივი ცხელი წყლის ზემოქმედების შემდეგაც;
მჟავები და ტუტეები (განზავებული–საშუალო კონცენტრაცია)	კარგი	სტაბილურია ოთახის ტემპერატურაზე მრავალი მინერალური მჟავისა და ტუტის მიმართ; ნაკლებად ძლიერი ჟანგბადშემცველი მჟავების (მაგ., კონცენტრირებული აზოტმჟავა) მიმართ
სპირტები (ეთანოლი, იზოპროპანოლი)	ძირითადად კარგი	მაღალი ტემპერატურის ან მექანიკური დატვირთვის პირობებში შესაძლებელია ბზარების წარმოქმნა (stress-cracking)
სარეცხი საშუალებები და დეზინფექტანტები	ძალიან კარგი	თავსებადია ტუტე სარეცხ საშუალებებთან
ნახშირწყალბადები	საშუალო	ალიფატური — მისაღებია; არომატული (ტოლუოლი, ქსილოლი) შეიძლება გამოიწვიოს გაჯირჯვება — საჭიროა ტესტირება
კეტონები და ესტერები (აცეტონი, ეთილაცეტატი)	ცუდი	იწვევს ბზარებს ან დაშლას — რეკომენდებულია მორიდება
ქლორირებული გამხსნელები (დიქლორმეთანი, ქლოროფორმი)	ცუდი	აზიანებს PSU-ს
ოქსიდანტები (მაგ. მათეთრებლები)	ცუდი ან საშუალო	დაბალი კონცენტრაციები ოთახის ტემპერატურაზე შეიძლება იყოს გამოყენებული, ხანგრძლივი ზემოქმედება არასასურველია.

3.6 მემბრანების ფორების დაბლოკვა (membrane blocking) და მისი თავიდან აცილების გზები

მემბრანული პროცესების ტექნიკური და ეკონომიკური მაჩვენებლები დიდ წილად განისაზღვრება მემბრანის მახასიათებლების სტაბილურობით დროის განმავლობაში, ანუ მემბრანის ფილტრაციული რესურსით.

მემბრანის თვისებების სტაბილურობა დროთა განმავლობაში ყველაზე მნიშვნელოვანი პირობაა იმ შემთხვევებში, როდესაც მემბრანა გამოიყენება გრძელვადიანი ფუნქციონირებისთვის განკუთვნილ მოწყობილობებში (სამრეწველო ქარხნებში). თუ მემბრანა განკუთვნილია ერთჯერადი გამოყენებისთვის (კვლევით ლაბორატორიებში, ერთჯერადი ოპერაციების დროს), ამ მოთხოვნას მეორეხარისხოვანი მნიშვნელობა აქვს.

მემბრანის გაჭუჭყიანება-გაბინდვა ეს არის პროცესი, რომლის დროსაც არასასურველი გამჭუჭყიანებელი ნივთიერებები, ნაწილაკები და მიკროორგანიზმები გროვდება გამფილტრავი მემბრანის ზედაპირზე ან ფორებში, ეს ნალექი ზღუდავს სითხის ნაკადის გადაადგილებას, ამცირებს ფილტრაციის ეფექტურობას და იწვევს ენერგიის მოხმარების გაზრდას [Mulder, 1996; Alammari et al., 2020].

მემბრანის ფორების დაბინძურება (Fouling) წარმოადგენს ადსორბირებული მოვლენების შედეგს, ამიტომ მნიშვნელოვანია მემბრანის მასალის სწორად შერჩევა. ჰიდროფობურ მემბრანებს, როგორც წესი, აღენიშნება ძლიერი ტენდენცია ფორების გაჭედვისკენ და ამიტომ ჩვეულებრივ გამოყენებული წნევისას გამხსნელი (წყალი) არ გაედინება მემბრანაში. ამის გადასაღებად წყალხსნარების ფილტრაციისას ჰიდროფობური მემბრანები გამოყენების წინ აუცილებელია წინასწარ უნდა დამუშავდეს სპირტით.

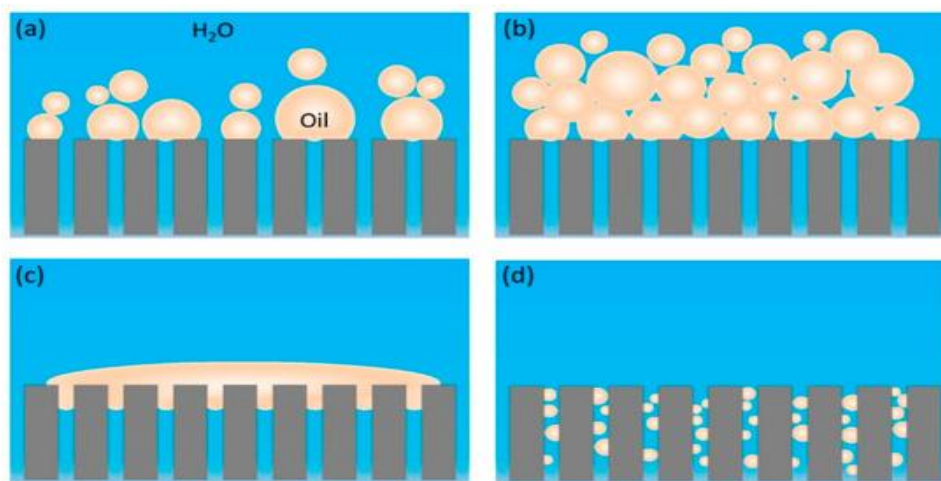
მემბრანების ფორების დაბლოკვა (membrane blocking) შეიძლება გამოწვეული იყოს რამდენიმე მიზეზით: გამოსაყოფი ხსნარის კომპონენტების ადსორბირების შედეგად, ფორების ბლოკირების და მემბრანის ზედაპირზე ცუდად ხსნადი ნივთიერებების ნალექის დეპონირების მიზეზით. მაგალითად, მემბრანის ფორების ჩაკეტვის მექანიზმი ნავთობი -წყლის ემულსიების ულტრაფილტრაციის დროს არის მემბრანის ფორების დაბლოკვა შეურევი სითხით (ნავთობით) [Dickhout et al., 2020].

ამ შემთხვევაში, სისტემის თვისებრივი აღწერა შესაძლებელია ლაპლასის განტოლების გამოყენებით:

$$P = (\gamma - \cos\theta)/r,$$

სადაც P არის კაპილარული წნევა; γ - წყალ-ზეთოვანი სისტემის ინტერფეისული დაძაბულობა; θ - დასველების (შეხების) კუთხე; r - არის მემბრანის ფორების რადიუსი.

პოლიმერული მატრიცის დასველების (შეხების) კუთხის მატებასთან ერთად, დაბლოკვის ხარისხი იზრდება, პროდუქტიულობა და შეკავება მცირდება.



სურათი 22. ჰიდროფილური და ჰიდროფობური მემბრანების ზედაპირის შედარება: ა–ბ) ჰიდროფილური მემბრანა; გ–დ) ჰიდროფობური მემბრანა.

აქედან გამომდინარე, განცალკევების ხარისხის მისაღწევად, მიზანშეწონილია დიდი ფორების მემბრანების გამოყენება, რომლებიც დამზადებულია ჰიდროფილური მასალებისგან. ამრიგად ისეთი ნარევის ფილტრაციისას, როგორიცაა წყალი-ნავთობის ემულსია დასაყოფად ჰიდროფობური მემბრანების გამოყენება არაპრაქტიკულია. სწორედ ამიტომ ნავთობიანი ჩამდინარე წყლების დამუშავებისას მნიშვნელოვანია მემბრანაზე ჰიდროფილური და სუპერჰიდროფილური ზედაპირის შექმნა, მაგალითად ქიმიური მოდიფიცირების გზით [Alammar et al., 2020]. ფორების ბლოკირების შედეგად, იკარგება საწყისი პროდუქტიულობის 92-98 %, ხოლო ჰიდროფილური ცელოლოზის მემბრანებისთვის ეს მაჩვენებელი 16-18%-ია.

შედარებით მარტივი ნარევების შემთხვევაში, როგორიცაა ნავთობი-წყლის ემულსიები, არსებობს ცალსახა კორელაცია განცალკევების ეფექტურობას (მემბრანის დაბლოკვის/რეგენერაციის ასპექტების ჩათვლით) და მემბრანის პოლიმერული მატრიცის ჰიდროფილობას შორის [Zhu et al., 2014].

3.7 პოლიმერული მემბრანების ფოროვნობა და ფორების ზომების განსაზღვრა

პოლიმერული მემბრანების ფორმირების დროს, გარდა მაღალი მექანიკური, თბო- და ქიმიური რეაგენტების მიმართ მდგრადობისა, გათვალისწინებული უნდა იყოს მემბრანის მაღალი სელექტიურობა და გასაფილტრი ხსნარის წარმადობა, რაც მიიღწევა მემბრანის ასიმეტრიულობითა და ზედაპირის მაღალი ფოროვნობით [Mulder, 1996].

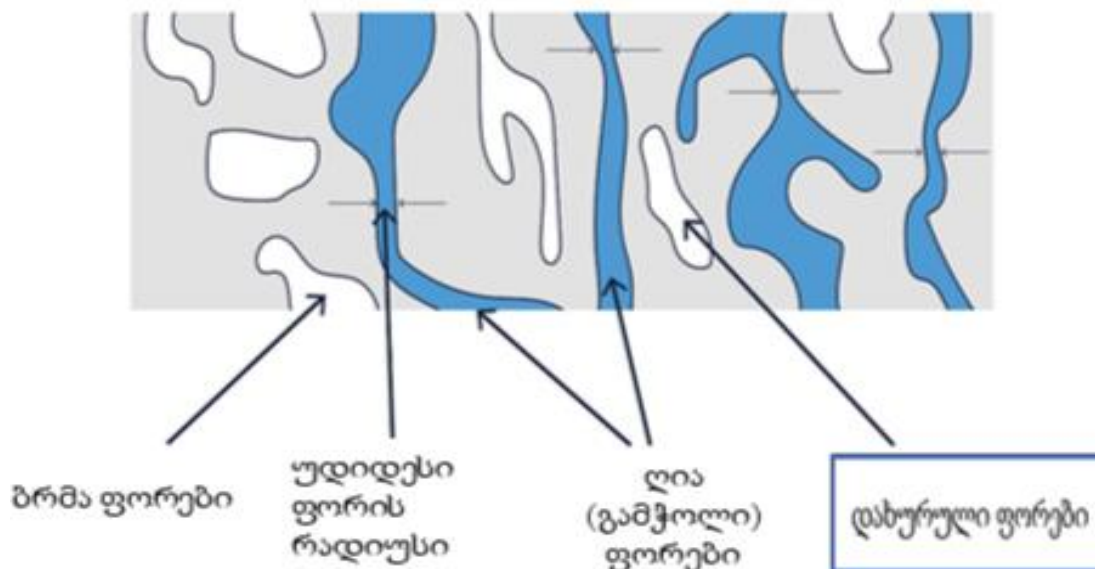
პოლიმერული მემბრანების ფოროვნობა და ფორების ზომები განისაზღვრება სხვადასხვა პარამეტრებით: საერთო ფოროვნობა, ფორების საშუალო და მაქსიმალური ზომები და მათი განაწილება ზომების მიხედვით. საერთო ფოროვნობაში იგულისხმება მასალაში ფორების საერთო მოცულობა.

$$Porosity (\%) = \frac{(W_w - W_d)/\rho}{V}$$

სადაც W_w , W_d შესაბამისად მემბრანის წონაა სველ და მშრალ მდგომარეობაში, ρ -წყლის სიმკვრივე (1 გრ/სმ³), V -მემბრანის მოცულობა.

მემბრანის მეორე მნიშვნელოვან პარამეტრს წარმოადგენს მისი ზედაპირული ფოროვნობა, რამდენადაც სწორედ ეს პარამეტრი განსაზღვრავს ზედაფენის სისქესთან კომბინაციაში მემბრანის წარმადობას.

ეფექტური ფოროვნობა - ეს ფორების ის ნაწილია, რომლებიც მონაწილეობენ სითხის ან აირის გადატანაში მემბრანის გავლით. ეს ფორებია, რომლებიც დაკავშირებული არიან ერთმანეთთან და წარმოქმნიან გამჭოლ არხებს.

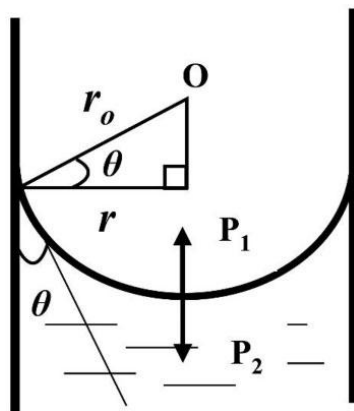


სურათი 23. ფორების სტრუქტურული ტიპები პოლიმერულ მემბრანაში (ბრმა ფორები, ღია გამჭოლი ფორები და დახურული იზოლირებული ფორები).

მემბრანის ფორების სიდიდის გაზომვა აირ სითხური (კაპილარული) ფორომეტრიის მეთოდით

აირ სითხური (კაპილარული) ფორომეტრიის მეთოდით (CFP) ხდება ფორების ზომისა და ფორების ზომების განაწილების განსაზღვრა [Gibson et al., 2020].

მეთოდის (ASTM Standard F316-03 (2019): *Standard test methods for pore size characteristics of membrane filters by bubble point and mean flow pore test*) არსი მდგომარეობს იმაში, რომ იზომება წნევა, რომელიც საჭიროა წყლით / პოროფილით დასველებულ მემბრანაში ჰაერის ბუშტულის გასასვლელად. ფილტრის ზედა ნაწილი კონტაქტშია სითხესთან, რომელიც ავსებს მემბრანის ყველა ფორს. გარკვეული წნევის დროს ჰაერის წნევის თანდათანობითი მატებით, ჰაერის ბუშტულები მემბრანის ფორებიდან გამოიღვანება.

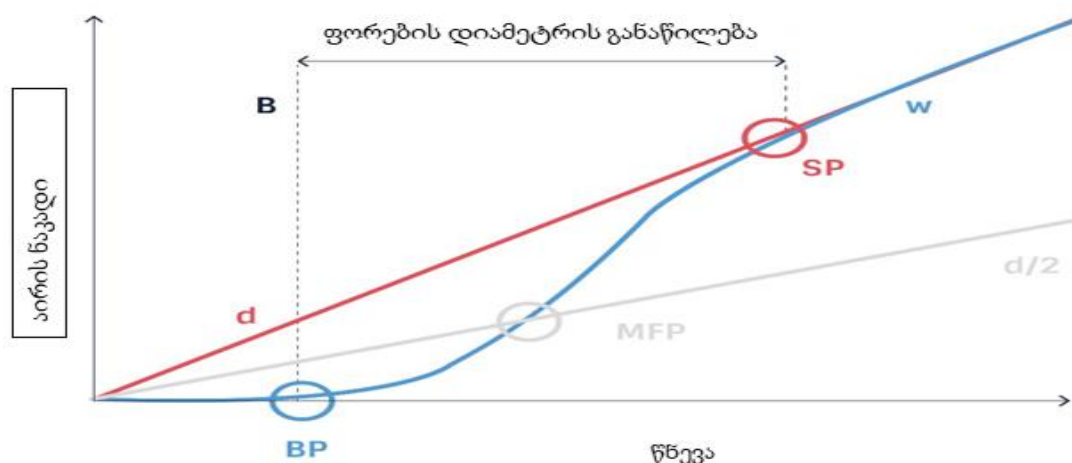


სურათი 24. მემბრანის კაპილარის სქემაში ფაზათაშორისი საზღვრისა და შეხების კუთხის სქემატური გამოსახულება.

დაბალ წნევაზე ჯერ უფრო დიდი ფორებიდან გამოიღვენება ფორების შემავსებელი სითხე (პოროფილი), წნევის შემდგომი გაზრდით ცარიელდება პატარა ფორები და ეს პროცესი მიმდინარეობს მანამ, სანამ ყველა ფორებიდან არ გამოიღვენება ფორების შემავსებელი სითხე (პოროფილი). წნევის ზემოქმედებით მემბრანის ფორებში გავლისას აირის ნაკადის ცვლილება ფიქსირდება და მიიღება მრუდი, რომელიც გამოხატავს აირის ნაკადის ცვლილების დამოკიდებულებას წნევაზე.

წნევის სკანირების მეთოდით წნევა მუდმივად იზრდება მუდმივი სიჩქარით და იზომება აირის ნაკადი ნიმუშში. წნევის გაზრდის სიჩქარე და გაზომვის დროს დაფიქსირებული მონაცემთა რაოდენობა შეიძლება დარეგულირდეს მომხმარებლის მიერ. ეს მეთოდი არის სწრაფი და არადესტრუქციული.

ფორომეტრით გაზომილი ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი პარამეტრი არის პირველი ბუშტულის წერტილი ანუ FBP; ასევე წნევა, რომლის დროსაც აღმოჩენილია პირველი უწყვეტი ბუშტულები. ეს წერტილი განსაზღვრავს მასალის შიგნით არსებულ უდიდეს ფორებს.



W = „სველი“ მრუდი
 d = „მშრალი“ მრუდი
 $d/2$ = „ნახევრად მშრალი“ მრუდი
 BP = უდიდესი ფორი
 MFP = საშუალო ფორი
 SP = უმცირესი ფორი

სურათი 25. კაპილარული ფორომეტრის ტიპური მრუდები „სველი“ (*wet*), „მშრალი“ (*dry*) და „ნახევრად მშრალი“ მრუდი (*half-dry*); უდიდესი ფორის (BP), საშუალო ფორის (MFP) და უმცირესი ფორის (SP) წერტილები.

სტანდარტის მიხედვით ხდება ფოროვანი ნიმუშის გაჟღენთვა ინერტული და არატოქსიკური ფორების შემავსებელი სითხით. სითხის ფოროვანი ქსელიდან გამოსადევნად (ე.წ. „სველი“ გაშვება) გამოიყენება ინერტული აირი (მაგ. აზოტი). „სველი მრუდი“ წარმოადგენს აირის წაკადის ცვლილებას მემბრანის ფორებში გავლისას. ასევე იზომება აირის წაკადი მშრალ ნიმუშზე („მშრალი გაშვება“). „ნახევრად მშრალი მრუდი“ მიიღება წაკადის მნიშვნელობების „გაშუალებით“.

ფორების დიამეტრის გამოთვლა შესაძლებელია იანგ-ლაპლასის განტოლებით გარკვეული დიამეტრის ფორებიდან სითხის გამოსადევნად საჭირო წნევის მიხედვით:

$$P = \frac{4 \cos \theta \gamma}{D}$$

სადაც P -არის ფორიდან სითხის გამოდევნისათვის საჭირო წნევა, θ არის შემავსებელი სითხის კონტაქტის კუთხე, γ შემავსებელი სითხის ზედაპირული დაძაბულობა და D - ფორების დიამეტრი. ფორის გაზომილი დიამეტრი განისაზღვრება ფორის ყველაზე ვიწრო მონაკვეთის (ფორის „ყელის“) დიამეტრით.



სურათი 26. ფორომეტრი POROLUX™ 500 (POROMETER NV).

ფორომეტრზე - **POROLUX™ 500** გამოთვლა ხდება პროგრამულად. კერძოდ, ხელსაწყო იძლევა ინფორმაციას ყველაზე დიდი (BP), საშუალო (MFP) და ფორების უმცირესი (SP) ზომების სიდიდეების (მკმ) შესახებ. განისაზღვრება ფორების ზომის განაწილება, ნაკადის კუმულაციური განაწილება, აირის გამტარიანობა.

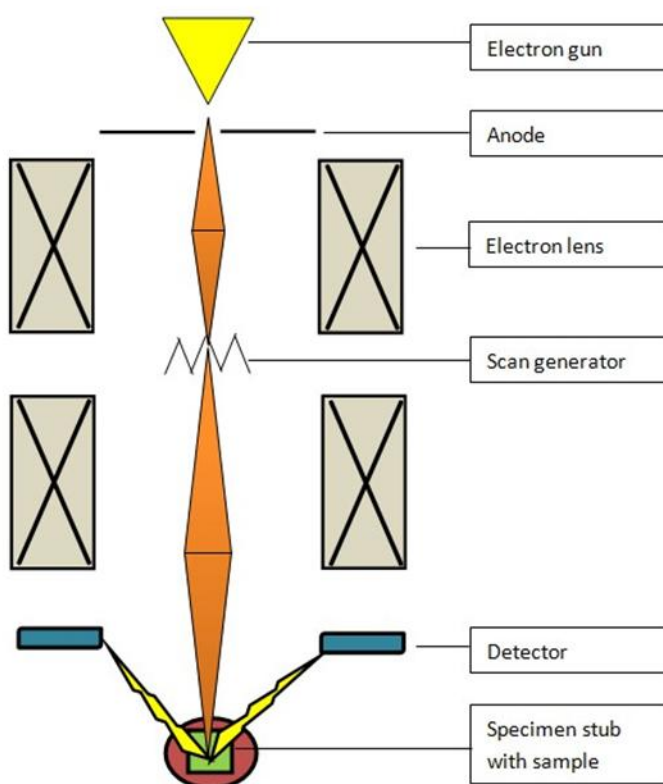
- **კუმულაციური ნაკადი [SUM]** აჩვენებს აირი ნაკადის იმ პროცენტს (Y-ღერძი), რომელმაც გაიარა ფორებში, რომელთა ზომა აღემატება X ღერძზე შესაბამის წერტილში არსებულ მნიშვნელობას. იგი პირდაპირ ახასიათებს ფილტრის ეფექტურობას.
- **დიფერენციალური ნაკადი [DIF]** აჩვენებს აირის ნაკადის იმ პროცენტულ წილს (Y-ღერძი), რომელიც მოდის შესაბამისი ზომის ფორების ინტერვალზე X ღერძზე; იგი წარმოადგენს „ფორების ზომის სიხშირეს“ (განაწილების სიმკვრივეს).

მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპია (SEM)

მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპია (SEM) გამოიყენება სხვადასხვა მასალის ზედაპირის ვიზუალიზაციისთვის. სინათლის მიკროსკოპისგან განსხვავებით, მიიღწევა მრავალჯერადი გადიდება და მაღალი გარჩევადობა ელექტრონული წყაროს (CeB6) გამოყენებით.

ჰაერის ატომებთან ელექტრონების ურთიერთქმედების თავიდან ასაცილებლად პროცესი მიმდინარეობს ვაკუუმის სისტემაში, რაც უზრუნველყოფს აგრეთვე, რომ არ მოხდეს ნაპერწკლების წარმოშობა ელექტრონის წყაროსა და დეტექტორების სიახლოვეს მაღალი ამპერაჟის გამო.

საკვლევ ნიმუშზე ელექტრონული სხივის ფოკუსირება ხორციელდება ელექტრომაგნიტური ხვეულებით.

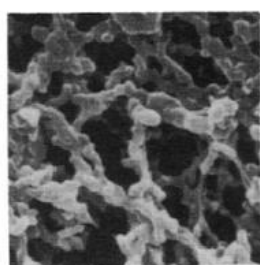


სურათი 27. მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპის (SEM) პრინციპული სქემა.

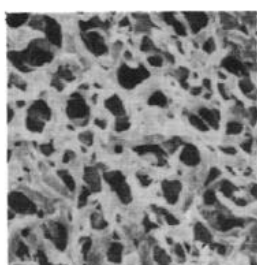


სურათი 28. მასკანირებელი მიკროსკოპი Phenom XL.

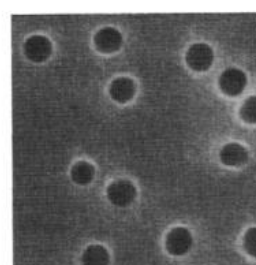
ნიმუშზე ელექტრონული სხივის მიმართვის შემდეგ ელექტრონული სხივი წრფივად ასკანირებს ნიმუშის ზედაპირს ელექტრომაგნიტური ველების საშუალებით (რასტრული სკანირება). ნიმუშსა და ელექტრონულ სხივს შორის ურთიერთქმედების შედეგად წარმოიქმნება უკუ არეკლილი ელექტრონები და დამახასიათებელი რენტგენული გამოსხივება. ეს სიგნალები მაღალმგრძნობიარე დეტექტორების მიერ გარდაიქმნება ციფრულ გამოსახულებად, რომელიც იძლევა უზუსტეს ინფორმაციას მემბრანის ზედაპირის ტოპოგრაფიაზე, ფორმის მორფოლოგიასა და ასიმეტრიული შრეების სტრუქტურაზე.



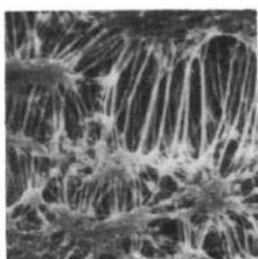
Mixed esters of cellulose membrane.



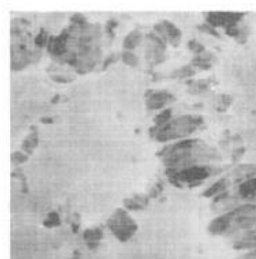
Durapore polyvinylidene difluoride membrane.



Isopore track-etched polycarbonate membrane.



Fluoropore PTFE membrane.



Solvex polypropylene membrane.

სურათი 29. სხვადასხვა მემბრანების ზედაპირის SEM ფოტოები

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Aguilera, F., Méndez, J., Pásaro, E., & Laffon, B. (2010). Review on the effects of exposure to spilled oils on human health. *Journal of Applied Toxicology*, 30(4), 291–301.
<https://doi.org/10.1002/jat.1522>
2. American Petroleum Institute. (1999). *Fate and effects of oil in marine ecosystems*. Author.
3. Amnesty International. (2020). *Reports on Niger Delta spills*. Amnesty International.
4. Arctic Review on Law and Politics. (2013). Legal and environmental aspects of oil spills in the Russian Arctic. *Arctic Review on Law and Politics*, 4(2), 45–62.
5. Atlas, R. M., & Hazen, T. C. (2011). Oil biodegradation and bioremediation: A tale of the two worst spills in U.S. history. *Environmental Science & Technology*, 45(16), 6709–6715. <https://doi.org/10.1021/es2013227>
6. Baker, J. M. (1995). *Marine pollution from oil*. Elsevier.
7. Barron, M. G., Vivian, D. N., Heintz, R. A., & Yim, U. H. (2020). Long-term ecological impacts from oil spills: Comparison of Exxon Valdez, Hebei Spirit, and Deepwater Horizon. *Environmental Science & Technology*, 54(11), 6456–6467.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05020>
8. Beagan, A., Lin, J., Lu, Y., & Mohamed, M. E. (2024). Sustainable and efficient oil-water separation using bio tin oxide-based superhydrophobic membrane. *Frontiers in Water*, 6, Article 1390739. doi.org
9. Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V., & Collier, T. K. (2016). Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 28–51. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027>
10. BP. (2010). *BP accident investigation report*. BP.
11. Chen, J., Zhang, W., Wan, Z., Li, S., Huang, T., & Fei, Y. (2019). Oil spills from global tankers: Status review and future governance. *Journal of Cleaner Production*, 227, 20–31.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.020>
12. Chow, D. (2021, October 7). How we clean oil spills hasn't changed in decades. These scientists want to change that. *NBC News*.
<https://www.nbcnews.com/science/environment/clean-oil-spills-hasnt-changed-decades-scientists-want-change-rcna2649>
13. Das, N., & Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview. *Biotechnology Research International*, 2011, 941810.
<https://doi.org/10.4061/2011/941810>
14. Etkin, D. S. (2001). *Worldwide analysis of oil spill response resources: A report to the International Oil Spill Conference*. Cutter Information Corp.
15. Etkin, D. S., & Nedwed, T. J. (2021). Effectiveness of mechanical recovery for large offshore oil spills. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 111848.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111848>
16. Farahani, M. D., & Zheng, Y. (2022). The formulation, development and application of oil dispersants. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 425.
<https://doi.org/10.3390/jmse10030425>

17. Fingas, M. (2013). *The basics of oil spill cleanup* (3rd ed.). CRC Press.
18. Fingas, M. F. (2011). *Oil spill science and technology: Prevention, response, and cleanup*. Elsevier.
19. Florida Department of Environmental Protection. (2023, September 11). *Media fact sheet for in-situ burning of oil spills*. <https://floridadep.gov/dle/oer/content/media-fact-sheet-situ-burning-oil-spills>
20. Hong, S., Khim, J. S., Ryu, J., Kang, S.-G., Shim, W. J., & Yim, U. H. (2014). Environmental and ecological effects and recoveries after five years of the Hebei Spirit oil spill, Taean, Korea. *Ocean & Coastal Management*, 102, 350–360. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.01.006>
21. International Tanker Owners Pollution Federation. (2014). *Oil tanker spill statistics 2013*. International Tanker Owners Pollution Federation.
22. International Tanker Owners Pollution Federation. (2020). *Oil tanker spill statistics 2019*. International Tanker Owners Pollution Federation.
23. International Tanker Owners Pollution Federation. (2003). *Prestige oil spill report*. ITOPF.
24. International Tanker Owners Pollution Federation. (2007). *MT Hebei Spirit incident case study*. ITOPF.
25. Jernelov, A. (2010). The threats from oil spills: Now, then, and in the future. *Ambio*, 39, 353–366. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0085-5>
26. K, N. P. (2025, May 29). *Shipwreck raises concerns about ecological damage in Kerala*. Mongabay India. <https://india.mongabay.com/2025/05/shipwreck-raises-concerns-about-ecological-damage-in-kerala/>
27. Kerlin, K. (2021, November 8). *Crude awakenings: An oil spill, a tiny bird and a big care network*. UC Davis Veterinary Medicine. <https://www.vetmed.ucdavis.edu/news/crude-awakenings>
28. Kim, J., et al. (2009). PAH contamination after Hebei Spirit spill. *Environmental Science & Technology*, 43(7), 2370–2375.
29. Kingston, P. F. (2002). Long-term environmental impact of oil spills. *Spill Science & Technology Bulletin*, 7(1–2), 53–61. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00051-8](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00051-8)
30. Leahy, J. G., & Colwell, R. R. (1990). Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiological Reviews*, 54(3), 305–315.
31. Ministry of Natural Resources, Russia. (1995–2020). *Kolva River oil spill reports*. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation.
32. National Ocean and Atmospheric Administration. (2024, July 8). *How do we track oil spills?* National Ocean Service. <https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial-coastal/oil-spills/os03-sub-01.html>
33. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2016). *Deepwater Horizon oil spill final programmatic damage assessment*. NOAA.
34. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2025, March 20). *What happened during the Deepwater Horizon oil spill?* National Ocean Service. <https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial-coastal/oil-spills/os04-sub-01.html>

35. National Research Council. (2003). *Oil in the sea III: Inputs, fates, and effects*. National Academies Press.
36. Nature. (2021). Environmental impacts of the MV Wakashio oil spill. *Nature*, 593, 123–128.
37. Pérez, L., et al. (2008). Prestige oil spill environmental impact. *Marine Pollution Bulletin*, 56(1), 101–115.
38. Peterson, C. H., Rice, S. D., Short, J. W., Esler, D., Bodkin, J. L., Ballachey, B. E., & Irons, D. B. (2003). Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. *Science*, 302(5653), 2082–2086. <https://doi.org/10.1126/science.1084282>
39. Pinedo, J., Ibáñez, R., Lijzen, J. P. A., & Irabien, Á. (2013). Assessment of soil pollution by petroleum hydrocarbons: A review. *Journal of Environmental Management*, 130, 315–331. doi.org
40. Prince, R. C. (2015). Oil spill dispersants: Boon or bane? *Environmental Science & Technology*, 49(11), 6376–6384. <https://doi.org/10.1021/es504699g>
41. Rosprirodnadzor. (2020). *Norilsk diesel spill incident report*. Federal Service for Supervision of Natural Resources, Russia.
42. Russell, S. (2023, February 21). *Progress in the bioremediation of oil spills and other eco-friendly approaches*. Environment.co. <https://environment.co/bioremediation-of-oil-spills/>
43. Science. (2012–2016). Series of publications on the ecological impacts of the Deepwater Horizon oil spill. *Science*.
44. Speight, J. G. (2014). *The chemistry and technology of petroleum* (5th ed.). CRC Press.
45. Sporrer, A. (2022, March 10). *When oil is spilled: What happens next?* FreightWaves. <https://www.freightwaves.com/news/when-oil-is-spilled-what-happens-next>
46. UNEP. (2011). *Environmental assessment of Ogoniland*. United Nations Environment Programme.
47. UNEP. (2020). *Wakashio spill situation report*. United Nations Environment Programme.
48. UNESCO/ROPME. (2006). *Regional reports on marine pollution: Jebel Ali oil spill*. UNESCO/ROPME.
49. U.S. Environmental Protection Agency, & U.S. Coast Guard. (2005–2015). *Joint spill reports: Norco & Bay Marchand*. U.S. Environmental Protection Agency/U.S. Coast Guard.
50. Wang, J., Chen, Y., Xu, Q., Cai, M., Shi, Q., & Gao, J. (2021). Highly efficient reusable superhydrophobic sponge prepared by a facile, simple and cost effective biomimetic bonding method for oil absorption. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91396-9>
51. WWF Arctic Programme. (2021). *Assessment of Arctic diesel spill impacts*. World Wildlife Fund.
52. Yan, K., Zhao, F., Pan, L., Jiang, Y., Shi, Y., & Yu, G. (2023). High-throughput clean-up of viscous oil spills enabled by a gel-coated mesh filter. *Nature Sustainability*, 6, 1654–1662. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01217-2>

53. Zhang, B., et al. (2021). Dispersants as marine oil spill treating agents: A review on mesoscale tests and field trials. *Environmental Systems Research*, 10, 37.

<https://doi.org/10.1186/s40068-021-00241-5>

54. საქართველოს მთავრობა. (2014, 15 იანვარი). *სასმელი წყლის ტექნიკური რეგლამენტის დამტკიცების შესახებ* (დადგენილება №58). სსიპ „საქართველოს საკანონმდებლო მაცნე“.

<https://matsne.gov.ge/ka/document/view/2196792?publication=0>

ინტერნეტიდან გამოყენებული ფოტოების და ილუსტრაციების წყაროები:

სურათი 1. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2010). *Oil spill weathering and environmental transport processes* [Infographic]. U.S. Department of Commerce. noaa.gov

სურათი 2 Timmer26. (2016). *Biodegradation of pollutants* [Infographic]. Wikimedia Commons. wikimedia.org

სურათი 3. Elastec, Inc. (n.d.). *Floating drum oil skimmers for spill response operations* [Image]. <https://www.elastec.com>

სურათი 4 UltraTech International, Inc. (n.d.). *Ultra-rapid boom: The fastest deploying oil boom on the planet* [Product Image]. <https://spillcontainment.com>

სურათი 5. Absorbents Online. (2022, June 13). *What are sorbents for oil spills, how do they work, and what are they made from?* [Image]. Absorbents Online Blog. <https://www.absorbentsonline.com/spill-containment-blog/what-are-sorbents-for-oil-spills/>

სურათი 6. Ward, C. P., & Reddy, C. M. (2018). *Photochemical oxidation of oil reduced the effectiveness of aerial dispersants applied in response to the Deepwater Horizon spill*. *Environmental Science & Technology Letters*, 5(5), 226–231. doi.org

სურათი 7. Ebadi, A., Khoshkholgh Sima, N., Olamaee, M., Hashemi, M., & Ghasemi, A. (2022). Bioremediation by oil degrading marine bacteria: An overview of supplements and pathways in key processes. *Chemosphere*, 303, Part 1, 134956. doi.org

სურათი 8. Fritt-Rasmussen, J., Wegeberg, S., Gustavson, K., Sanni, S., Jézéquel, R., Magnussen, J., & Brandvik, P. J. (2023). Coastline in-situ burning of oil spills, analysis of a Greenland field experiment. *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129976. doi.org

სურათი 9. FRC Systems. (n.d.). *High-efficiency CPI oil-water separator for industrial and petrochemical wastewater treatment* [Product Image]. FRC Wastewater Systems. <https://www.frcsystems.com>

სურათი 10 Newterra. (n.d.). *Industrial wastewater treatment systems and engineered solutions for oil and gas sectors* [Industrial Image]. Newterra Clean Water Technologies. newterra.com

სურათი 11.

Napier-Reid. (n.d.). *DIFLOAT™ dissolved air flotation (DAF) systems for industrial wastewater clarification* [Product Image]. Napier-Reid Water and Wastewater Treatment Solutions. <https://napier-reid.com>

სურათი 12. Paradiso, C. (2020). *Wide aerial of water purification circle, clean drinking water. Sewage treatment plant in the sun* [Stock Video/Image]. [Adobe Stock. https://stock.adobe.com/video/wide-aerial-of-water-purification-circle-clean-drinking-water-ecosystem-of-filtration-fresh-water-and-water-management-sewage-treatment-plant-in-the-sun/370538774](https://stock.adobe.com/video/wide-aerial-of-water-purification-circle-clean-drinking-water-ecosystem-of-filtration-fresh-water-and-water-management-sewage-treatment-plant-in-the-sun/370538774)

სურათი 13. Hebei Huayu Environmental Engineering Co., Ltd. (n.d.). *Advanced high-efficiency ultrafiltration water treatment system for industry* [Product Image]. Made-in-China. <https://huayuhan.en.made-in-china.com/product/eQOYaykAHSpG/China-Advanced-High-Efficiency-Ultrafiltration-Water-Treatment-System-for-Industry.html>

სურათი 14. SSWM. (2011). *Activated carbon filters for water treatment and industrial adsorption processes* [Product Image]. Sustainable Sanitation and Water Management Knowledge Base. <https://sswm.info/es/sswm-university-course/module-6-disaster-situations-planning-and-preparedness/further-resources-0/adsorption-%28activated-carbon%29>

სურათი 26. <https://www.porometer.com/>

სურათი 29. Baker, R. W. (2012). *Membrane technology and applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

4. სამეცნიერო ლიტერატურის მიმოხილვა

4.1 ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების (ნ/პ) შემცველი წყლების გაწმენდა

ნავთობპროდუქტებით (ნ/პ) დაბინძურებული წყლები ძირითადად წარმოიქმნება ნავთობის შემნახველი მოცულობების დაცლის ან გამორეცხვის შემდეგ, ნავთობის გადაქაჩვის და ტრანსპორტირების დროს დაღვრების შემთხვევაში, ასევე ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებულ წყლებს წარმოქმნის ტანკერების ე.წ. ტრიუმის წყლები, ბენზინგასამართი სადგურების ჩამდინარე წყლები.

ნავთობით და ნავთობპროდუქტებით წყლების გაწმენდის ტექნოლოგიურ პროცესებში გამოიყენება როგორც მექანიკური, ასევე ფიზიქიმიური, ბიოლოგიური და ქიმიური მეთოდები. მათ შორისაა კოაგულაცია [Puszkarewicz A, 2008; Hassan et al., 2019; Zhao et al., 2021], ფლოტაცია [Calcagnile et al., 2012; Zouboulis & Avranas, 2000], ბიოდეგრადაცია [Yin et al., 2009; Gupta et al., 2011], მემბრანული ფილტრაცია [Janknecht et al., 2004; Tomaszewska et al., 2005], თანამედროვე ჟანგვითი პროცესები [Santos et al., 2006] და კომბინირებული ტექნოლოგიები [Benito et al., 2002; Beery et al., 2018].

ნავთობშემნახველი მოცულობების დაცლის ან გამორეცხვის შემდეგ მიღებული ტექნოლოგიური წყალი, შეიცავს ნ/პ-ს (ნავთობნახშირწყალბადები, მაზუთი, კეროსინი, მინერალური ზეთები და მათი მინარეთები), გამრეცხ საშუალებებს და ნავთობშლამს. ეს ტექნოლოგიური წყალი გასაწმენდად მიეწოდება ნავთობდამლექავ მოწყობილობას ან გაწმენდის გარეშე ჩაედინება კანალიზაციაში, მდინარეში ან ზღვაში და წარმოადგენს მზარდ ეკოლოგიურ საშიშროებას.

რაც უფრო დიდია ნავთობ ნახშირწყალბადებში ნახშირბადის ატომების რიცხვი, მით უფრო ნაკლებად ხსნადია ის წყალში. ხსნადობა იზრდება მწკრივში ალკანები < ციკლოალკანები < არომატული ნახშირწყალბადები. წყალზე მოტივტივე ნავთობის ფენას წყლიდან აცილებენ სპეციალური ტექნიკური მოწყობილობებით და ამის შემდეგ წყალში რჩება 20-40 მგ/ლ-მდე ნ/პ გახსნილ ან ნაწილობრივ ემულგირებულ მდგომარეობაში.

ნავთობის დაღვრების დროს წყლიდან გახსნილი ან ემულგირებული ნ/პ-ის მოსაშორებლად მიმართავენ ფლოტაციურ და სორბციულ მეთოდებს [Payne et al., 2012; Evdokimova et al., 2012; Calcagnile et al., 2012]. ამ მეთოდების გამოყენებით ნ/პ-ის შემცველობა მცირდება შესაბამისად 10-12 და 0,1-0,2 მგ/ლ -მდე [Paulauskienė et al., 2014; Adebajo et al., 2003].

ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნის საწარმოო წყლების გასუფთავება მიმდინარეობს შემდეგი სქემით: ქვიშის ფილტრები, ნავთობდამჭერები, დასაყოვნებელი რეზერვუარები, ბიოგასუფთავება ბიორექტორებზე, საბოლოო გასუფთავება ფლოტატორებზე და ბიოტბორებზე.

ჩამდინარე და ტექნოლოგიური წყლების გასაწმენდად გამოიყენება ბიოტბორები, სადაც შერწყმულია ფილტრაცია და ბიოდაჟანგვა. ფილტრი შეიძლება იყოს კერამიტიკის მარცვლები, პერლიტი. ბიოლოგიური მეთოდებიდან აღსანიშნავია ბაქტერიებით ზემოქმედება, რომლებიც ღებულობენ ნავთობის დაშლაში მონაწილეობას. მათი კულტივირება გაძნელებულია [Yin et al., 2008; Jain et al., 2017].

წინარე გაწმენდის დამლექავებში ნავთობპროდუქტების კონცენტრაცია მცირდება 50-100 მგ/ლ-მდე, გაწმენდის შედარებით მაღალი ხარისხი მიიღება ისეთი მეთოდების გამოყენების დროს, როგორიცაა: კოაგულაცია (30-40 მგ/ლ-მდე), რეაგენტული ფლოტაცია (10-20 მგ/ლ-მდე), ელექტროფლოტაცია (2-10მგ/ლ-მდე), ოზონირება (2 მგ/ლ-მდე), ბიოდაჟანგვა (3-5 მგ/ლ-მდე).

ეკოლოგიური თვალსაზრისით გამორიცხულია დამუშავება კოაგულანტებით, რომ გარემოში დამატებით ქიმიური ნაერთები არ იქნეს შეყვანილი.

რადგანაც ფლოტაციურ მეთოდში გამოყენებული ფლოტორეაგენტები თავად აბინძურებენ წყლებს, ხოლო მიღებული შლამების შემდგომი უტილიზაცია სირთულეს წარმოადგენს, ამიტომ ტრადიციულად იყენებენ ისეთ მეთოდებს, როგორიცაა სორბცია [Emenike et al., 2022, Wang et al.,], კოაგულაცია [PUSZKAREWICZ et al., 2008], ბიოდეგრადაცია [Jain et al., 2011] და მემბრანული ფილტრაცია [Janknecht et al., 2004].

საინტერესოა ახალი „მწვანე“ ტექნოლოგიები, სადაც გამოყენებულია ნ/პ-ის დაჟანგვისათვის ელექტროქიმიური მეთოდები [Santos et al., 2005].

გასუფთავების ტრადიციული მეთოდების გამოყენება დაკავშირებულია ელექტროენერგიის და ქიმიური რეაგენტების დიდ ხარჯთან, ტექნოლოგიურ პროცესებს სჭირდება დიდი ფართობი და ამავე დროს გაწმენდის ხარისხი არ აკმაყოფილებს ეკოლოგიის თანამედროვე მოთხოვნებს.

ტრადიციულ (ფლოტაცია, კოაგულაცია, ბიოდეგრადაცია, მემბრანული ფილტრაცია) მეთოდებთან ერთად გაწმენდის უკეთესი მაჩვენებლის მისაღწევად გამოიყენება კომბინირებული ტექნოლოგიები. მაგალითად: მატრიცაში მიკრობების ჩანერგვა და სორბციის და ბიორემედიაციის კომპლექსური გამოყენება [Scaffaro et al., 2017], სორბცია და მემბრანული ფილტაცია [Younis et al., 2020], ფლოტაცია-კოაგულაცია [Zouboulis et al., 2020], ფლოტაცია და ფილტრაცია კერამიკულ მემბრანებზე [Beery et al., 2018], ულტრაფილტრაცია და სორბცია [Benito, et al.2002].

4.2 ჩამდინარე წყლების სორბციული გაწმენდის თანამედროვე მიდგომები

ჩამდინარე წყლების ნავთობპროდუქტებიდან გაწმენდის წინარე საფეხურების შემდეგ ფიზიკური მეთოდებიდან ყველაზე ეფექტურია სორბცია [Sirotkina et al., 2005], რისთვისაც სორბენტებად შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა ტიპის ფოროვანი მასალა.

ძირითადი მოთხოვნა, რაც წაეყენება სორბენტებს, ესაა არატოქსიკურობა, ეფექტურობა, სიიაფე, მრავალჯერადობა და გამოყენების შემდეგ უტილიზაცია [Radetić et al., 2003; Gohub et al., 2018; Nechchadi et al., 2020]

ფართო გამოყენება აქვს მცენარეული წარმოშობის სორბენტებს: ტორფს [Cojocar et al., 2011], ხის ნახერხს [Benyoucef et al., 2020], ნანოსტრუქტურებულ ცელულოზას [Mahfoudhi et al., 2017], ბამბის ბოჭკოს [Deschamps et al., 2003; Lv et al., 2018], ჩალას [Sidiras et al., 2011; Pires et al., 2021] და ა.შ.

სორბენტის სახით გამოიყენებენ არაორგანული სორბენტებსაც: პერლიტს [Bandura et al., 2017], ვერმიკულიტს [Patent 28], კერამზიტს.

სინთეზური სორბენტებიდან აღსანიშნავია: პოლიურეთანი, პოლივინილქლორიდი, ნეილონი, პოლიპროპილენი, პოლიაკრილატი [Zilouei et al., 2015; Bamufleh et al., 2017; Emenike et al., 2022; Hoang et al., 2017; Mottaghi et al., 2021].

სორბენტების ტევადობა სხვადასხვაა მათი ბუნებიდან გამომდინარე და იცვლება ფართო (1- დან 66 გ/გ -მდე) დიაპაზონში. პრაქტიკაში სორბციული მეთოდით გაწმენდას მიმართავენ ნავთობის დაბალი კონცენტრაციის დროს. გაწმენდის ტექნოლოგიის გამოყენების დროს რაოდენობრივი და თვისობრივი მაჩასიათებლების გარდა მნიშვნელოვანია პროცესის ეკონომიურობა.

ყველაზე მარტივი და ეფექტურია მჟონავი გაფილტვრა ადსორბენტის შრეში, რისთვისაც შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა ტიპის სორბენტები.

ავტორების მიერ [Nenkova et al., 2003] ნავთობპროდუქტებით გაჭუჭყიანებული წყლების გასაწმენდად გამოყენებულია ხის ბოჭკო, ხის ბოჭკოს ჰიდროლიზით მიღებული ტექნიკური ლიგნინი, ხის ნახერხი (თელა) და მუხის ქერქი, ასევე მატყლის ძენძი, მატყლის ძენძის და ქიმიური ბოჭკოს ნარევი (პოლიამიდი, ცელულოზის ბოჭკო 60%). წყლის გაწმენდის ხარისხის შესაფასებლად გამოყენებულია ქიმიურად მოხმარებული ჟანგბადის მაჩვენებელი (COD). სორბციის უკეთესი უნარი აღმოაჩნდა სორბენტებს: მატყლის ძენძი, მატყლის ძენძის და ქიმიური ბოჭკოს ნარევი (პოლიამიდი, ცელულოზის ბოჭკო 60%).

შესწავლილია და კარგი ადსორბციული თვისებები აქვს გააქტივებულ ნახშირს, ბენტონიტებს [Okiel et al., 2011], სინთეზური ცეოლიტებს [Li et al., 2013; Bandura et al., 2015].

სინთეზური ცეოლიტები, კერძოდ Na-X მოდიფიცირებული კლინოპტილოლიტი (სორბციული ტევადობა - 0,91 გ/გ) და კომერციული სორბენტი - Absodan (სორბციული ტევადობა 0,52 გ/გ) ავლენენ 2-ჯერ მეტ ადსორბციის უნარს, ვიდრე კლინოპტილოლიტი (სორბციული ტევადობა 0,36 გ/გ) [Bandura et al., 2015].

ყველაზე იაფფასიანია საწარმოო ნარჩენი ხის ნახერხი და ასევე აგროინდუსტრიის ნარჩენი სხვადასხვა მცენარეული ნედლეული, მაგ. ადგილობრივი ხილის ანარჩენი [Alaa El-Din et al., 2018; Pires et al., 2021], სიმინდის ტარო [Nwadiogbu et al., 2016], ჩაის გადამუშავების ანარჩენი [Geetha et al., 2013], შაქრის ლერწმის გადამუშავების ანარჩენები [Brandão et al., 2010; Kudaybergenov et al., 2015; Xia et al., 2020, Al-Najar et al., 2023; Spiridon et al., 2024].

ნაშრომში [Vlaev et al., 2011] შესწავლილია ბრინჯის დამუშავების ანარჩენების (rice husks ash) გამოყენება ნედლი ნავთობის და დიზელის შემცველი ტრიუმის წყლის წინარე გასუფთავებისთვის (მიკრო- და ულტრაფილტრაციამდე). დადგენილია, რომ ანარჩენები სორბირებს უფრო მეტ ნედლ ნავთობს, ვიდრე დიზელს.

ნაშრომში ავტორების მიერ [Zubaidi et al. 2015] აღწერილია ნედლი ნავთობის შემცველი წყლების გაწმენდა ბიოდეგრადირებადი ნატურალური სორბენტების გამოყენებით (ადგილობრივი მცენარეები: მასოფა და იუდა), მათი ნავთობტევადობა შესაბამისად ტოლია -5.415 გ/გ და 6.281 გ/გ.

სორბციის უნარი დიდად არის დამოკიდებული ნანოფორების ზომებზე. ავტორთა [Jin, et al., 2017] კვლევები ეძღვნება ნანოსტრუქტურებული ნახშირის გამოყენებას ნავთობპროდუქტების შემცველი წყლების გასაწმენდად.

მაღალი სორბციული თვისებები აქვს გააქტივებული ნახშირს, რომელსაც გააჩნია მეზოფორული განვითარებული სისტემა და მაღალი ადსორბციის უნარი. ავტორების მიერ [Gvazava et al., 2016] ადსორბენტად (დინამიურ პირობებში) გამოყენებულია საქართველოს ტყიულ შაორის საბადოს ქვანახშირი.

სტატიაში [Okiel et al., 2011] წყალში ემულგირებულ მდგომარეობაში მყოფი ნავთობის ადსორბციისთვის გამოყენებულია გააქტივებული ნახშირი, ბენტონიტი და ჩანაცვლებული ნახშირი (Deposited carbon). ადსორბციის კარგი მაჩვენებელი აქვს ე.წ. ჩანაცვლებული ნახშირს და ბენტონიტს. შესწავლილია ისეთი პარამეტრები, როგორიცაა ადსორბენტთან კონტაქტის დრო, ადსორბატის კონცენტრაცია, ადსორბციის იზოთერმები.

ნაშრომში [Golub et al., 2017] ავტორების მიერ შესწავლილია C_7H_{16} - $C_{38}H_{78}$ ნავთობპროდუქტების შემცველი ხელოვნური ნარევის (Artificial solution) დაყოფა სტატიკურ და დინამიკურ პირობებში. საუკეთესო სორბციის უნარი აჩვენა არყის ხის ქერქმა და მინაბოჭკომ, ნაკლები კორპმა და პოლიურეთანმა.

დიდი მნიშვნელობა ენიჭება სორბენტების რეგენერირების და ბიოდეგრადაციის უნარს.

სტატიაში [Wang et al., 2016] ავტორების მიერ აღწერილია პოლიპროპილენის ღრუბელის მიღების მეთოდი მარტივი სინთეზის გზით, კერძოდ თერმო ინდუცირებული ფაზათა გარდაქმნის გზით. მიღებული სორბენტი გამოყენებული იქნა ნედლი ნავთობის შემცველი წყლების გასაწმენდად. მოდიფიცირებულ პოლიპროპილენის ღრუბელს აქვს მაღალფოროვანი სტრუქტურა და მაღალი ჰიდროფობური თვისებები. ნავთობის გამოწურვის შემდეგ სრულად შესაძლებელია მისი რეგენერაცია.

ნაშრომში ავტორი [Yang et al., 2024] ადასტურებს ფოროვანი პოლიურეთანის გამოყენების პერსპექტიულობას ნავთობიანი წყლის გაწმენდისთვის. მაღალი სორბციის უნარს ფოროვანი პოლიურეთანი ინარჩუნებს ხანგრძლივად და გამოყენების რამდენიმე ციკლის შემდეგაც ის ინარჩუნებს თავის სორბციულ თვისებებს. ფოროვანი პოლიურეთანის მაღალეფექტიანობა, სელექტიურობა ნავთობის მიმართ, რეგენერაციის უნარიანობა ხდის მას ეკოლოგიურად და ეკონომიურად საინტერესოს და პერსპექტიულს [Sung et al., 2017].

4.3 მეორადი პოლიმერული მასალების გამოყენება სორბენტის სახით

ეკონომიური თვალსაზრისით და ეფექტურობით გამოირჩევა სორბცია სინთეზური სორბენტების გამოყენებით, სადაც სორბენტის მატრიცას წარმოადგენს ნარჩენი (მეორადი) პოლიმერული მასალა, რომელიც თავად წარმოადგენს გარემოს გამჭუჭყიანებელს.

პოლიმერული ნაწარმის წარმოების ზრდასთან ერთად წარმოიშვა პოლიმერული ნარჩენების (გამოყენებული ბოთლები, სამედიცინო მილები, პარკები, პოლიმერული ღრუბლები) უტილიზაციის პრობლემა [Al-Salem et al., 2009]. პოლიმერული ნარჩენები წარმოადგენს მზარდ ეკოლოგიურ საშიშროებას [Andrady et al., 2011; Kharisov et al., 2014].

1950 წლიდან დღემდე წარმოებულია 8,3 მილიარდი ტონა პლასტიკი, მათგან მხოლოდ 9% გადამუშავდა მეორადი ნედლეულის სახით და 12 % დაიწვა [Geyer et al., 2017]. ხშირ შემთხვევაში მათი გადამუშავება არ არის მიზანშეწონილი, რადგან გარდა დიდი ენერგოდანახარჯებისა, გადამუშავების პროცესში გარემოში გამოიფრქვევა ტოქსიკური ნაერთები და აირები [Hopewell et al., 2009]. გადამუშავებასთან ერთად მნიშვნელოვანია პოლიმერული ნარჩენების მეორადი გამოყენების ტექნოლოგიების შემუშავება (recycling).

ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლების გასაწმენდად ნარჩენი პოლიმერული მასალის გამოყენების დროს ერთდროულად ორი ეკოლოგიური პრობლემა იჭრება: პლასტიკური ნარჩენების უტილიზაცია და ნავთობით გაჭუჭყიანება [Aboul-Gheit et al., 2006; Sarbatly et al., 2016; Kim et al., 2021; Iftekhar et al., 2023].

ავტორების მიერ [Maafa et al., 2024] პლასტიკური ნარჩენების გადამუშავებით მიღებულია აქტივირებული ნახშირი, რომელიც გამოყენებულია ნავთობის შემცველი წყლების გასაწმენდად.

სორბენტის მაღალფოროვანი სტრუქტურა მიიღწევა სხვადასხვა მეთოდებით. მოდიფიცირების ერთერთი მიმართულებაა სამგანზომილებიანი სტრუქტურირებული კარკასის მქონე პოლიმერული სორბენტების შექმნა [Ciesinska et al., 2011].

კვლევაში [Guan et al., 2019] ნანოტექნოლოგიების გამოყენებით და ზედაპირის მოდიფიკაციით მიღებულია სამგანზომილებიანი (3D), სუპერ დასველების უნარიანი (Superwetting) პოლიმერული ფოროვანი მასალა ნავთობის და წყლის ნარევის დაყოფისათვის.

სორბციის უნარის გაზრდისთვის მატრიცას ანიჭებენ სიუხეშეს, ამისთვის იყენებენ ელექტროსპინინგს, ლაზერით დამუშავებას [Haridharan et al., 2022].

4.4 ნავთობის დაღვრის ლიკვიდაცია სორბენტების გამოყენებით

ნავთობის დაღვრის ლიკვიდაციის დროს შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა ტიპის სორბენტები, როგორც ბუნებრივი ასევე სინთეზური [Payne et al., 2012; Rotar et al., 2012; Paulauskienė et al., 2014; Adebajo et al., 2003].

ფართო გამოყენება აქვს მცენარეული წარმოშობის სორბენტებს: ტორფს [Cojocar et al., 2015], ხის ნახერხს [Rotar et al., 2014], ცელულოზას [Wang et al. 2015; Mahfoudhi et al., 2017], ჩალას [Nwadiogbu et al., 2016], ბამბას [Deschamps et al., 2003] .

სორბენტის სახით გამოიყენება ბუნებრივი სილიკატური ნაერთები: პერლიტი, ვერმიკულიტი, კერამზიტი და სხვა. ჰიდროფობურობის გაზრდის მიზნით წინასწარ ახდენენ მათ ჰიდროფობიზაციას მინერალური ზეთებით. მაგ: შექმნილია სილიკატები ჰიდროფობიზებული ამინებით და კარბოქსილატური ლატექსებით.

ნავთობის სორბენტად გამოიყენება სინთეზური მასალებიც- პოლივინილქლორიდი, ნეილონი, პოლიპროპილენი; კარგია კაუჩუკი და რეზინი. კარგი სორბციის უნარი აქვს პენოპლასტს [Sung et al., 2017], რადგან აქვს კარგად განვითარებული ფოროვანი სტრუქტურა. დაქუცმაცებული პენოპოქსიდი შთანთქმავს ნავთობს თავისი მასის შეფარდებით 1:35 [Li et al., 2013].

კვლევაში [Alessandrello et al., 2017] დაღვრების ლიკვიდაციისთვის გამოყენებულია პოლიურეთანი, რომელზეც იმოხილიზებულია ბაქტერიები. ამგვარად მოდიფიცირებული მასალა ადვილად განიცდის ბიოდეგრედაციას.

წარმოების ნარჩენები გამოიყენება მათი სიიფის გამო. ხშირად ახდენენ სორბენტების დამატებით მოდიფიკაციას მათთვის ჰიდროფობურობის მინიჭებისთვის, ჰიდროფობური სორბენტი წყლის ზედაპირზე დიდხანს ტივტივებს.

წყლის არედან დაღვრილი ნედლი ნავთობის ამოსაღებად გამოყენებულია აგროინდუსტრიის ნარჩენი პროდუქტები, მაგ: აცეტანჰიდრიდით ჰიდროფობიზირებული სიმინდის ნარჩენები [Nwadiogbu et al., 2016], ბანანის კანი [El-Din et al., 2017] .

ავტორების [Sidiras et al., 2016] მიერ ნავთობპროდუქტების შემცველი წყლების ლიკვიდაციისთვის სორბენტების სახით გამოყენებულია ხორბლის თივა, რომელიც მოდიფიცირებულია ჰიდროლიზით (ავტოკლავირება სუფთა წყალში, ტემპერატურა 160-240 °C , კონტაქტის დრო 0-50 წთ).

ლაბორატორიული კვლევების თანახმად [Aboul-Gheit et al., 2006], ზოგიერთი პლასტიკატის ნარჩენები (PE and PP waste powders and sheets, PU) ამჟღავნებს ნავთობის

კარგი სორბციის უნარს და შესაძლოა გამოყენებული იქნეს ზღვაში ჩაღვრილი ნავთობის მოსაშორებლად.

ნაშრომში [Wang et al. 2016] აღწერილია მაღალფოროვანი სტრუქტურის მქონე პოლიპროპილენის ღრუბელის მიღება გამარტივებული სინთეზის გზით და მიღებული სორბენტის გამოყენება ნედლი ნავთობის შემცველი წყლების გასაწმენდად. მოდიფიცირებულ პოლიპროპილენს აქვს მაღალფოროვანი სტრუქტურა, მაღალი ჰიდროფობური თვისების, გამოწურვით სრულად შესაძლებელია მისი რეგენერაცია.

ავტორების [Nguyen et al., 2022; Haridharan et al., 2022] მიერ ნაჩვენებია ინოვაციური პოლიმერული სორბენტების გამოყენებით ოკეანეების გაქუჩყიანებასთან ბრძოლის პერსპექტივა. პოლიმერულ სორბენტებს გაუმჯობესებული აქვთ ფოროვნების ხარისხი და ბიოდეგრადაციის უნარი.

ჰიდროფობურობის გაზრდის მიზნით ახდენენ ბუნებრივი სორბენტების ბოჭკოების ფტორირებას, ალკილის ჯგუფის ჩანერგვას, ჰიდროფობური პოლიმერების, მაგ პოლიდიმეთილსილოქსანის (PDMS) ჩანერგვას, შედეგად მცირდება სორბენტის დასველების უნარი [Deschamps et al., 2003 Wang et al., 2015; Tursi et al., 2018] .

დაღვრილი ნავთობის ლიკვიდაციისთვის იყენებენ სილანებით დამუშავებულ ჰიდროფობიზებულ პოლიურეთანს ნაკუწების სახით, შემდეგ აგროვებენ, გამოწურავენ ნავთობის დაახლოებით 80%-ს და ისევ იყენებენ [Liu et al., 2013; Sung et al., 2017].

ამ მეთოდების ნაკლია სორბენტის და გამფილტრავი მასალის უტილიზაციის პრობლემა, გაწმენდის შედეგად მიღებული სორბენტი იწვევს წყლების და ნიადაგის შემდგომ დაბინძურებას, ე. ი. ხდება გარემოს მეორადი დაბინძურება.

4.5 ნავთობით და ნ/პ -ით დაბინძურებული წყლების გაწმენდა მემბრანული ფილტრაციის მეთოდებით.

ბოლო წლებია მემბრანული ტექნოლოგიები სულ უფრო ფართოდ გამოიყენება ჩამდინარე წყლების გაწმენდის პროცესში, რადგანაც გამოირჩევიან ეფექტურობით,

აპარატურული გაფორმების კომპაქტურობით და ავტომატიზაციის შესაძლებლობით [Ezugbe et al., 2020].

მემბრანული ფილტრაციის მეთოდები უზრუნველყოფენ დაბინძურებული წყლის ფიზიკურ განცალკევებას სპეციალური ნახევარგამტარი მემბრანების საშუალებით, რაც საშუალებას იძლევა მივიღოთ მაღალი ხარისხის გაწმენდილი წყალი. მემბრანული მეთოდების სხვა მეთოდებთან კომბინირებული გამოყენება მნიშვნელოვნად ზრდის გაწმენდის პროცესის ეფექტურობას და ამცირებს გარემოზე ნეგატიურ ზემოქმედებას.

მემბრანების მაღალი სელექტიურობა საშუალებას იძლევა ჩამდინარე წყლებს მოშორდეს თავისუფალი და ასევე ემულგირებული ნავთობნახშირწყალბადები.

ჩამდინარე წყლებს თან ახლავს არამარტოემულგირებული ნავთობნახშირწყალბადები, არამედ მთელი სპექტრი გახსნილი ორგანული ნაერთებისა და ზანი-ი, რომელიც ხელს უშლის წყლის საბოლოო გაწმენდას ტრადიციული მეთოდებით [Yu et al., 2017; Abuhasel et al., 2021].

ძირითადად გამოყენებული მემბრანული ფილტრაციის სახეებია მიკროფილტრაცია (მფ), ულტრაფილტრაცია (უფ) და უკუოსმოსი [Ahmad et al. 2021; Munirasu et al., 2016].

განსაკუთრებით ეფექტურია და აქვს ნაკლები ენერგოხარჯები [Bera et al., 2022] ემულგირებული ნავთობნახშირწყალბადების მოსაშორებლად ულტრაფილტრაცია (წვეთების ზომა ნაკლებია 10 მკმ-ზე). ნანოფილტრაცია და უკუოსმოსი გამოიყენება გახსნილი ორგანული ნაერთებისა და მარილების იმ შემცველობამდე მოსაშორებლად, როდესაც გაწმენდილი წყალი შეიძლება გამოყენებული იქნას წარმოებაში განმეორებით [Ahmad et al., 2018].

ნავთობის და ნ/პ-ის შემცველი წყლების ფილტრაციისთვის ძირითადად გამოყენებულია კერამიკული მილისებური [Hyun et al., 1997; Hua et al., 2006; Abadi et al., 2011; Cui et al., 2008] და კომპოზიტური, მაგალითად კერამიკულ-პოლიმერული მემბრანები [Mittal et al., 2011; Yang et al., 2010; Zhang et al., 2009], სულ უფრო ხშირად გამოიყენება ნანოფორებიანი მემბრანა ჩართული გააქტივებული ნახშირბადით, ნახშირბადის ნანომილაკებით [Daramola et al., 2017].

კვლევაში [Moslehyani et al., 2015] CROSS-FLOW მეთოდით წყლის არედან ნავთობის სელექტიურად გამოსაყოფად გამოყენებულია PVDF მემბრანა.

ავტორს [Khangildin et al., 2015] ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული საწარმოო წყლების გასაწმენდად ულტრაფილტრაციული მეთოდით გამოყენებული აქვს ბრტყელი (აცეტცელულოზური და პოლიამიდური) და მილისებური (ფთოროპლასტის) მემბრანები.

კვლევაში [Daramola et al., 2017] ნავთობპროდუქტების შემცველი წყლების გასასუფთავებლად გამოყენებულია ნახშირბადის ნანომილაკები CNTs (Carbon Nanotubes), რომელიც ჩანერგილია პოლისულფონის მემბრანაში. მემბრანის სელექტიურობა 95% -ია. განხორციელებული ექსპერიმენტებიდან ჩანს, რომ ჰიბრიდული მემბრანა ბევრად ეფექტურია, ვიდრე ჩვეულებრივი უფ პოლიმერული მემბრანები [Sarfaraz et al., 2012; Salahi et al., 2010].

ულტრაფილტრაციულ და უკუსმოსურ ორსაფეხურიან სისტემებში [Tomaszewska et al., 2005] ნავთობის შემცველი ტრიუმის წყლების გაწმენდის დროს ულტრაფილტრაციის საფეხურზე შეწონილი ნაწილაკები საერთოდ არ აღინიშნება; 2-ე საფეხურზე (უკუსმოსი) ორგანული ნაერთები მცირდება 70%-ით (TOC-ის მიხედვით), 90 %-ით ყველა კათიონი [Campo et al., 2016] .

4.6 მემბრანების მოდიფიცირება

ძირითადი პრობლემა, რომელიც ზღუდავს მემბრანების ფართოდ გამოყენებას არის ფილტრაციის პროცესში მემბრანის გაბინდვა (გაჭუჭყიანება), რის გამოც მცირდება მემბრანების გამტარობა (წარმადობა) და იზრდება ექსპლუატაციაზე დანახარჯები [Shon et al., 2006].

წარმადობის კლება აიხსნება მემბრანის ზედაპირთან გასაფილტრი ნივთიერებების დაგროვებით, ე.წ. „კონცენტრაციული პოლარიზაციით“. ექსპერიმენტის მონაცემებიდან [Zhang et al., 2021] ნათლად ჩანს კორელაციური დამოკიდებულება მემბრანის წარმადობასა და გასაფილტრ წყალში ნავთობპროდუქტების საწყის კონცენტრაციას შორის.

მემბრანების გაბინდვის შესამცირებლად მიმართავენ შემდეგ მეთოდებს: გასაფილტრი წყლის წინარე დამუშავება, ჰიდროდინამიკური რეჟიმების სრულყოფა, მემბრანის ზედაპირის მოდიფიკაცია [Ullah et al., 2021].

თანამედროვე კვლევები მიმართულია მემბრანების ზედაპირის მოდიფიკაციაზე მისი ჰიდროფილურობის გაზრდის მიზნით. ჰიდროფილურობის გაზრდა ხელს უწყობს მემბრანის მდგრადობას გაჭუჭყიანებისადმი [Yalcinkaya et al., 2020; Lee et al., 2017], რისთვისაც იყენებენ სხვადასხვა ნანომასალებს- მეტალთა ოქსიდებს და ნანოსტრუქტურებულ ნახშირბადს. ისინი ამცირებენ ნავთობის წვეთების ადგეზიას და ხელს უშლიან ზედაპირის გაჭუჭყიანებას, ხოლო ფოტოკატალიზური მემბრანების გამოყენება საშუალებას იძლევა ორი პროცესის- ფილტრაციის და ორგანული ნაერთების დაჟანგვის შერწყმით გაიზარდოს გაწმენდის ეფექტურობა [Santos et al., 2020].

მემბრანული ტექნოლოგიის განვითარებაში ბოლო 5-7 წლის განმავლობაში ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი მოვლენა გახდა იმ ნანოკომპოზიტიური მემბრანული მასალების შექმნა და დამუშავება, რომლებიც ნანოგანზომილებიანი კომპონენტების სახით შეიცავენ ყველაზე ხშირად ნახშირბადულ ნანომილაკებს.

ნანოკომპოზიტიური მასალის ფორმირებისას, მასში 2-დან 5%-მდე ნანოკომპონენტების შეყვანა ხელს უწყობს მემბრანის სატრანსპორტო თვისებების ამაღლებას, ამასთან უმჯობესდება აგრეთვე მექანიკური თვისებები, ფორმის მდგრადობა, ცეცხლგამძლეობა, ელექტროგამტარებლობა და სხვა.

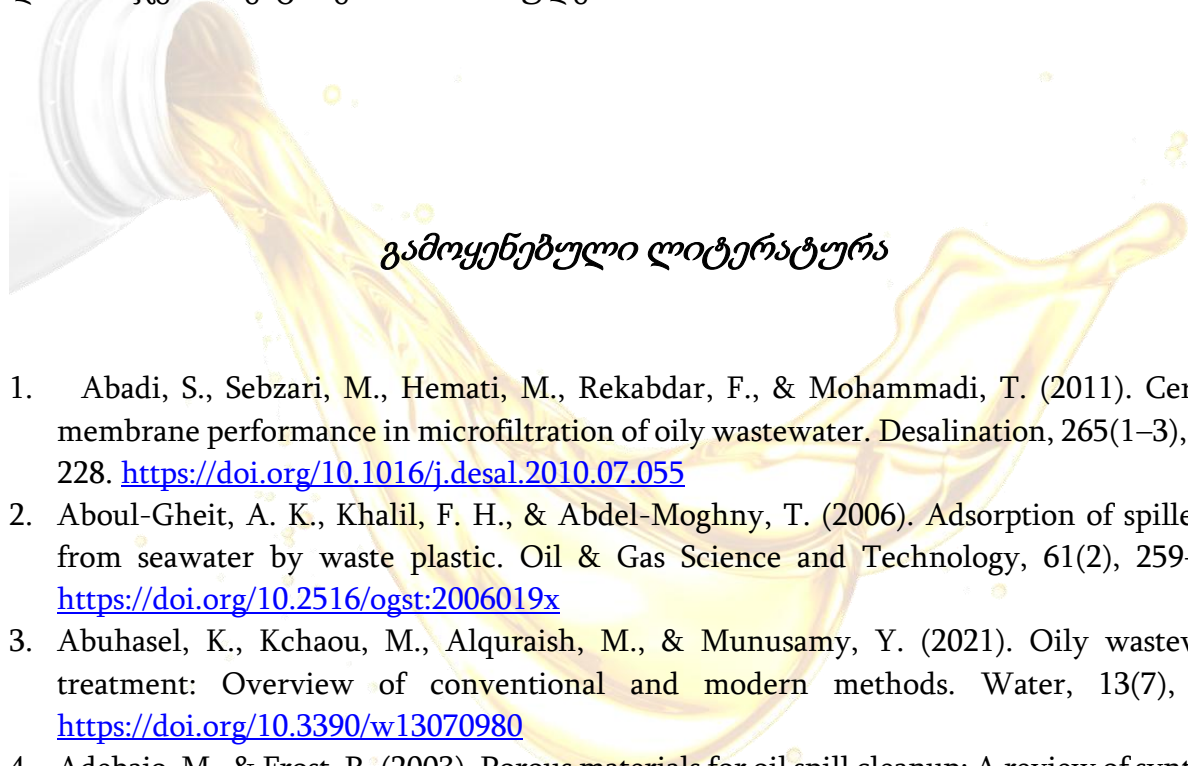
გრაფენის ოქსიდის (GO) შეყვანა პოლისულფონის კოლოიდურ ხსნარში გავლენას ახდენს მისაღები მემბრანის მორფოლოგიაზე. კვლევების [Vatanpour et al., 2014; Zinadini et al., 2014; Prajapati et al., 2026] მიხედვით ოპტიმალურია GO-ს წონითი შემცველობა 0,05–დან 0,5 %-მდე, იზრდება დასასხმელი ხსნარის სიბლანტე და იცვლება ფაზური ინვერსიის კინეტიკა. მიიღება მეტად ერთგვაროვანი მემბრანა, ამასთან საშუალო ფორების ზომა ნაკლებია, ხოლო მათი განაწილება ზომების მიხედვით უფრო ვიწრო.

GO-ის ჰიდროფილურობის გამო უმჯობესდება შიგა ფორების ურთიერთკავშირი და საერთო ფორიანობა იზრდება [Ganesh et al., 2013; Zhang et al., 2013].

გრაფენის ოქსიდის მეტი შემცველობისას (0,5–დან წონის 1,0 %-მდე) აგლომერაციის შედეგად მემბრანის სტრუქტურა არაერთგვაროვანი ხდება და მემბრანის საექსპლუატაციო მაჩვენებლები უარესდება [Vatanpour et al., 2014; Lee et al., 2016].

პერსპექტიულია ჰიბრიდული მეთოდების დანერგვა, მაგალითად, მემბრანული მეთოდების გამოყენება კომპლექსურად სხვადასხვა ფიზიკო-ქიმიურ და ბიოლოგიურ პროცესებთან, როგორიცაა კოაგულაცია, ფლოტაცია და ბიოდეგრადაცია. ეს კომბინაცია ხელს უწყობს გაწმენდის ეფექტურობას, მემბრანულ ელემენტზე დატვირთვის შემცირებას [Putatunda et al., 2019; Scholz et al., 2000].

ამგვარად, მემბრანული ტექნოლოგიები ეფექტურად წმენდს ჩამდინარე წყლებს ნავთობისგან და ნ/პ-გან და წყლების განმეორებითი გამოყენების საშუალებას იძლევა, ხოლო ახალი კვლევები მიმართულია მემბრანების მდგრადობის გაზრდის, მემბრანებისთვის ახალი ფუნქციონალური მასალის გამოყენების, ექსპლუატაციაზე დანახარჯების შემცირების მიმართულებით.



გამოყენებული ლიტერატურა

1. Abadi, S., Sebzari, M., Hemati, M., Rekabdar, F., & Mohammadi, T. (2011). Ceramic membrane performance in microfiltration of oily wastewater. *Desalination*, 265(1–3), 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.055>
2. Aboul-Gheit, A. K., Khalil, F. H., & Abdel-Moghny, T. (2006). Adsorption of spilled oil from seawater by waste plastic. *Oil & Gas Science and Technology*, 61(2), 259–268. <https://doi.org/10.2516/ogst:2006019x>
3. Abuhasel, K., Kchaou, M., Alquraish, M., & Munusamy, Y. (2021). Oily wastewater treatment: Overview of conventional and modern methods. *Water*, 13(7), 980. <https://doi.org/10.3390/w13070980>
4. Adebajo, M., & Frost, R. (2003). Porous materials for oil spill cleanup: A review of synthesis and absorbing properties. *Journal of Porous Materials*.
5. Ahmad, N. A., Goh, P. S., Karim, Z. A., & Ismail, A. F. (2018). Thin film composite membrane for oily wastewater treatment. *Membranes*, 8(4), 86. <https://doi.org/10.3390/membranes8040086>
6. Ahmad, T., Guria, C., & Mandal, A. (2021). A review of oily wastewater treatment using ultrafiltration membrane: A parametric study to enhance the membrane performance. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101289. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101289>

7. Alessandrello, M. J., Tomás, M. S., Raimondo, E. E., Vullo, D. L., & Ferrero, M. A. (2017). Petroleum oil removal by immobilized bacterial cells on polyurethane foam under different temperature conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1–2), 156–160. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.040>
8. Al-Najar, J. A., Al-Humairi, S. T., Lutfee, T., Balakrishnan, D., Veza, I., Soudagar, M. E. M., & Fattah, I. M. R. (2023). Cost-effective natural adsorbents for remediation of oil-contaminated water. *Water*, 15, 1186. <https://doi.org/10.3390/w15061186>
9. Alomar, T., et al. (2024). A review on recent developments and future prospects in the treatment of oily petroleum refinery wastewater by adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, 64, 105616.
10. Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
11. Bamufleh, H. S., & Edris, G. (2017). Treatment of contaminated wastewater. *Petroleum Science and Technology*.
12. Bandura, L., Woszek, A., Kołodyńska, D., & Franus, W. (2017). Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: A review. *Minerals*, 7(3), 37. <https://doi.org/10.3390/min7030037>
13. Benito, J., et al. (2002). Design and construction of a modular pilot plant for the treatment of oil-containing wastewaters. *Desalination*, 147(1–3), 5–10. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00563-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00563-5)
14. Bera, S. P., Godhaniya, M., & Kothari, C. (2022). Emerging membrane technology for wastewater treatment. *Journal of Basic Microbiology*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jobm.202100259>
15. Baker, R. W. (2012). *Membrane technology and applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118359686>
16. Brandão, P. C., Souza, T. C., Ferreira, C. A., Hori, C. E., & Romanielo, L. L. (2010). Removal of petroleum hydrocarbons from aqueous solution using sugarcane bagasse as adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), 1106–1112. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.060>
17. Calcagnile, P., Fragouli, D., Bayer, I. S., Anyfantis, G. C., Martiradonna, L., Cozzoli, P. D., & Athanassiou, A. (2012). Magnetically driven floating foams for the removal of oil contaminants from water. *ACS Nano*, 6(6), 5413–5419. <https://doi.org/10.1021/nn3012948>
18. Campo, R., Di Prima, N., Giustra, M. G., Freni, G., & Di Bella, G. (2016). Performance of a moving bed-membrane bioreactor treating saline wastewater contaminated by hydrocarbons from washing of oil tankers. *Desalination and Water Treatment*, 57(48–49), 22943–22952. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1153907>
19. Cojocaru, C., Macoveanu, M., & Cretescu, I. (2011). Peat-based sorbents for the removal of oil spills from water surface: Application of artificial neural network modeling. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 384(1–3), 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.05.036>

20. Cui, J., Zhang, X., Liu, H., Liu, S., & Yeung, K. (2008). Preparation and application of zeolite/ceramic microfiltration membranes for treatment of oil contaminated water. *Journal of Membrane Science*, 325(1), 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.08.015>
21. Daramola, M., Hlanyane, P., Sadare, O., Oluwasina, O., & Iyuke, S. (2017). Performance of carbon nanotube/polysulfone composite membranes during oil–water mixture separation: Effect of CNT dispersion method. *Membranes*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.3390/membranes7010014>
22. Deschamps, G., Caruel, H., Borredon, M., Bonnin, C., & Vignoles, C. (2003). Oil removal from water by selective sorption on hydrophobic cotton fibers. *Environmental Science & Technology*, 37(5), 1013–1015. <https://doi.org/10.1021/es020061s>
23. Dickhout, J. M., Moreno, J., Biesheuvel, P. M., Boels, L., Lammertink, R. G. H., & de Vos, W. M. (2020). Membrane fouling by emulsified oil: A review. *Separation and Purification Technology*, 248, 116919. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116919>
24. Dmitrieva, E. S., Anokhina, T. S., Novitsky, E. G., Volkov, V. V., Borisov, I. L., & Volkov, A. V. (2022). Polymeric Membranes for Oil-Water Separation: A Review. *Polymers*, 14(5), 980. <https://doi.org/10.3390/polym14050980>
25. El-Din, G. A., Amer, A., Malsh, G., & Hussein, M. (2017). Study on the use of banana peels for oil spill removal. *Alexandria Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.020>
26. Emenike, E. C., Adeleke, J., Iwuozor, K. O., & Ogunniyi, S. (2022). Adsorption of crude oil from aqueous solution: A review. *Journal of Water Process Engineering*.
27. Evdokimova, G., Gershenkop, A., Mozgova, N., Myazin, V., & Fokina, N. (2012). Soils and waste water purification from oil products using combined methods under the North conditions. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(12), 1733–1738. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.689188>
28. Ezugbe, E. O., & Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: A review. *Membranes*, 10(5), 89. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>
29. Fingas, M. F. (2011). *Oil spill science and technology: Prevention, response, and cleanup*. Elsevier.
30. Ganesh, B. M., Isloor, A. M., & Ismail, A. F.. (2013). Enhanced hydrophilicity and antifouling properties of graphene oxide incorporated polysulfone mixed matrix membrane. *Desalination*, 313, 199–207.
31. Geetha, K. S., & Belagali, S. L. (2013). Adsorption studies of plant-based oil and mineral oils on tea powder waste. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(1).
32. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
33. Gibson, P., Schreuder-Gibson, H., & Rivin, D. (2020). Comparison of capillary flow porometry and liquid extrusion porometry techniques for the characterization of porous and face mask membranes. *Applied Sciences*, 10(16), 5703. <https://doi.org/10.3390/app10165703>

34. Gołub, A., & Piekutin, J. (2017). Application of porous materials in oil substances separation from water. *E3S Web of Conferences*, 22, 00056. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200056>
35. Gvazava, E., Maisuradze, N., & Samkharadze, I. (2016). Purification of sewage contaminated by oil products using mesoporous coal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 44, 052016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/5/052016>
36. Haridharan, N., Sundar, D., Kurrupasamy, L., & Olga, T. (2022). Oil spills adsorption and cleanup by polymeric materials: A review. *Polymers for Advanced Technologies*. <https://doi.org/10.1002/pat.5636>
37. Hoang, P. H., Hoang, A. T., Chung, N. H., & Le Quang, D. (2017). The efficient lignocellulose-based sorbent for oil spill treatment from polyurethane and agricultural residue of Vietnam. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1415397>
38. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
39. Hua, F., Tsang, Y., Wang, Y., Chan, S., Chua, H., & Sin, S. (2007). Performance study of ceramic microfiltration membrane for oily wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 128(2–3), 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.10.017>
40. Hua, L., Lifan, L., & Fenglin, Y. (2013). Oleophilic polyurethane foams for oil spill cleanup. *Procedia Environmental Sciences*, 18, 528–533. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.071>
41. Huang, J., et al. (2024). Recent advances in membrane technologies applied in oil–water separation. *Discover Nano*, 19, 66.
42. Hyun, S., & Kim, G. (1997). Synthesis of ceramic microfiltration membranes for oil/water separation. *Separation Science and Technology*, 32(18), 2927–2943. <https://doi.org/10.1080/01496399708000788>
43. Jain, P., & Gupta, V. (2011). Bioremediation of petroleum oil contaminated soil and water. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 5(1), 1–26.
44. Janknecht, P., Lopes, A. D., & Mendes, A. M. (2004). Removal of industrial cutting oil from oil emulsions by polymeric ultra- and microfiltration membranes. *Environmental Science & Technology*, 38(18), 4878–4883. <https://doi.org/10.1021/es0348243>
45. Jin, L., Hu, B., Kuddannaya, S., Zhang, Y., Li, C., & Wang, Z. (2018). A three-dimensional carbon nanotube-nanofiber composite foam for selective adsorption of oils and organic liquids. *Polymer Composites*, 39, E151–E159. <https://doi.org/10.1002/pc.24334>
46. Kharisov, B. I., Dias, H. V. R., & Kharissova, O. V. (2014). Nanotechnology-based remediation of petroleum impurities from water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 122, 705–718. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.09.013>
47. Kudaybergenov, K. K., Ongarbayev, E. K., & Mansurov, Z. A. (2015). Oil sorption by heat-treated rice husks. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 6(5), 243. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000243>

48. Lalia, B. S., Kochkodan, V., Hashaikheh, R., & Hilal, N.. (2013). A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship. *Desalination*, 326, 77–95.
49. Lee, A., Elam, J. W., & Darling, S. B.. (2016). Membrane materials for water purification: Design, development, and application. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(1), 17–42.
50. Li, S.-G., van den Boomgaard, T., & Smolders, C. A. (1996). Physical gelation of amorphous polymers in a mixture of solvent and nonsolvent. *Macromolecules*, 29(6), 2053–2059. <https://doi.org/10.1021/ma9508966>
51. Vahid Vatanpour, Majid Esmaeili, & Mohammad Hossein Davood Abadi Farahani. (2014). Fouling reduction and retention increment of polyethersulfone nanofiltration membranes embedded by amine-functionalized multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Membrane Science*, 466, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.04.031>
52. Lee, C. H., Tiwari, B., Zhang, D., & Yap, Y. K. (2017). Oil–water separation by nanotechnology and environmental applications: A review. *Environmental Science: Nano*, 4(3), 514–525.
53. Liu, L. (2013). Oleophilic polyurethane foams for oil spill cleanup. *Procedia Environmental Sciences*, 18, 528–533. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.071>
54. Maafa, I. M. (2024). Recycled activated carbon from plastic waste for effective oil removal from produced water. *Desalination and Water Treatment*.
55. Mahfoudhi, N., & Boufi, S. (2017). Nanocellulose as a novel nanostructured adsorbent for environmental remediation: A review. *Cellulose*, 24(3), 1171–1197. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1194-0>
56. Mansour, R. B., et al. (2024). Petroleum wastewater: Environmental protection, treatment, and safe reuse: An overview. *Journal of Environmental Management*, 351, 119827.
57. Mittal, P., Jana, S., & Mohanty, K. (2011). Synthesis of low-cost hydrophilic ceramic–polymeric composite membrane for treatment of oily wastewater. *Desalination*, 282, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.071>
58. Mkheidze, N., Gotsiridze, R., & Kiknadze, N. (2024). Cost-effective remediation of petroleum-contaminated waters using locally sourced wood sawdust. *Journal of Environmental Research*.
59. Mkheidze, N., Gotsiridze, R., Mkheidze, S., & Pattyn, D. (2020). Determination of the polymeric membranes pore size distribution by the method of capillary flow porometry. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 14(1), 64–71.
60. Mohammadi, Z., Mottaghi, H., Abbasi, M., Tahouni, N., & Panjeshahi, M. H. (2021). Experimental investigation of crude oil removal from water using polymer adsorbent. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101959. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101959>
61. Moslehyani, A., Mobaraki, M., Ismail, A., et al. (2015). PVDF membrane for oil-in-water separation via cross-flow ultrafiltration process. *Jurnal Teknologi*, 78(1). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.4469>

62. Munirasu, S., Abu Haija, M., & Banat, F. (2016). Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment—A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 183–202. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.010>
63. Mulder, M. (1996). *Basic principles of membrane technology* (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1766-8>
64. National Oceanic and Atmospheric Administration. (n.d.). Oil spills. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills>
65. National Research Council of Canada. (1983). Polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment: Formation, sources, fate and effects on aquatic biota.
66. Nguyen, X. P., Nguyen, D. T., Pham, V. V., & Vo, D. T. (2022). Highlights of oil treatment technologies and rise of oil-absorbing materials in ocean cleaning strategy. *Water Conservation and Management*, 6(1), 6–14.
67. Nwadiogbu, J. O., Ajiwe, V. I. E., & Okoye, P. A. C. (2016). Removal of crude oil from aqueous medium by sorption on hydrophobic corncobs: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Taibah University for Science*, 10(1), 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.03.014>
68. Okiel, K., El-Sayed, M., & El-Kady, M. Y. (2011). Treatment of oil–water emulsions by adsorption onto activated carbon, bentonite and deposited carbon. *Egyptian Journal of Petroleum*, 20(2), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2011.06.002>
69. Paulauskienė, T., Jucikė, I., Juščenko, N., & Baziukė, D. (2014). The use of natural sorbents for spilled crude oil and diesel cleanup from the water surface. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(6), 1959. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1959-0>
70. Payne, K. C., Jackson, C. D., Aizpurua, C. E., Rojas, O. J., & Hubbe, M. A. (2012). Oil spills abatement: Factors affecting oil uptake by cellulosic fibers. *Environmental Science & Technology*, 46(14), 7725–7730. <https://doi.org/10.1021/es3015524>
71. Pires, M. R., Lourenço, M. S., Dias, M. C., da Silva, L. R., Júnior, I. P., & Mori, F. A. (2021). Application of different vegetable fibers as natural sorbents and their use in water decontamination from crude oil. *Chemical Engineering & Technology*, 44(12), 2269–2278. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100105>
72. Puszkarewicz, A. (2008). Removal of petroleum compounds from water in coagulation process. *Environment Protection Engineering*, 34(1), 5–14.
73. Putatunda, S., Bhattacharya, S., & Sen, D. (2019). Treatment processes for emulsified oily wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 4444–4462.
74. Prajapati, D. P., Gaikwad, S. S., Kumar, S., Aswal, V. K., et al. (2026). Studies on mixed matrix membranes as efficient materials for dye removal from textile waste-water. *Journal of Membrane Science*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772421226000152>
75. Rotar, O., & Iskrizhitskaya, D. (2014). Cleanup of water surface from oil spills using natural sorbent materials. *Procedia Chemistry*, 10, 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.10.025>

76. Rupal, A., Meda, S. R., Gupta, A., Tank, I., Kapoor, A., Sharma, S. K., Sathish, T., & Murugan, P. (2022). Utilization of polymer composite for development of sustainable construction material. *Advances in Materials Science and Engineering*.
<https://doi.org/10.1155/2022/1240738>
77. Salahi, A., Abbasi, M., Mohammadi, T., & Rekabdar, F. (2010). Permeate flux decline during UF of oily wastewater: Experimental and modeling. *Desalination*, 251(1–3), 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.08.006>
78. Santos, E. N., László, Z., & Hodúr, C. (2020). Photocatalytic membrane filtration for oily wastewater. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(6), e2533.
<https://doi.org/10.1002/apj.2533>
79. Santos, M. R. G., et al. (2006). The application of electrochemical technology to the remediation of oily wastewater. *Chemosphere*, 64(3), 393–399.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.036>
80. Sarfaraz, M. V., et al. (2012). Experimental investigation and modeling hybrid nano-porous membrane process for industrial oily wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(10), 1642–1651. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.02.009>
81. Scaffaro, R., Lopresti, F., Catania, V., & Santisi, S. (2017). Polycaprolactone-based scaffold for oil-selective sorption and improvement of bacteria activity for bioremediation of polluted water. *European Polymer Journal*, 91, 100–110.
82. Scholz, W. (2000). Treatment of oil contaminated wastewater in a membrane bioreactor. *Water Research*, 34(14), 3621–3629. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00106-8)
83. Shon, H. K., Vigneswaran, S., Kim, I. S., Cho, J., & Ngo, H. H. (2006). Fouling of ultrafiltration membrane by effluent organic matter: A detailed characterization using different organic fractions in wastewater. *Journal of Membrane Science*, 278(1–2), 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.11.006>
84. Spiridon, I., Apostol, I., Dinu, M. V., & Anghel, N. (2024). New porous adsorbents based on natural polymers for treatment of motor oil contaminated wastewaters. *Journal of Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/pol.20240280>
85. Sung, T., Yu, A., & Tan, Z. (2017). Oil adsorption performance and efficiency study on novel silane functionalized graphene polyurethane sponge. University of Waterloo.
86. Sutrisna, P. D., Kurnia, K. A., Siagian, U. W. R., Ismadji, S., & Wenten, I. G. (2022). Membrane fouling and fouling mitigation in oil–water separation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107532.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107532>
87. S. M. Al-Salem, Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
88. Tomaszewska, M., Orecki, A., & Karakulski, K. (2005). Treatment of bilge water using a combination of ultrafiltration and reverse osmosis. *Desalination*, 185(1–3), 203–212.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.078>

89. Ullah, A., Tanudjaja, H. J., Ouda, M., & Hasan, S. W. (2021). Membrane fouling mitigation techniques in wastewater treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102247. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102247>
90. Wake, H. (2005). Oil refineries: A review of their ecological impacts on the aquatic environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62(1–2), 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.08.013>
91. Wang, G., He, Y., Wang, H., et al. (2015). A cellulose sponge with robust superhydrophilicity and underwater superoleophobicity for highly effective oil/water separation. *Green Chemistry*, 17(5), 3093–3099.
92. Wang, G., & Uyama, H. (2016). Facile synthesis of flexible macroporous polypropylene sponges for separation of oil and water. *Scientific Reports*, 6, 21265. <https://doi.org/10.1038/srep21265>
93. Xia, S., Zhang, L., Davletshin, A., Li, Z., You, J., & Tan, S. (2020). Application of polysaccharide biopolymer in petroleum recovery. *Polymers*, 12(9), 1860. <https://doi.org/10.3390/polym12091860>
94. Yalcinkaya, F., Boyraz, E., Maryska, J., & Kucerova, K. (2020). Membrane technology for oily wastewater treatment: A review of the current state of the art. *Materials*, 13(2), 493. <https://doi.org/10.3390/ma13020493>
95. Yang, T., Ma, Z., & Yang, Q. (2011). Formation and performance of kaolin/MnO₂ bi-layer composite dynamic membrane for oily wastewater treatment: Effect of solution conditions. *Desalination*, 270(1–3), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.019>
96. Yin, H., Qiang, J., Jia, Y., Ye, J., Peng, H., Qin, H., & He, B. (2009). Characteristics of biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* S6 isolated from oil-containing wastewater. *Process Biochemistry*, 44(3), 302–308. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.11.003>
97. Younis, S. A., Maitlo, H. A., Lee, J., & Kim, K. H. (2020). Nanotechnology-based sorption and membrane technologies for the treatment of petroleum-based pollutants in natural ecosystems and wastewater streams. *Advances in Colloid and Interface Science*, 282, 102197. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102197>
98. Yu, L., Han, M., & He, F. (2017). A review of treating oily wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(Suppl. 2), S1913–S1922. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.020>
99. Zhang, M., Liu, Y., Su, Y., Jiang, Z., & Sun, Q. (2013). Composite membranes based on graphene oxide for water treatment: A review. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(24), 6779–6791.
100. Zhang, X., Chai, X., Liu, J., Wang, R., Yang, Y., & He, X. (2021). Interfacial characteristics in membrane filtration for oil-in-water treatment processes. *Journal of Membrane Science*, 623, 119092. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119092>
101. Zhang, Y., Cui, P., Du, T., Shan, L., & Wang, Y. (2009). Development of a sulfated Y-doped nonstoichiometric zirconia/polysulfone composite membrane for treatment of wastewater containing oil. *Separation and Purification Technology*, 70(2), 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.09.010>

102. Zhu, Y., Wang, D., Jiang, L., & Jin, J. (2014). Recent progress in developing advanced membranes for emulsified oil/water separation. *NPG Asia Materials*, 6, e101. <https://doi.org/10.1038/am.2014.23>
103. Zilouei, H., Asadinezhad, A., & Keshavarz, A. (2015). Removal of oil from water using polyurethane foam modified with nanoclay. *Chemical Engineering Journal*, 261, 498–504. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.077>
104. Zinadini, S., Zinatizadeh, A. A., Rahimi, M., Vatanpour, V., & Zangeneh, H.. (2014). Preparation of a novel antifouling mixed matrix PES membrane by embedding graphene oxide nanoplates. *Journal of Membrane Science*, 453, 292–301.
105. Zouboulis, A., & Avranas, A. (2000). Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 172(1–3), 153–161. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00561-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00561-6)
106. ASTM International. (2024). *Standard test method for solvent-free membrane recoverable oil and grease by infrared determination* (ASTM Standard No. D7575-11(2024)). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D7575-11R24>
107. ASTM International. (2025). *Standard test method for detailed analysis of petroleum naphthas through n-nonane by capillary gas chromatography* (ASTM Standard No. D5134-21(2025)). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5134-21R25>
108. ASTM International. (2019). *Standard test methods for pore size characteristics of membrane filters by bubble point and mean flow pore test* (ASTM Standard No. F316-03(2019)). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/F0316-03R19>

5. ექსპერიმენტული ნაწილი

წინამდებარე კვლევის ძირითად მიზანს წარმოადგენდა წყლის გარემოს ნავთობითა და ნავთობპროდუქტებით დაბინძურების პრევენციისა და ლიკვიდაციისთვის ორეტაპიანი, კომბინირებული ეკოლოგიური ტექნოლოგიის შემუშავება.

პროცესის პირველ ეტაპზე ხორციელდება ჩამდინარე წყლების წინააღმდეგ გაწმენდა ადგილობრივი მცენარეული და მეორადი პოლიმერული ნარჩენებისგან მიღებული სორბენტების გამოყენებით, ხოლო მეორე ეტაპზე — ღრმა გაწმენდა მაღალეფექტური კომპოზიტური მემბრანების მეშვეობით.

კვლევაში გამოყენებული იქნა შემდეგი ძირითადი მასალები და რეაგენტები:

- ბუნებრივი მცენარეული ნარჩენები: კრიპტომერიის ნახერხი (*Cryptomeria japonica*), ფიჭვის ნახერხი (*Pinus*) და სხვა.
- მეორადი პოლიმერული ნარჩენები: მეორადი ფოროვანი პოლიურეთანი (PU), პოლისტიროლი (PS) და სხვა.
- პოლიმერები მემბრანების სინთეზისთვის: პოლისულფონი (PSU) და პოლიოქსადიაზოლი.
- ფორების წარმომქმნელი დანამატი (პოროგენი): პოლიეთილენგლიკოლი (PEG-400).
- კომპოზიტური მემბრანების მისაღებად: გრაფენის ოქსიდი (GO).
- გამხსნელი: N-მეთილ-2-პიროლიდონი (NMP)
- დამაბინძურებლები: ნედლი ნავთობი (Azer Light Crude Oil) და დიზელის საწვავი.

5.1 კვლევის მეთოდები

სორბციის და მემბრანული ფილტრაციის პროცესების ოპტიმალური რეჟიმის პირობების დასადგენად გამოყენებული იყო თეორიული, ექსპერიმენტული გამოთვლითი და გრაფიკული მეთოდები. თეორიული მოიცავს ფილტრაციული, სორბციული, მიკრო- და ულტრაფილტრაციული მეთოდების თეორიული საფუძვლების გამოყენებას, რომელიც წარმოდგენილია სამეცნიერო ლიტერატურაში. ექსპერიმენტული მეთოდი მოიცავს სამეცნიერო კვლევითი სამუშაოების ჩატარებას ფილტრაციის, სორბციის და ულტრაფილტრაციის, სტანდარტული და ჩვენს მიერ შემუშავებული ტექნოლოგიით.

წყალში ნავთობპროდუქტების ნარჩენი კონცენტრაციის განსაზღვრას ვახდენდით ფურიე-ტრანსფორმაციის ინფრაწითელი სპექტრომეტრის (Fourier-transform infrared spectrometer)— FTIR IRSpirit (Shimadzu) საშუალებით, ინოვაციური არაექსტრაქციული მეთოდით, აგრეთვე გაზქრომატოგრაფიული მეთოდით- მაღალი გარჩევადობის Thermo TRACE 1310 გაზქრომატოგრაფზე.

სინთეზირებული პოლიმერული მემბრანების კვლევისთვის გამოყენებული იყო კაპილარული ნაკადის ფორომეტრიის (CFP) მეთოდი.

ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავებისა და ფიზიკურ-ქიმიური პარამეტრების განსაზღვრისთვის გამოყენებული იქნა საერთაშორისო ISO სტანდარტები.

ნავთობნახშირწყალბადების განსაზღვრა გაზქრომატოგრაფიული მეთოდით.

კვლევები ტარდებოდა სტანდარტული მეთოდიკების შესაბამისად. საკვლევი ნავთობის ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების განსაზღვრისთვის გამოყენებული იქნა შემდეგი სტანდარტები: ASTM D 5002 ,ASTM D 4052, ASTM D 4928, გოსტ 6370-83 , ASTM D 3230, IP 336, ASTM D 664 , ASTM D 5853(A), ASTM D 86 და ASTM D 5134 .

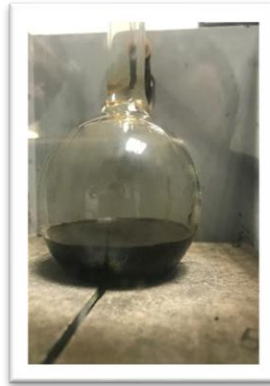
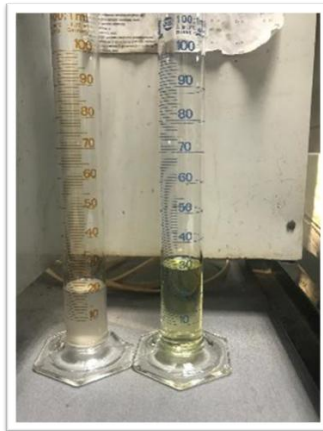
კვლევისათვის გამოყენებული იყო შემდეგი ტექნიკურ მატერიალური ბაზა: გოგირდის რენტგენო-ფლუოროსცენციური ანალიზატორი RIGAKU NEX QC, ციფრული დენსიტომეტრი Mettler Toledo DM-40, კულონომეტრული კარლ ფიშერის ტიტრატორი Mettler Toledo C-30, ატმოსფერულ წნევაზე ფრაქციული შემადგენლობის განმსაზღვრელი ხელსაწყო APHC- 1၆.

წყლიდან ნავთობის კომპონენტების ხის ნახერხზე სორბციის პროცესის გამოსაკვლევად მოვახდინეთ სორბენტში გატარებული და ასევე საწყისი ნავთობიანი წყლის ექსტრაქცია ნ-პენტანით (*chromatographic grade*)

ნახშირწყალბადოვანი შემადგენლობის კვლევა ხორციელდებოდა Thermo-ს ფირმის გაზქრომატოგრაფზე ალურ-იონიზაციული დეტექტორით, მოდელი TRACE 1310 GC, რომელიც უზრუნველყოფილი იყო ავტომატური პროგრამით Chrom-Card / PIANO და Supelco DH 100 კვარცის კაპილარული სვეტით, სიგრძე 100 მ, შიდა დიამეტრი 0.25 მმ, უძრავი ფაზა მეთილსილოქსანი. აღნიშნული სვეტის გამოყენება იძლევა ნახშირწყალბადების საუკეთესო დაყოფის საშუალებას C₁₅-ის ჩათვლით.

ქრომატოგრაფირების ძირითადი სამუშაო პირობები:

- *Sample Size:* 0.5 მკლ
- *Split Ratio:* 200 / 1
- *Injector Temp:* 250 °C
- *Detector Temp (FID):* 250 °C
- *Carrier Gas / Pressure:* ჰელიუმი / 345 კპა
- *Column Temperature Program:* 35 °C; იზოთერმული დაყოვნება 13 წუთი;
 - რეჟიმი 1: 10 °C/წთ სიჩქარით 45 °C-მდე, დაყოვნება 15 წთ;
 - რეჟიმი 2: 1.0 °C/წთ სიჩქარით 60 °C-მდე, დაყოვნება 15 წთ;
 - რეჟიმი 3: 2.0 °C/წთ სიჩქარით 180 °C-მდე, საბოლოო დაყოვნება 20 წთ.

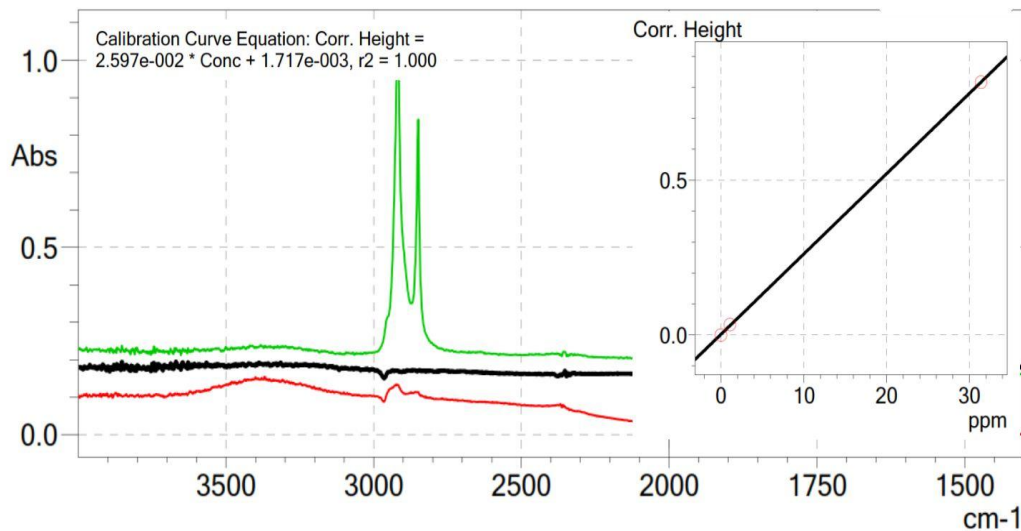


სურათი 30. ნავთობის დისტილაციის პროდუქტები ა) ბენზინის და დიზელის ფრაქცია; ბ) მძიმე მაზუტის ნარჩენი ფრაქცია.

ნავთობნახშირწყალბადების განსაზღვრა ფურიე ტრანსფორმაციის ინფრაწითელი სპექტროსკოპიის მეთოდით

წყალში ნავთობპროდუქტების (ნ/პ) კონცენტრაციის დასადგენად ათვისებული იქნა სტანდარტი „Test Method for Solvent-Free Membrane Recoverable Oil and Grease by Infrared Determination“ ASTM D7575 – 11, რომლის არსია საკვლევი ხსნარის OSS Clear Shot მემბრანულ ფილტრზე (კატრიჯზე) გაფილტვრა და შემდგომ ფილტრის სელექტიურ შრეზე სორბირებული ნავთობის და ნ/პ-ის კონცენტრაციის განსაზღვრა 2990 სმ-1 ტალღის სიგრძეზე ფურიეს გარდაქმნის ინფრაწითელი სპექტროსკოპის-IRSpirit გამოყენებით. ამ სტანდარტის გამოყენებით გამოირიცხა ექსტრაქციისთვის გამხსნელების გამოყენება.

საკალიბრაციო მრუდის და ოპტიკური ნულის (Background-ის) FTIR სპექტრის მუდმივი კონტროლის საფუძველზე ხდებოდა წყალში ნ/პ კონცენტრაციის დადგენა სორბციულ სვეტში გატარებამდე და სორბენტზე სორბციის შემდეგ.



მრუდი 1: ოპტიკური Background-ის FTIR სპექტრი და მიღებული ხაზოვანი საკალიბრაციო მრუდი Shimadzu FTIR IRSpirit სპექტროფოტომეტრზე ნავთობპროდუქტების რაოდენობრივი განსაზღვრისათვის.

სორბციის მრუდების აგება და სორბციული ტევადობის გამოთვლა

საკვლევი პოლიმერული მასალის სორბციული თვისებების შესასწავლად სორბენტები (სულ 8 სორბენტი იქნა გამოკვლეული) ჩატვირთულ იქნა მინის სორბციულ სვეტებში. შესწავლილი იქნა საწყისი ნავთობიანი წყალხსნარიდან (კონცენტრაცია $C_0 = 30$ მგ/ლ) პოლიმერულ სორბენტზე სორბირებული ნ/პ -ს რაოდენობა დინამიკურ (ნაკადურ) პირობებში, ამისთვის, ყოველი 100 მლ ფილტრატის შეგროვების შემდეგ, ფილტრატში ნარჩენი კონცენტრაცია განისაზღვრებოდა ASTM D7575-11 სტანდარტის მიხედვით.

ექსპერიმენტული შედეგების მათემატიკური ანალიზის საფუძველზე შეირჩა მაქსიმალური ეფექტურობის მქონე სორბენტები.

ექსპერიმენტის მსვლელობისას სორბციული ტევადობა გამოითვლებოდა შემდეგი ფორმულით:

$$q = \frac{(C_0 - C) \times V}{m}$$

სადაც q არის სორბციული ტევადობა გრ/გრ;

C_0 არის საწყისი წყალხსნარში ნ/პ -ის კონცენტრაცია,მგ/ლ;

C -- მიღებული ფილტრატის კონცენტრაცია, მგ/ლ;

V -მიღებული ფილტრატის მოცულობა, მლ

m -სორბენტის მასა, გრ

პოლიმერული მემბრანების ფორიანობის კვლევა აირ-დინამიკური (კაპილარული) ფორომეტრიის მეთოდით.

სინთეზირებული მემბრანების ფორების ზომების განაწილებას ვიკვლევდით ფორომეტრზე POROLUX 500 (ხელსაწყო შეძენილია ბელგიურ-გერმანული ფირმისგან Porometer NV) კაპილარული ნაკადის ფორომეტრიის მეთოდით **ACTM F-316-03** სტანდარტების შესაბამისად, რაც გამორიცხავს ტოქსიკური ნივთიერებების (ვერცხლისწყალი) გამოყენებას.

კაპილარული ნაკადის ფორომეტრის მეთოდით (CFP) მოხდა ფორების ზომისა და ფორების ზომის განაწილების განსაზღვრა. ფორების განსაზღვრა ეფუძნება მასალის ინერტული ფორების შემავსებელი სითხის (პროპილი) გადაადგილებას მასკანირებელი წნევის ზემოქმედებით. წნევის შესაქმნელად გამოიყენება ძირითადად შეკუმშული აზოტი.

აირ-დინამიკური (კაპილარული) ფორომეტრი Porolux™ 500 წარმოადგენს კვლევის გაფართოებული საშუალებას, რომელიც განკუთვნილია „გამჭოლი“ ფორების სიდიდის სწრაფი გაზომვისთვის ისეთ მასალებში, როგორიცაა მემბრანები, ფილტრები, ტექსტილი, ქაღალდი, ფოროვანი ბოჭკოები, უქსოვადი მასალები და სხვა.

ხელსაწყოში ფორების დიამეტრის განსაზღვრისათვის გამოიყენება ე.წ. პირველი ბუშტულის წერტილის (FBP-First Bubble Point) განსაზღვრის პრინციპი, რომლის დროსაც ხდება წნევის საფეხურებრივი სტაბილიზაცია და აირით თხევადი ფაზის გამოძევება უდიდესი ზომის ფორისგან.

ძირითადი პარამეტრი, რომლის მიხედვით ისაზღვრება უდიდესი ზომის ფორი, რომელიც არსებობს მემბრანის მასალაში, არის პირველი ბუშტულის წერტილი -FBP. ხელსაწყოთი განისაზღვრება მემბრანის შემდეგი მონაცემები: მინიმალური, საშუალო და მაქსიმალური ფორის დიამეტრი, აირგამტარობა, მემბრანაში ზომების მიხედვით ფორების განაწილების მაჩვენებელი ჰისტოგრამის სახით, ჰიდრაულიკური ნაკადი.

მემბრანების წარმადობის განსაზღვრა

მემბრანის წარმადობა დისტილირებული წყლის მიმართ განისაზღვრება ფორმულით:

$$Q = \frac{V}{St}$$

სადაც Q - მემბრანის წარმადობაა, ლ/მ²სთ; V-მემბრანაში გასული დისტილირებული წყლის მოცულობა (ლ); S-მემბრანის სამუშაო ფართი (მ²); t-ფილტრაციის დრო (სთ).

საწყისი წარმადობის განსაზღვრა ჩატარდა საპილოტე უჯრედში. ანათვალ ადებულ იქნა სტანდარტის თანახმად ფილტრაციის დაწყებიდან 10 წთ-ის შემდეგ, ულტრაფილტრაციული მემბრანებისთვის 0,15 მპა წნევაზე.

5.2 მცენარეული სორბენტების გამოცდა

კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ნავთობითა და ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლის გაწმენდა მინიმალური დანახარჯებით და ამისთვის სორბენტის სახით ადგილობრივი საწარმოს ნარჩენი ბუნებრივ ნედლეულის (ხის ნარჩენები, ნახერხი, მცენარეული აგრონარჩენები) და აგრეთვე მეორადი პოლიმერული მასალის გამოყენება.

გაწმენდის ოპტიმალური პირობების შესარჩევად შესწავლილ იქნა წყლის გაწმენდის ხარისხზე ისეთი ფაქტორების ზეგავლენა, როგორიცაა ჩასატვირთი სორბენტის დაფქვის ზომა (particle size), სორბციის დრო ან კონტაქტის დრო, ნავთობპროდუქტის საწყისი კონცენტრაცია, სორბენტის ჩატვირთვის სიმკვრივე, pH-ის და ტემპერატურის გავლენა სორბციის პროცესზე.

პირველ ეტაპზე შესწავლილი იქნა სხვადასხვა მცენარეული ნარჩენის ეფექტურობა ნავთობის სორბციის მიმართ. ჩატარდა ექსპერიმენტები წყლიდან ნავთობის სორბციაზე სტატიკურ პირობებში ისეთ მასალებზე როგორიცაა: მზესუმზირის გადამუშავების ანარჩენები (გვირგვინი), ტორფი, ხავსი, თივა და სხვა.



სურათი 31. სფაგნუმი, როგორც ბუნებრივი სორბენტი ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლის გასაწმენდად.



სურათი 32. მზესუმზირის გვირგვინი, როგორც ბუნებრივი სორბენტი ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლის გასაწმენდად.

კვლევის ობიექტები

საკვლევ მასალად შერჩეული იქნა 13 მცენარის ნარხერხი (სურათი 33). კერძოდ: ფიჭვის (*Pinus*), თხილის (*Corylus*), ევკალიპტის (*Eucalyptus*), რცხილა (*Carpinus*), ქლიავის (*Prunus domestica*), კრიპტომერიის (*Cryptomeria japonica*), პალმონიის (*Paulownia*), მუხის (*Quercus*), თხმელას (*Alnus*), თუთას (*Morus*), ტუია ლაუზონიას (*Thuja standishii*), კოწახურის (*Elaeagnus umbellata*) და კედრის (*Cedrus*).

ნახერხი მომზადებული იყო ბუნებრივი შრობის მეთოდით და წარმოადგენდა ნარევს ნაწილაკების ზომით 1-4 მმ-დე, კრიპტომერიის ნახერხი გაიცრა 0.5 მმ, 1.0 მმ, 2.0 მმ, 3.15 მმ ზომის საცრებში. ნახერხი მოპოვებული იქნა ინდ. მეწარმესთან ხის დამამუშავებელ საწარმოში „ნოდარი“.

კვლევაში გამოყენებული იყო აზერბაიჯანული კომპანიის (Azer Light Crude Oil) ნედლი ნავთი, რომლის გადატვირთვა წარმოებს სუფსის ტერმინალზე (წელიწადში

90 000 ტონაზე მეტი). ნავთობის ფიზიკო-ქიმიური მაჩვენებლები შესწავლილი იქნა სტანდარტული მეთოდების შესაბამისად.



Figure 1. Sawdust from Various Plants

სურათი 33. სხვადასხვა მცენარის სახეობისგან მიღებული ნახერხის ნიმუშები

საწყის ეტაპზე განხორციელდა სხვადასხვა მცენარის (ფართოფოთლოვანი და წიწვოვანი) ნახერხის კვლევა, მათგან საუკეთესო სორბციის უნარის მქონე ნახერხის დასადგენად. აღებულ იქნა 100 მლ მოცულობის სხვადასხვა მცენარის ნახერხი (დაფქვის ხარისხი 1-4 მმ -მდე) და ჩაიტვირთა სორბციულ სვეტებში (სიმაღლე 250მმ, დიამეტრი 50მმ), და ამის შემდგომ გატარდა ნავთობი. სორბირებული ნავთობის რაოდენობა განისაზღვრებოდა წონითი მეთოდით. სხვადასხვა მცენარის ნახერხის სორბციული ტევადობა ($m/m\%$ და $v/v\%$), ასევე ჩატვირთული ნახერხის მასა, მოცულობა და სიმკვრივე წარმოდგენილია ცხრილში №4.

ცხრილი №4. სხვადასხვა მცენარის ნახერხზე ნავთობის სორბციის ექსპერიმენტის შედეგები

№	ნიმუშის დასახელება	მოცულობა, მლ	მასა, გ	სიმკვრივე, გ/მლ	ნაკადში სორბციის უნარი, გ/100მლ	ნაკადში სორბციის უნარი, გ/გ	სორბციული ტევადობა, მ/მ%	სორბციული მოცულობა, v/v %
1	ფიჭვი Pinus	100	17.12	0.1712	23.7	1.4	138.7	28.1
2	თხილი Corylus	100	17.28	0.1728	19.9	1.2	115.4	23.6
3	ევკალიპტი Eucalyptus	100	14.61	0.1461	26.6	1.8	182.3	31.5
4	რცხილა Carpinus	100	14.51	0.1451	23.7	1.6	163.2	28.0
5	ქლიავი Prunus domestica	100	17.42	0.1742	24.3	1.4	139.4	28.7
6	კრიპტომერია Cryptomeria japonica	100	12.53	0.1253	31.6	2.5	252.2	37.4
7	პალმონიის Paulownia	100	9.85	0.0985	21.2	2.2	215.5	25.1
8	მუხა Quercus	100	23.78	0.2378	26.0	1.1	109.4	30.8
9	თხმელა Alnus	100	11.91	0.1191	22.9	1.9	192.4	27.1
10	თუთა Morus	100	10.19	0.1019	17.0	1.7	166.7	20.1
11	ტუია ლაუზონია Thuja standishii	100	9.95	0.0995	18.6	1.9	186.7	22.0
12	კოწახური Elaeagnus umbellata	100	11.11	0.1111	18.1	1.6	163.2	21.5
13	კედრი Cedrus	100	11.85	0.1185	21.6	1.8	182.0	25.5

გამოკვლეული მცენარეების ნახერხებიდან ყველაზე მაღალი სორბციის უნარი გამოავლინა კრიპტომერიის ნახერხმა (31,6 გრ ნავთობი 100 მლ სორბენტზე). ასევე კარგი შედეგი მოგვცა ევკალიპტის და მუხის ნახერხმა, რომლებიც ფაქტობრივად ერთნაირი სორბციული უნარით (26,6 გრ/ 100 მლ და 26,0 გრ/100მლ-ზე) ხასიათდება.

ყველაზე დაბალი სორბციული უნარი დაფიქსირდა თუთის შემთხვევაში (17,0 გრ/100მლ-ზე).

კვლევამ აჩვენა, რომ სორბციული უნარი არ არის კორელაციურ დამოკიდებულებაში მცენარის სიმკვრივესთან და ის განპირობებულია მცენარის უჯრედის აგებულების სხვა ფაქტორებით.

სორბირებული ნავთობის ფრაქციული შემადგენლობის განსაზღვრა.

დადგინდა, ნავთობის შემადგენელი ფრაქციებიდან რომელი სორბირებს უპირატესად (უკეთესად) ნახერხის სორბენტზე, რისთვისაც 300 მლ საკვლევი ნავთობი გატარდა 200 მლ მოცულობის სორბენტში (კრიპტომერიის ნახერხი, 1-4 მმ ნაწილაკების ზომის).

ნავთობის ფრაქციული შთანთქმის უნარის დასადგენად განისაზღვრა სორბენტში გატარებული ნავთობის ფრაქციული შემადგენლობა. დადგინდა, რომ დაბალმდულარე ნავთობპროდუქტების გამოსავლიანობა 300°C-ზე ტემპერატურაზე შეადგენს 51,5%, ს (იხ. ცხრილი №5).

მიღებული შედეგებიდან ჩანს, რომ ნავთობის ფრაქციული შემადგენლობა სორბენტში გატარებისას არ განიცდის ცვლილებას და რჩება ისეთივე თანაფარდობის, რაც საწყისი, რაზეც მეტყველებს მსუბუქი და მძიმე ფრაქციების გამოსავლიანობა. აქედან გამომდინარე, შეიძლება ითქვას, რომ ნახერხის სორბენტი ნავთობს სორბირებს მთლიანი შემადგენლობით, როგორც მძიმე ასევე მსუბუქ ფრაქციებს.

ცხრილი №5. ნავთობის ფრაქციული შემადგენლობა სორბცამდე და სორბციის შემდგომ.

მაჩვენებელი	მეთოდი	შედეგი	
ფრაქციული შემადგენლობა	ASTM D 86	საწყისი ნავთობი (%)	სორბციის შემდგომ ფილტრატში (%)
საშუალო ფრაქცია 180 –300°C		51.5	51.5
მძიმე ნაშთი >300 C°		48.5	48.5

უფრო დეტალური კვლევისათვის ჩვენს მიერ შესწავლილი იქნა ბენზინის (სიმკვრივე $\rho_{20}=0.7516$ გ/მლ) ფრაქციის ნახშირწყალბადების სორბციული უნარი. ნახშირწყალბადების კომპონენტური შემადგენლობის განსაზღვრისათვის გამოყენებული იქნა აირ ქრომატოგრაფიის მეთოდი.

ცხრილი № 6. ნახშირწყალბადების შემადგენლობა 180 C° ფრაქციაში

ნახშირწყალბადების შემადგენლობა	ASTM D 5134 mod მეთოდი	მასური, %180 C° ფაქციაში	მასური, %საწყისი	მასური, % სორბციის შემდგომ
პარაფინები		27.573	6.962	6.676
იზოპარაფინები		30.515	33.800	31.110
ოლეფინები		0.311	9.596	9.716
ნაფტენები		30.743	34.075	37.194
არომატული ნახშირწყალბადები		10.607	13.077	12.196
ოქსიგენატები		0	0.011	0
C1		0.007	0	0
C2		0,0	0.011	0
C3		0.425	0.015	0.003
C4		3.140	3.385	1.908
C5		8.340	19.217	16.454
C6		17.164	19.848	18.699
C7		23.562	18.798	19.623
C8		21.596	17.486	18.792
C9		12.738	10.774	12.433
C10		6.433	4.193	4.737
C11		2.463	2.742	3.041
C12		0.711	0.923	1.048
C13		0.363	0.127	0.148
C14		0.197	0	0.004
C15+		0.250	0.004	0.020
უცნობი		2.611	2.476	3.089

კვლევამ აჩვენა, რომ სორბენტში გატარებისას, ბენზინის ფრაქციის (როგორც ნავთობის შემთხვევაში) კომპონენტების მასური შემცველობა რჩება თითქმის იგივე, რაც საწყისი. მცირე ცვლილებები გამოწვეულია ფაქტობრივად მსუბუქი კომპონენტების აორთქლებით, რასაც მეტყველებს ბენზინის ფრაქციის სიმკვრივის ზრდაც. ვინაიდან სორბენტში

გატარების შემდგომ ბენზინის სიმკვრივე 20°C-ზე შეადგენდა $\rho_{20}=0.7523$ გ/მლ, რაც 0,0007 ერთეულით უფრო მაღალია ვიდრე საწყისი.

ნედლი ნავთობის სორბციული უნარის დამოკიდებულება ნახერხის ნაწილაკების ზომებზე.

ნაწილაკების ზომებზე ნახერხის სორბციული უნარის დამოკიდებულების შესასწავლად ნახერხი გაიცრა ავტომატურ ვიბრაციულ საცერში (გამოყენებული იქნა 0.5მმ, 1მმ, 2მმ, 3,15 მმ -იანი საცრები). შემდგომ საკვლევად აღებული იქნა კრიპტომერიის და ფიჭვის ნახერხი ნაწილაკების ზომით: 0.5მმ, 1მმ, 2მმ და 3,15 მმ, რომელშიც გატარდა სორბციის უნარის დასადგენად ნედლი ნავთობი.

$$\text{სორბციის უნარი (მგ/მგ)} = \frac{Co - Ce}{Ce \cdot m} \times V$$

სადაც Co - საწყისი კონცენტრაცია მგ/ლ,
 Ce - წონასწორული კონცენტრაცია,
 m - აბსორბენტის მასა,
 V - ხსნარის მოცულობა

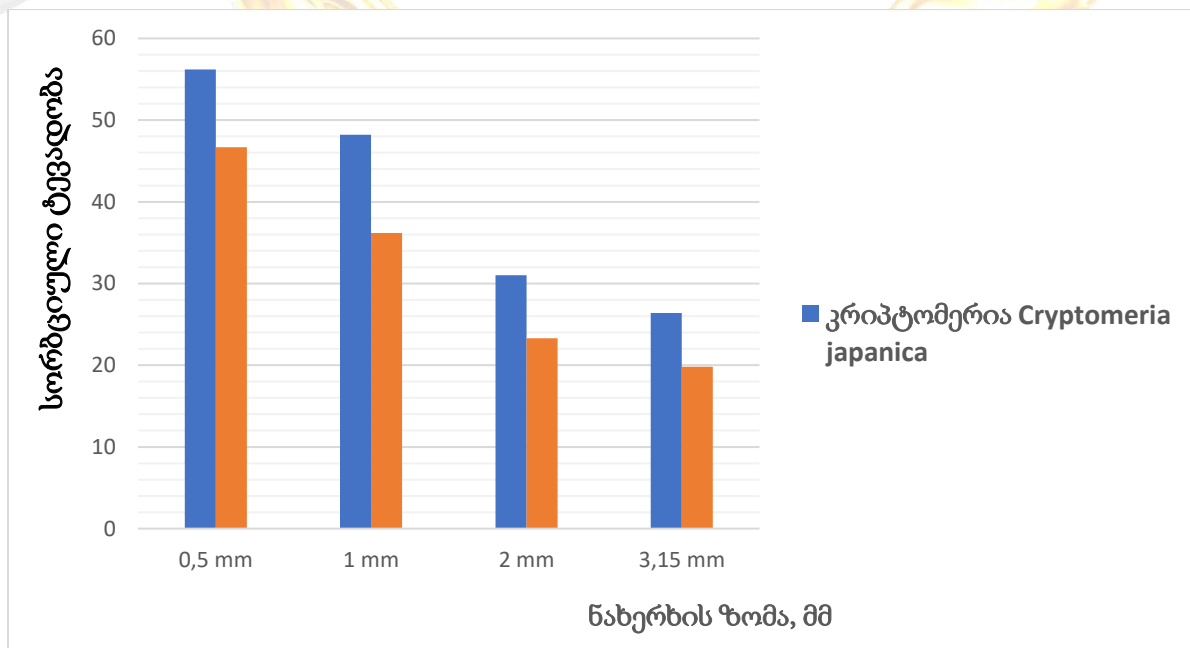
კვლევამ აჩვენა, რომ ნაწილაკის ზომის შემცირებასთან ერთად პროპორციულად იზრდება ნედლი ნავთობის სორბციის უნარი. მიღებული შედეგები მოყვანილია ცხრილში 7- ფიჭვის ნახერხი და ცხრილში 8-კრიპტომერიის ნახერხი.

ცხრილი №7. ნედლი ნავთობის სორბციის უნარის დამოკიდებულება ნაწილაკების ზომებზე ფიჭვის ნახერხის მაგალითზე

№	ნიმუშის ნაწილაკების ზომები	მოცულობა, მლ	მასა, გ	სიმკვრივე, გ/მლ	ნაკადში სორბციის უნარი, გ/100მლ	ნაკადში სორბციის უნარი, მლ/100მლ	ნაკადში სორბციის უნარი, გ/გ	სორბციული ტევადობა, მ/მ%	სორბციული მოცულობა, ვ/ვ. %
1	0.5 მმ	100.0	25.21	0.2521	46.7	55.2	1.9	185.2	55.2
2	1.0 მმ	100.0	23,52	0.2352	36.2	42.0	1.5	153.9	42.0
3	2.0 მმ	100.0	18,12	0.1812	23.3	27.0	1.3	128.4	27.0
4	3.15 მმ	100.0	15.52	0.1552	19.8	23.0	1.3	127.7	23.0

ცხრილი №8. ნედლი ნავთობის სორბციის უნარის დამოკიდებულება ნაწილაკების ზომებზე კრიპტომერიის ნახერხის მაგალითზე

№	ნიმუშის ნაწილაკების ზომები (კრიპტომერია)	მოცულობა, მლ	მასა, გ	სიმკვრივე, გ/მლ	ნაკადში სორბციის უნარი, გ/100მლ	ნაკადში სორბციის უნარი, მლ/100მლ	ნაკადში სორბციის უნარი, გ/გ	სორბციული ტევადობა, მ/მ%	სორბციული მოცულობა, ვ/ვ. %
1	0.5 მმ	100.0	18.45	0.1845	56.20	66,49	3,0	304,6	66,5
2	1.0 მმ	100.0	16.14	0.1614	48.20	57,02	2,6	257,4	48,2
3	2.0 მმ	100.0	13.12	0.1312	31.00	36,67	2,0	203,7	31,0
4	3.15 მმ	100.0	11.05	0.1105	26.40	31,23	2,1	205,9	26,4



მრუდი 2. ხის ნახერხის სორბციის უნარის დამოკიდებულება ნიმუშის ნაწილაკების ზომებზე

როგორც ცხრილი 4-დან ჩანს, ყველაზე მაღალი სორბციული აქტივობით გამოირჩევა კრიპტომერიის ნახერხი. კვლევამ აჩვენა, რომ სორბციის უნარი მნიშვნელოვნად არის

დამოკიდებული ნაწილაკების გეომეტრიულ ზომებზე. ნედლი ნავთობის სორბციის დამოკიდებულება ნაწილაკების ფრაქციებზე ფიჭვისა და კრიპტომერიისთვის მოცემულია ცხრილში 7 და ცხრილში 8, ხოლო გრაფიკული დამოკიდებულება წარმოდგენილია მრუდი 2-ზე.

ნედლი ნავთობის შემცველი წყლიდან ნავთობის სორბციის პროცესის შესწავლა აქტივირებულ ნახერხზე

ცნობილია, რომ ხის ნახერხი შეიცავს სხვადასხვა ფისოვან და ორგანულ ნაერთებს, რომლებიც წყლის გატარებისას ნაწილობრივ გადადიან ნახერხიდან წყალში. ამიტომ განხორციელდა ნედლი ნავთობის შემცველი წყლის გასაწმენდად გამოსაყენებელი ნახერხის წინასწარ გაწმენდა (აქტივაცია) შემდეგი თანმიმდევრობით: 100 მლ მოცულობის სორბენტი ირეცხებოდა თავდაპირველად 200 მლ ეთანოლით (96%) და შემდგომ იმავე მოცულობის გამოხდილი წყლით, 3,2-5,0 მლ/წთ-ში სიჩქარით.

გაწმენდილ სორბენტში (ნახერხი) გატარებულ იქნა ნედლი ნავთობით გაჯერებული წყალი 250 მლ რაოდენობით. ექსპერიმენტების ჩასატარებლად დამზადდა დაბინძურებული წყლის იმიტატი: კერძოდ, 100 მლ ნავთობის (აღებული იყო საშუალო სიმკვრივის ნავთობი -Azer Light Crude Oil) და 900 მლ წყლის შერევით მიღებული იქნა ნავთობიანი წყლის ემულსია, რომელშიც ნავთობის მასური წილი შეადგენდა 8,57%.

სორბენტად გამოყენებული იქნა კრიპტომერიის ნახერხი, ვინაიდან გამოკვლეული მცენარეების ნახერხებს შორის მას ყველაზე მაქსიმალური სორბციის უნარი აღმოაჩნდა.

შესწავლილი იქნა როგორც საწყისი ნავთობიანი წყალი, ასევე სორბენტში გატარების შემდგომ მიღებული ფილტრატი.

წყლიდან შეკავებული ნავთობკომპონენტების რაოდენობის განსასაზღვრავად ჩატარდა ექსტრაქცია ნ-ჰექსანის გამოყენებით საწყისი ნავთობიანი წყლიდან (იმიტატი) და სორბენტში გატარებული ფილტრატიდან. ექსტრაქტების ანალიზი ჩატარდა გაზქრომატოგრაფზე. ნახერხში გატარების შემდეგ წყალში ნავთობკომპონენტების შემცველობა შემცირდა 39, 49 %-ით. კვლევის შედეგები მოყვანილია ცხრილში №9.

ცხრილი №9. შეკავებული ნავთობკომპონენტების რაოდენობა

საკვლევი ხსნარი	ანალიზის მეთოდი	ერთეული	ნავთობკომპონენტების შემცველობა
-----------------	-----------------	---------	--------------------------------

საწყისი ხსნარი	GC	მგ/ლ	29,25
ნახერხში გატარების შემდეგ	GC	მგ/ლ	11,55

ინტერესს წარმოადგენდა იმის დადგენაც, თუ კონკრეტულად ნედლ ნავთობში შემავალი რომელი ნივთიერებები გადადიან წყალში. ქრომატოგრაფირების მეშვეობით დადგინდა წყალში გადასული 180°C ფრაქციის ინდივიდუალური ნახშირწყალბადების შემადგენლობა. ანალიზის შედეგები მოცემულია ცხრილში №10.

ცხრილი №10. გაჰქრომატოგრაფიული ანალიზის შედეგები

დრო	კომპონენტი	საწყისი ხსნარი, მგ/ლ	ნახერხში გატარების შემდეგ, მგ/ლ
13,00	Cyclopentane	0,50	0,50
13,30	2-Methylpentane	0,25	0,10
14,15	3-Methylpentane	0,25	0,50
15,25	n-Hexane	0,25	0,10
17,36	Methylcyclopentane	0,25	0,10
18,19	2,2,3-Trimethylbutane	0,50	0,50
19,52	Benzene	0,25	0,15
31,21	Ethylcyclopentane	5,00	2,00
35,28	Toluene	1,00	1,00
55,90	Ethylbenzene	13,00	4,50
58,36	m-Xylene	1,00	0,50
58,68	p-Xylene	3,50	1,50
64,27	o-Xylene	1,00	0,05

როგორც მონაცემებიდან შანს, ნავთობი-წყალი სისტემებიდან ნახერხზე ცუდად სორბირებს ისეთი კომპონენტები, როგორიც არის Cyclopentane, 2,2,3-Trimethylbutane და Toluene.

საინტერესოა იმის დადგენა, თუ რა ფაქტორები მოქმედებს ნავთობპროდუქტების წყალში გადასვლაზე: კომპონენტების ხსნადობა, თუ ნავთობში აღნიშნული კომპონენტების სიჭარბე. ჩატარდა ანალიზი ნავთობის 180°C-ზე გამოხდილი ფრაქციის კომპონენტური შემადგენლობის დასადგენად. ანალიზის შედეგები მოცემულია ცხრილში №11.

ცხრილი №11. 180 °C-ზე გამოხდილი ნავთობის ფრაქციის დომინანტი
კომპონენტები

კომპონენტი	დრო	რაოდენობა, %
Propane	7,255	0,406
i-Butane	7,685	0,745
n-Butane	8,05	2,324
i-Pentane	9,4	3,327
n-Pentane	10,135	3,79
Cyclopentane	12,99	0,9
2,3-Dimethylbutane	13,075	0,408
2-Methylpentane	13,315	2,486
3-Methylpentane	14,145	1,857
n-Hexane	15,275	4,408
2,2-Dimethylpentane	17,365	3,362
2,2,3-Trimethylbutane	18,14	0,043
Benzene	19,49	0,669
Cyclohexane	20,53	3,496
2-Methylhexane	21,52	1,677
2,3-Dimethylpentane	21,705	0,666
1,1-Dimethylcyclopentane	22,025	0,474
3-Methylhexane	22,58	2,064
1c,3-Dimethylcyclopentane	23,355	0,819
1t,3-Dimethylcyclopentane	23,72	0,806
1t,2-Dimethylcyclopentane	24,095	1,446
n-Heptane	26,015	4,956
Methylcyclohexane	29,225	7,43
2,2-Dimethylhexane	29,625	0,585
Ethylcyclohexane	31,095	0,533
1c,2t,4-Timethylcyclopentane	32,69	0,517
1t,2c,3-Timethylcyclopentane	34,045	0,64
Toluene	35,315	2,819
2,3-Dimethylhexane	36,73	0,476
2-Methylheptane	38,04	2,074
4-Methylheptane	38,275	0,582

3-Methylheptane	39,54	1,75
1c,2t,3-Timethylcyclopentane	39,68	1,537
1t,4-Dimethylcyclohexane	40,02	0,633
2t-Ethylcyclopentane	42,48	0,523
1t,2-Dimethylcyclohexane	43,44	0,993
n-Octane	45,025	5,025
1,1,4-Timethylcyclopentane	51,355	1,625
2,4-Dimethylhexane	51,835	0,634
n-Propylcyclopentane	52,68	0,866
Ethylbenzene	55,86	0,482
m-Xylene	58,465	1,745
p-Xylene	58,715	0,43
3,5-Dimethylhexane	59,165	0,666
4-Methyloctane	61,435	0,522
2-Methyloctane	61,75	0,66
3-Methyloctane	63,475	0,782
o-Xylene	64,33	1,101
n-Nonane	69,94	3,147
I17	80,825	0,521
I19	83,215	0,615
n-Decane	86,26	1,626

ნავთობის სორბცია ორთქლით დამუშავებულ ნახერხზე

ნახერხის სორბციული თვისებების გასაუმჯობესებლად ჩატარდა მისი თერმული ($T=140-160^{\circ}\text{C}$ -ზე) და მაღალი წნევის ორთქლ-კონტაქტური აქტივაცია სპეციალურ დანადგარში (სურათი 34).

ამის შემდეგ გაწმენდილ სორბენტში (ნახერხი) გატარებული იქნა როგორც სუფთა ნავთობი, ასევე ნავთობით გაჯერებული წყალი.

ექსპერიმენტების ჩასატარებლად დამზადდა დაბინძურებული წყლის იმიტატი: კერძოდ 25 მლ ნავთობისა (აღებული იყო საშუალო სიმკვრივის ნავთობი Azer Light Crude Oil) და 975მლ წყლის შერევით მიღებული იქნა ნავთობით გაჯერებული წყალი, რომელიც შეიცავდა 123 მგ/ლ გახსნილ (ემულგირებული) ნავთობპროდუქტებს. სორბენტად შეირჩა კრიპტომერიის ნახერხი, რადგანაც გამოკვლეულ მცენარეების ნახერხს შორის მას ყველაზე მაქსიმალური სორბციის უნარი გააჩნდა.



სურათი 34. ნახერხის მაღალი წნევის ორთქლით აქტივაციის ექსპერიმენტული მოწყობილობა.

წყალში ნავთობის კომპონენტების განსაზღვრისათვის, მოვახდინეთ მათი ექსტრაქცია ნ-პენტანით (*chromatographic grade*). ნავთობნახშირწყალბადების განსაზღვრა მოხდა გაუქრომატოგრაფზე -Thermo TRACE 1310.

ექსპერიმენტის შედეგებიდან ჩანს, რომ ნახერხში გატარების შემდეგ ნავთობნახშირწყალბადების შემცველობა შემცირდა 50 მლ გატარებისას 0-მდე, 100 მლ-ს გატარებისას- 1.15 მგ/ლ-მდე, 200 მლ-ს გატარებისას 16.07 მგ/ლ-მდე, 500 მლ-ს გატარებისას 36,43 მგ/ლ-მდე. ნავთობნახშირწყალბადების შემცველი წყლის გაწმენდის პროცესი განხორციელდა 25 C° ტემპერატურაზე, ხსნარის გატარების სიჩქარე 3-5 მლ/წთ. აქტივაციის შედეგად მიღებული ეფექტი და ფრაქციული ცვლილებები მოცემულია ცხრილში 12.



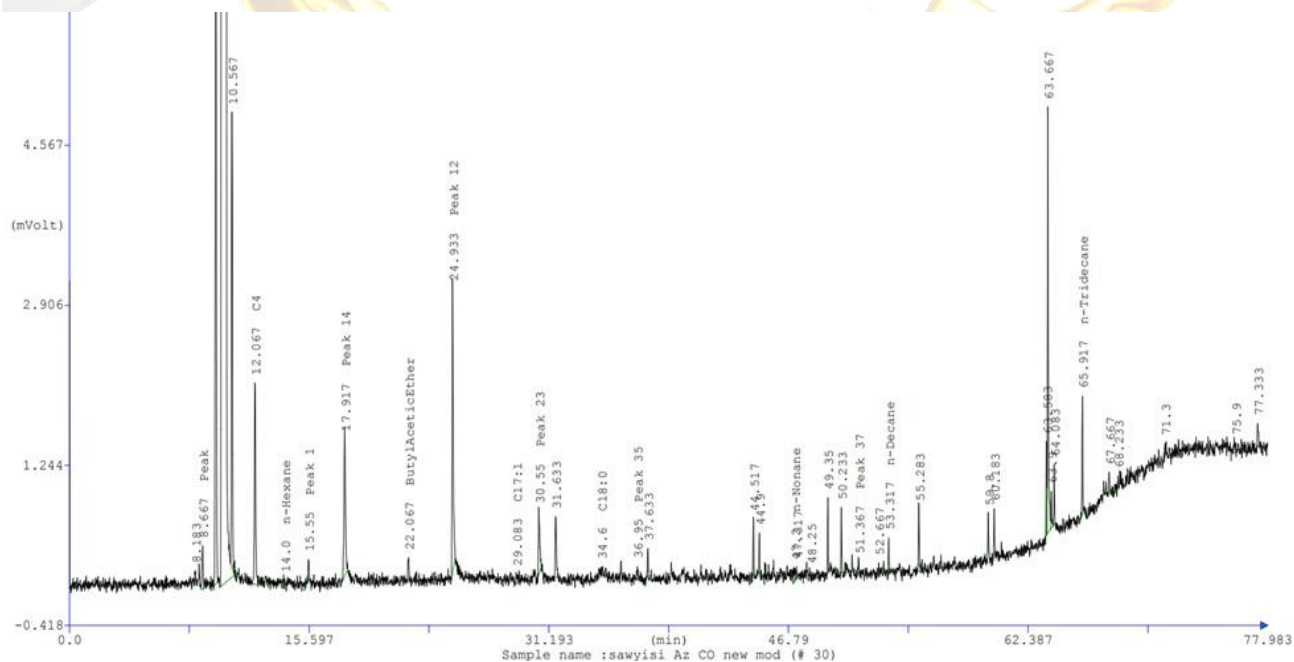
სურათი 35. გაზქრომატოგრაფი Thermo TRACE 1310



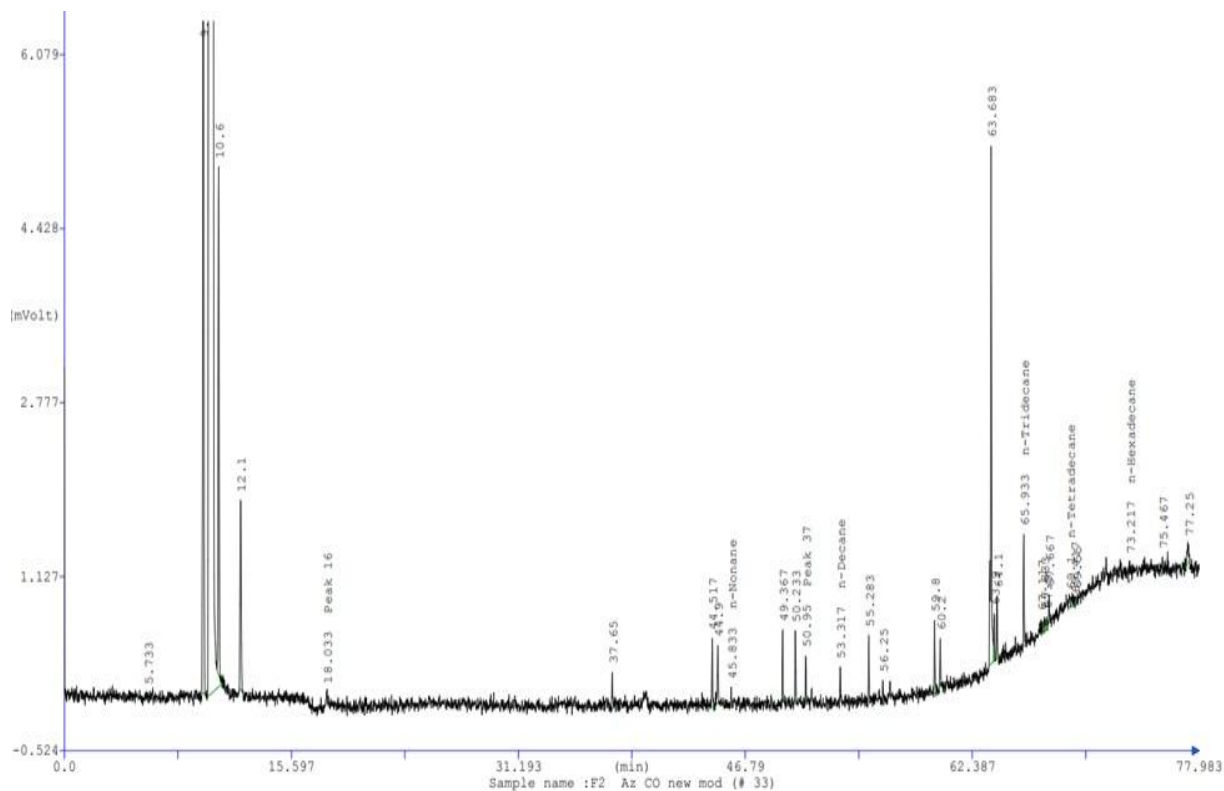
სურათი 36. ატმოსფერულ წნევის პირობებში ნავთობის დისტილაციის მოწყობილობა

ცხრილი 12: ნავთობნახშირწყალბადების შემცველობის ცვლილება გააქტივებულ ნახერხში გატარების შემდეგ.

საკვლევი ხსნარი	მოცულობა, მლ	ერთეული	ნავთობკომპონენტების შემცველობა (განსაზღვრულია გაზქრომატოგრაფიული მეთოდით)
საწყისი ხსნარი		მგ/ლ	123
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	50	მგ/ლ	0.00
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	100	მგ/ლ	1.15
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	200	მგ/ლ	16.07
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	500	მგ/ლ	36.43



მრუდი 3. ა) დაბინძურებული წყლის (იმიტატი) ქრომატოგრამა
(ნავთობნახშირწყალბადების შემცველობა 123 მგ/ლ).

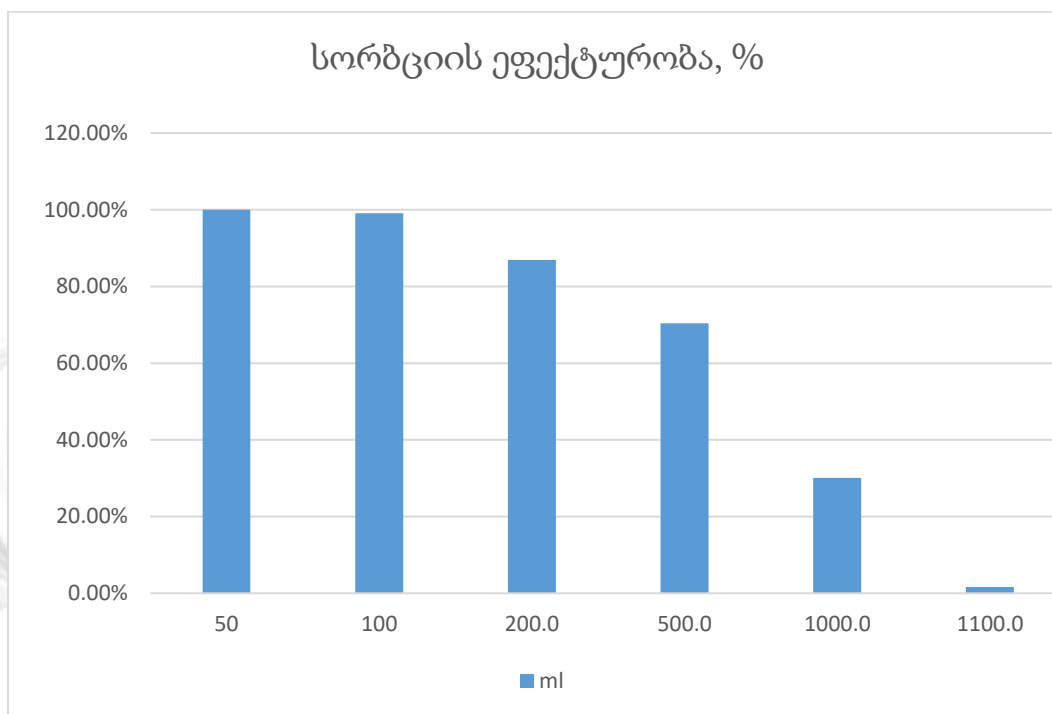


მრუდი 3. ბ) ფილტრატის (სორბენტში გატარების შემდეგ) ქრომატოგრამა (ნავთობნახშირწყალბადების შემცველობა 16,07 მგ/ლ).

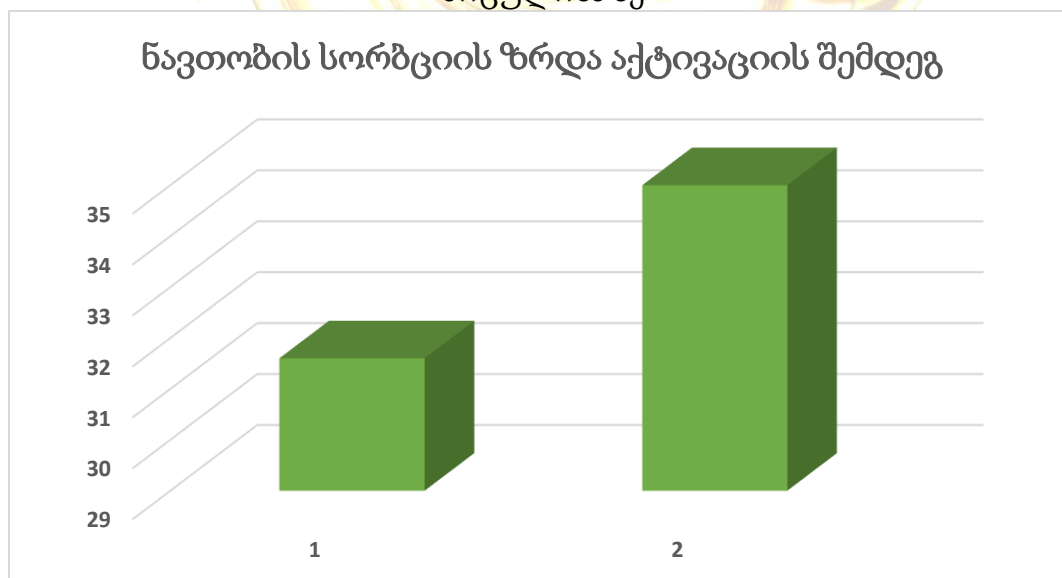
ცხრილი 13. სორბციის ეფექტურობის დამოკიდებულება სორბენტზე გატარებული ხსნარის მოცულობაზე.

საკვლევი ხსნარი	მოცულობა, მლ	სორბციის ეფექტურობა
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	50	100.0%
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	100	99.1%
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	200	86.9%
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	500	70.4%
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	1000	30.1%
ნახერხზე სორბციის შემდეგ	1100	1.6%

ნახერხის ორთქლ-კონტაქტური დამუშავებით სორბციული უნარი ნავთობის გატარებისას გაიზარდა 11%-ით. ხოლო ნავთობიანი წყლის გატარებისას მისი ეფექტურობა გაიზარდა 3- ჯერ (იხ. მრუდი 5).



მრუდი 4. სორბციის ეფექტურობის დამოკიდებულება გატარებული წყლის მოცულობაზე

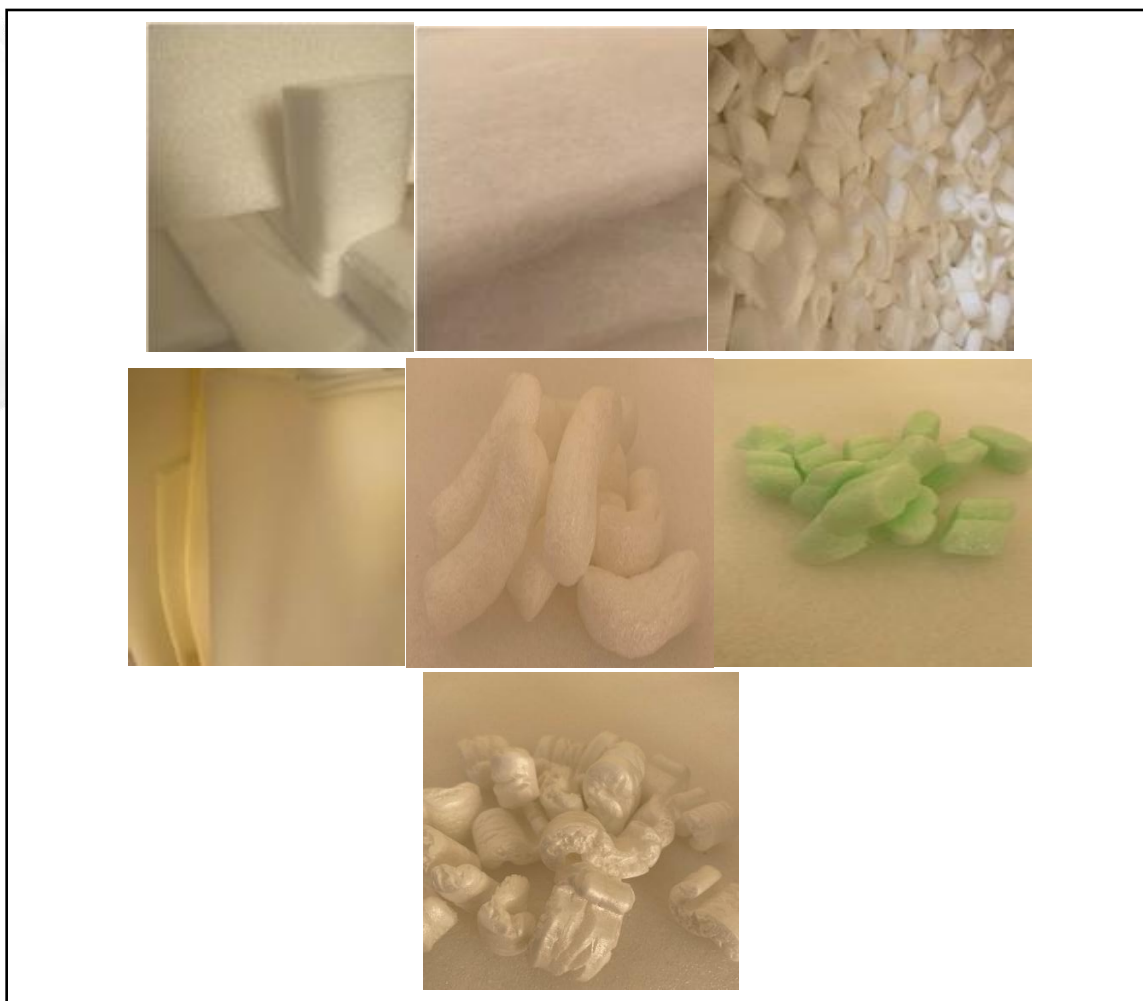


მრუდი 5. სორბციის ზრდა ნახერხის აქტივაციის შემდეგ

5.3 სორბცია მეორად პოლიმერულ ნარჩენებზე

ნახერხთან ერთად შესწავლილი იქნა მეორადი ფოროვანი პოლიმერების გამოყენების შესაძლებლობა.

აღნიშნულის განსახორციელებლად მოდიებული იქნა სხვადასხვა პოლიმერული მასალის ნიმუშები (სურათი 37), ძირითადად ადგილობრივი წარმოების ნარჩენი ფოროვანი პოლიმერული მასალა (ავეჯის დამზადების საწარმოების ნარჩენები, შესაფუთი მასალები და სხვა).

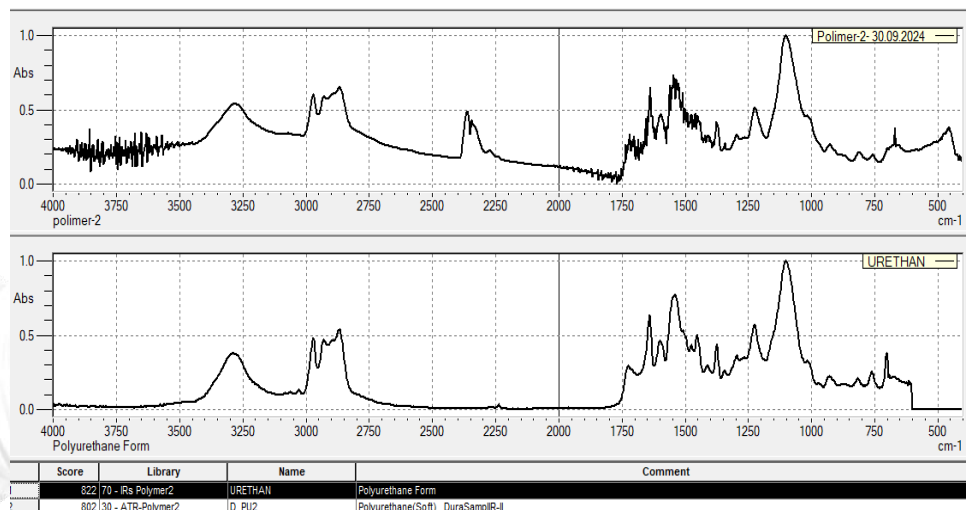


სურათი 37. მეორადი ფოროვანი პოლიმერული მასალების ნიმუშები.

ჩატარდა მოდიებული პოლიმერული მასალის კვლევა იდენტიფიკაციის მიზნით FTIR IRSpirit (Shimadzu) სპექტრომეტრზე.

FTIR სპექტროფოტომეტრზე სკანირების და Shimadzu -ს მონაცემთა ბაზის გამოყენებით საკვლევი პოლიმერების იდენტიფიკაციისას (იხ. **მრუდი 6.** უცნობი

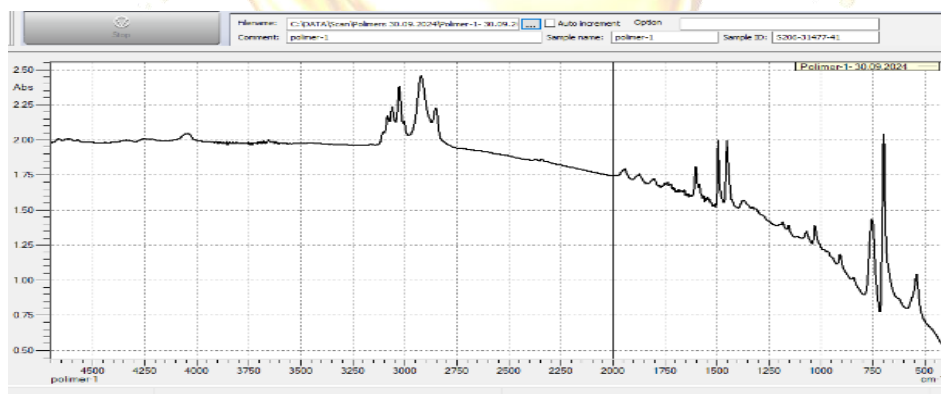
პოლიმერის იდენტიფიკაცია) დადგინდა, რომ ისინი შედგებოდნენ პოლიურეთანისაგან (**PU**), პოლისტიროლისაგან (**PS**) (4 სხვადასხვა მოდიფიკაცია), დაბალი სიმკვრივის პოლიეთილენისგან (**PE**), სახამებელისაგან; პოლიესტერისაგან; (იხ. მრუდი 7. FTIR სპექტრები (ა-თ) მიღებული IRSpirit სპექტროსკოპზე).



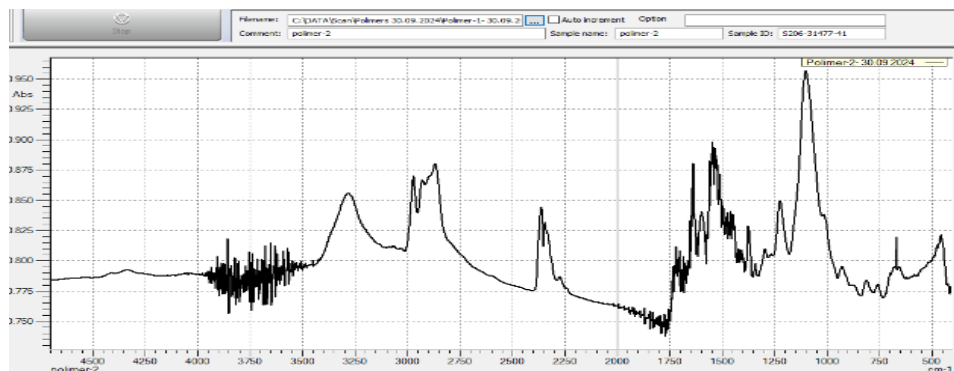
მრუდი 6. უცნობი პოლიმერის იდენტიფიკაცია.

პირველი მრუდი -საკვლევი პოლიმერი, მეორე მრუდი -პოლიურეთანი. FTIR სპექტრი მიღებული IRSpirit სპექტრომეტრზე.

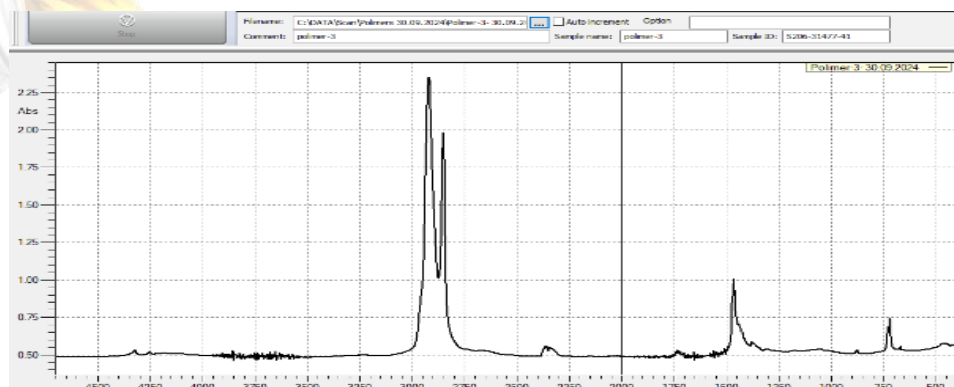
მრუდი 7. ა)პოლისტიროლი.



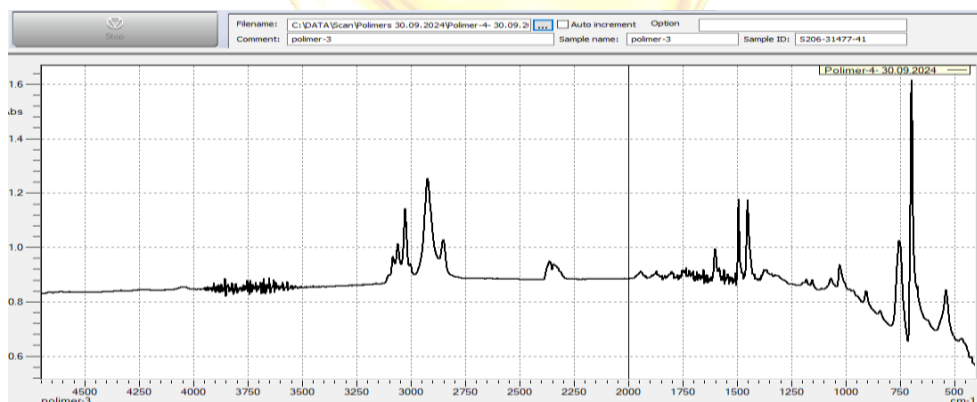
მრუდი 7. ბ)პოლიურეტანი



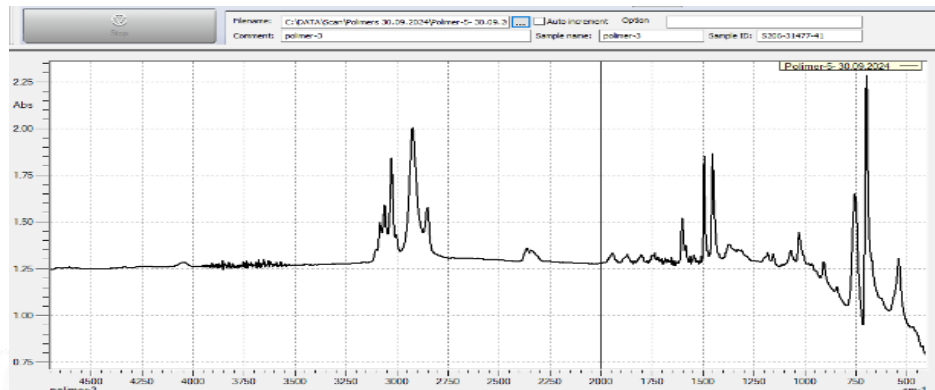
მრუდი 7. გ)დაბალი სიმკვრივის პოლიეთილენი



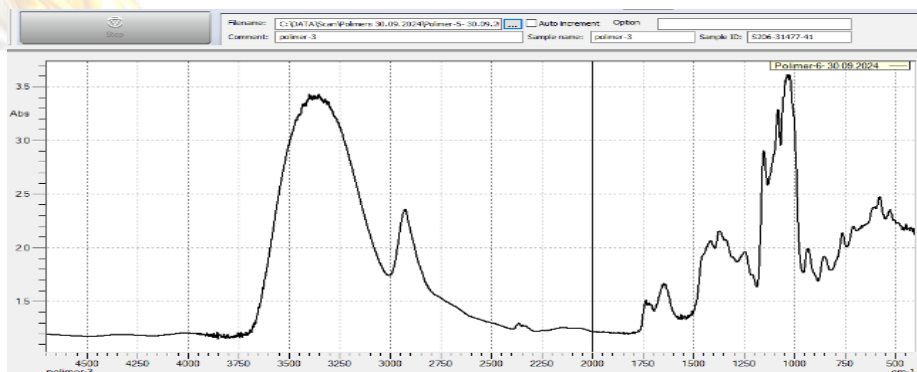
მრუდი 7. დ)პოლისტიროლი



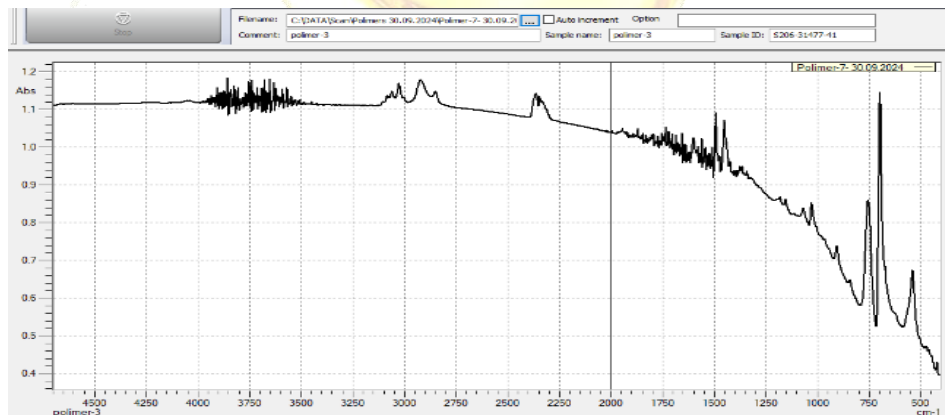
მრუდი 7. ე) პოლისტიროლი



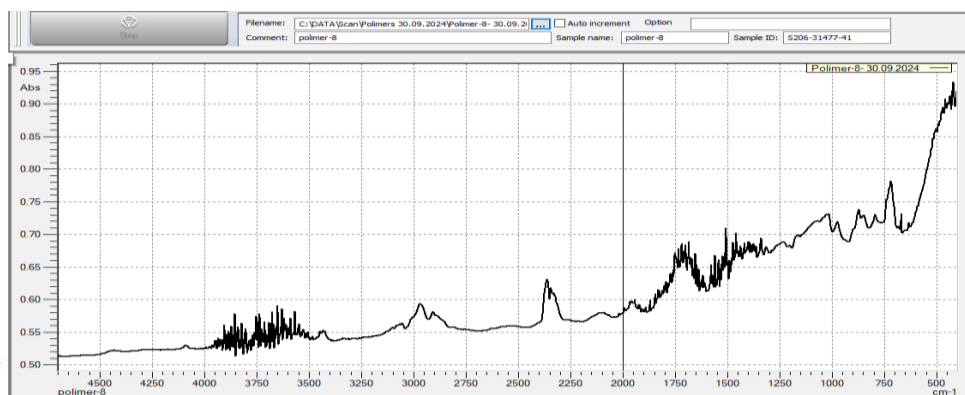
მრუდი 7. ვ) სახამებელი



მრუდი 7.ზ) პოლისტიროლი



მრუდი 7.თ)პოლიესტერი



ეს პოლიმერები წარმოადგენს წარმოების ნარჩენებს, მეორად მასალას. პოლისტიროლის მასალა ხშირად გამოიყენება მყარი ფირფიტების ან პატარა გრანულების სახით, რომლებიც იცავენ საგანს ტრანსპორტირებისას. სახამებელი (Starch-based foam)-ბიოდეგრადირებადი შეფუთვის მასალაა, რომელიც ხშირად მზადდება მცენარეული სახამებლისგან, გაფუებული პოლიეთილენი (Expanded Polyethylene, EPE) – ქაფი, რომელიც ფართოდ გამოიყენება შესაფუთად, იზოლაციისთვის და ამორტიზაციისთვის. პოლიურეთანი (Polyurethane)-გამოიყენება მყიფე საგნების შეფუთვისათვის, აქვს კარგი ამორტიზაცია, ასევე ფართოდ გამოიყენება რბილი ავეჯის დამზადების დროს, ამიტომაც ძირითადად მისი მოპოვება მოხდა ავეჯის მწარმოებლებთან.

ნავთობპროდუქტების (დიზელის) შემცველი წყალხსნარის მომზადება

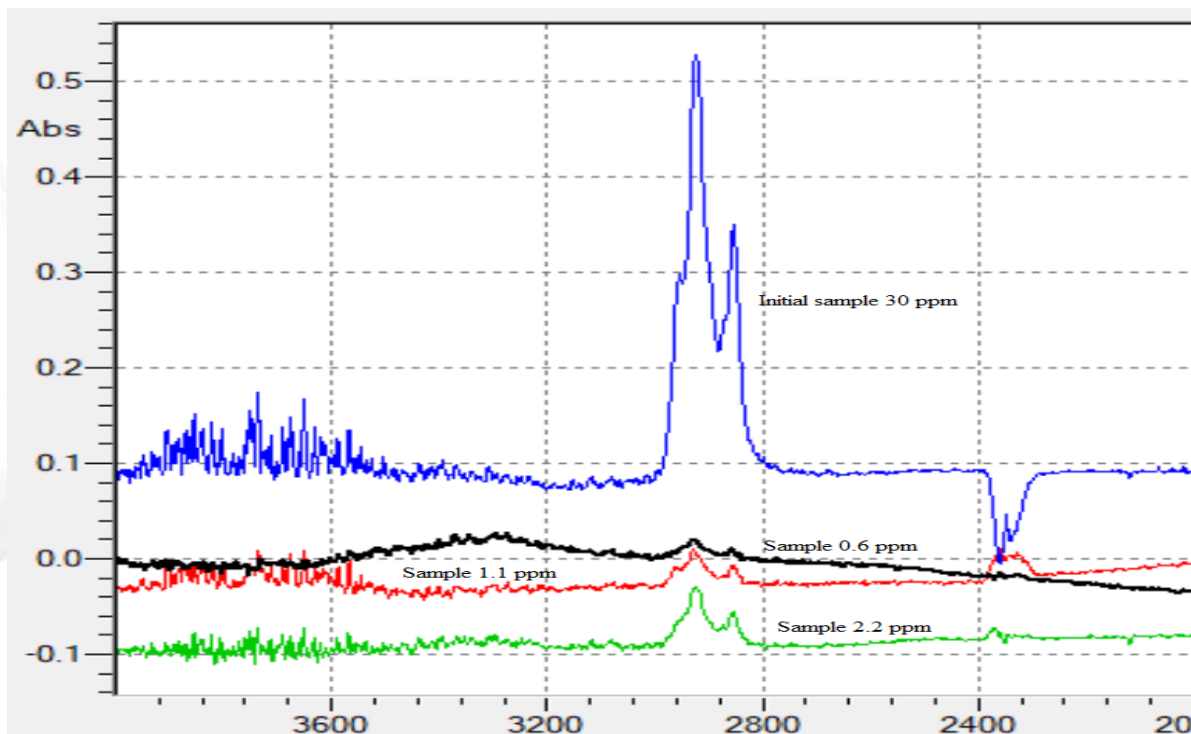
ფოროვანი პოლიმერების სორბციული თვისებების დასადგენად მომზადდა ხელოვნურად დაბინძურებული ნავთობპროდუქტების შემცველი წყალხსნარი. ცნობილი კონცენტრაციის ხსნარის მომზადება: დიზელის (გაზოილის) წყალხსნარის დასამზადებლად 500 მგ დიზელი გაიხსნა 1ლ წყალში, მიღებული ემულსია ჰომოგენიზაციის მიზნით მოთავსდა 30 წთ ულტრაბგერით აბაზანაში, $T=40^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე.

დიზელის კონცენტრაციის განსაზღვრა

უცნობ ნიმუშში ნ/პ კონცენტრაციის დასადგენად 10 მლ საანალიზო ხსნარს ატარებდნენ შპრიცის (syringe) საშუალებით მემბრანულ ფილტრში (OSS part: 1013

SPE), ფილტრს (კატრიჯს) აშრობდნენ 10-15წთ განმავლობაში მშრალი ჰაერის ნაკადში. შემდეგ ხსნარში ნ/პ კონცენტრაციას საზღვრავდნენ IRSpirit სპექტროფოტომეტრზე.

განსაზღვრის შედეგებმა აჩვენა, რომ წყალში გადასული ნახშირწყალბადების კონცენტრაცია საწყის ხსნარში (initial solution) შეადგენს 30 მგ/ლ-ს ანუ 30 ppm.



მრუდი 8. ნ/პ-ის კონცენტრაცია საწყის ნიმუშში და სხვადასხვა ფილტრატში. სპექტრები მიღებულია FTIR IRSpirit სპექტროფოტომეტრზე.



სურათი 38. ექსტრაქციისათვის გამოყენებული OSS ფილტრი-კარტრიჯი (Part No. 1013 SPE) და 10 მლ-იანი შპრიცი.

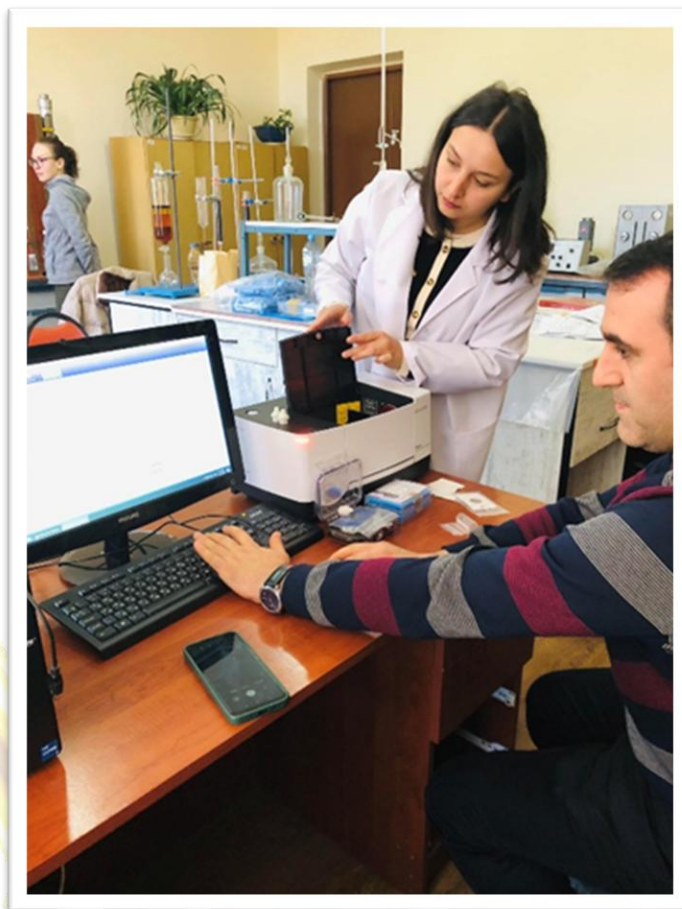


სურათი 39. სორბციული სვეტები ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლების გასაწმენდად.

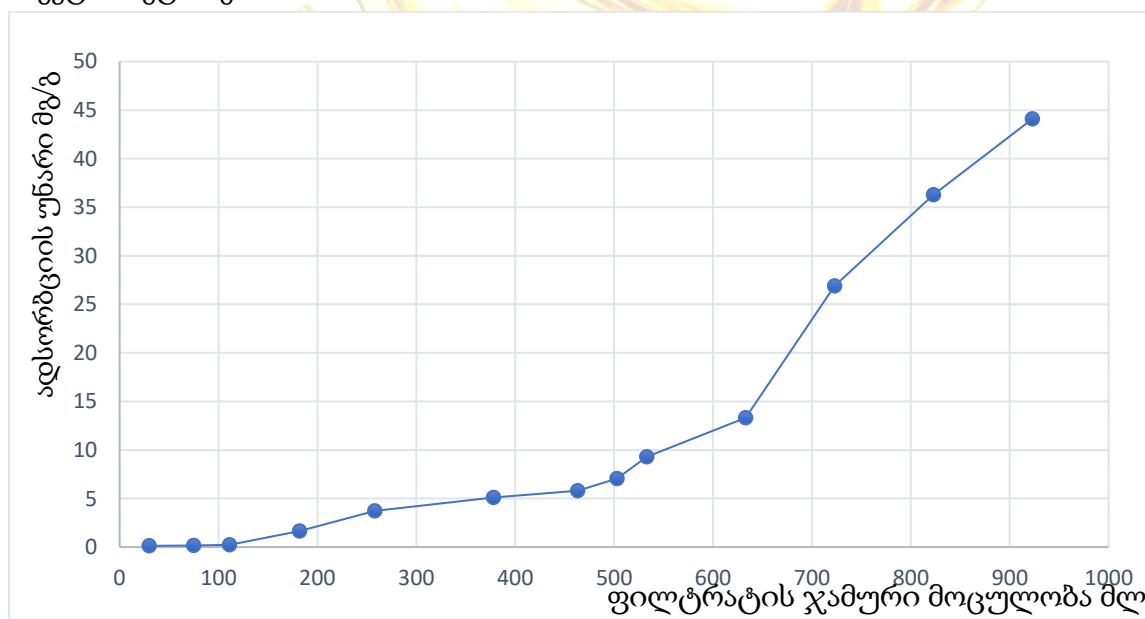
სორბციის მრუდების აგება

საკვლევი პოლიმერების სორბციული თვისებების შესასწავლად სორბენტები (სულ 8 სორბენტი იქნა გამოკვლეული) ჩატვირთულ იქნა მინის სორბციულ სვეტებში. შესწავლილი იქნა საწყისი წყალხსნარიდან (C_0 -30 მგ/ლ) პოლიმერულ სორბენტზე სორბირებული ნ/პ -ს რაოდენობა დინამიკურ პირობებში, რისთვისაც ყოველი 100 მლ საწყისი ხსნარის დამატების შემდეგ ისაზღვრებოდა ფილტრატში დარჩენილის ნ/პ კონცენტრაცია **D7575 – 11 სტანდარტის** გამოყენებით. შედეგების მიხედვით შეირჩა საუკეთესო სორბციული თვისებების მქონე სორბენტი .

ჩატარებული კვლევების შედეგად აღებული 8 პოლიმერული მასალიდან, როგორც ყველაზე ეფექტური სორბენტი შეიძლება გამოვყოს პოლიურეთანი და შემდგომ პოლისტიროლი.



სურათი 40. ნიმუშების FTIR სპექტროსკოპიული ანალიზი IR Spirit (Shimadzu) სპექტრომეტრზე.



~მრუდი 9. დიზელის სორბციის პროცესი PU-ზე, ჩატვირთვის სიმკვრივე $\rho=0,1125$ გ/მლ

თუ განვიხილავთ სორბციულ სვეტში (სორბენტის ჩატვირთვის სიმკვრივე $\rho=0,1125$ გ/მლ) პოლიურეთანის სორბენტზე მიმდინარე პროცესს, მრუდის მიხედვით შეიძლება ითქვას, რომ პოლიმერის სორბციის უნარი ნელ-ნელა იზრდება, 600 მლ ხსნარის გატარების შემდეგ სორბენტი უკვე აქტიურად მუშაობს და დიდი რაოდენობით იწოვს დიზელს. ჩანს, რომ ექსპერიმენტის დასრულების შემდეგაც სორბენტი არ არის გაჯერებული. პოლიურეთანი ეფექტურად შთანთქმავს დიზელს, განსაკუთრებით ფილტრაციის მოგვიანებით ეტაპებზე. რაც შეეხება სორბციული სვეტს, რომელშიც პოლისტიროლის სორბენტია, თავიდან კარგად შთანთქმავს დიზელს, მაგრამ დროთა განმავლობაში შთანთქმის უნარი მცირდება. მაღალი ეფექტურობა (97%) ჩანს საწყის ეტაპებზე, ხოლო სორბენტის გაჯერების შემდეგ ეფექტურობა იკლებს (89%). დაახლოებით 300 მლ-ის შემდეგ სორბციული უნარი აღწევს პიკს (~175 მგ/ლ), რაც მიუთითებს, რომ სორბენტის აქტიური ცენტრების უმეტესობა შევსებულია. ექსპერიმენტების შედეგებით (იხ. ცხრილი 14) ჩანს, რომ პოლიურეთანი უფრო ეფექტურია დიზელის შთანთქმაში.

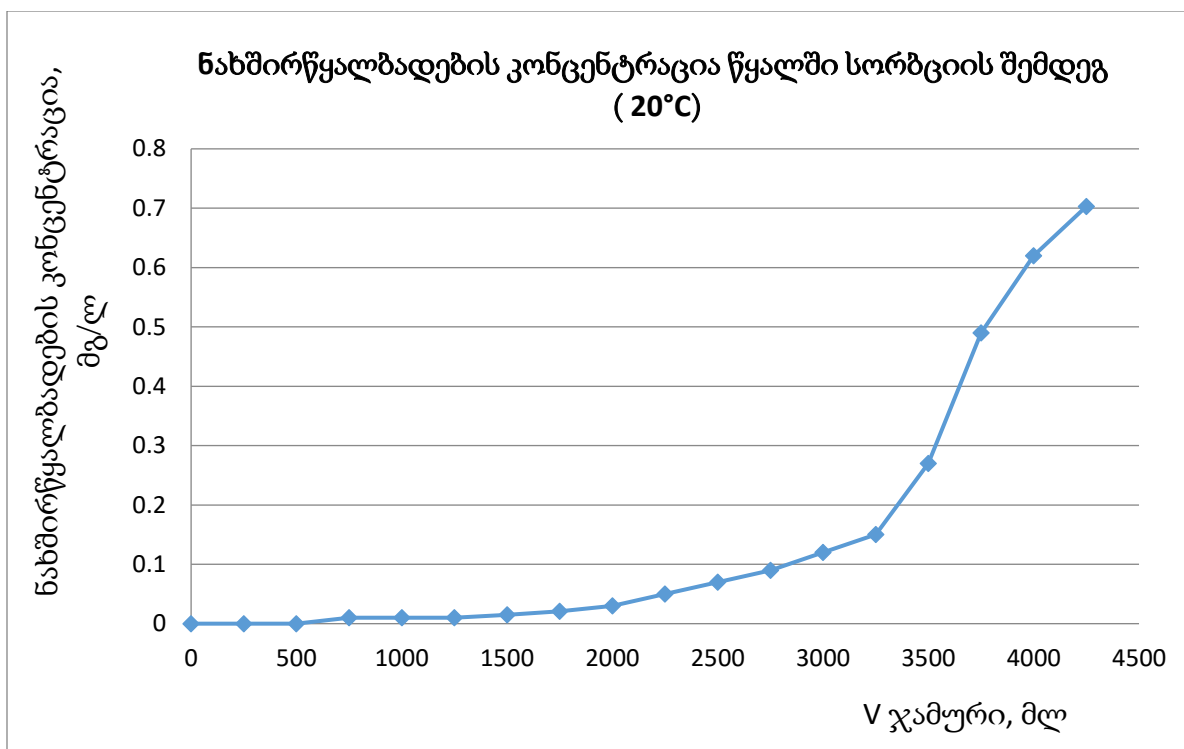
ცხრილი 14. პოლისტიროლის და პოლიურეთანის სორბენტების მახასიათებლები

სორბენტის მასალა	სორბირებული დიზელი (მგ)	სორბციული ტევდობა (q, მგ/გ)	დიზელის მაქსიმალური შთანთქმა (%)
მეორადი პოლისტიროლი	14.95 მგ	0.72 მგ/გ	97.85%
მეორადი პოლიურეთანი	16.64 მგ	3.17 მგ/გ	100%

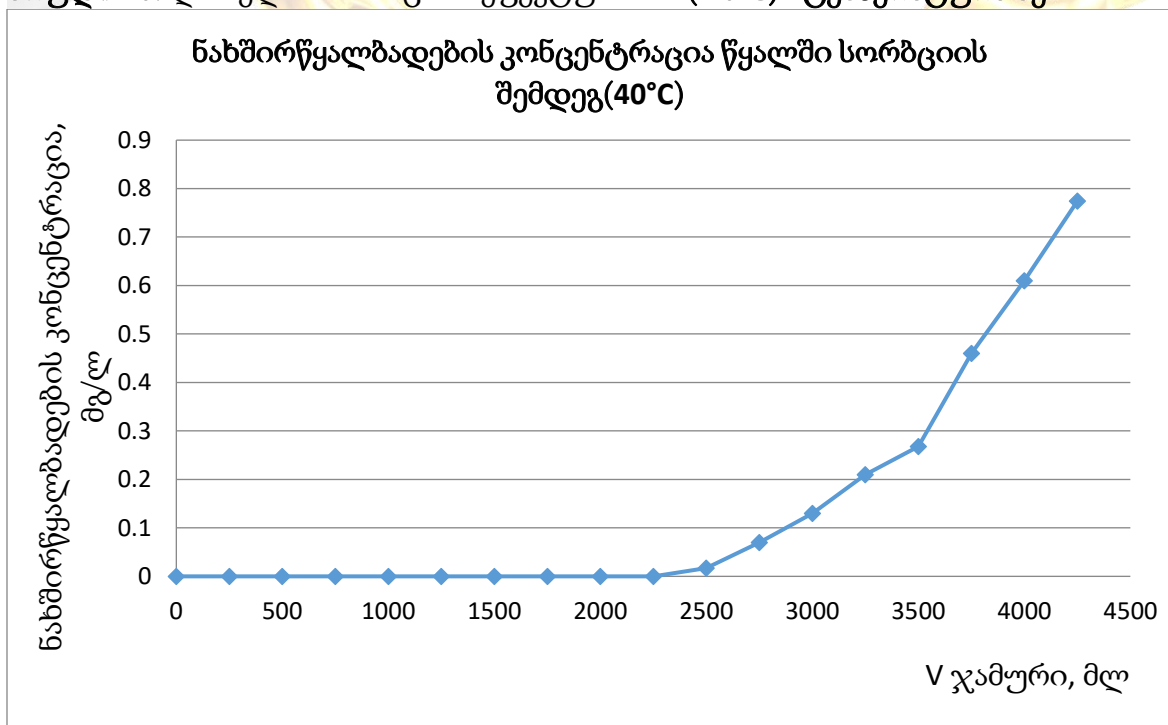
ექსპერიმენტების შედეგიდან გამომდინარე შეირჩა საუკეთესო სორბციული თვისებების მქონე სორბენტი -პოლიურეთანი.

სორბციის ოპტიმალური რეჟიმის დადგენა

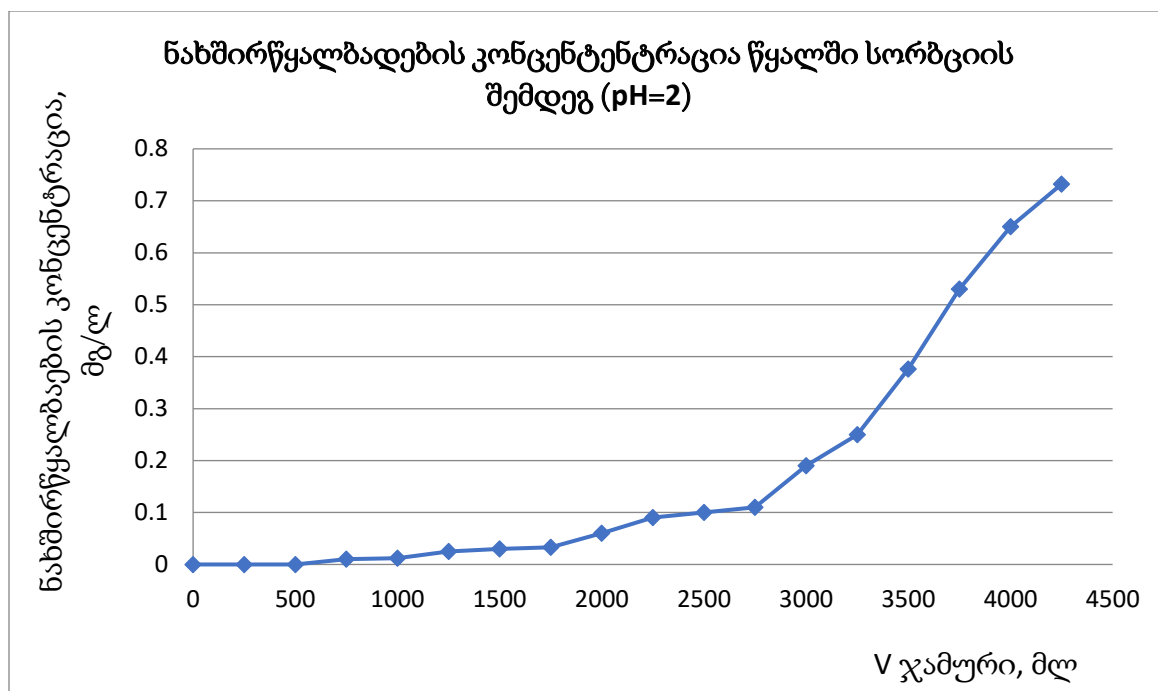
სორბციის პროცესი შესწავლილი იქნა სხვადასხვა pH-ის და საკვლევი ხსნარის სხვადასხვა ტემპერატურის დროს. მიღებული მონაცემებით და ხსნარის გატარების შემდეგ ფილტრატში დარჩენილი ნავთობნახშირწყალბადების კონცენტრაციის მნიშვნელობებით (მგ/ლ) აგებული იქნა მრუდები (იხ. მრუდი 10-15).



მრუდი 10. დიზელის სორბციის ეფექტურობა (20°C) ტემპერატურაზე

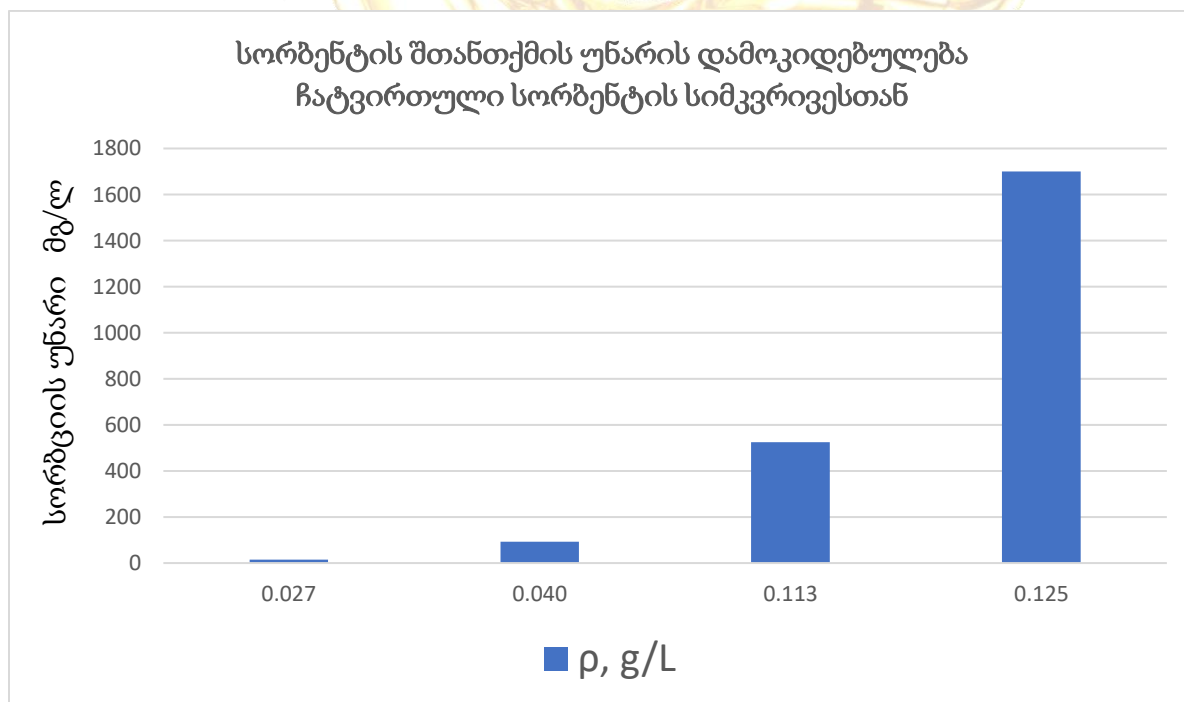


მრუდი 11. დიზელის სორბციის ეფექტურობა (40°C) ტემპერატურაზე

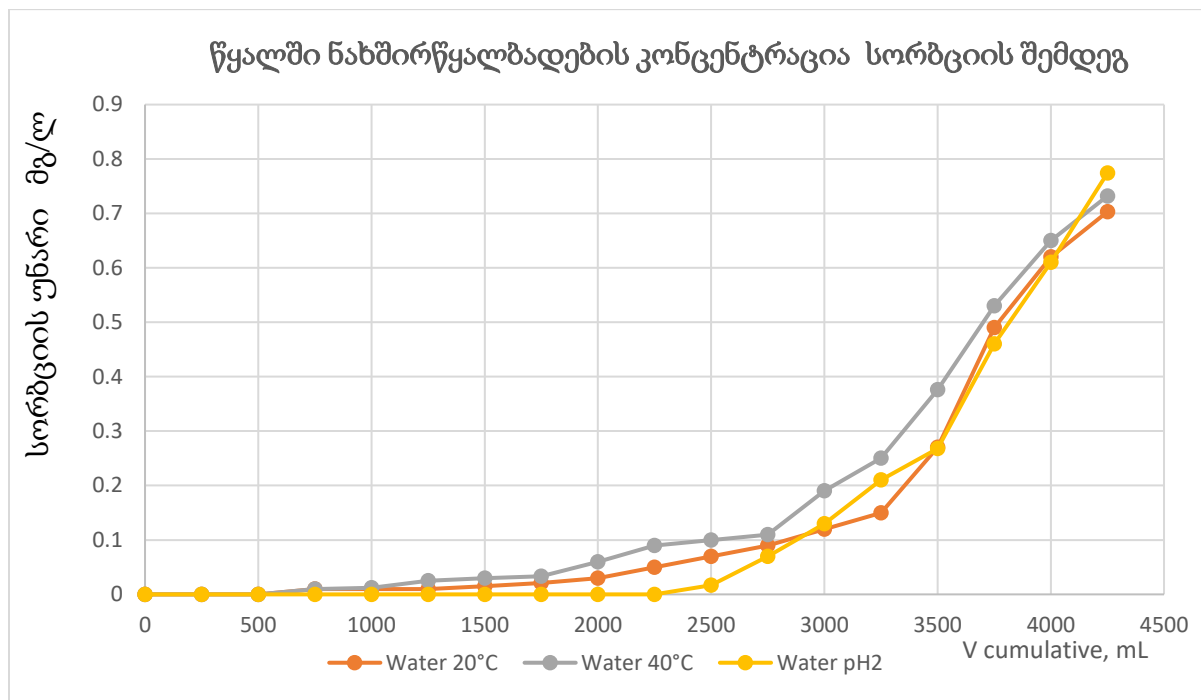


მრუდი 12. დიზელის სორბციის ეფექტურობა (pH =2)

შესწავლილი იქნა სორბენტის ჩატვირთვის სიმკვრივის და სორბციულ ტევადობის დამოკიდებულება. ნახაზიდან (იხილეთ მრუდი. 13) ჩანს, რომ სორბციული ტევადობა იზრდება ჩატვირთული სორბენტის სიმკვრივის ზრდასთან ერთად.



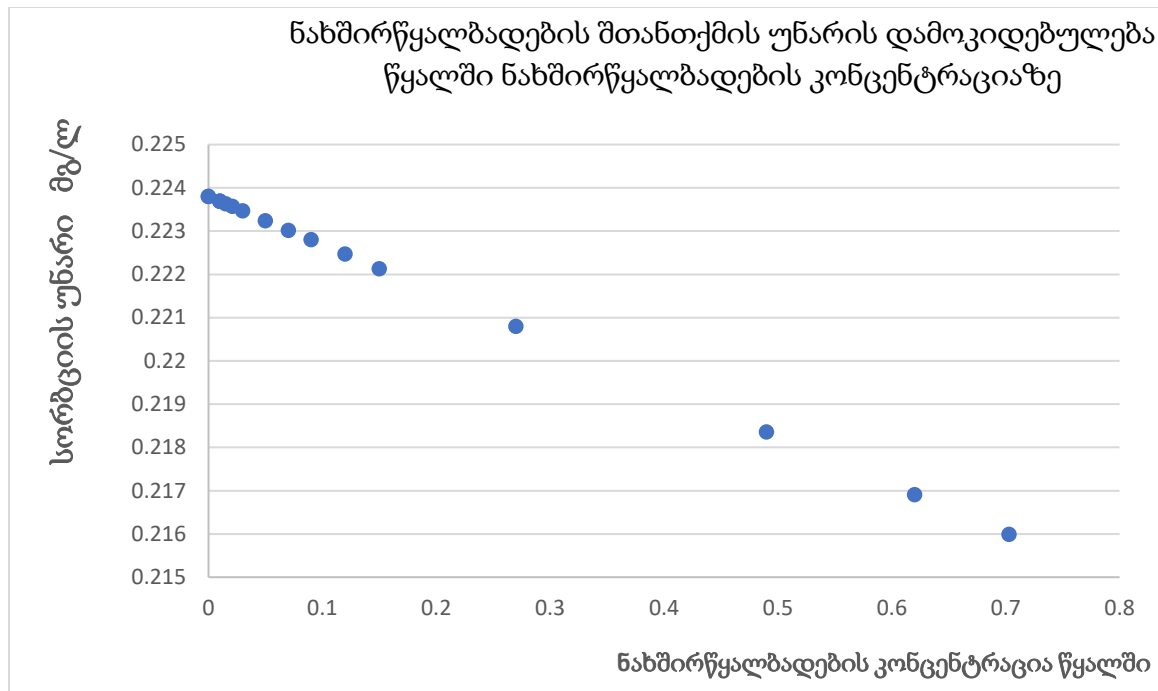
მრუდი 13. სორბენტის ჩატვირთვის სიმკვრივის ზეგავლენა სორბციულ ტევადობაზე.



მრუდი 14. ნახშირწყალბადების კონცენტრაცია სორბციის შემდეგ.

მონაცემების მიხედვით შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ხსნარის ტემპერატურის გაზრდა ან შემცირება არ ახდენს მნიშვნელოვან ზეგავლენას სორბციის პროცესზე.

განსაზღვრული იქნა პოლიურეთანის სორბციის უნარი, სორბენტზე სორბირებული ნავთობნახშირწყალბადების მასა (იხ. ცხრილი 14). ცდების დროს სორბენტზე შეკავებული დიზელის მასა ტოლია $Q_1 = 899,633$ მგ, როცა $T = 20^\circ\text{C}$; $Q_2 = 900,815$ მგ, როცა $T = 40^\circ\text{C}$; $Q_3 = 898,960$ მგ pH=2-ის შემთხვევაში.



მრუდი 15. ნახშირწყალბადების შთანთქმის უნარის დამოკიდებულება წყალში ნახშირწყალბადების კონცენტრაციაზე

დასკვნები

- **საუკეთესო ბუნებრივი სორბენტი:** გამოკვლეული 13 სახეობის მცენარის ნახერხიდან ყველაზე მაღალი სორბციული უნარი გამოავლინა კრიპტომერიის ნახერხმა (*Cryptomeria japonica*). მისი ნაკადში სორბციის უნარია **31.6 გრ ნავთობი 100 მლ სორბენტზე**, ხოლო სორბციული ტევადობა **252.2 m/m%-ია**. ყველაზე დაბალი მაჩვენებელი დაფიქსირდა თუთიის შემთხვევაში (17.0 გრ/100მლ).
- **ნაწილაკების ზომის გავლენა:** ნაწილაკების ზომის შემცირებასთან ერთად სორბციის უნარი პროპორციულად იზრდება. 0.5 მმ ფრაქციის კრიპტომერიის ნახერხის სორბციული ტევადობა **304.6 m/m%-მდე** იზრდება, მაშინ როცა 3.15 მმ ფრაქციისთვის ის 205.9 m/m%-ია.
- **თერმული და ორთქლ-კონტაქტური აქტივაციის ეფექტი:** ნახერხის მაღალი წნევის ორთქლით დამუშავებამ (140-160°C) ნავთობიანი წყლის გატარებისას მისი სორბციული ეფექტურობა **3-ჯერ გაზარდა**.
- **სელექტიურობა ფრაქციების მიმართ:** ნახერხის სორბენტი ნავთობს სორბირებს მთლიანი შემადგენლობით (მძიმე და მსუბუქ ფრაქციებს ერთნაირად). თუმცა, ნავთობი-წყალი სისტემიდან ნახერხზე შედარებით ცუდად სორბირდება ისეთი კომპონენტები, როგორიცაა ციკლოპენტანი, 2,2,3-ტრიმეთილბუტანი და ტოლუოლი.

- **მეორადი სინთეზური სორბენტები:** გამოკვლეული 8 მეორადი პოლიმერული მასალიდან ყველაზე ეფექტურია მეორადი პოლიურეთანი (PU). მისი სორბციული ტევადობაა 3.17 მგ/გ, რაც მკვეთრად აღემატება მეორადი პოლისტიროლის მაჩვენებელს (0.72 მგ/გ, 97.85% შთანთქმა).
- **სორბციის რეჟიმის გავლენა :** ხსნარის ტემპერატურის გაზრდა (20°C-დან 40°C-მდე) ან შემჟავება (pH=2) არ ახდენს მნიშვნელოვან ზეგავლენას პოლიურეთანზე სორბციის პროცესზე.

5.4 ნავთობნახშირწყალბადებით დაბინძურებული წყლების გაწმენდა მემბრანული ფილტრაციის მეთოდით

სორბციული მეთოდით წინარე გაწმენდის შემდგომ, წყალში დარჩენილი ემულგირებული ნავთობპროდუქტების ნაწილაკების სრული სეპარაციისთვის გამოყენებული იქნა პოლისულფონური (PSU) ულტრაფილტრაციული მემბრანები. მემბრანები დამზადდა ფაზური ინვერსიის მეთოდით Memcast™ ავტომატურ მოწყობილობაზე (სურათი 41).

მემბრანების მიღება და მათი მახასიათებლების (ფორიანობის, წარმადობის, სელექტიურობის) დადგენა განხორციელდა ბსუ-ს აგრარული და მემბრანული ტექნოლოგიების ინსტიტუტის მემბრანების სინთეზის და ბარომემბრანული ტექნოლოგიების კვლევით ლაბორატორიაში.

მემბრანების ფორის ზომების, ფორის ზომების მიხედვით განაწილების და აირგამტარობის შესასწავლად გამოყენებული იყო კაპილარული ფორომეტრის მეთოდი (CFP).

მემბრანის ფორიანობის გაზრდის მიზნით გამოყენებული იქნა დაბალმოლეკულური პოლიეთილენგლიკოლი PEG – 400, ანუ დამზადდა კომპოზიციური ხსნარები, შემდეგი შედგენილობით: პოლისულფონი + N-მეთილ პიროლიდონი (N-MP)+ PEG – 400.

მემბრანის ჰიდროფობურობის გაზრდის მიზნით დამზადდა აგრეთვე კომპოზიტები გრაფენის ოქსიდის (GO) გამოყენებით, შემდეგი შემადგენლობით: პოლისულფონი (PSU) + პოლიეთილენგლიკოლი (PEG-400) + გრაფენის ოქსიდი; პოლისულფონი (PSU) + გრაფენის ოქსიდი. გრაფენის ოქსიდი სხვადასხვა კონცენტრაციით წინასწარ იქნა გახსნილი (დისპერგირებული) N -მეთილ პიროლიდონში.

პოლიმერული მემბრანების სინთეზი

მემბრანული ფილტრაციისთვის გამოყენებული იქნა ჩვენს მიერ სინთეზირებული ჰიდროფობური და ჰიდროფილური მემბრანები. სინთეზირებული იქნა მიკრო- და ულტრაფილტრაციული მემბრანები, რისთვისაც გამოყენებული იყო პოლიმერები: პოლისულფონი, ფთოროპლასტი, პოლიოქსადიაზოლი, აგრეთვე პოლიამიდი.

ეს პოლიმერები გამოირჩევიან თერმო- და ქიმიური მდგრადობით, რაც ხელს უწყობს მემბრანების რეგენერაციას და შესაბამისად მათ მრავალჯერად გამოყენებას. წინასწარი კვლევების საფუძველზე ულტრაფილტრაციული მემბრანის მასალად შერჩეული იქნა პოლიოქსადიაზოლი და პოლისულფონი, ხოლო პოლიმერის ჩამოსასხმელი ხსნარის დასამზადებლად გამხსნელი- N-მეთილპიროლიდონი.

კვლევისთვის დამზადდა მემბრანის ჩამოსასხმელი ხსნარი პოლიმერის სხვადასხვა კონცენტრაციით (15%, 20% და 22%-იანი), რისთვისაც პოლიმერს წინასწარ აშრობდნენ 100-110°C ტემპერატურაზე მუდმივ წონამდე, შემდეგ პოლიმერს ჩატვირთავდნენ ჰერმეტიულად დახურულ ჭურჭელში (ან ჭურჭელში, რომელიც შევსებული იყო აზოტით), უმატებდნენ გამხსნელს (N-MP) და პერიოდულად ურევდნენ სრულ გახსნამდე.

მემბრანის ფირები მიღებულ იქნა ე.წ ფაზური ინვერსიის მეთოდით მემბრანების ფირის სახით დასაფენი ავტომატური მოწყობილობის (Automatic Coating Mashine Memcast™, Porometer Ltd.) გამოყენებით, რომელზედაც განისაზღვრა ფილიერის ჭრილისა (1 მმ) და ფირის დაფენის სიჩქარის (2,0 სმ/წმ) ოპტიმალური პარამეტრები .

იმავე ხელსაწყოზე (Memcast), იგივე პარამეტრებით დამზადდა ულტრაფილტრაციული კომპოზიტური მემბრანები პოლიეთილენგლიკოლის, გრაფენის ოქსიდის გამოყენებით.

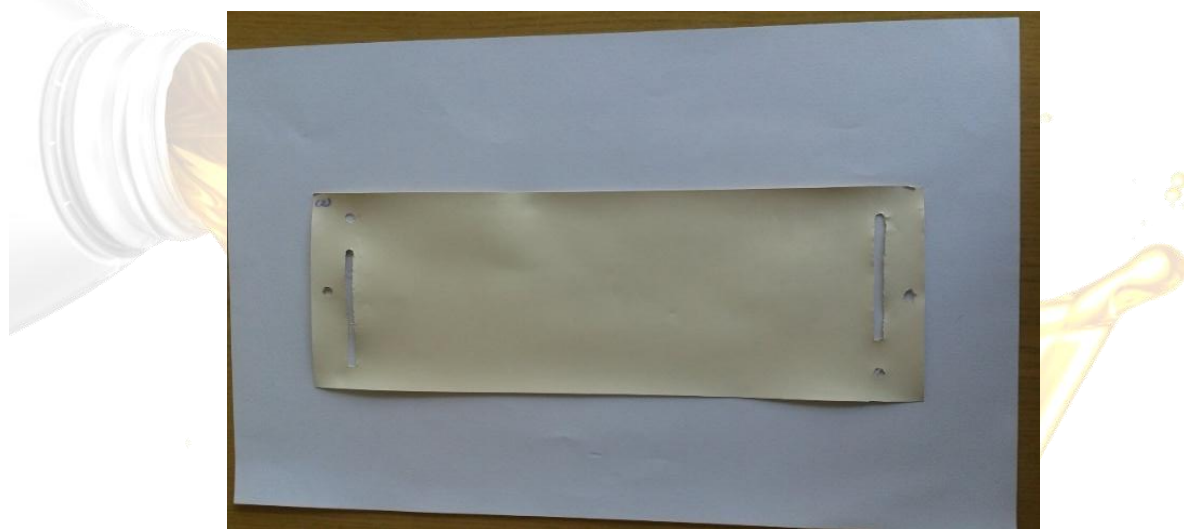


სურათი 41. პოლიმერული ფირის დასაფენი ავტომატური მოწყობილობა Memcast™

დაყოვნების შემდეგ (დაყოვნების დრო 30 წმ) დაფენილი ფირი კოაგულაციისთვის თავსდება წყლის აბაზანაში (15-17° C ტემპერატურა). ფორმირებული მემბრანები ირეცხებოდა და ინახებოდა დისტილირებულ წყალში.

ექსპერიმენტის დროს ცვლიდნენ პროცესის პარამეტრებს: მემბრანების ფირის დასაფენი მოწყობილობის ფილიერის ღრეჩოს სიდიდეს, დაფენის სიჩქარეს, დაყოვნების დროს.

შედეგად დამზადებული იქნა პოლიმერული მემბრანის ნიმუშები: სხვადასხვა სისქის მემბრანები, რომელთაც აქვთ სხვადასხვა ფორმის სიდიდეები.



სურათი 42. პოლისულფონის მასალისგან დამზადებული მემბრანა

მემბრანების ფორმის ზომების განსაზღვრა

ჩვენს მიერ მიღებული მემბრანების ფორმის ზომები და მათი განაწილება ზომების მიხედვით შესწავლილ იქნა ფორომეტრზე (Porolux™ 500) ACTM F-316 სტანდარტის შესაბამისად.

ფორომეტრის მეშვეობით განისაზღვრა მემბრანის შემდეგი მახასიათებლები: მინიმალური (Smallest), საშუალო (Mean) და მაქსიმალური (Bubble point pore size) ფორის სიდიდე.

მიღებული ინფორმაცია მნიშვნელოვანია კონკრეტული ფილტრაციის პროცესისათვის მემბრანის შესარჩევად, ასევე მემბრანის შემდგომი შესწავლისათვის და მოდიფიკაციისთვის.

კვლევები ჩატარდა წნევის სხვადასხვა დიაპაზონში (წნევის დიაპაზონი 0-6, 0-10, 0-10,5; 0-11,5 და 0-12,5 ბარი); მატესტირებელი აირი- აზოტი (Test gas -Nitrogen) , ზოგ შემთხვევაში წნევის შესაქმნელად გამოყენებული იყო კომპრესორი (Test gas –Air).

მიღებული შედეგები წარმოდგენილია ცხრილებში (იხ. ცხრილი 15-17)

ცხრილი 15. პოლისულფონის მემბრანების მინიმალური, საშუალო და მაქსიმალური ფორების ზომები.

ულტრაფილტრაციული მემბრანა	მინიმალური ფორები, მკმ	საშუალო ფორები, მკმ	მაქსიმალური ფორები, მკმ
პოლისულფონი-20%, ფირის სისქე 55 მკმ.	0,1123	0,2018	0,404
პოლისულფონი -20%, ფირის სისქე 55 მკმ.	0,1094	0,1122	0,2245
პოლისულფონი 22%, ფირის სისქე 90 მკმ.	0,0711	0,0810	0,2188

შერჩეული ულტრაფილტრაციული პოლისულფონის მემბრანის მაჩვენებლებია: მემბრანის სისქე- 50-55მკმ; მემბრანის წარმადობა-ლ/მ2სთ; უდიდესი ფორის სიდიდე- 0,2245მკმ; საშუალო ფორის სიდიდე-0,1122მკმ; უმცირესი ფორის სიდიდე-0,1094 მკმ, რაც შეესაბამება ულტრაფილტრაციული მემბრანებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს.

დამზადებულ იქნა ულტრაფილტრაციული პოლიოქსადიაზოლის მემბრანები 20, 22 და 24% -იანი კონცენტრაციის ხსნარებიდან (წარმადობა შესაბამისად 14, 25, 12 ლ/მ2სთ).

ცხრილი 16. პოლიოქსადიაზოლის მემბრანების მინიმალური, საშუალო და მაქსიმალური ფორების ზომები.

ულტრაფილტრაციული მემბრანა	მინიმალური ფორები, მკმ	საშუალო ფორები, მკმ	მაქსიმალური ფორები, მკმ
პოლიოქსადიაზოლი, ფირის სისქე 98 მკმ	0,5999	0,6388	4,509
პოლიოქსადიაზოლი, ფირის სისქე 100 მკმ	0,1524	0,1554	0,2133

პოლიოქსადიაზოლი, ფირის სისქე 100 მკმ	0,160	0,228	5,86
--------------------------------------	-------	-------	------

შერჩეული პოლიოქსადიაზოლის მემბრანის მაჩვენებლებია: მემბრანის სისქე- 100 მკმ; უდიდესი ფორის სიდიდე- 0,2133 მკმ; საშუალო ფორის სიდიდე-0,1554 მკმ; უმცირესი ფორის სიდიდე- 0,1524 მკმ., რაც შეესაბამება ულტრაფილტრაციული მემბრანებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს.

შერჩეულ იქნა ჩამოსასხმელი ხსნარის ოპტიმალურ კონცენტრაცია -20%. დამზადდა ულტრაფილტრაციული მემბრანების ნიმუშები. პოლიოქსადიაზოლის 22%-იანი ხსნარიდან დამზადებულ მემბრანას 0-7 ბარამდე წნევით ტესტირებისას აირის გამტარებლობა არ აღმოაჩნდა.

მემბრანის ფორიანობის გაზრდის მიზნით დამზადდა კომპოზიტური მემბრანა დაბალმოლეკულური პოლიეთილენგლიკოლის (PEG – 400) დამატებით. პოლიმერული ხსნარის შემადგენლობა: პოლისულფონი - 50გრ; N-MP - 200გრ; PEG – 400 -20 გრ.

ცხრილი 17. მოდიფიცირებული პოლისულფონის (PSU+PEG) მემბრანების მინიმალური, საშუალო და მაქსიმალური ფორების ზომები.

ულტრაფილტრაციული მემბრანა	მინიმალური ფორები, მკმ	საშუალო ფორები, მკმ	მაქსიმალური ფორები, მკმ
პოლისულფონი (18%) + PEG, ფირის სისქე 98 მკმ.	0,0676	0,067	0,087
პოლისულფონი + PEG, ფირის სისქე 120 მკმ.	0,0766	0,103	0,3322
პოლისულფონი + PEG, ფირის სისქე 130 მკმ.	0,0626	0,3488	0,337

პოლისულფონის, როგორც მემბრანის წარმომქმნელი პოლიმერის უარყოფითი მხარეა ჰიდროფობურობა და შედარებით დაბალი სიმტკიცე, რაც ზღუდავს მათ ფუნქციონირებას მაღალი წნევის დროს (7 ბარამდე ბრტყელი მემბრანებისთვის, 2 ბარამდე - ღრუ ბოჭკოვანი მემბრანებისთვის).

მემბრანებისთვის ჰიდროფილური თვისებების მისანიჭებლად კომპოზიტურ მემბრანებში შეყვანილი იქნა გრაფენის ოქსიდი (GO). კერძოდ, დამზადდა შემდეგი შემადგენლობის პოლიმერული ხსნარები: პოლისულფონი (PSU)+PEG+GO და აგრეთვე

პოლისულფონი (PSU) + GO). გრაფენის ოქსიდი სხვადასხვა კონცენტრაციით წინასწარ იქნა გახსნილი (დისპერგირებული) N-MP-ში.

ცხრილი 18. დამზადებული პოლიმერული ხსნარების შემადგენლობა

N მეთილ პიროლიდონი (გრ)	პოლიეთილგლიკოლი (გრ)	პოლისულფონი (გრ)	გრაფენის ოქსიდი (გრ)
100	10	25	0
100	10	25	0,25
98,8	10	25	1,5

გრაფენის ოქსიდის ხსნარები დამზადდა შემდეგი მეთოდით: ტენიანობის მოსაშორებლად გრაფენის ოქსიდი გამოშრობილი იქნა საშრობ კარადაში 60 °C-ზე 12სთ-ის განმავლობაში, გამხსნელის (N-MP) დამატების შემდგომ დისპერგირებისთვის მოთავსდა ულტრაბგერით აბაზანაში (ექსპერიმენტებში გამოყენებული იქნა ულტრაბგერითი აბაზანა JY92-IIDN (Touch Screen Ultrasonic Homogenizer , 20-25 KHz, 900 W).

მიღებული მემბრანების ფორების ზომები განისაზღვრა ფორომეტრზე (POROLUX 500, მატესტირებული აირი-აზოტი).



სურათი 43. ფორომეტრი Porolux™ 500 მემბრანების ფორების ზომისა და განაწილების განსაზღვრისათვის.



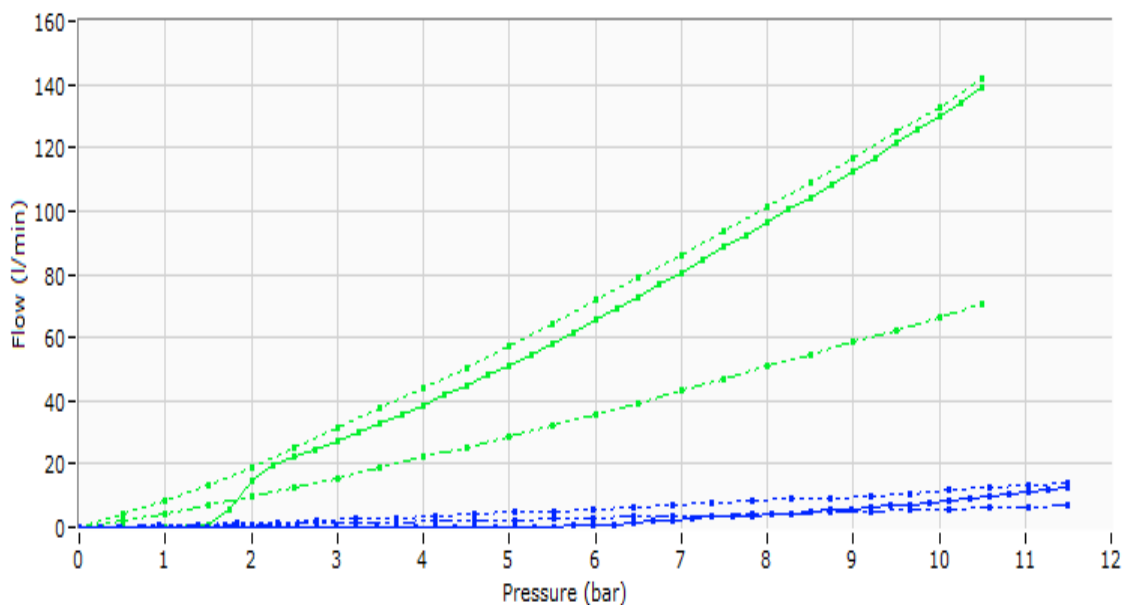
სურათი 45. მემბრანების ნიმუშების მომზადება

ცხრილი 19. მოდიფიცირებული პოლისულფონის (PSU+PEG; PSU+PEG+GO) მემბრანების ფორომეტრზე კვლევის შედეგები

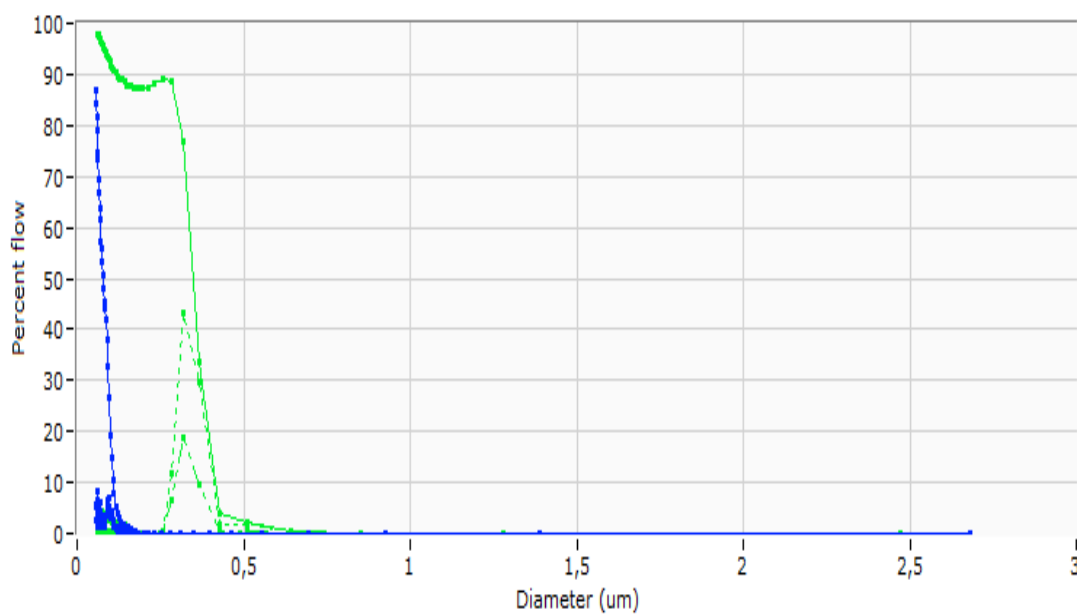
საკვლევი მასალა	უმცირესი (min) ფორის ზომა (მკმ)	საშუალო (mean) ფორის ზომა (მკმ)	უდიდესი (max) ფორის ზომა (მკმ)	უმცირესი ფორის შესაბამისი წნევა (ბარი)	საშუალო ფორის შესაბამისი წნევა (ბარი)	უდიდესი ფორის შესაბამისი წნევა (ბარი)	საწყისი/ - საბოლოო წნევა	ტესტირების დრო	ნიმუშის სისქე (მკმ)
Polysulfon +PEG+GO	inf	0,127	0,464	inf	5,029	1,378	0-10,5	34:01"	130
Polysulfon +PEG+GO	0,0626	0,348	inf	10,21	1,835	inf	0-12,5	36:58"	130
Polysulfon (20%) +GO	0,0945	0,143	inf	6,767	4,447	0,00	0-7	13:30"	98
Polysulfon (20%) +GO	0,1067	0,109	0,1597	6	5,861	4,008	0-6	57:42"	98
Polysulfon (15%) +GO	0,0836	0,151	1,474	7,656	4,228	0,4343	0-10	38:48"	98

შერჩეული პოლისულფონ-გრაფენის ოქსიდი კომპოზიციური მემბრანის მაჩვენებლებია: მემბრანის სისქე- 84 მკმ; უდიდესი ფორის სიდიდე- 1,474 მკმ-საშუალო ფორის სიდიდე-0,1514 მკმ; უმცირესი ფორის სიდიდე- 0,0836მკმ., რაც შეესაბამება ულტრაფილტრაციული მემბრანებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს.

ფორომეტრზე მიღებულ იქნა აირის ნაკადის (%) და მემბრანის ფორის დიამეტრის (მკმ) დამოკიდებულებების და აირის ნაკადის (ლ/წთ) და წნევის (ბარი) დამოკიდებულებების მრუდები კომპოზიციური მემბრანებისთვის -PSU + PEG+GO.

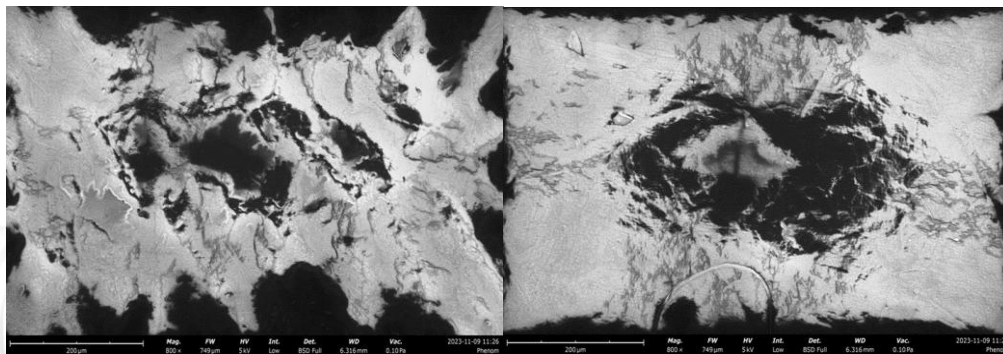


მრუდი 16. აირის ნაკადის (ლ/წთ) და წნევის (ბარი) დამოკიდებულების მრუდი. ლურჯი ფერის მრუდი -კომპოზიციური მემბრანა -PSU + PEG+1% GO (PSU -ს მიმართ) - და მწვანე მრუდი PSU + PEG+3% GO (PSU -ს მიმართ).



მრუდი 17. აირის ნაკადის (%) და ფორის დიამეტრის (მკმ) დამოკიდებულების მრუდი. ლურჯი მრუდი -კომპოზიციური მემბრანა PSU + PEG+1% GO (PSU -ს მიმართ) და მწვანე- PSU + PEG+3% GO (PSU -ს მიმართ).

პოლისულფონის პოლიმერიდან სინთეზირებული ულტრაფილტრაციული მემბრანების ზედაპირების SEM გამოსახულება მიღებულია მასკანირებელ ელექტრომიკროსკოპზე Phenom XL ფირმა POROMETER NV-ს ლაბორატორიაში.



ა

ბ

სურათი 44 . პოლისულფონის მემბრანების ზედაპირის SEM მიკროფოტოგრაფიები, გადიდება $\times 800$: ა) PSf მემბრანა; ბ) PEG-ით მოდიფიცირებული PSf მემბრანა.

დასკვნები

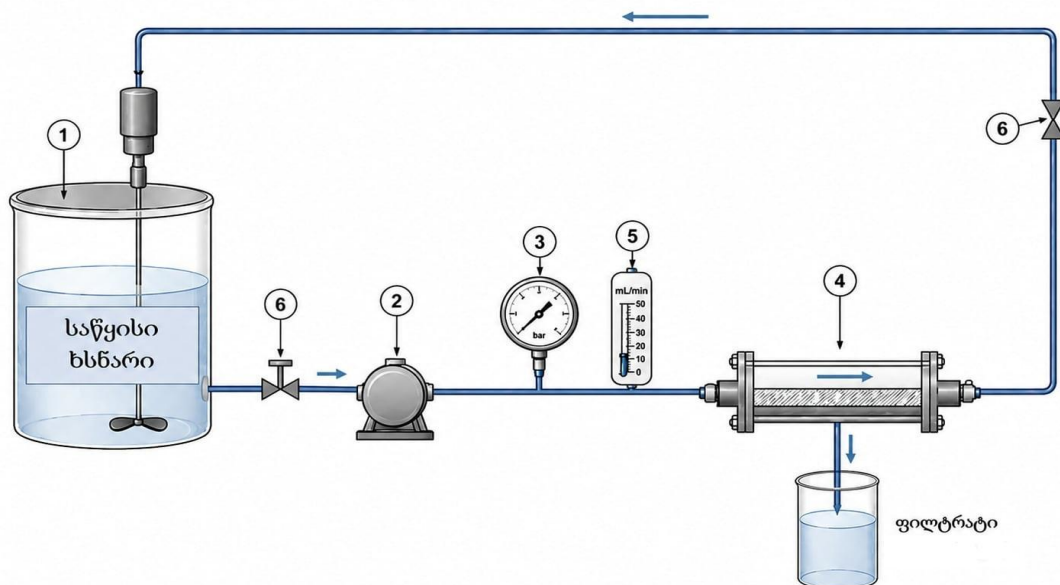
- **ოპტიმალური საბაზისო პოლიმერები:** ულტრაფილტრაციული მემბრანების სინთეზისთვის საუკეთესო თერმო- და ქიმიური მდგრადობა აჩვენეს პოლისულფონმა (PSU) და პოლიოქსადიაზოლმა (POD). ჩამოსასხმელი ხსნარის ოპტიმალურ კონცენტრაციაა **20%**.
- **მემბრანების მოდიფიკაცია:** მემბრანის ფორიანობისა და ჰიდროფილურობის გასაზრდელად ეფექტური აღმოჩნდა პოროგენის – პოლიეთილენგლიკოლის (PEG-400) და გრაფენის ოქსიდის (GO) კომპლექსური გამოყენება.
- **გრაფენის ოქსიდის (GO) გავლენა:** 15% PSU + GO შემადგენლობის მემბრანამ აჩვენა ულტრაფილტრაციისთვის ოპტიმალური პარამეტრები: საშუალო ფორის ზომა **0.1514 მკმ**, ხოლო უმცირესი ფორის ზომა **0.0836 მკმ**.

ფილტრაციის პარამეტრების კვლევა ლაბორატორიულ ფილტრაციულ უჯრედზე

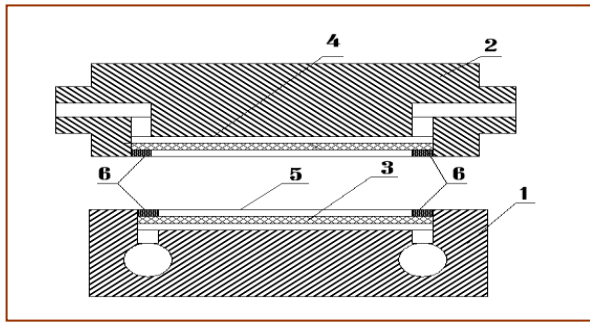
მიკრო- და ულტრაფილტრაციული პროცესის კვლევისთვის ინსტიტუტის მექანიკურ საამქროში დამზადდა ფილტრაციული უჯრედი და საპილოტე ფილტრაციული დანადგარი (იხ. **სურათები 46-49**), რომელზეც ჩატარდა ნავთობპროდუქტების შემცველი წყალხსნარის ფილტრაციის და მემბრანის რეგენერაციის ექსპერიმენტები.

მემბრანის წარმადობის მნიშვნელობა (სუფთა წყლის მიმართ) განისაზღვრა სტანდარტის მიხედვით. ანათვალ ალბუმი იქნა ფილტრაციის დაწყებიდან 10 წთ-ის შემდეგ (წნევა -1,2 ბარი). გაზომვა ტარდებოდა ჩიხური ფილტრაციით. მოდიფიცირებული მემბრანის წარმადობა ტოლია 24 ლ/(მ².სთ)-ში.

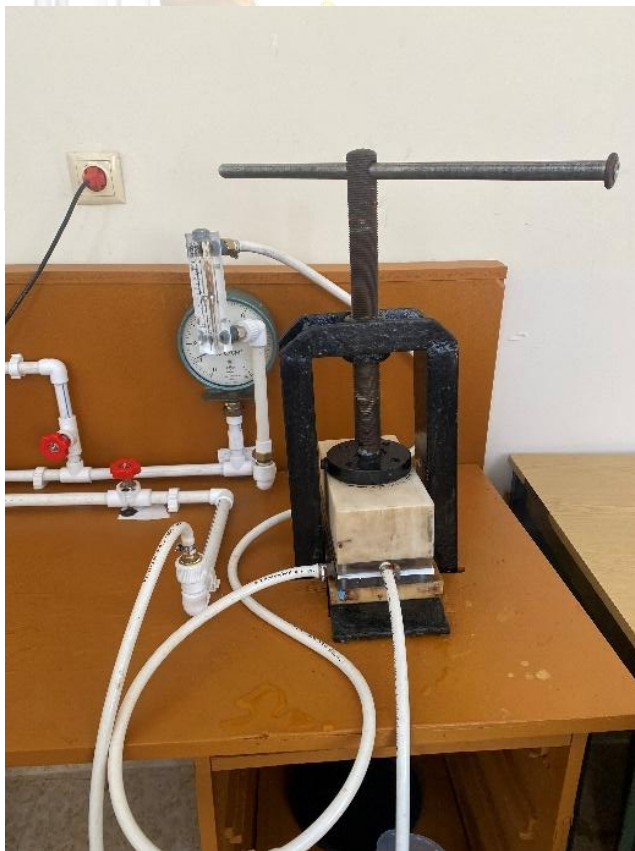
საწყისი წარმადობის განსაზღვრა ჩატარდა საპილოტე უჯრედში. მემბრანული უჯრედის შემადგენელი ნაწილები ნაჩვენებია **სურათზე 47**:



სურათი 46. მემბრანული ფილტრაციის ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა: საწყისი ხსნარის ავზი (1), კომპრესორი (2), მანომეტრი (3), მემბრანული უჯრედი (4), ხარჯზომი (5), მარეგულირებელი ონკანი (6).



სურათი 47. ლაბორატორიული ფილტრაციული უჯრედი და მისი ძირითადი კონსტრუქციული ელემენტები:
1. ფუძე; 2. სახურავი; 3. ფოროვანი საფენი; 4. ბადე; 5. მემბრანა ; 6. ჰერმეტიკული საფენები.



ა)



ბ)

სურათი 48. ა) მემბრანული ფილტრაციის ექსპერიმენტული დანადგარის რეალური ფოტო. ბ) საზომი და რეგულირების ელემენტები: ხარჯმზომი და მანომეტრი.

საკვლევი ხსნარების შემადგენლობის განსაზღვრა გაზქრომატოგრაფზე

ნავთობკომპონენტების მიმართ მემბრანის სელექტიურობის განსასაზღვრავად ჩატარდა საწყისი (სორბენტში გატარების შემდეგ) და მემბრანული ფილტრაციით მიღებული ფილტრატის ანალიზი გაზქრომატოგრაფზე.

ნავთობ ნახშირწყალბადების კონცენტრაციის განსასაზღვრავად ჯერ 100 მლ საკვლევ წყალს ამატებდნენ 5 მლ კონცენტრირებულ გოგირდმჟავას და შემდეგ ახდენდნენ ექსტრაქციას 5-5 მლ ნ-ჰექსანით ორჯერ, გამყოფი ძაბრის გამოყენებით,

ჯამური და დეტალური ნახშირწყალბადების შემადგენლობის განსაზღვრისათვის კვლევა განხორციელდა Thermo-ს ფირმის გაზქრომატოგრაფზე ალურ-იონიზაციული დეტექტორით: მოდელი TRACE 1310 GC; რომელიც უზრუნველყოფილი იყო ავტომატური პროგრამა Chrom-Card და მეტალის კაპილარული სვეტით CP 9079 (სიგრძე 15 მ, შიდა დიამეტრი 0.32 მმ); უძრავი ფაზა შედუღებული სილიციუმი 0.1მმ ნაწილაკების ზომით. აღნიშნული სვეტის გამოყენება იძლევა ნახშირწყალბადების საუკეთესო დაყოფის საშუალებას C₁-C₁₀₀-ს ჩათვლით.

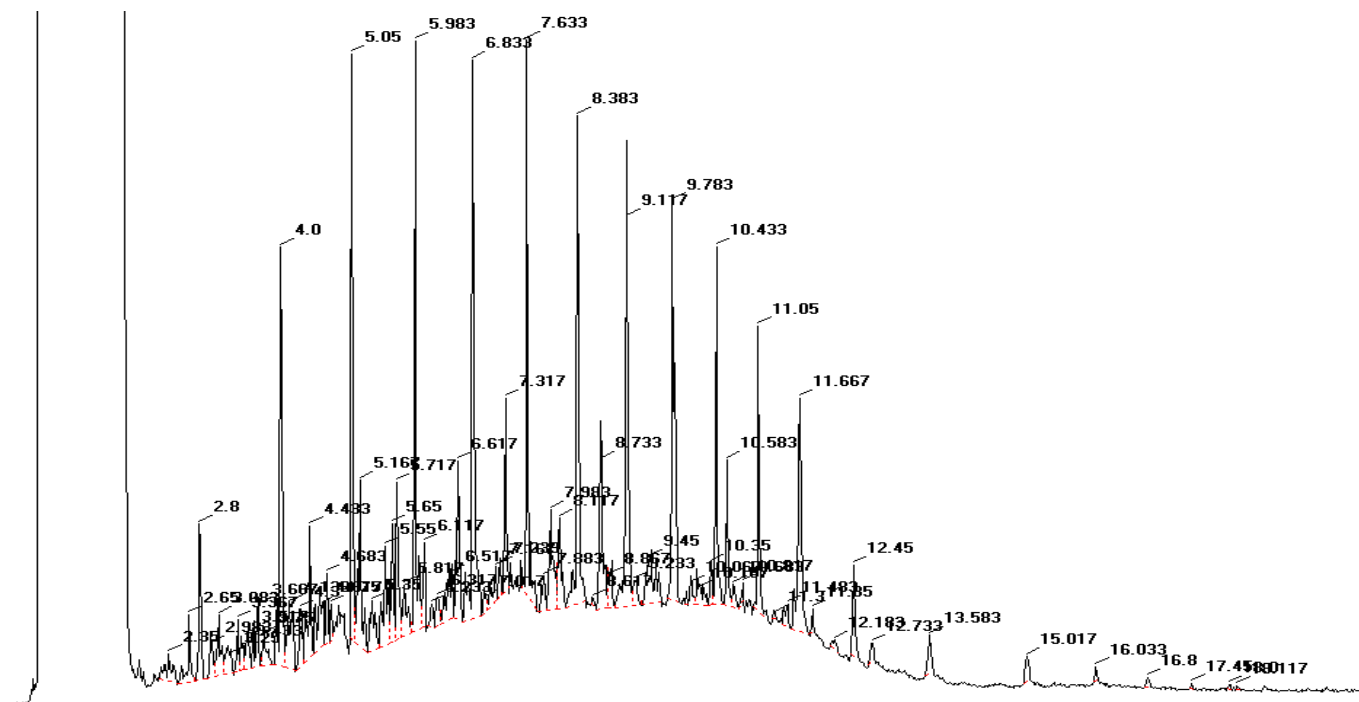
ცხრილი 20. ქრომატოგრაფირების პირობები

ქრომატოგრაფირების პირობები:	
TRACE 1310 GC Method	
Initial temperature	40.0 °C
Initial hold time	2.00 min
Ramp 01 rate	15.0 °C/min
Ramp 01 final temperature	180.0 °C
Ramp 01 hold time	3.00 min
Ramp 02 rate	15.0 °C/min
Ramp 02 final temperature	380.0 °C
Ramp 02 hold time	7.00 min
S/SL	
S/SL mode	Splitless
Temperature	380 °C
Split flow	5.0 mL/min
Splitless time	1.00 min
Purge flow	5.0 mL/min

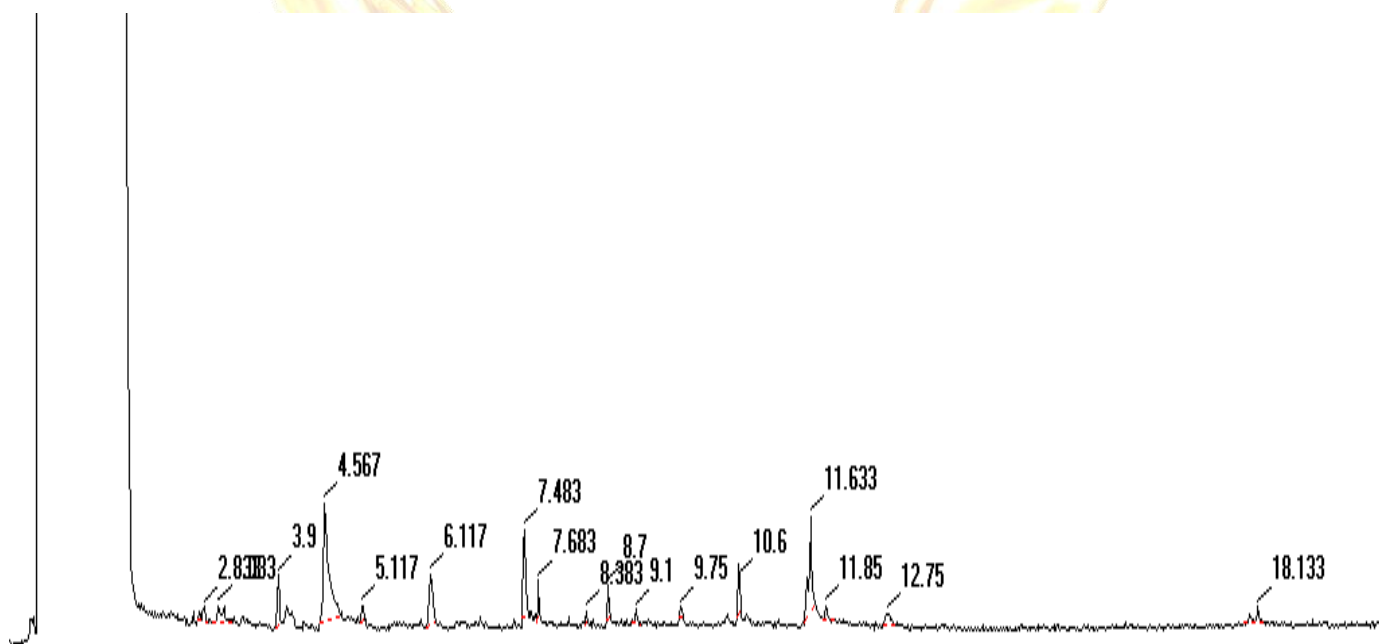
ცხრილში (ცხრილი №21) მოყვანილია ნახშირწყალბადების შემცველობა საწყის დაბინძურებულ წყალში (მგ/ლ-ში), სორბციულ სვეტებში გატარების შემდეგ და პოლისულფონისა და პოლიოქსადიაზოლის მემბრანებში ფილტრაციის შემდეგ სხვადასხვა რეჟიმების გათვალისწინებით.

ცხრილი №21. ნახშირწყალბადების შემცველობა (მგ/ლ) სორბციულ სვეტებში გატარებისა და მემბრანული ფილტრაციის შემდეგ.

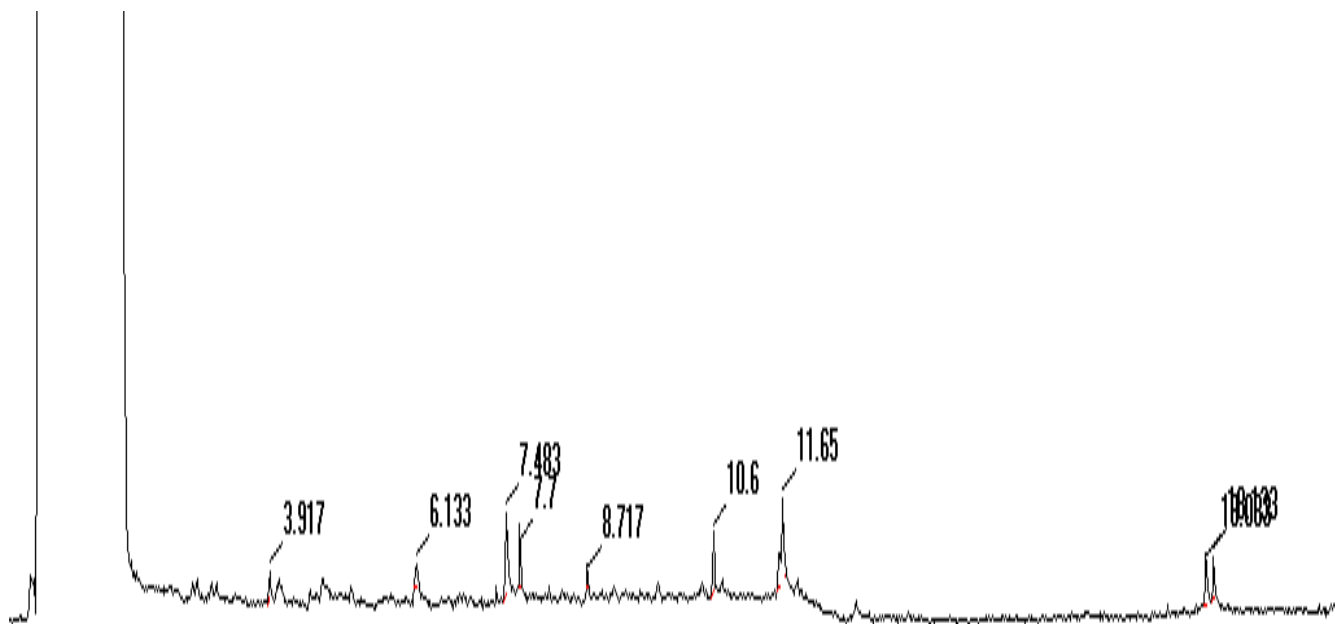
№	საკვლევი ნიმუში	პროცესის პირობები	კონცენტრაცია, მგ/ლ	შეკავების კოეფიციენტი, %
1	საწყისი ხსნარი (კონცენტრაცია-50 მგ/ლ) სორბციულ სვეტში გატარებამდე		53.0	
2	ხსნარი სორბციულ სვეტში გატარების შემდგომ	სორბენტი - პოლიურეთანი	2.9	94.53%
3	პოლისულფონის მემბრანაში გატარებული ფილტრატის კონცენტრაცია	საწყისი კონცენტრაცია-2.9 მგ/ლ; ფილტრაციის რეჟიმი: წარმადობა- 75 ლ/მ ² სთ; წნევა 1.2 ატმ	1.8	37.93%
4	პოლისულფონის მემბრანაში გატარებული ფილტრატის კონცენტრაცია	წარმადობა -10 ლ/მ ² სთ; წნევა 1.1 ატმ	0.18	93.79%
5	პოლიოქსადიაზოლის მემბრანაში გატარებული ფილტრატის კონცენტრაცია	წარმადობა -25 მლ/7 წთ ; ვაკუუმი	0.01	99.66%



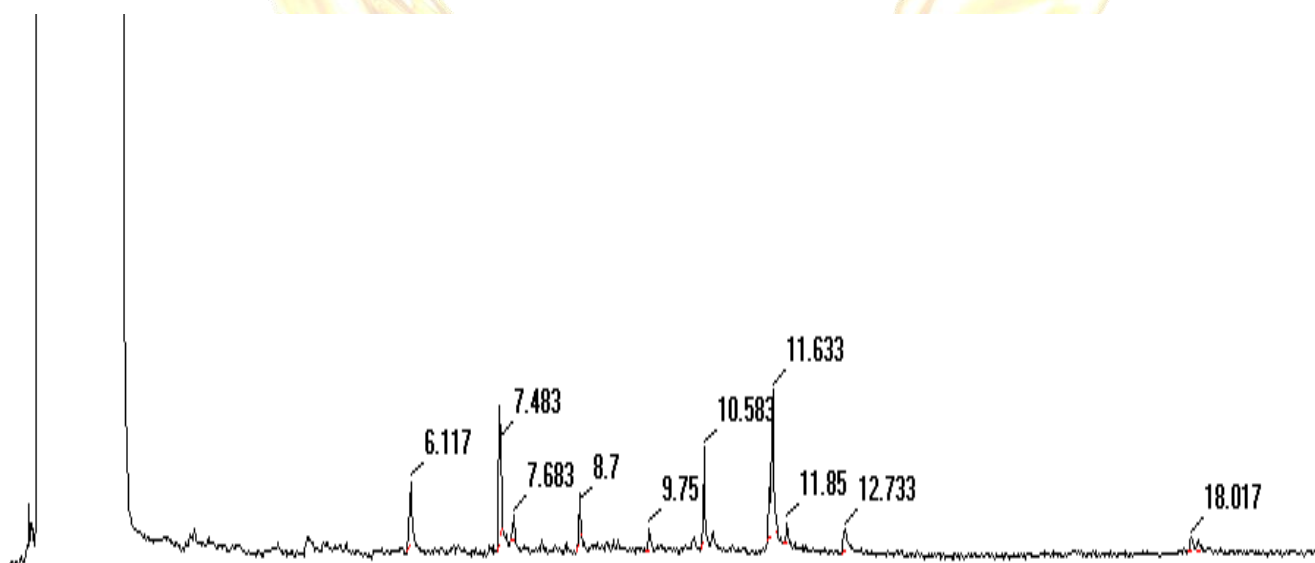
მრუდი 18. საწყისი ხსნარის ქრომატოგრამა



მრუდი 19. სორბციულ სვეტში გატარების შემდგომ მიღებული ფილტრატის ქრომატოგრამა



მრუდი 20. მემბრანაში (PSU) გატარებული პერმეატის ქრომატოგრამა (წარმადობა - 75 ლ/მ² სთ; წნევა 1.2 ატმ)



მრუდი 21. მემბრანაში (PSU) გატარებული პერმეატის ქრომატოგრამა (წარმადობა - 10 ლ/მ² სთ; წნევა 1.1 ატმ)

ორექაპიანი გაწმენდის (სორბცია + ულტრაფილტრაცია) შედეგები, კერძოდ მაღალი სელექტიურობა დასტურდება საბოლოო ფილტრატების ქრომატოგრამებით.

წარმოდგენილი გაზქრომატოგრაფიული ანალიზის შედეგებისა (ცხრილი №21) და ქრომატოგრამების (მრუდი 18, 19 და 20) მიხედვით, შეგვიძლია აღვწეროთ, თუ როგორ იცვლება ნახშირწყალბადოვანი ფრაქციების შემადგენლობა კომპლექსური (სორბცია + ულტრაფილტრაცია) გაწმენდის თითოეულ საფეხურზე.

- საწყისი ხსნარის ქრომატოგრამაზე (მრუდი 18) ფიქსირდება მაღალი ინტენსივობის, მჭიდროდ განლაგებული პიკები დეტექციის მრავალ წერტილში. ეს პიკები შეესაბამება ნავთობისა და დიზელის საწვავის ძირითად კომპონენტებს — მსუბუქ და საშუალო ალკანებს (პარაფინებს), იზოპარაფინებსა და ნაფტენებს (C5–C15 დიაპაზონში), ასევე არომატულ ნახშირწყალბადებს (ბენზოლი, ტოლუოლი, ქსილოლები). ჯამური კონცენტრაცია არის მაღალი და შეადგენს 53.0 მგ/ლ-ს.
- სორბციულ სვეტში გატარების შემდგომი ქრომატოგრამა (მრუდი 19): პოლიურეთანის სორბენტში გატარების შემდეგ, მრუდი 18-ზე არსებული ძირითადი ინტენსიური პიკების უმეტესობა პრაქტიკულად სრულად ქრება ან მინიმუმამდე მცირდება. ქრომატოგრამის ბაზისური ხაზი სწორდება, ხოლო ჯამური კონცენტრაცია ეცემა 2.9 მგ/ლ-მდე (გაწმენდის ეფექტურობა — 94.53%). მეორედმა პოლიურეთანმა (PU) მაქსიმალური სელექტიურობით შეაკავა საშუალო მოლეკულური მასის მქონე სწორჯაჭვიანი ალკანები და იზოპარაფინები. ქრომატოგრამაზე მცირე ინტენსივობით მაინც ნარჩუნდება ცალკეული პიკები (მაგ. 4.567, 7.483, 11.633 წთ-ზე). ექსპერიმენტული ნაწილის მონაცემების (ცხრილი №10) თანახმად, ეს არის ის ნაერთები, რომლებიც ცუდად სორბირდება პოლიმერულ მატრიცაზე მათი მაღალი წყალხსნადობის ან სტრუქტურული თავისებურებების გამო, კერძოდ: ციკლოპენტანი, 2,2,3-ტრიმეთილბუტანი და ტოლუოლი.
- მემბრანაში (PSU) გატარებული პერმეატის ქრომატოგრამა (მრუდი 21): ოპტიმალური დაბალი წარმადობის რეჟიმში პოლისულფონის მემბრანაზე გატარების შემდეგ, მრუდი 19-ზე დარჩენილი პიკებიც ქრება. ქრომატოგრამაზე რჩება მხოლოდ უმნიშვნელო, იზოლირებული ხმაურის დონის პიკები. ეს ადასტურებს ნავთობის ემულსიის ნარჩენი წვრილდისპერსული წვეთების (0.01–1 მკმ დიაპაზონში) საბოლოო სრულ შეკავებას მემბრანის მიერ. სორბციულ საფეხურზე ნარჩენი ციკლოპენტანი და ტოლუოლი მაქსიმალურად იქნა სეპარირებული ასიმეტრიული პოლისულფონური ფორების მიერ. ნარჩენი კონცენტრაცია მცირდება 0.18 მგ/ლ-მდე (შეკავების კოეფიციენტი — 93.79%; 99.66%-მდე POD-ის შემთხვევაში), რაც პრაქტიკულად სუფთა წყლის იდენტურია.

ექსპერიმენტის მსვლელობისას მემბრანული ფილტრაციის მაჩვენებლები იცვლება, წარმადობა კლებულობს, ამის მიზეზი არის ის, რომ ექსპლუატაციის დროს მემბრანების ზედაპირზე მიმდინარეობს სხვადასხვა ნივთიერებების სორბირება, ნალექის წარმოქმნა, მემბრანის ფორმის თანდათანობითი გაბინდება.

მემბრანების წარმადობის აღსადგენად გამოყენებული იყო რეგენერაცია ქიმიური რეაგენტებით (ძირითადად ნატრიუმის და კალიუმის ჰიდროქსიდით). რეგენერაცია ტარდებოდა მაშინ, როცა მემბრანის საწყისი წარმადობა იკლებდა 30-40 %-ით.

მემბრანული ფილტრაცია იმ მომენტამდე, როცა წარმადობა ეცემა 0-მდე, ანუ მის სრულ გაბინდვამდე მიზანშეუწონელია, რადგანაც მიმდინარეობს მემბრანის ფორმის სრული შეუქცევადი დაბლოკვა.

მდგრადობა რეგენერაციის დროს მიუთითებს, რომ შესაძლოა პოლიმერული მემბრანები (PSU, POD, PSU+GO) გამოყენებული იქნეს ნავთობპროდუქტების შემცველი წყლების გასაწმენდად.

ამრიგად, კომპლექსური სორბციულ-მემბრანული მეთოდების გამოყენებით, როცა სორბენტებად გამოყენებულია წარმოების ნარჩენები -ხის ნახერხი და ფოროვანი პოლიურეთანი, ხოლო ფილტრაციისთვის პოლიმერული ულტრაფილტრაციული მემბრანები, შესაძლებელია ნავთობპროდუქტებით დაბინძურებული წყლები გაიწმინდოს ზდკ-ს მნიშვნელობებამდე სასმელი წყლის ტექნიკური რეგლამენტის მიხედვით [საქართველოს მთავრობა, 2014]

6. დასკვნები და რეკომენდაციები

ძირითადი სამეცნიერო შედეგები

1. ბუნებრივი სორბენტების ეფექტურობა:

გამოკვლეული მცენარეული ნარჩენებიდან (ნახერხი) ნედლი ნავთობის მიმართ საუკეთესო სორბციული უნარი გამოავლინა კრიპტომერიის ნახერხმა (31.6 გ/100 მლ ანუ 252.2 მ/მ%), რომლის ეფექტურობა პირდაპირპროპორციულად იზრდება ნაწილაკების ზომის შემცირებასთან ერთად (0.5 მმ ფრაქციისთვის — 304.6 მ/მ%).

ნახერხის მაღალი წნევის ორთქლ-კონტაქტურმა აქტივაციამ (140--160°C) ნავთობიანი წყლის გატარებისას სორბციული ეფექტურობა გაზარდა 3-ჯერ (საწყისი კონცენტრაცია 123 მგ/ლ შემცირდა ზდვ-ს ქვედა ზღვრამდე პირველადი ეტაპებისთვის). დადგინდა, რომ ციკლოპენტანი, 2,2,3-ტრიმეთილბუტანი და ტოლუოლი ნახერხზე შედარებით ცუდად სორბირდება.

2. მეორადი სინთეზური სორბენტები:

შესწავლილი 8 მეორადი პოლიმერული მასალიდან (FTIR ანალიზით) დიზელის საწვავის შთანთქმის საუკეთესო მაჩვენებელი აჩვენა მეორადმა ფორფანმა პოლიურეთანმა (PU), რომლის სორბციული ტევადობა შეადგენს 3.17 მგ/გ-ს (100%-იანი შთანთქმის ეფექტურობით).

პროცესის კინეტიკამ აჩვენა, რომ ხსნარის ტემპერატურის ცვლილება (20°C და 40°C) და მჟავიანობა (pH=2) მნიშვნელოვან გავლენას არ ახდენს პოლიურეთანის სორბციულ ტევადობაზე.

3. მემბრანული ფილტრაცია და ღრმა გაწმენდა

ფაზური ინვერსიის მეთოდით სინთეზირებული ულტრაფილტრაციული მემბრანებიდან ოპტიმალური სტრუქტურული და ფილტრაციული მახასიათებლები აჩვენა 20%-იანმა პოლისულფონმა (PSU, საშუალო ფორი 0.1122 მკმ) და პოლიოქსადიაზოლმა (POD).

მემბრანების მოდიფიცირებამ დაბალმოლეკულური პოლიეთილენგლიკოლით (PEG-400) და გრაფენის ოქსიდით (GO) არსებითად გაზარდა მემბრანების ჰიდროფილურობა, ფორიანობა და გაჭუჭყიანებისადმი მდგრადობა.

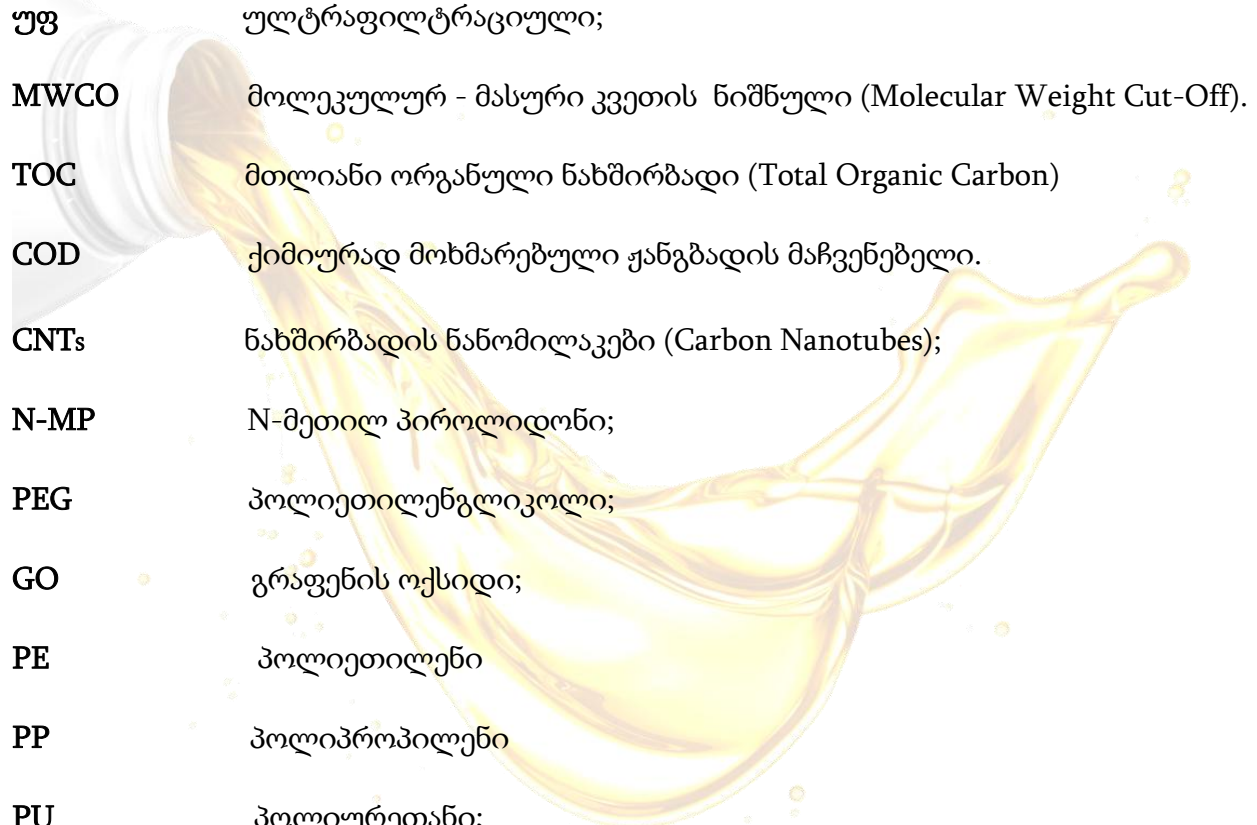
ორეტაპიანი კომპლექსური სისტემის გამოყენებით (პოლიურეთანის სორბცია + PSU/POD ულტრაფილტრაცია) ნავთობნახშირწყალბადების ჯამური კონცენტრაცია საწყისი 53 მგ/ლ-დან შემცირდა 0.18 მგ/ლ-მდე (PSU-სთვის) და 0.01 მგ/ლ-მდე (POD-სთვის), რაც შეკავების კოეფიციენტით შეადგენს 93.79%--99.66%-ს და სრულად აკმაყოფილებს სასმელი წყლის ტექნიკური რეგლამენტის ზდვ ნორმებს (<0.1 მგ/ლ).

პრაქტიკული რეკომენდაციები

1. **საწარმოო დანერგვა:** ნავთობმომპოვებელ, გადამამუშავებელ და სატრანსპორტო-სანავსაყუდრე სექტორებში რეკომენდებულია მრავალსაფეხურიანი, ჩაკეტილი ტიპის გამწმენდი სისტემების ინტეგრაცია, სადაც პირველ ეტაპზე გამოიყენება ადგილობრივი მცენარეული (კრიპტომერიის ნახერხი) და მეორადი პოლიმერული (PU) ფილტრ-სორბენტები, ხოლო ღრმა გაწმენდის (პოლირების) ეტაპზე — ბრტყელფირფიტოვანი მემბრანული მოდულები.
2. **ნარჩენების მართვა და უტილიზაცია:** რეკომენდებულია გარემოს მეორადი დაბინძურების თავიდან ასაცილებლად, ნავთობით გაჯერებული პოლიურეთანი ექვემდებარებოდეს მექანიკურ გამოწურვას/რეგენერაციას ან უტილიზირებული იქნას სამშენებლო მსუბუქი ბლოკების/კონსტრუქციების წარმოებაში, ხოლო გამოყოფილი ნავთობი დაბრუნდეს ტექნოლოგიურ ციკლში.
3. **მემბრანების ექსპლუატაცია და რეგენერაცია:** მემბრანული აპარატების რეგენერაცია ტუტე რეაგენტებით (NaOH, KOH) უნდა განხორციელდეს საწყისი წარმადობის 30–40%-იანი კლებისთანავე, რათა თავიდან იქნას აცილებული ფორების შეუქცევადი ბლოკირება.
4. **სამომავლო კვლევები და სახელმწიფო სტრუქტურები:** მიზანშეწონილია გრაფენის ოქსიდით (GO) მოდიფიცირებული პოლისულფონური მემბრანების ფართომასშტაბიანი საპილოტე გამოცდების გაგრძელება. სახელმწიფო და გარემოსდაცვითი სტრუქტურების მხრიდან სასურველია შეიქმნას ეკონომიკური სტიმულები და მოხდეს მხარდაჭერა ადგილობრივი წარმოებისთვის მწვანე ტექნოლოგიების დასანერგად.

დანართები

დანართი 1. ტექსტში გამოყენებული შემოკლებები



ნ/პ	ნავთობპროდუქტები;
მმნ	მაღალმოლეკულური ნაერთები;
ზდვ	ზღვრული დასაშვები კონცენტრაცია;
ზანი	ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები;
უფ	ულტრაფილტრაციული;
MWCO	მოლეკულურ - მასური კვეთის ნიშნული (Molecular Weight Cut-Off).
TOC	მთლიანი ორგანული ნახშირბადი (Total Organic Carbon)
COD	ქიმიურად მოხმარებული ჟანგბადის მაჩვენებელი.
CNTs	ნახშირბადის ნანომილაკები (Carbon Nanotubes);
N-MP	N-მეთილ პიროლიდონი;
PEG	პოლიეთილენგლიკოლი;
GO	გრაფენის ოქსიდი;
PE	პოლიეთილენი
PP	პოლიპროპილენი
PU	პოლიურეთანი;
PSU	პოლისულფონი;
POD	პოლიოქსადიაზოლი;
PVDF	პოლივინილიდენფლუორიდი;
FTIR	ფურიე-ტრანსფორმაციის ინფრაწითელი სპექტროსკოპია (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy).

დანართი 2. პოლიმერული მემბრანების კვლევის შედეგები .



Reporting the following file(s):

- o D:\Documents\Documents\Membrane\19.07.#8.txt

Basic information about sample and measurement:

Material	Sample ID	Measuring mode	Operator	Start time	Run time	Error
PSU+PEG	001	Full porometry	NINO Mkheidze	2025-07-19 01:30:05 +04:00	32:35	0

Measurement results:

Smallest pore size (um)	MFP size (um)	Bubble point pore size (um)	Smallest pore pressure (bar)	MFP pressure (bar)	Bubble point pressure (bar)	Bubble point flow (l/min)	Calculated bubble point	Calc. FBP method	Calc. FBP filter
0,07665	0,1030	0,3322	8,350	6,213	1,926	0,005000	X	Size at 5 ml/min flow	X

Physical data about sample and test fluid:

Fluid	Fluid tension (dyn/cm)	Fluid angle (°)	Shape factor name	Shape factor	Sample holder	Sample area (mm ²)	Sample thickness (um)	Sample support	Gas	Temperature (degC)
Porefil	16,00	0,000	1	1,000	SH 25	298,6	45,00	standard	Air	20,00

Measurement settings:

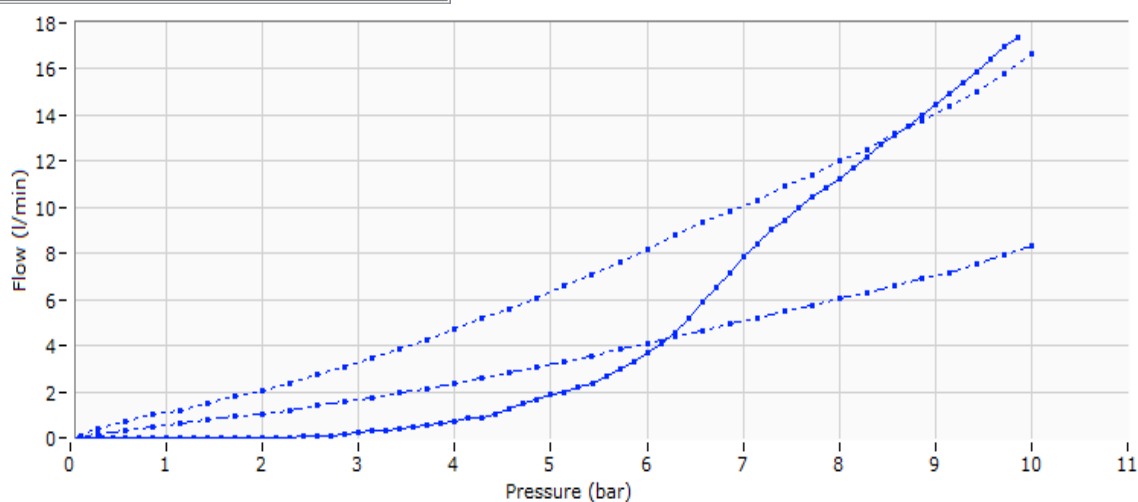
Initial pressure (bar)	Final pressure (bar)	Wet measurements	Dry measurements (%)	Pressure slope (s/bar)	Smallest pore convergence (%)
0,000	10,00	70	50	100,0	98,00

Model and version information:

Model	Unit ID	Manufacturer	PLC version	UI version	Data format version
POROLUX 500	POR.500.16AB.135	IB-FT Germany	2.53	2.53	1.08

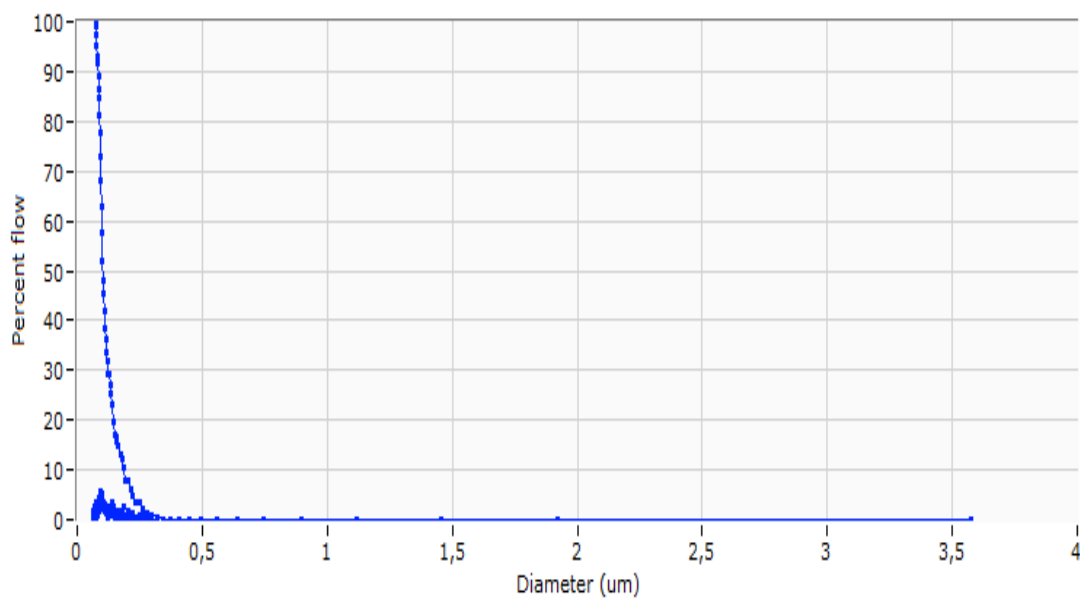
Flow/Pressure:

Selected Graph(s) (dark background):
Wet curve [WET]
Dry curve [DRY]
Half dry curve [DRY2]



Percent flow/Diameter:

Selected Graph(s) (dark background):
Cumulative filter flow [SUM]
Differential filter flow [DIF]
Pore size flow distribution [CDIF]



Reporting the following file(s):

- D:\Documents\Documents\Membrane\23.05.#4.txt

Basic information about sample and measurement:

	Material	Sample ID	Measuring mode	Operator	Start time	Run time	Error
23.05.#4	POD	004	Full porometry	Nino Mkheidze	2025-05-23 11:44:44 +04:00	16:39	5009 (Auxiliary air pressure low)

Measurement results:

	Smallest pore size (um)	MFP size (um)	Bubble point pore size (um)	Smallest pore pressure (bar)	MFP pressure (bar)	Bubble point pressure (bar)	Bubble point flow (l/min)	Calculated bubble point	Calc. FBP method	Calc. FBP filter
23.05.#4	0,1524	0,1554	0,2133	4,200	4,119	3,000	0,02086	X	First flow	X

Physical data about sample and test fluid:

	Fluid	Fluid tension (dyn/cm)	Fluid angle (°)	Shape factor name	Shape factor	Sample holder	Sample area (mm ²)	Sample thickness (um)	Sample support	Gas	Temperature (degC)
23.05.#4	Porefil	16,00	0,000	1	1,000	SH 25	298,6	50,00	standard	Air	18,00

Measurement settings:

	Initial pressure (bar)	Final pressure (bar)	Wet measurements	Dry measurements (%)	Pressure slope (s/bar)
23.05.#4	0,000	5,000	50	50	100,0

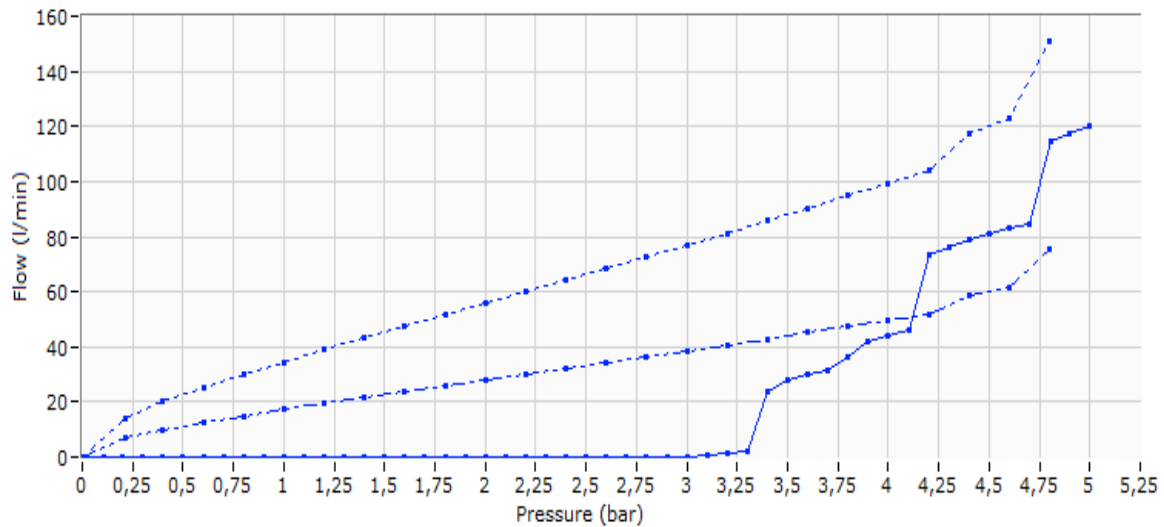
Model and version information:

	Model	Unit ID	Manufacturer	PLC version	UI version	Data format version
23.05.#4	POROLUX 500	POR.500.16AB.135	IB-FT Germany	2.53	2.53	1.08

Flow/Pressure:

Selected Graph(s) (dark background):	
Wet curve [WET]	
Dry curve [DRY]	
Half dry curve [DRY2]	

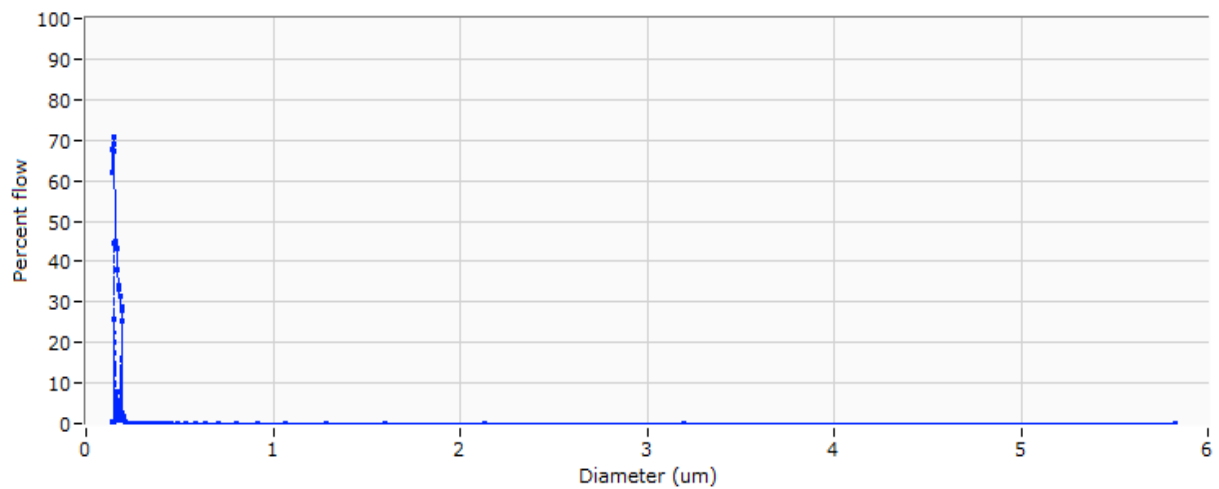
 [WET]23.05.#4	 [DRY]23.05.#4	 [DRY2]23.05.#4
---	---	--



Percent flow/Diameter:

Selected Graph(s) (dark background):	
Cumulative filter flow [SUM]	
Differential filter flow [DIF]	
Pore size flow distribution [CDIF]	

 [SUM]23.05.#4	 [DIF]23.05.#4	 [CDIF]23.05.#4
---	---	--



Reporting the following file(s):

- o D:\Documents\Documents\Membrane 10.06.26.#6.txt

Basic information about sample and measurement:

Material	Sample ID	Measuring mode	Operator	Start time	Run time	Error
Polysulfone 20 % +PEG10%	001	Full porometry	jeiran putkaradze	2026-06-10 13:21:23 +04:00	13:30	0

Measurement results:

Smallest pore size (um)	MFP size (um)	Bubble point pore size (um)	Smallest pore pressure (bar)	MFP pressure (bar)	Bubble point pressure (bar)	Bubble point flow (l/min)	Calculated bubble point
0,09458	0,1439	Inf	6,767	4,447	0,000	0,000	X

Physical data about sample and test fluid:

Fluid	Fluid tension (dyn/cm)	Fluid angle (°)	Shape factor name	Shape factor	Sample holder	Sample area (mm ²)	Sample thickness (um)	Sample support	Gas	Temperature (degC)
Porefil	16,00	0,000	1	1,000	SH 25	298,6	98,00	standard	N2	20,00

Measurement settings:

Initial pressure (bar)	Final pressure (bar)	Wet measurements	Dry measurements (%)	Pressure slope (s/bar)
0,000	7,000	60	50	60,00

Model and version information:

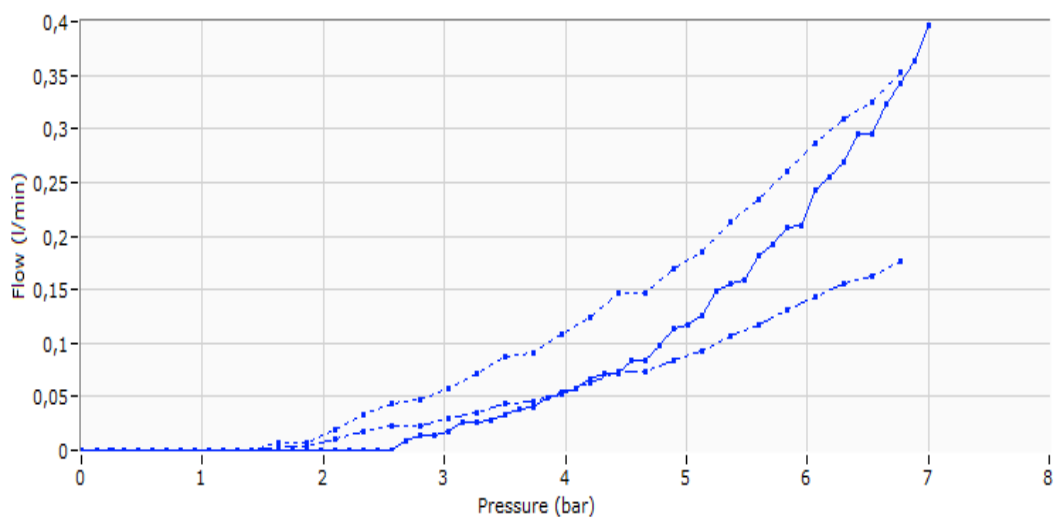
Model	Unit ID	Manufacturer	PLC version	UI version	Data format version
POROLUX 500	POR.500.16AB.135	IB-FT Germany	2.53	2.53	1.08

V 2.53

Flow/Pressure:

Selected Graph(s) (dark background):
Wet curve [WET]
Dry curve [DRY]
Half dry curve [DRY2]

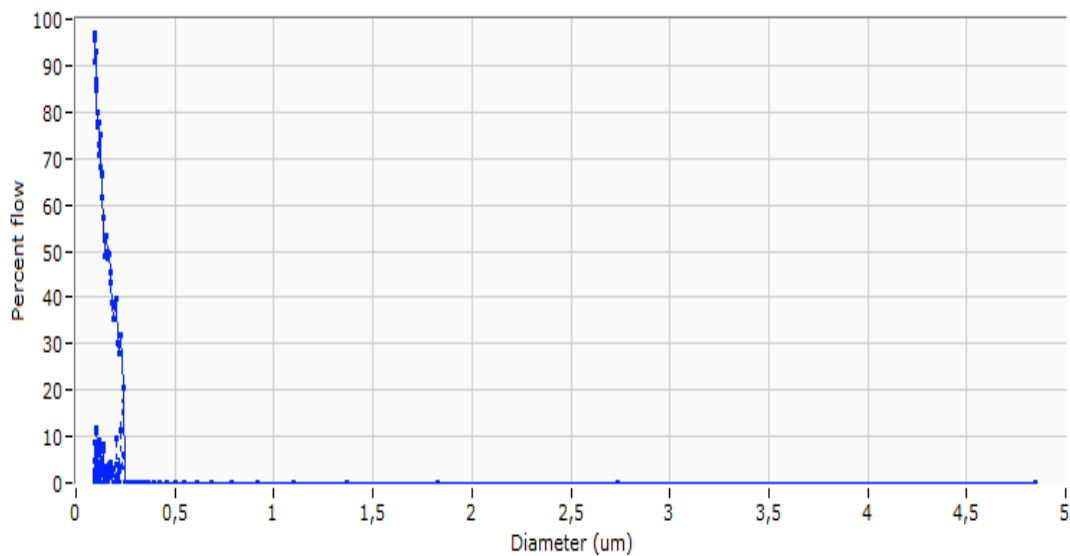
 [WET]Membrane 10.06.26.#6	 [DRY]Membrane 10.06.26.#6	 [DRY2]Membrane 10.06.26.#6
---	---	--



Percent flow/Diameter:

Selected Graph(s) (dark background):
Cumulative filter flow [SUM]
Differential filter flow [DIF]
Pore size flow distribution [CDIF]

 [SUM]Membrane 10.06.26.#6	 [DIF]Membrane 10.06.26.#6	 [CDIF]Membrane 10.06.26.#6
---	---	--



Reporting the following file(s):

- o D:\Documents\Documents\Membrane 24.04.26.#3.txt

Basic information about sample and measurement:

Material	Sample ID	Measuring mode	Operator	Start time	Run time	Error
Polysulfone 20%+PEG10%	001	Full porometry	Nino Mkheidze	2026-04-24 13:29:57 +04:00	57:42	0

Measurement results:

Smallest pore size (um)	MFP size (um)	Bubble point pore size (um)	Smallest pore pressure (bar)	MFP pressure (bar)	Bubble point pressure (bar)	Bubble point flow (l/min)	Calculated bubble point	Calc. FBP method	Calc. FBP filter
0,1067	0,1092	0,1597	6,000	5,861	4,008	0,03000	X	Size at 30 ml/min flow	X

Physical data about sample and test fluid:

Fluid	Fluid tension (dyn/cm)	Fluid angle (°)	Shape factor name	Shape factor	Sample holder	Sample area (mm ²)	Sample thickness (um)	Sample support	Gas	Temperature (degC)
Porefil	16,00	0,000	1	1,000	SH 25	298,6	98,00	standard	N2	20,00

Measurement settings:

Initial pressure (bar)	Final pressure (bar)	Wet measurements	Dry measurements (%)	Pressure slope (s/bar)
0,000	6,000	25	50	300,0

Model and version information:

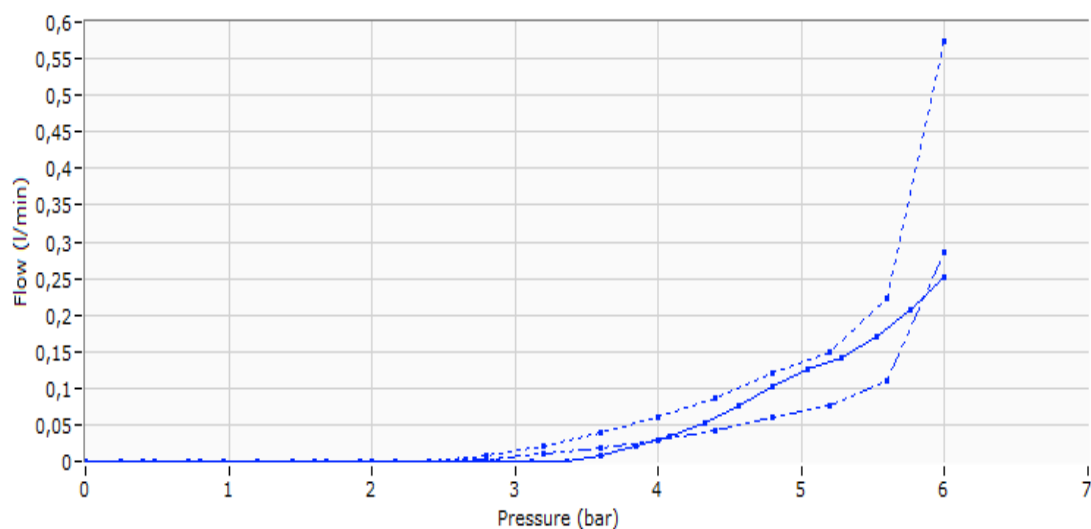
Model	Unit ID	Manufacturer	PLC version	UI version	Data format version
POROLUX 500	POR.500.16AB.135	IB-FT Germany	2.53	2.53	1.08

V 2.53

Flow/Pressure:

Selected Graph(s) (dark background):
Wet curve [WET]
Dry curve [DRY]
Half dry curve [DRY2]

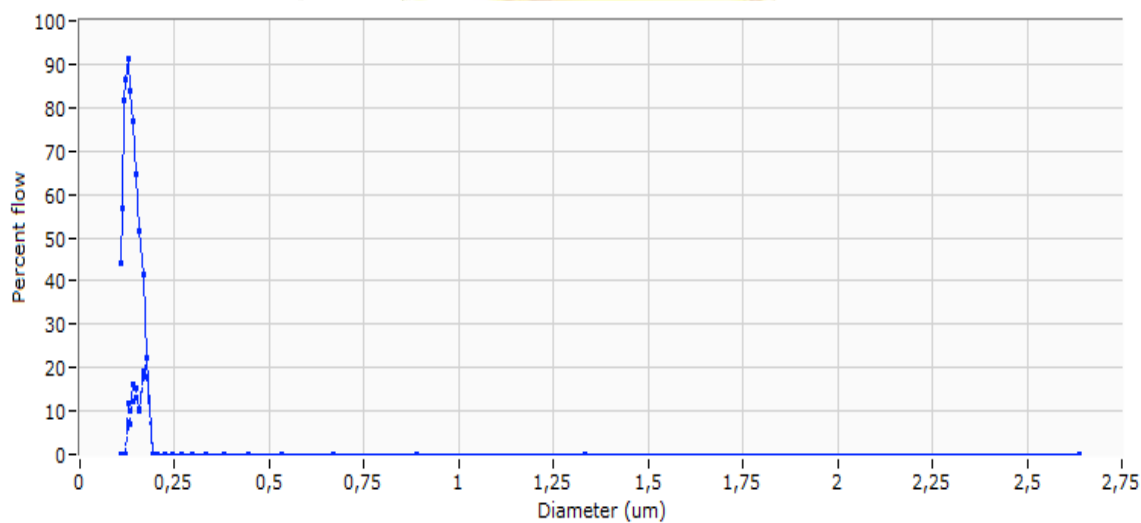
 [WET]Membrane 24.04.26.#3	 [DRY]Membrane 24.04.26.#3	 [DRY2]Membrane 24.04.26.#3
---	---	--



Percent flow/Diameter:

Selected Graph(s) (dark background):
Cumulative filter flow [SUM]
Differential filter flow [DIF]
Pore size flow distribution [CDIF]

 [SUM]Membrane 24.04.26.#3	 [DIF]Membrane 24.04.26.#3	 [CDIF]Membrane 24.04.26.#3
---	---	--



Reporting the following file(s):

- o D:\Documents\Documents\Membrane 30.06.26.#2.txt

Basic information about sample and measurement:

Material	Sample ID	Measuring mode	Operator	Start time	Run time	Error
Polysulfone 15% +GO	003	Full porometry	Jeiran Putkaradze	2026-06-30 14:51:18 +04:00	38:48	0

Measurement results:

Smallest pore size (um)	MFP size (um)	Bubble point pore size (um)	Smallest pore pressure (bar)	MFP pressure (bar)	Bubble point pressure (bar)	Bubble point flow (l/min)	Calculated bubble point	Calc. FBP method	Calc. FBP filter
0,08360	0,1514	1,474	7,656	4,228	0,4343	0,005000	X	Size at 5 ml/min flow	X

Physical data about sample and test fluid:

Fluid	Fluid tension (dyn/cm)	Fluid angle (°)	Shape factor name	Shape factor	Sample holder	Sample area (mm ²)	Sample thickness (um)	Sample support	Gas	Temperature (degC)
Porefil	16,00	0,000	1	1,000	SH 25	298,6	177,0	standard	N2	20,00

Measurement settings:

Initial pressure (bar)	Final pressure (bar)	Wet measurements	Dry measurements (%)	Pressure slope (s/bar)	Smallest pore convergence (%)
0,000	10,00	110	50	120,0	98,00

Model and version information:

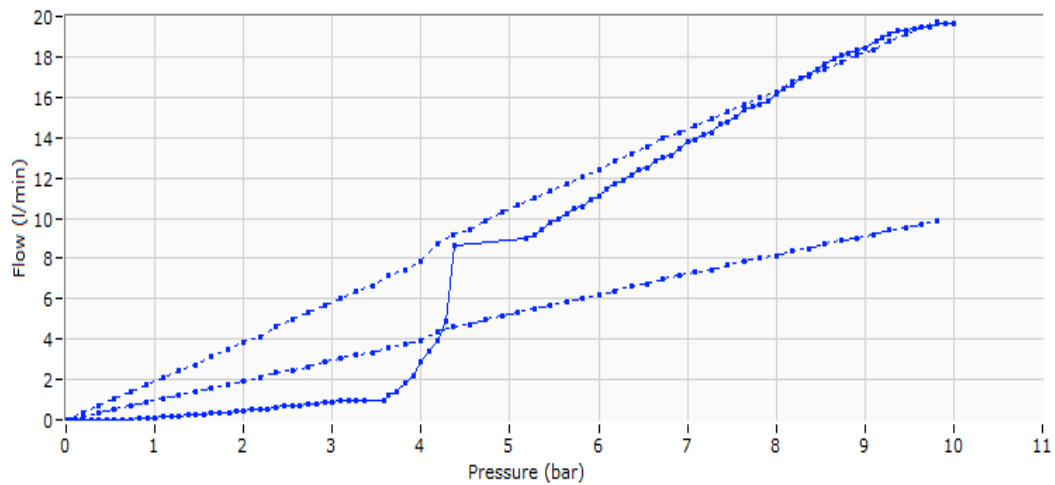
Model	Unit ID	Manufacturer	PLC version	UI version	Data format version
POROLUX 500	POR.500.16AB.135	IB-FT Germany	2.53	2.53	1.08

V 2.53

Flow/Pressure:

Selected Graph(s) (dark background):
Wet curve [WET]
Dry curve [DRY]
Half dry curve [DRY2]

 [WET]Membrane 30.06.26.#2	 [DRY]Membrane 30.06.26.#2	 [DRY2]Membrane 30.06.26.#2
---	---	--



Percent

flow/Diameter:

Selected Graph(s) (dark background):
Cumulative filter flow [SUM]
Differential filter flow [DIF]
Pore size flow distribution [CDIF]

 [SUM]Membrane 30.06.26.#2	 [DIF]Membrane 30.06.26.#2	 [CDIF]Membrane 30.06.26.#2
---	---	--

