

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-65-78>

УДК: 628.16.08:54.05

MXene ЖӘНЕ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ КОМПОЗИТТІ МЕМБРАНАЛАР: ҚАСИЕТТЕРІ ЖӘНЕ СУДЫ ТАЗАЛАУДАҒЫ ТИІМДІЛІГІ

А. Т. Табынбаева¹, А. Р. Сатаева¹, Н. А. Ахметов², К. Т. Тастамбек^{1,2}, Ж. Т. Тауанов^{1,2*}

¹ «Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті», Алматы, Қазақстан,

² «Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті», Түркістан, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

Қазіргі таңда су ресурстарының тапшылығы мен сапасының төмендеуі экологиялық және әлеуметтік маңызды мәселе болып отыр. Өнеркәсіптік өндіріс, ауыл шаруашылығы және тұрмыстық қызмет нәтижесінде өзендер, көлдер және жер асты сулары ауыр металдар, органикалық бояғыштар, фармацевтикалық қалдықтар, микропластиктер және патогенді микроағзалармен ластанады. Бұл экосистемелердің бұзылуына, биотаға зиян келуіне және адам денсаулығына қауіп төндіреді. Дәстүрлі тазалау әдістері – тұндыру, хлорлау, адсорбция, ионалмастырғыш шайырлар – күрделі құрамдағы немесе жоғары концентрациядағы ластағыштарды толық жоя алмайды. Осыған байланысты мембраналық технологиялар суды молекулалық деңгейде бөлуге, энергияны аз тұтынуға және экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін перспективалы бағыт болып саналады.

Соңғы жылдары MXene және наноцеллюлоза негізіндегі композитті мембраналар ерекше қызығушылық тудырды. MXene – MAX фазаларынан алынған екіөлшемді карбидтер мен нитридтердің тобы, оның қабаттық құрылымы, жоғары электрөткізгіштігі, гидрофильділігі және функционалды беткі топтары мембраналардың өткізгіштігін арттырып, иондарды бөлу мен органикалық ластағыштарды адсорбциялау тиімділігін жақсартады. Наноцеллюлоза биологиялық тұрғыдан ыдырайтын наноматериал болып, мембрананың механикалық беріктігін, тұрақтылығын және биосәйкестігін қамтамасыз етеді, сондай-ақ селективтілік пен ластануға қарсы қасиеттерін арттырады.

MXene мен наноцеллюлозаның комбинациясы синергиялық әсер көрсетеді: наноцеллюлоза MXene қабаттарының агрегациясын болдырмайды, ал берік фаза әрекеттесу мембрананы ақаулардан қорғайды. Бұл тұщыландыру, ауыр металдарды, органикалық бояғыштарды, дәрілік қалдықтарды және микропластиктерді тиімді өңдеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, композиттің қабаттық құрылымы мен функционалды топтары ұзақ мерзімді тұрақтылық пен жоғары өнімділікті қамтамасыз етеді.

Мақалада MXene мен наноцеллюлозаның қасиеттері, композитті мембраналарды алу әдістері, құрылымдық сипаттамалары және суды тазалауда қолдану перспективалары жан-жақты қарастырылады. Зерттеу жаңа буын мембраналық технологиялардың экологиялық қауіпсіз, жоғары өнімді және тұрақты болуына қатысты әлеуетін көрсетеді, бұл суды тиімді тазалау мен ұзақ мерзімді тұрақтылыққа қол жеткізуде маңызды ғылыми және практикалық мәнге ие.

Түйін сөздер: MXene, наноцеллюлоза, селективтілік, композитті мембрана, ауыр металдар, су тазалау.

КІРІСПЕ

Су ресурстарының тапшылығы мен сапасының төмендеуі бүгінгі таңда жаһандық деңгейдегі ең өзекті экологиялық және әлеуметтік мәселелердің бірі болып отыр. Қазіргі таңда өзендер мен көлдердің, сондай-ақ жер асты суларының ластануы өнеркәсіптік өндіріс, ауыл шаруашылығы және тұрмыстық қызмет салдарынан қарқынды жүріп жатыр. Су жүйелеріне түсетін ластағыштардың қатарына ауыр металдар, органикалық бояғыштар, дәрілік препараттар, пестицидтер, микропластиктер және патогенді микроағзалар жатады [1, 2]. Мұндай заттардың жинақталуы экосистемелердің бұзылуына, биотаға уытты әсердің артуына және адам денсаулығына қауіптің күшеюіне әкеледі.

Әсіресе, ауыр металдардың (сынап, қорғасын, кадмий, хром), тұрақты органикалық қосылыстардың және антибиотиктердің суда болуы күрделі экологиялық мәселелерді туындатады. Бояғыш заттар су ортасының түсін өзгертіп қана қоймай, фотосинтез процесін тежейді және мутагенді әсер көрсетуі мүмкін.

Микропластик пен дәрілік қалдықтардың тірі ағзаларда биожинақталуы қазіргі таңда ғалымдар арасында ерекше алаңдаушылық тудырып отыр [3, 4].

Суды тазалаудың дәстүрлі әдістері – тұндыру, хлорлау, адсорбция, ионалмастырғыш шайырлар – белгілі бір дәрежеде тиімді болғанымен, жоғары концентрациядағы немесе күрделі құрамдағы ластағыштарды толық жоюға қабілетті емес [5]. Осыған байланысты мембраналық технологиялар соңғы онжылдықта су тазалаудың ең үмітті бағыттарының біріне айналды. Олар молекулалық деңгейде бөлуге, энергияны салыстырмалы түрде аз тұтынуға және экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді [6, 7]. Алайда, дәстүрлі полимерлі мембраналардың қолданылуында да бірқатар шектеулер бар: олар механикалық және химиялық тұрақтылығы төмен, ластағыштарға қарсы тозуға бейім және биоластануға сезімтал [8]. Осыған байланысты ғалымдар жаңа буын мембраналық материалдарды әзірлеуде наноматериалдарды пайдалануға ерекше назар аударып отыр.

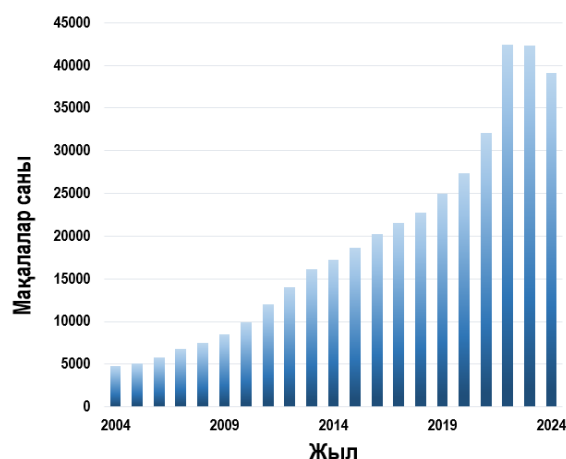
Наноцеллюлоза – жаңартылатын биомассада алынатын, биологиялық тұрғыдан ыдырайтын наномасштабты материал. Оның жоғары механикалық беріктігі, үлкен меншікті беткі ауданы, гидрофильділігі және модификацияға икемділігі мембраналардың селективтілігі мен өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді [9].

МХене – МАХ фазаларынан алынатын екіөлшемді карбидтер мен нитридтер тобы. Бұл материалдың электрөткізгіштігі, гидрофильділігі, функционалды топтарының болуы және қабаттық құрылымы су тазалаудағы адсорбция және ион селективтілігі процестерін жақсартуға жағдай жасайды [10]. Зерттеулер МХене негізіндегі материалдардың ауыр металдарды, органикалық бояғыштарды, тұздарды және бактерияларды тиімді бөлу қабілетін көрсетіп отыр [11–13].

1 КОМПОЗИТТІ МЕМБРАНАЛАР

1.1 Композитті мембраналардың жіктелуі

Соңғы 20 жылда су тазартуға арналған композитті мембраналар бойынша жарияланымдар саны айтарлықтай өсті (сурет 1).



1–сурет. Суды тазартуға арналған композитті мембраналар бойынша ғылыми жарияланымдардың жылдар бойынша өсуі

2004–2010 жылдары зерттеулер біртіндеп көбейсе, кейіннен наноматериалдар (TiO_2 , графен, МХене) мен гибриді құрылымдардың (металл-органикалық каркастар, композиттер) дамуына байланысты қарқын алды [14–16]. 2019 жылдан кейін зерттеулер саны күрт артып, 2022–2023 жылдары 40 000-нан асты, бұл су тазарту технологияларын жетілдіруге деген сұраныстың артуымен байланысты.

Соңғы он жылда полимерлі композиттік мембраналарды әзірлеу және функционализациялау бағытында айтарлықтай прогресс байқалды. Бұл саладағы зерттеулер мембраналардың селективтілігін, өткізгіштігін және төзімділігін арттыруға бағытталған [17].

Функционалды наноматериалдары бар полимерлі композиттік мембраналар

Полимерлі мембраналарда функционалды наноматериалдарды қолдану – қазіргі зерттеулердің маңызды бағыттарының бірі. Мысалы, МХене-ді қосу мембраналардың гидрофильділігін, иондық таңдамалылығын

және тұрақтылығын арттырады, сондай-ақ агрессивті ортада өткізгіштікті сақтайды, бұл оларды әртүрлі сүзу процестерінде тиімді қолдануға мүмкіндік береді [18]. Сонымен қатар, МХене мембраналардың механикалық және термиялық қасиеттерін жақсартады, бұл олардың су тазарту және газдарды бөлу саласында қолданылу аясын кеңейтеді [19].

Сонымен бірге, графен оксиді (GO) қосылған мембраналар гидрофильділікті және өткізгіштікті жақсартып, суды тазарту тиімділігін арттырады [20]. Ал металл-органикалық каркастар (МОК) қосылған мембраналар кеуекті құрылымды жақсартып, жоғары селективтілік пен өткізгіштікке қол жеткізеді [21].

Органикалық емес толтырғыштары бар гибриді мембраналар

Тағы бір қызықты бағыт – органикалық емес толтырғыштары бар гибриді мембраналарды әзірлеу, мысалы, МОК материалдары. Мұндай мембраналар керемет өткізгіштікті және жоғары селективтілікті көрсетеді [21–23].

Олар газдар мен сұйықтықтарды бөлу процестері үшін ерекше тиімді. Зерттеулер көрсеткендей, металл-органикалық каркастар негізіндегі мембраналар жоғары қысымдарда да тұрақтылықты қамтамасыз етеді, бұл оларды әртүрлі өнеркәсіптік процестерде қолдануға жарамды етеді [24].

Наноқұрылымдық мембраналар

Мембраналардың наноқұрылымдануы ерекше қасиеттерге жетуге мүмкіндік береді, мысалы, өлшемді бақыланатын саңылаулар мен ионды арналардың пайда болуы. Соңғы зерттеулер көрсеткендей, наноқұрылымдық мембраналар төмен энергия шығындарымен жоғары өнімділікке қол жеткізуі мүмкін, бұл оларды әртүрлі бөліп алу процестеріне өте тиімді етеді [25].

Мембраналардың наноқұрылымдануы материалдың селективтілік пен өткізгіштік қасиеттерін айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік береді. Нанокеуектер мен иондық арналардың өлшемін бақылау арқылы иондарды бөлу тиімділігі артып, суды тұщыландыру және ластағыштарды жою процестерінде энергия шығынын төмендету мүмкіндігі туады. Соңғы зерттеулерде дәл осы тәсіл литий иондарын селективті түрде бөліп алуда тиімді екендігі көрсетілген [26].

Сонымен қатар, екіөлшемді материалдарға негізделген мембраналар (мысалы, MoS_2) су тазарту және тұщыландыру саласында жоғары нәтижелер көрсетті [27]. Мұндай наноқұрылымды мембраналар судың жоғары өткізгіштігін сақтай отырып, иондар мен тұздардың өтуін тиімді түрде шектейді [27, 28]. Бұл қасиет оларды жаңа буынның сүзгіш жүйелерде қолдануға тиімді етеді, себебі мембранадағы ұйымдасқан наноканалдар судың өтуін жеңілдетіп, тұздық иондарға тосқауыл болады [28, 70].

Биомиметикалық мембраналар

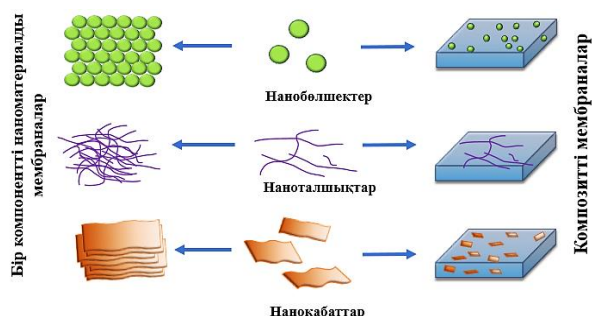
Биомиметикалық технологияларды қолдану мембраналық материалдарды дамытудағы маңызды қадам болды. Аквакуектер мен беткі сіңірімділікті

бағыттау арқылы мембраналар жоғары өткізгіштікке және ластануға тұрақтылыққа қол жеткізді. Мұндай мембраналар, табиғи сүзгілеу механизмдерін имитациялай отырып, минималды ластанумен жоғары тиімділікті қамтамасыз етеді [29].

Ионды сұйықтықтар негізіндегі мембраналар

Ионды сұйықтықтар – химиялық әсерлерге тұрақтылығын жақсартатын және антифулингтік қасиеттері бар мембраналардың құрамына енгізілетін ерекше материалдар. Ионды сұйықтықтары бар мембраналар дәстүрлі полимерлі мембраналарға қарағанда ластануға төмен сезімтал және иондар мен органикалық молекулаларды бөлуде жоғары таңдамалылыққа ие. Бұл ерекшеліктер олардың сүзу және басқа процестерде қолдану үшін жаңа мүмкіндіктер ашады [30, 31].

Соңғы он жылда композиттік мембраналар технологиясының айтарлықтай дамығаны байқалады, бұл олардың тиімділігін, селективтілігін және тұрақтылығын арттыруға бағытталған. Нанокұрылымды материалдарды мембраналық жүйелерге біріктіру олардың құрылымдық және функционалдық қасиеттерін айтарлықтай жақсартады. Бұл тәсіл бір компонентті наноматериалдар негізінде жасалған мембраналармен қатар, композитті мембраналар әзірлеуге де мүмкіндік береді. 2-суретте нанобөлшектер, наноталшықтар және наноқабаттардан тұратын мембраналық құрылымдардың қалыптасу жолдары бейнеленген.



2-сурет. Нанокұрылымдардың мембраналық технологияларға интеграциясы.

Композитті мембраналарда қолданылатын материалдар

Полимерлі матрицалар

Композитті мембраналарда қолданылатын полимерлі матрицаларға полиамид, полиэфирсульфон, поливинилиденфторид (ПВДФ), хитозан және полиакрилонитрил (ПАН) сияқты материалдар жатады. Бұл полимерлер мембраналардың жоғары механикалық және химиялық қасиеттерін қамтамасыз етіп, оларды әртүрлі қолдану салаларына, соның ішінде суды тұщыландыру, ластаушы заттарды селективті түрде бөлу және биомедициналық қолданбаларға жарамды етеді [32–34].

Мысалы, полиамидті және полиимидті мембраналар олардың жоғары селективтілігі мен ластануға

төзімділігі арқасында тұщыландыру процестерінде кеңінен қолданылады [35].

Полиэфирсульфон (PES) мембраналарының құрылымына MXene және полианилин (PANI) полимерін енгізу арқылы олардың электрөткізгіштігі артады және антифулинг қасиеттері жақсарады, бұл оларды су тазарту және бояғыштарды бөлу үшін тиімді етеді [36].

Поливинилиденфторид (ПВДФ) мембраналық технологияларда кеңінен қолданылады. MAF-4 материалымен модификацияланған ПВДФ негізіндегі композитті мембраналар жоғары су өткізгіштігімен және қақтың түзілуіне төзімділігімен ерекшеленеді, бұл оларды мембраналық дистилляция үшін перспективалы етеді [37]. Басқа зерттеулер көрсеткендей, анионды балшықты нанобөлшектермен және көміртекті кванттық нүктелермен толықтырылған ПВДФ мембраналары ауыр металдарды адсорбциялау және анықтау үшін тиімді қолданылады [38].

Биополимерлі мембраналар, мысалы, хитозан негізіндегі мембраналар, олардың биологиялық ыдырайтын қасиеттері мен ластаушы заттарды адсорбциялау қабілетінің жоғары болуына байланысты кеңінен зерттелуде. Мысалы, титан диоксиді (TiO₂) қосылған хитозан мембраналары су тазартуда тамаша нәтижелер көрсетеді [39].

Полиакрилонитрил (ПАН) мембраналары MXene/көміртекті нанотүтікшелер көпқабатты нанокұрылымдарымен модификацияланып, өнеркәсіптік ағынды сулардан майлар мен бояғыштарды тиімді жоюға мүмкіндік береді [40]. Сонымен қатар, ПВДФ/ПАН негізіндегі электроспиннинг әдісімен жасалған мембраналар натрий-иондық батареялар мен қысым датчиктерінде сепаратор ретінде қолданылады, бұл олардың функционалды мүмкіндіктерін кеңейтеді [41].

Функционалды толтырғыштар

Функционалды толтырғыштар композиттік мембраналарды модификациялауда маңызды рөл атқарады, олардың механикалық, сорбциялық және тасымалдау қасиеттерін жақсартады. Олардың ішінде көміртекті наноматериалдарға, металл оксидтеріне, цеолиттерге, MXene және функционалды нанобөлшектерге ерекше көңіл бөлінеді.

Көміртекті наноматериалдар, мысалы, графен оксидтері мен көміртекті нанотүтікшелер (КНТ), мембраналық құрылымдарды нығайту үшін белсенді қолданылады. Олар механикалық беріктікті және мембраналардың тұрақтылығын арттырып қана қоймай, селективтілік пен өткізгіштікті жақсартады. Мысалы, көміртекті нанотүтікшелерді полимерлі матрицаға қосу мембрананың гидрофильдігін арттырады, бұл олардың ластануын азайтады және қызмет ету мерзімін ұзартады [42]. Графен оксидтері жоғары беттік ауданы мен ерекше электрондық құрылымы арқасында мембраналардың сорбциялық қабілетін арттырады, бұл оларды су тазарту және заттарды селективті бөлу үшін перспективалы материал етеді.

MXene ЖӘНЕ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ КОМПОЗИТТІ МЕМБРАНАЛАР: ҚАСИЕТТЕРІ ЖӘНЕ СУДЫ ТАЗАЛАУДАҒЫ ТИІМДІЛІГІ

Металл оксидтері, мысалы, TiO_2 , Fe_3O_4 және ZrO_2 , фотокаталитикалық және сорбциялық қасиеттерінің арқасында кеңінен қолданылады. Композиттік мембраналарға TiO_2 нанобөлшектерін енгізу биологиялық ластануға төзімділікті арттырады және су тазарту процестерінде тиімділікті жоғарылатады [43]. Fe_3O_4 негізіндегі магнитті наноккомпозиттер ауыр металдарды судан бөлуде жоғары тиімділік көрсетеді. Wei Long және әріптестері мұнай-химия өндірісінің ағынды суларынан Cr(VI) иондарын бөлу үшін $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Saccharomyces cerevisiae}$ магнитті наноккомпозитін қолданды [44]. *Saccharomyces cerevisiae* бұл биосорбциялық қасиеттерге ие біржасушалы ашытқы саңырауқұлақ, ол матрица ретінде Fe_3O_4 нанобөлшектерін тұрақтандырады және иондарды байланыстыру қабілетін арттырады. Зерттеу барысында адсорбция кинетикасы мен изотермалары талданды, сонымен қатар рентген фотоэлектрондық спектроскопия әдісі қолданылып, иондардың байланысу механизмдері айқындалды [44].

Li және әріптестері ұсынған «ядро–қабықша» құрылымды Fe_3O_4 композиті де Cr(VI) иондарын тиімді адсорбциялай алатынын көрсетті. Бұл жұмыста әртүрлі pH мәндерінің әсері қарастырылып, Cr^{6+} иондарының формалары (HCrO_4^- , CrO_4^{2-}) адсорбция процесіне айтарлықтай ықпал ететіні дәлелденді [45].

Zhou және әріптестері әзірлеген ксантатпен модификацияланған $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ негізіндегі поливинил спирті/хитозан композиті Cd^{2+} сияқты ауыр металл иондарын ерітіндіден жоғары тиімділікпен жоятыны анықталды [46].

Цеолиттер мен MXene композиттік мембраналарды жасауда үлкен әлеуетке ие. Цеолиттер жоғары кеуектілігі мен тұрақтылығының арқасында газдар мен сұйықтықтарды селективті бөлу үшін перспективалы материал болып табылады. Олардың құрылымы органикалық қосылыстар мен ауыр металдарды тиімді түрде жоюға мүмкіндік береді, бұл оларды су тазарту және сүзу процестерінде таптырмас етеді [47]. MXene ерекше электрлік және механикалық қасиеттерінің арқасында жоғары өткізгіштігі бар мембраналарды жасау үшін қолданылады, бұл интеллектуалды мембраналық жүйелерді дамытуға жол ашады.

Функционалды нанобөлшектер, мысалы, күміс (Ag), алтын (Au) және металл-органикалық каркастар, мембраналарға антибактериалды және каталитикалық қасиеттер беру үшін белсенді түрде енгізіледі. Күміс пен алтын нанобөлшектері айқын антимикробтық белсенділікке ие, бұл мембраналық беттердің биоластануын болдырмауға көмектеседі. МОК қосу сорбциялық сипаттамаларды жақсартады және органикалық ластағыштарды бөлу тиімділігін арттырады [48].

Мембраналардың құрылымдық және жұмыс сипаттамалары олардағы толтырғыш ретінде қолданылатын наноматериалдардың түріне байланысты өзгеріп отырады. Әртүрлі функционалды толтырғыштар өткізгіштікке, селективтілікке, механикалық беріктікке және антибактериалды қасиеттерге әртүрлі деңгейде әсер етеді. Бұл мәліметтер 1-кестеде жинақталып көрсетілген.

1-кесте. Әртүрлі функционалды толтырғыштардың мембраналардың қасиеттеріне әсері.

Толтырғыш түрі	Негізгі қасиеттері	Мембранаға әсері	Қолдану саласы	Дереккөз
Көміртек наноматериалдар (графен оксиді, КНТ)	Жоғары механикалық беріктік, электрөткізгіштік, үлкен беткі аудан	Гидрофилділікті арттырады, мембрана селективтілігін жақсартады	Су тазарту, газ бөлу, биомедицина, электроника	[42, 49]
Металл оксидтері (TiO_2 , Fe_3O_4 , ZrO_2)	Фотокатализ, магниттік қасиеттер, жоғары химиялық тұрақтылық	Антибактериалды қасиеттер қосады, судан ауыр металдарды бөлуді жақсартады	Су және ауа тазарту, катализ	[50]
Цеолиттер	Жоғары кеуектілік, жоғары селективтілік	Ластаушы заттарды сорбциялау қабілетін арттырады	Газ және сұйықтық бөлу, су тазарту	[47, 51]
MXene	Жоғары өткізгіштік, механикалық қасиеттер	Өткізгіштігін арттырады	Ақылды мембраналық жүйелер, энергияны сақтау	[52]
Функционалды нанобөлшектер (Ag, Au, МОК)	Антибактериалды, каталитикалық белсенділік	Ластануға төзімділігін арттырады	Биомедицина, суды зарарсыздандыру, сенсорлар	[53, 54]

Осылайша, композиттік мембраналарда функционалды толтырғыштарды қолдану олардың пайдалану сипаттамаларын жақсартуға кең мүмкіндіктер ашады.

Hg²⁺ иондарын және басқа ауыр металдарды селективті байланыстыруға арналған функционалды топтар

Тиолды, карбоксилді және аминдік топтар металл иондарымен күшті кешендер түзіп, сорбция тиімділігін арттырады. Бұл топтар жоғары химиялық белсенділікке ие, бұл оларды металл иондарын су ерітінділерінен сорбциялау процестерінде тиімді етеді [55].

Көптеген зерттеулер бұл топтардың Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} және Hg^{2+} иондарын бөлуде жоғары селективтілік көрсететінін дәлелдеді. Мысалы, карбоксилді және тиолды топтармен модификацияланған магнитті наносорбенттер бірнеше ионды бір мезетте тиімді жоя алады [55, 56].

Аминдік топтармен және тиол топтарымен өңделген активтендірілген көмір Pb^{2+} және Hg^{2+} иондарын толық дерлік жоя алады. Бұл материалдар сорбция жылдамдығы жоғары, ал адсорбция процесі — химиялық және ион алмасу механизмдерінің үйлесімі арқылы жүреді. Сонымен қатар, бұл модификация-

ланған көмір сорбенттері бірнеше қайта қолдануға жарамды, яғни оларды регенерациялау мүмкіндігі бар [57].

Ал хитозан мен оның туындылары құрамындағы аминдік және гидроксил топтарының арқасында ауыр металдарды байланыстыруда кеңінен қолданылады. Олар биосорбент ретінде экологиялық тұрғыдан қауіпсіз және жоғары адсорбциялық сыйымдылыққа ие [58]. Осылайша, функционалды сорбенттерді әзірлеу ауыр металл иондарынан суды тазарту үшін жоғары тиімді жүйелерді жасауға бағытталған өзекті міндет болып қала береді.

2 СУДЫ ТАЗАЛАУДА КОМПОЗИТТІ

МЕМБРАНАЛАРДЫҢ ТИІМДІЛІГІ

Мембраналардың су сіңіргіштігі

Мембраналардың су сіңіргіштігі – олардың гидрофильділігін және ылғалды ұстап тұру қабілетін анықтайтын маңызды параметр болып табылады. Бұл көрсеткіш келесі формула бойынша есептеледі:

Мұндағы W_m және W_d сәйкесінше ылғалданған (г, мг) және құрғақ мембрананың массасын (г, мг) білдіреді.

$$\% \text{ Су сіңіргіштік} = \left(\frac{W_m - W_d}{W_m} \right) \cdot 100.$$

Мембрананың кеуектілігі

Мембрананың кеуектілігі оның сұйықтықтар мен газдарды өткізу қабілетін анықтайды, сондай-ақ селективтілігі мен механикалық беріктігіне әсер етеді. Ол келесі формула бойынша есептеледі:

Мұндағы ρ – су тығыздығы (0,998 г/см³), l – мембрана қалыңдығы (см), A – мембрана ауданы (см²).

$$\epsilon (\%) = \left(\frac{W_m - W_d}{Al\rho} \right) \cdot 100.$$

Мембраналардың антифулингтік қасиеттері

Мембраналардың антифулингтік қасиеттері олардың ластануға төзімділігін және тазартудан кейін ағынды қалпына келтіру мүмкіндігін анықтайды:

Мұндағы J_{f1} – таза судың бастапқы ағыны (л·м⁻²·сағ⁻¹), J_b – ластаушы зат сүзілгеннен кейінгі ағын (л·м⁻²·сағ⁻¹), J_{f2} – мембрананы жұғаннан кейінгі ағын (л·м⁻²·сағ⁻¹).

Ағынды қалпына келтіру коэффициенті (FRR):

$$FRR (\%) = \left(\frac{J_{f2}}{J_{f1}} \right) \cdot 100.$$

Қайтымды ластану (R_r):

$$R_r (\%) = \left(\frac{J_{f2} - J_b}{J_{f1}} \right) \cdot 100.$$

Қайтымсыз ластану (R_{ir}):

$$R_{ir} (\%) = \left(\frac{J_{f1} - J_{f2}}{J_{f1}} \right) \cdot 100.$$

Жалпы ластану коэффициенті (R_t):

$$R_t (\%) = \left(\frac{J_{f1} - J_b}{J_{f1}} \right) \cdot 100.$$

Композитті мембраналардың селективтілігі

Композитті мембраналардың бөлу тиімділігі мембраналық сүзуде қолданылатын стандартты әдістер арқылы бағалануы мүмкін. Осындай әдістердің бірі – еріген заттың ауытқу коэффициенті (R) мен пермеат ағынын (J_p) есептеу.

Ауытқу коэффициенті (R) мембрананың органикалық қосылыстарды, бояғыштарды немесе ауыр металдардың иондарын қаншалықты тиімді ұстап қалатынын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл көрсеткіш бастапқы ерітіндідегі (C_f) және пермеаттағы (C_p) зат концентрациялары негізінде есептеледі, яғни мембрананың бөлу қабілетін сандық түрде сипаттайды:

$$R (\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_f} \right) \cdot 100.$$

Пермеат ағыны (J_p) мембрананың өткізгіштік қасиеттерін сипаттайды және белгілі бір уақыт ішінде оның беті арқылы өтетін сұйықтық көлемін өлшеу арқылы анықталады:

$$J_p = \frac{V}{A \cdot \Delta t}$$

Мұнда V – пермеат көлемі (л), A – мембрананың тиімді ауданы (м²), Δt – сынақ уақыты (сағат).

Осындай әдістер мембраналық технологияларды зерттеуде кеңінен қолданылады, түрлі мембраналардың суды ластаушы заттардан тазарту тиімділігін салыстыруға мүмкіндік береді [61]. 2-кестеде әртүрлі ластаушы заттарды бөлуге арналған композитті мембраналардың сүзу өнімділігі мен селективтілігіне қатысты әдеби деректер негізінде салыстырмалы талдау ұсынылған.

МХеке және нанокеллюлоза негізіндегі композитті мембраналардың тиімділігін сипаттау үшін тек сандық көрсеткіштермен шектелу жеткіліксіз. Су сіңіргіштік, кеуектілік, ластануға қарсы тұрақтылық немесе бояғыштар мен тұздарға селективтілік сияқты параметрлер маңызды болғанымен, олардың артындағы негізгі механизмдерді де түсіндіру қажет.

Ti₃C₂T_x (МХеке) полиамидті активті қабатқа межелік полимеризация әдісі арқылы енгізілген кезде, мембрананың бетінде көпіршік тәрізді ерекше морфология қалыптасады. Бұл құрылым тиімді өтімді ауданның артуына ықпал етеді. Соның нәтижесінде су ағыны шамамен 45 л·м⁻²·сағ⁻¹·бар⁻¹-ге жетіп, бастапқы полиамидті мембранамен салыстырғанда 1,58 есеге жоғарылайды. Сонымен бірге, мембрана жоғары селективтілігін сақтап қалады: бояғыштар мен тұздарды бөлу коэффициенті шамамен 820-ға тең [69].

MXene ЖӘНЕ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ КОМПОЗИТТІ МЕМБРАНАЛАР: ҚАСИЕТТЕРІ ЖӘНЕ СУДЫ ТАЗАЛАУДАҒЫ ТИІМДІЛІГІ

2 – кесте. Әртүрлі ластаушы заттарды бөлуге арналған композитті мембраналардың өнімділігін салыстыру

№	Мембрана құрамы	Ластаушы зат	Өтімділік (л·м ⁻² ·сағ ⁻¹ ·бар ⁻¹)	Ағынды қалпына келтіру коэф. (%)	Бөлу тиімділігі (%)	Дереккөз
1	PSF/MXene	BSA	450	76,1	>90	[59]
2	MXene (Ti ₃ C ₂ T _x)	MG, BSA	—	67,3	99,49	[60]
3	Ti ₃ C ₂ T _x (MXene) / целлюлоза ацетаты	<i>E. coli</i> , <i>B. subtilis</i>	256,85	—	98	[61,62]
4	Наноцеллюлоза негізіндегі композиттік мембрана	Ag ⁺ , Cu ²⁺ , Fe ³⁺	900<	—	Ag ⁺ : ~100%, Cu ²⁺ : 74–86%, Fe ³⁺ : 74–86%	[63]
5	PES / Цвиттерион-MXene	BSA	480	94	90	[64]
6	MXene / керамикалық негіз	гумин қышқылы	331,9	—	86,5	[65]
7	PSF / Fe ₃ O ₄ / GO	гумин қышқылы	25,5	—	96,5	[66]
8	PAN / ZnO-NPs	Mn ⁷⁺	136,3	87,4	96,21	[67]
9	PES / мезокеуекті Si	Cd ²⁺ , Zn ²⁺	~80,20	—	91,94	[68]

MXene-нің электрөткізгіштігі мен гидрофильділігі мембрана бетінде тұрақты гидраттық қабат түзілуіне жағдай жасайды. Бұл қабат фулингтің алдын алады. Ультрасүзгіш тәжірибелері көрсеткендей, теріс электрлік потенциалды (2 В) қолдану пермеат ағынын 1,6 есеге арттырған. Сонымен қатар, органикалық көміртекті бөлу тиімділігі 60,7%-дан 71,2%-ға дейін өскен. Мұндай нәтиже ластаушы бөлшектердің электростатикалық тебілуінің күшеюімен байланысты [70].

Химиялық тұрақтылық та маңызды артықшылық болып табылады. MXene қосылған жұқа қабатты нанокомпозитті мембраналар хлорлау немесе рН өзгерісі сияқты агрессивті жағдайларда да құрылымдық тұтастығын және сүзу қасиеттерін сақтайды [71]. Мысалы, Natu және әріптестері Ti₃C₂T_x сулы суспензиялары бейтарап ортада салыстырмалы түрде тұрақты екенін анықтаған. Ал рН 5 және рН 10 жағдайында айтарлықтай агрегация байқалған, бұл оның қышқылдық және сілтілік ортаға сезімталдығын дәлелдейді [72]. Тағы бір зерттеуде MXene енгізілген наносүзгіш мембраналар 105 күн үздіксіз суда қолданылғаннан кейін де Na₂SO₄-ты 98%-дан жоғары деңгейде ұстап тұрғаны көрсетілген. Бұл олардың ұзақ мерзімді сүзуге тұрақтылығын дәлелдейді [73].

Композитті мембрана құрамындағы наноцеллюлоза MXene қабаттарының агрегациясын болдырмайтын тұрақтандырғыш матрица қызметін атқарады. Сондай-ақ, ол берік межелік әрекеттесу арқылы мембранадағы ақауларды жабады. Мұндай синергиялық әсер механикалық беріктікті, селективтілікті және ұзақ мерзімді ластануға қарсы тұрақтылықты арттырады [74].

Сонымен қатар, наноцеллюлоза экологиялық таза әрі жаңартылатын табиғи биополимер ретінде ерекше маңызға ие. Оның айқын гидрофильділігі мембрананың суланғыштығын жоғарылатып, су ағынының тұрақты болуын қамтамасыз етеді [75]. Гидроксил топтарының көп болуы химиялық функционализацияға мүмкіндік беріп, мембрананың селективтілігі мен химиялық тұрақтылығын күшейтеді [76]. Бұдан басқа, наноцеллюлоза матрицасы

композиттің механикалық беріктігін арттырып, ұзақ мерзімді жұмыс істеу қабілетін қамтамасыз етеді [77].

MXene және наноцеллюлоза негізіндегі композитті мембраналар жоғары тиімділікті көрсетеді, алайда олардың толық потенциалын бағалау үшін тек сандық көрсеткіштерге емес, механикалық беріктілік, селективтілік және ластануға қарсы тұрақтылық сияқты қосымша қасиеттерге де назар аудару қажет. MXene қабатының гидрофильділігі мен электрөткізгіштігі судың ағынын арттырып, беттік ластанудың алдын алады, бұл ұзақ мерзімді қолдануда мембрананың жұмыс өнімділігін сақтауға мүмкіндік береді.

Наноцеллюлозаның экологиялық таза және гидрофильді табиғаты судың мембрананы біркелкі сулануына ықпал етіп, ұзақ мерзімді жұмысқа мүмкіндік береді. Сонымен қатар, оның химиялық функционализацияға бейімділігі мембрананың селективтілігін және химиялық тұрақтылығын арттырады, бұл әртүрлі ластаушы заттарды тиімді сүзуге жағдай жасайды. Осылайша, MXene мен наноцеллюлозаның синергиялық әсері мембрананың гидродинамикалық, механикалық және химиялық қасиеттерін үйлестіріп, оның практикалық қолданудағы сенімділігін арттырады.

Қорыта айтқанда, MXene-наноцеллюлоза композиттері тек сандық көрсеткіштермен емес, микро-және нано-деңгейдегі механизмдер арқылы да жоғары тиімділікті қамтамасыз етеді, бұл олардың су тазарту саласында кеңінен қолданылу потенциалын айқындайды.

3 MXENE ЖӘНЕ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ КОМПОЗИТТІ МЕМБРАНАЛАР

3.1 Мембраналарды алу әдістері

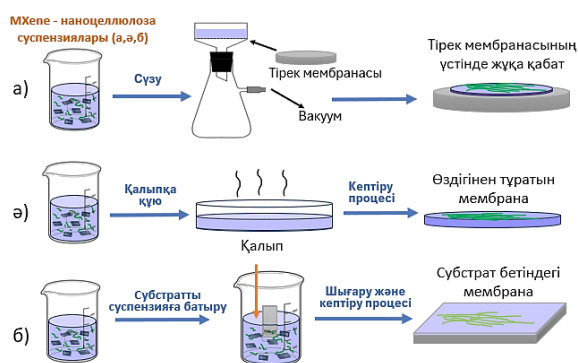
Вакуумдық сүзу

Вакуумдық сүзу және одан кейінгі ыстық престеу – қабатты наноцеллюлозалық мембраналық сүзгіштерді алудың жылдам, қарапайым және қолжетімді әдісі. Мұндай мембраналардың қалыңдығы мен кеуектерінің мөлшерін наноцеллюлоза суспензиясының концентрациясы мен мөлшерін өзгерту арқылы

реттеуге болады [78]. Бұл әдістің тиімділігі оның көпфункционалды сипатымен байланысты: вакуум сүзгілеу барысында наноцеллюлоза талшықтары тығыз орналасады, ал кейінгі ыстық престеу олардың байланысын күшейтіп, механикалық беріктігін арттырады. Осылайша, алынған мембраналар түрлі қолдану салаларына, соның ішінде су тазарту, биомедициналық жабындар мен катализдік процестерге бейімделе алады.

Ерітіндіден құю және сұйыққа батыру әдісі

Өзін-өзі ұстап тұратын мембраналар әдетте Петри табақшасында сұйылтылған наноцеллюлоза суспензиясын буландыру арқылы алынады. Агломерацияның алдын алу үшін дисперсия концентрациясын мүмкіндігінше төмендету қажет. Бұл көрсеткіш беткі химиялық құрам мен талшық диаметріне байланысты болғанымен, әдетте 1 масс% аспайды [78]. 3-ші суретте мембраналарды қалыптау әдістері көрсетілген.



3-сурет. Композиттік мембрана алудың негізгі әдістері: вакуумдық сүзу әдісі (а); ерітіндіден құю әдісі (ә); сұйыққа батыру әдісі (б)

Мұндай әдіс өте қарапайым болғанымен, оның белгілі бір шектеулері бар. Біріншіден, булану процесі ұзақ уақытты қажет етеді, бұл өндірістік масштабта тиімділікті төмендетуі мүмкін. Екіншіден, алынған мембраналардың біртектілігі дисперсияның бастапқы жағдайына және булану жылдамдығына тәуелді. Дегенмен, бұл әдіс жоғары мөлдірлікке ие жұқа мембраналарды алу үшін тиімді болып табылады, сондықтан ол оптикалық құрылғылар мен сенсорлық жабындар өндірісінде ерекше қызығушылық тудырады.

3.2 Композитті мембраналарда MXene және наноцеллюлоза рөлі

Соңғы жылдары наноцеллюлоза (ФНЦ, КНЦ) мен MXene негізіндегі композиттер мембраналық технология саласында ерекше қызығушылық тудырады. Бұл екі материалдың синергетикалық үйлесімі олардың жеке шектеулерін толықтырып, механикалық беріктігі жоғары, электрөткізгіш, икемді әрі экологиялық тұрғыда тұрақты жаңа мембраналар алуға мүмкіндік береді [79].

Наноцеллюлозаның гидроксил топтарының көп болуы оған жоғары гидрофильділік береді, бұл суды

және полярлы ерітінділерді жақсы сіңіруге ықпал етеді. Алайда, таза күйінде наноцеллюлозадан алынған мембраналар артық ісінуге бейім және механикалық тұрақтылығы төмен болуы мүмкін. Осыған байланысты зерттеушілер наноцеллюлозаны MXene қабаттарымен біріктіріп, суды өткізу қабілеті мен механикалық қасиеттерін оңтайландыруға қол жеткізді [80]. ТЕМРО-тотықтырылған ФНЦ пен MXene негізінде дайындалған мембраналардың созылу беріктігі 171 МПа-ға жетіп, ион өткізгіштігі $4 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ көрсеткен. Мұндай нәтижелер осмотикалық энергияны түрлендіруде жоғары тиімділікті көрсетті [81].

MXene, КНЦ және күміс негізіндегі жеңіл әрі икемді композитті мембраналар әзірленді. Олар «кірпіш тәрізді» құрылымға ие болып, электромагниттік кедергілерге қарсы жоғары тиімділікті қамтамасыз етеді. MXene бетінде күміс нанобөлшектерінің өздігінен қалпына келуі және мембрананың құрылымы арқасында олардың электромагниттік экрандау тиімділігі ≈ 50 дБ-қа жетеді, бұл күміссіз мембраналардың көрсеткішінен (≈ 15 дБ) едәуір жоғары. Мембраналар жұқа (46 мкм), созылуға төзімділігі жоғары (32 МПа-ға дейін) және жақсы электрөткізгіштікке ($588 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$) ие [82]. Сонымен қатар, MXene және гемицеллюлоза негізіндегі биоинспириленген композиттік пленкалардың беріктік шегі 135 МПа-ға дейін жетіп, электрөткізгіштігі $739 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ шамасында болған [83].

Зерттеулер көрсеткендей, MXene және наноцеллюлоза негізіндегі композиттерді түрлі тәсілдермен модификациялау олардың қасиеттерін айтарлықтай жақсарты алады. Мысалы, лигнинмен модификацияланған гидротермиялық наноцеллюлоза және MXene қабаттары біріктірілген құрылымда механикалық беріктік 258 МПа-ға жеткен, ал электрөткізгіштігі $1,75 \cdot 10^5 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ деңгейінде тіркелген [84]. Мұндай көрсеткіштер бұл материалдарды икемді суперконденсаторларда қолдануға жол ашады.

Сондай-ақ, MXene-ФНЦ композиттері суперконденсатор электродтары мен сенсорларда тиімді қолданылып жүр. Мысалы, MXene/ФНЦ/полианилин жұқа қабатының өткізгіштігі $634 \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ болып, 2000 циклдан кейін бастапқы сыйымдылығының 94%-ын сақтап қалған [85]. Ал КНЦ негізіндегі MXene ультражұқа пленкалары шамамен 57 МПа беріктікке және $10^4 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ электрөткізгіштікке қол жеткізіп, электромагниттік кедергілерді 40 дБ-ден жоғары деңгейде экрандауға қабілетті болған [86].

Әдеби деректер көрсеткендей, бұл материалдардың синергетикалық үйлесімі механикалық беріктілікті, электрөткізгіштікті және суды өткізу қабілетін арттыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, түрлі функционализация әдістерін қолдану арқылы олардың қасиеттерін одан әрі жақсартуға болады. Мұндай композиттер болашақта су тазарту жүйелері, суперконденсаторлар, сенсорлық құрылғылар және электромагниттік қорғау салаларында тиімді қолданылуы мүмкін.

4 ПЕРСПЕКТИВАЛАР МЕН БОЛАШАҚ БАҒЫТТАР **Өзін-өзі қалпына келтіретін және өзін-өзі** **тазартатын мембраналар**

Соңғы жылдары MXene және наноцеллюлоза негізіндегі композиттерге ерекше назар аударылуда, себебі олардың бірегей құрылымдық қасиеттері мембраналардың ұзақ мерзімділігін және тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді. Хіа және әріптестері жоғары механикалық беріктікке ие, өзін-өзі қалпына келтіретін және өзін-өзі тазартатын супрамолекулалық талшықты мембрананы әзірледі [87]. Pantuso және т.б. динамикалық гибриді мембраналардың ластануға қарсы тұру және өзін-өзі тазарту қабілеттерін көрсетті [88]. Бұл бағыттағы дамулар MXene мен наноцеллюлозаны интеграциялау арқылы жаңа буын «ақылды» мембраналар құруға жол ашады [94].

Экологиялық қауіпсіз биоыдырайтын **мембраналарды әзірлеу**

Целлюлоза ацетатына негізделген наноталшықты мембраналар биоыдырайтын әрі экологиялық таза балама ретінде ерекше назарға ие [89]. Tang және әріптестері MXene/наноцеллюлоза композиттерін пайдаланып, механикалық беріктігі жоғары әрі биоыдырайтын пленкалар жасады [95]. Мұндай гибриді құрылымдар экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз ете отырып, сүзгілеу және биомедициналық қолданбаларда тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жасыл еріткіштерді пайдалану арқылы уыттылықты азайту мембраналық технологиялардың тұрақты дамуына ықпал етеді.

Молекулалық жобалау және **функционалдылық**

Молекулалық деңгейде модельдеу мембраналардың селективтілігі мен өткізгіштігін басқаруда маңызды рөл атқарады. Wang және әріптестері органикалық молекулалық елек тәрізді мембраналардың күрделі қоспаларды жоғары селективтілікпен бөле алатынын көрсетті [90]. Shahbabaei және Tang кері осмосқа арналған жұқа қабатты нанокомпозитті мембраналарды молекулалық модельдеу арқылы оңтайландырды [91]. Жақында Ху және басқалары MXene/наноцеллюлоза мембраналарын атомдық деңгейде модельдеу арқылы олардың ион тасымалдау қасиеттерін жақсартудың жаңа тәсілдерін сипаттады [96].

MXene/наноцеллюлоза композитті **мембраналардың артықшылықтары**

Бұл материалдар жоғары өткізгіштікке, механикалық тұрақтылыққа және ластануға төзімділікке ие. Asif және Zhang керамикалық мембраналардың өнеркәсіптік қолданудағы рөлі мен олардың болашағын талқылады [92]. Issaoui және әріптестері мембраналық технологиялардың су ресурстарын тұрақты басқарудағы маңызын атап өтті [93]. Wang және әріптестері MXene/наноцеллюлоза композитті мембраналарының осмостық энергия өндірудегі әлеуетін көрсетті [97]. Бұл бағыттағы жұмыстар мембраналық

технологияларды ірі масштабта қолдануға мүмкіндік береді.

Болашақ бағыттар

MXene мен наноцеллюлозаға негізделген жаңа композиттер биомедицина, газ бөлінуі және энергия сақтау сияқты қосымша салаларда да қолданылуы мүмкін [98–100]. Сонымен қатар, ФНЦ-мен күшейтілген MXene мембраналарының тұрақтылығы мен ұзақ мерзімділігін арттыру мәселелері белсенді зерттелуде [101]. Жақында жарияланған шолулар MXene/наноцеллюлоза гидрогельдерінің сенсорлар мен икемді құрылғылардағы әлеуетін көрсетті [102]. Жалпы, инновациялық материалдардың комбинациясы және молекулалық жобалау әдістері болашақта мембраналық технологиялардың функционалдығын кеңейтуге және экологиялық тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді [103, 104].

ҚОРЫТЫНДЫ

Су тазалауға арналған заманауи мембраналар экологиялық тұрақты технологияларды дамытудың негізгі бағыттарының бірі болып табылады. Бұл шолу барысында MXene және наноцеллюлоза негізіндегі композитті мембраналардың құрылымдық ерекшеліктері мен функционалдық қасиеттері, сонымен қатар олардың су тазарту саласындағы артықшылықтары жан-жақты талданды.

MXene материалының гидрофильділігі мен беткі белсенділігі, сондай-ақ наноцеллюлозаның биологиялық ыдырағыштығы мен жоғары механикалық беріктігі композитті мембраналардың өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл материалдардың үйлесімі арқылы алынған мембраналар судың тұщытылуы, ауыр металл иондарын, органикалық ластанғыштар мен микростаттарды тиімді бөлу сияқты күрделі міндеттерді шешуге қабілетті.

Жинақталған ғылыми деректер көрсеткендей, MXene мен наноцеллюлоза негізіндегі композитті мембраналар болашақта экологиялық қауіпсіз және тиімді су тазалау жүйелерін дамытуда маңызды орын алуы мүмкін. Бұл бағыттағы зерттеулерді тереңдету мембраналардың ұзақ мерзімді тұрақтылығы мен практикалық қолдану мүмкіндігін кеңейтуге жол ашады.

Алғыс

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің, BR24992814 «Оңтүстік Қазақстан облысының тұрақты дамуы үшін инновациялық технологияларды дамыту және заманауи инфрақұрылым құру» қолдауымен орындалды.

ӘДЕБИЕТТЕР / REFERENCES

1. Abdelhamid, H. N. Nanocellulose-based materials for water pollutant removal: A review // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – Vol. 25(15). – P. 8529. <https://doi.org/10.3390/ijms25158529>

2. Liu, Y., Liu, H., & Shen, Z. Nanocellulose based filtration membrane in industrial waste water treatment: a review // *Materials*. – 2021. – Vol. 14(18). – P. 5398. <https://doi.org/10.3390/ma14185398>
3. Varghese, R. T., Cherian, R. M., Antony, T., Tharayil, A., Das, H., Kargarzadeh, H., & Thomas, S. A review on the best bioadsorbent membrane-nanocellulose for effective removal of pollutants from aqueous solutions // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. – 2022. – Vol. 3. – P. 100209. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100209>
4. Huang, L., Ding, L., Caro, J., & Wang, H. MXene-based membranes for drinking water production // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2023. <https://doi.org/10.1002/anie.202311138>
5. AlHadithy, Z.E., AbdulRazak, A.A., Al-Ghaban, A.M.H.A. et al. Advancements in Water Treatment with MXene-Enhanced Membranes: A Review of Current Progress and Future Directions // *Water Air Soil Pollut.* – 2024. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07628-x>
6. Sun, Y., Lu, J., Li, S., Dai, C., Zou, D., & Jing, W. MXene-based membranes in water treatment: Current status and future prospects // *Separation and Purification Technology*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125640>
7. Zubair, M., Yasir, M., Ponnammam, D., Mazhar, H., Sedlarik, V., Hawari, A. H., ... & Al-Ejji, M. Recent advances in nanocellulose-based two-dimensional nanostructured membranes for sustainable water purification: A review. // *Carbohydrate Polymers*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121775>
8. Iqbal, D., Zhao, Y., Zhao, R., Russell, S. J., & Ning, X. A review on nanocellulose and superhydrophobic features for advanced water treatment // *Polymers*. – 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14122343>
9. Al-Hamadani, Y. A., Jun, B. M., Yoon, M., Taheri-Qazvini, N., Snyder, S. A., Jang, M., ... & Yoon, Y. Applications of MXene-based membranes in water purification: A review // *Chemosphere*. – 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126821>
10. Hong, S., Al Marzooqi, F., El-Demellawi, J. K., Al Marzooqi, N., Arafat, H. A., & Alshareef, H. N. Ion-selective separation using MXene-based membranes: a review // *ACS Materials Letters*. – 2023. – Vol. 5(2). – P. 341–356. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.2c00914>
11. Meskher, H., Thakur, A., Hazra, S. K., Ahamed, M. S., Saleque, A. M., Alsahly, Q. F., ... & Lynch, I. Recent advances in applications of MXenes for desalination, water purification and as an antibacterial: a review // *Environmental Science: Nano*. – 2025. <https://doi.org/10.1039/D4EN00427B>
12. Liu, J., Zhao, Z., Xu, R., Wang, Y., Wang, X., & Tan, F. Sulfhydryl functionalized two-dimensional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene for efficient removal of Hg^{2+} in water samples // *Journal of Hazardous Materials*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135205>
13. Daulbayev, C., Nursharip, A., Tauanov, Z., Busquets, R., & Baimenov, A. Mechanisms of mercury removal from water with highly efficient MXene and silver-modified polyethyleneimine cryogel composite filters // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2024. <http://dx.doi.org/10.1007/s42114-024-00945-z>
14. Wang, X., Wang, R., Xu, Y., & Wei, G. Recent advances in biohybrid membranes for water treatment: Preparation strategies, nano-hybridization, bioinspired functionalization, applications, and sustainability analysis // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2025. <https://doi.org/10.1039/D5TA04214C>
15. Vo, T.S., Lwin, K.M. & Kim, K. Recent developments of nano-enhanced composite membranes designed for water/wastewater purification – a review // *Adv. Compos. Hybrid Mater.* – 2024. – Vol. 7. – P. 127. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-00923-5>
16. Tiwary, S.K., Singh, M., Chavan, S.V. et al. Graphene oxide-based membranes for water desalination and purification // *npj 2D Mater. Appl.* – 2024. – Vol. 8. – P. 27. <https://doi.org/10.1038/s41699-024-00462-z>
17. Santhamoorthy, M., Asaithambi, P., Perumal, I., Elangovan, N., Natarajan, P., Lin, M. C. & Phan, T. T. V. A comprehensive review of the functionalized polymer composite membranes in wastewater treatment // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2025. – Vol. 13(5). – P. 117735. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2025.117735>
18. J. Jimmy and B. Kandasubramanian, Mxene functionalized polymer composites: Synthesis and applications // *Eur Polym J*. – 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109367>
19. R. Ohno, K. Shudo, T. Tano, and K. Kakinuma, Development of Polymer Composite Membranes with Hydrophilic TiO_2 Nanoparticles and Perfluorosulfonic Acid-Based Electrolyte for Polymer Electrolyte Fuel Cells Operating over a Wide Temperature Range // *ACS Appl Energy Mater.* – 2023. <https://doi.org/10.1021/acsaem.3c01721>
20. Liu, S., Han, X., Hua, J., Zhang, Y., Gao, Y., Daigger, G. T. & Song, G. Graphene oxide-based composite membranes: Antifouling mechanisms, functionalization strategies, and applications in refractory wastewater treatment // *Separation and Purification Technology*. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134416>
21. Choi, Jong Soo, et al. A review of metal–organic framework-based membranes for the removal of emerging contaminants from water // *Journal of Water Process Engineering*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106456>
22. Liu, R., Sui, Y., & Wang, X. Metal–organic framework-based ultrafiltration membrane separation with capacitive-type for enhanced phosphate removal // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.136>
23. Motshekga, S.C., Oyewo, O.A. & Makgato, S.S. Recent and Prospects of Synthesis and Application of Metal–Organic Frameworks (MOFs) in Water Treatment: A Review // *J Inorg Organomet Polym.* – 2024. <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03063-x>
24. R. Pathak, M. Punetha, S. Bhatt, S. A. Pillai, P. S. Dhapola, and V. D. Punetha, Organic and inorganic nanofillers for polymer nanocomposites // *Advances in Functionalized Polymer Nanocomposites*. – Elsevier. – 2024. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18860-2.00003-7>
25. S. Xue et al. Nanostructured Graphene Oxide Composite Membranes with Ultraperviousness and Mechanical Robustness. – 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b03780>
26. Razmjou, A., Asadnia, M., Hosseini, E. et al. Design principles of ion selective nanostructured membranes for the extraction of lithium ions // *Nat Commun.* – 2019. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13648-7>
27. Oviroh, P. O., Jen, T. C., Ren, J., Mohlala, L. M., Warmbier, R., & Karimzadeh, S. Nanoporous MoS_2

- membrane for water desalination: a molecular dynamics study // *Langmuir*. – 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00708>
28. Henmi, M., Nakatsuji, K., Ichikawa, T., Tomioka, H., Sakamoto, T., Yoshio, M., & Kato, T. Self-organized liquid-crystalline nanostructured membranes for water treatment: selective permeation of ions // *Advanced Materials*. – 2012. <https://doi.org/10.1002/adma.201200108>
 29. H. Oh et al. Approaching Ideal Selectivity with Bioinspired and Biomimetic Membranes // *ACS Nano*. – 2025, <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c09699>
 30. Friess K, Izák P, Kárászová M, Pasichnyk M, Lanč M, Nikolaeva D, Luis P, Jansen JC. A Review on Ionic Liquid Gas Separation Membranes // *Membranes*. – 2021; <https://doi.org/10.3390/membranes11020097>
 31. R. F. M. Elshaarawy, R. M. Abd El-Aal, F. H. A. Mustafa, A. E. Borai, S. Schmidt, and C. Janiak, Dual ionic liquid-based crosslinked chitosan for fine-tuning of antifouling, water throughput, and denitrification performance of polysulfone membrane // *Int J Biol Macromol*. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.186>
 32. Radu, E.R.; Voicu, S.I.; Thakur, V.K. Polymeric Membranes for Biomedical Applications // *Polymers*. – 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15030619>
 33. Karki, S., Hazarika, G., Yadav, D., & Ingole, P. G. Polymeric membranes for industrial applications: Recent progress, challenges and perspectives // *Desalination*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117200>
 34. Hazarika, B., Ahmaruzzaman, M., Santosh, M. S., Barceló, D., & Rtimi, S. Advances in polymer-based nanocomposite membranes for water remediation: Preparation methods, critical issues and mechanisms // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111401>
 35. Y. A. Ghodke, N. Mayilswamy, and B. Kandasubramanian, Polyamide (PA)- and Polyimide (PI)- based membranes for desalination application // *Polymer Bulletin*. – 2023. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04559-7>
 36. N. Li et al. MXene-PANI/PES composite ultrafiltration membranes with conductive properties for anti-fouling and dye removal // *J Memb Sci*. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121271>
 37. R. Wu, Y. Tan, F. Meng, Y. Zhang, and Y.-X. Huang, PVDF/MAF-4 composite membrane for high flux and scaling-resistant membrane distillation // *Desalination*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116013>
 38. H. Zhao, D. Zhang, H. Sun, Y. Zhao, and M. Xie, Adsorption and detection of heavy metals from aqueous water by PVDF/ATP-CDs composite membrane // *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128573>
 39. A. Spoială et al., Preparation and Characterization of Chitosan/TiO₂ Composite Membranes as Adsorbent Materials for Water Purification // *Membranes (Basel)*. – 2022. <https://doi.org/10.3390/membranes12080804>
 40. T. F. Ajibade, H. Tian, K. Hassan Lasisi, Q. Xue, W. Yao, and K. Zhang, Multifunctional PAN UF membrane modified with 3D-MXene/O-MWCNT nanostructures for the removal of complex oil and dyes from industrial wastewater // *Sep Purif Technol*. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119135>
 41. Z.Liu et al., Electrospun PVDF/PAN membrane for pressure sensor and sodium-ion battery separator // *Adv Compos Hybrid Mater*. – 2021. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00364-4>
 42. M. Barrejón and M. Prato, Carbon Nanotube Membranes in Water Treatment Applications // *Adv Mater Interfaces*. – 2022. <https://doi.org/10.1002/admi.202101260>
 43. Z. Jin, Q. Chen, Y. Shen, X. Chen, M. Qiu, and Y. Fan, Construction of TiO₂-ZrO₂ composite nanofiltration membranes for efficient selective separation of dyes and salts // *Sep Purif Technol*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128127>
 44. Long W., Chen Z., Shi J., Yang S. Efficient Removal of Cr(VI) Ions in Petrochemical Wastewater Using Fe₃O₄@Saccharomyces cerevisiae Magnetic Nanocomposite // *Nanomaterials*. – 2022. <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/18/3250>
 45. Li H., Hua J., Li R., Zhang Y., Jin H., Wang S., Chen G. Application of Magnetic Nanocomposites: Core-Shell Fe₃O₄ Material for Efficient Adsorption of Cr(VI) // *Water*. – 2023. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/15/2827>
 46. Zhou W., Wang Y., Zhang J., Zhang Y., et al. Xanthate-Modified Magnetic Fe₃O₄@SiO₂-Based Polyvinyl Alcohol/Chitosan Composite Material for Efficient Removal of Heavy Metal Ions from Water // *Polymers*. – 2022. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/6/1107>
 47. R. Mahdavi Far, B. Van der Bruggen, A. Verliefde, and E. Cornelissen, A review of zeolite materials used in membranes for water purification: history, applications, challenges and future trends // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. – 2022. <https://doi.org/10.1002/jctb.6963>
 48. Z.-K. Tan, J.-L. Gong, S.-Y. Fang, J. Li, W.-C. Cao, and Z.-P. Chen, Outstanding anti-bacterial thin-film composite membrane prepared by incorporating silver-based metal-organic framework (Ag- MOF) for water treatment // *Appl Surf Sci*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153059>
 49. Jasim, H. K., Al-Ridah, Z. A., & Naje, A. S. Graphene oxide-carbon nanotube composite membrane for enhanced removal of organic pollutants by forward osmosis // *Desalination and Water Treatment*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100363>
 50. Kirk, C. H., Wang, P., Chong, C. Y. D., Zhao, Q., Sun, J., & Wang, J. TiO₂ photocatalytic ceramic membranes for water and wastewater treatment: Technical readiness and pathway ahead // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.09.05>
 51. Kumari, S., Chowdhry, J., Kumar, M., & Garg, M. C. Zeolites in wastewater treatment: A comprehensive review on scientometric analysis, adsorption mechanisms, and future prospects // *Environmental Research*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119782>
 52. Ajith, S., Almomani, F., & Qiblawey, H. Emerging 2D MXene-based polymeric membranes for water treatment and desalination // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112078>
 53. Rodrigues, A. S., Batista, J. G., Rodrigues, M. Á., Thipe, V. C., Minarini, L. A., Lopes, P. S., & Lugão, A. B. Advances in silver nanoparticles: a comprehensive review on their potential as antimicrobial agents and their mechanisms of action elucidated by proteomics // *Frontiers in Microbiology*. – 2024. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440065>

54. Chamam, B., Ben Dassi, R., Abderraouf, J., Mericq, J. P., Faur, C., Trabelsi, I., ... & Heran, M. Incorporation of Ag-ZnO Nanoparticles into PVDF Membrane Formulation to Enhance Dye Retention, Permeability, and Antibacterial Properties // *Polymers*. – 2025. <https://doi.org/10.3390/polym17091269>
55. Xu, T., Qu, R., Zhang, Y., Sun, C., Wang, Y., Kong, X & Ji, C. Amino-Thiol Bifunctional Polysilsesquioxane/Carbon Nanotubes Magnetic Composites as Adsorbents for Hg (II) Removal // *Frontiers in Environmental Chemistry*. – 2021. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2021.706254>
56. V. P. Kothavale et al., Carboxyl and thiol-functionalized magnetic nanoadsorbents for efficient and simultaneous removal of Pb(II), Cd(II), and Ni(II) heavy metal ions from aqueous solutions: Studies of adsorption, kinetics, and isotherms // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.111089>
57. S. M. Waly, A. M. El-Wakil, W. M. A. El-Maaty, and F. S. Awad, Efficient removal of Pb(II) and Hg(II) ions from aqueous solution by amine and thiol modified activated carbon // *Journal of Saudi Chemical Society*. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101296>
58. Y. Zhang et al. Research progress of adsorption and removal of heavy metals by chitosan and its derivatives: A review // *Chemosphere*. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130927>
59. Z. Shen et al., Fabrication of a Novel Antifouling Polysulfone Membrane with in Situ Embedment of MXene Nanosheets // *Int J Environ Res Public Health*. – 2019. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234659>
60. Azam, R. S., Almasri, D. A., Alfahel, R., Hawari, A. H., Hassan, M. K., Elzatahry, A. A., & Mahmoud, K. A. MXene (Ti₃C₂T_x)/cellulose acetate mixed-matrix membrane enhances fouling resistance and rejection in the crossflow filtration process // *Membranes*. – 2022. <https://doi.org/10.3390/membranes12040406>
61. Pandey, R. P., Rasheed, P. A., Gomez, T., Azam, R. S., & Mahmoud, K. A. A fouling-resistant mixed-matrix nanofiltration membrane based on covalently cross-linked Ti₃C₂T_x (MXene)/cellulose acetate. *Journal of Membrane Science*. – 2020. – Vol. 607. – P. 118139. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118139>
62. I. Ounifi et al., Antifouling Membranes Based on Cellulose Acetate (CA) Blended with Poly(acrylic acid) for Heavy Metal Remediation // *Applied Sciences*. – 2021. <https://doi.org/10.3390/app11104354>
63. Karim, Z., Mathew, A. P., Kokol, V., Wei, J., & Grahm, M. High-flux affinity membranes based on cellulose nanocomposites for removal of heavy metal ions from industrial effluents // *RSC Advances*. – 2016. <https://doi.org/10.1039/C5RA27059F>
64. P. Kallem, N. Elashwah, G. Bharath, H. M. Hegab, S. W. Hasan, and F. Banat, Zwitterion-Grafted 2D MXene (Ti₃C₂T_x) Nanocomposite Membranes with Improved Water Permeability and Self- Cleaning Properties // *ACS Appl Nano Mater*. – 2023. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c04722>
65. L. Qian et al., Conductive MXene ultrafiltration membrane for improved antifouling ability and water quality under electrochemical assistance // *RSC Adv*. – 2023. <https://doi.org/10.1039/D3RA01116J>
66. Chai, P. V., Mahmoudi, E., Teow, Y. H., & Mohammad, A. W. Preparation of novel polysulfone-Fe₃O₄/GO mixed-matrix membrane for humic acid rejection // *Journal of Water Process Engineering*. – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.06.001>
67. A. Zahid et al., Enabling improved PSF nanocomposite membrane for wastewater treatment with selective nanotubular morphology of PANI/ZnO // *Mater Adv*. – 2024. <https://doi.org/10.1039/D4MA00859F>
68. A. A. Alotaibi, A. K. Shukla, M. H. Mrad, A. M. Alswieleh, and K. M. Alotaibi, Fabrication of Polysulfone-Surface Functionalized Mesoporous Silica Nanocomposite Membranes for Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater // *Membranes (Basel)*. – 2021. <https://doi.org/10.3390/membranes11120935>
69. Wang, Y., Xu, H., Ding, M., Zhang, L., Chen, G., Fu, J., Wang, A., Chen, J., Liu, B., Yang, W. MXene-regulation polyamide membrane featuring bubble-like nodule for efficient dye/salt separation and antifouling performance // *RSC Advances*. – 2022. <https://doi.org/10.1039/D2RA00335J>
70. Qian, L., Yuan, C., Wang, X., Zhang, H., Du, L., Wei, G., Chen, S. Conductive MXene ultrafiltration membrane for improved antifouling ability and water quality under electrochemical assistance // *RSC Advances*. – 2023. <https://doi.org/10.1039/D3RA01116J>
71. Usman, J., Yogarathinam, L. T., Baig, N., Abba, S. I., Chrystie, R., & Aljundi, I. H. MXene-enhanced sulfonated TFN nanofiltration membranes for improved desalination performance // *Desalination*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117566>
72. Ganji, N., Reardon-Lochbaum, C. A., Ambade, S. B., Anastasia, C. M., Eckhert, P. M., Rosenzweig, Z. & Fairbrother, D. H. Stability of Ti₃C₂T_x MXenes in engineered environments // *Environmental Science: Nano*. – 2024. <https://doi.org/10.1039/D3EN00438D>
73. Xue, Q., & Zhang, K. The preparation of high-performance and stable MXene nanofiltration membranes with MXene embedded in the organic phase // *Membranes*. – 2021. <https://doi.org/10.3390/membranes12010002>
74. Zhang, Y., Li, S., Huang, R., He, J., Sun, Y., Qin, Y., & Shen, L. Stabilizing MXene-based nanofiltration membrane by forming analogous semi-interpenetrating network architecture using flexible poly (acrylic acid) for effective wastewater treatment // *Journal of Membrane Science*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120360>
75. Solhi, L., Guccini, V., Heise, K., Solala, I., Niinivaara, E., Xu, W., ... & Kontturi, E. Understanding nanocellulose-water interactions: turning a detriment into an asset // *Chemical reviews*. – 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c0061>
76. Jaffar, S.S.; Saallah, S.; Misson, M.; Siddiquee, S.; Roslan, J.; Saalah, S.; Lenggoro, W. Recent Development and Environmental Applications of Nanocellulose-Based Membranes // *Membranes*. – 2022. <https://doi.org/10.3390/membranes12030287>
77. Mbisana, M., Keroletswe, N., Naretsile, F. et al. Nanocellulose composites: synthesis, properties, and applications to wastewater treatment // *Cellulose* 31. – 2024. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06268-y>
78. Z. Dai, V. Ottesen, J. Deng, R. M. L. Helberg, and L. Deng, A Brief Review of Nanocellulose Based Hybrid Membranes for CO₂ // *Separation*. – 2019. <https://doi.org/10.3390/fib7050040>
79. Xu, T., Song, Q., Liu, K. et al. Nanocellulose-Assisted Construction of Multifunctional MXene-Based Aerogels

- with Engineering Biomimetic Texture for Pressure Sensor and Compressible Electrode // *Nano-Micro Lett.* – 2023. <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01073-x>
80. Qin, Z., Chen, X., Lv, Y., Zhao, B., Fang, X., & Pan, K. Wearable and high-performance piezoresistive sensor based on nanofiber/sodium alginate synergistically enhanced MXene composite aerogel // *Chemical Engineering Journal.* – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138586>
 81. Sun, Z., Ahmad, M., Gao, Z., Shan, Z., Xu, L., Wang, S., & Jin, Y. Highly ionic conductive and mechanically strong MXene/CNF membranes for osmotic energy conversion // *Sustainable Energy & Fuels.* – 2022. <https://doi.org/10.1039/D1SE01729B>
 82. Xin, W., Xi, G. Q., Cao, W. T., Ma, C., Liu, T., Ma, M. G., & Bian, J. Lightweight and flexible MXene/CNF/silver composite membranes with a brick-like structure and high-performance electromagnetic-interference shielding // *RSC advances.* – 2019. <https://doi.org/10.1039/C9RA06399D>
 83. Chen, R., Tang, H., Dai, Y., Zong, W., Zhang, W., He, G., & Wang, X. Robust bioinspired MXene–hemicellulose composite films with excellent electrical conductivity for multifunctional electrode applications // *ACS nano.* – 2022. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c08163>
 84. Chang, L., Peng, Z., Zhang, T., Yu, C., & Zhong, W. Nacre-inspired composite films with high mechanical strength constructed from MXenes and wood-inspired hydrothermal cellulose-based nanofibers for high performance flexible supercapacitors // *Nanoscale.* – 2021. <https://doi.org/10.1039/D0NR08090J>
 85. Yuan T, Zhang Z, Liu Q, Liu X.T, Miao Y.N, Yao C.L. MXene (Ti₃C₂T_x)/cellulose nanofiber/polyaniline film as a highly conductive and flexible electrode material for supercapacitors // *Carbohydr Polym.* – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120519>
 86. Liu, Z. S., Liu, J., Dai, Y., Li, X. F., Yu, Z. Z., & Zhang, H. B. Bioinspired ultrathin mxene/cnc composite film for electromagnetic interference shielding // *J. Inorg. Mater.* – 2020. <https://doi.org/10.15541/jim20190148>
 87. M. Xia et al., Bio-inspired high-strength supramolecular fiber membrane by ice-dissolving-regeneration for achieving self-healing, self-cleaning and water purification // *Chemical Engineering Journal.* – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150023>
 88. E. Pantuso et al., Smart dynamic hybrid membranes with self-cleaning capability // *Nature Communications.* – 2023. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41446-9>
 89. D. G. Oldal, F. Topuz, T. Holtzl, and G. Szekely, Green Electrospinning of Biodegradable Cellulose Acetate Nanofibrous Membranes with Tunable Porosity // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering.* – 2023. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05676>
 90. H. Wang et al., Organic molecular sieve membranes for chemical separations // *Chemical Society Reviews.* – 2021. <https://doi.org/10.1039/D0CS01347A>
 91. M. Shahbabaee and T. Tang, Molecular modeling of thin-film nanocomposite membranes for reverse osmosis water desalination // *PCCP.* – 2022. <https://doi.org/10.1039/D2CP03839K>
 92. M. B. Asif and Z. Zhang, Ceramic membrane technology for water and wastewater treatment // *Chemical Engineering Journal,* – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129481>
 93. M. Issaoui et al., Membrane technology for sustainable water resources management: Challenges and future projections // *Sustainable Chemistry and Pharmacy.* – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100590>
 94. Lin, H., Wu, M., Zhao, Z., Zhang, F., Zhou, C., Yang, D., ... & Liang, L. Design of High-Performance MXene-Based 2D Membranes for Desalination via Machine Learning and Hybrid Optimization Algorithms // *ACS Applied Materials & Interfaces.* – 2025. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c11202>
 95. S. Tang et al., Nacre-inspired biodegradable nanocellulose/MXene/AgNPs films // *Carbohydrate Polymers.* – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120204>
 96. Xu, Z., Zhu, B., Liu, X., Lan, T., Huang, Y., Zhang, Y., & Wu, D. High-performance electroionic artificial muscles boosted by superior ion transport with Ti₃C₂T_x MXene/Cellulose nanocomposites for advanced 3D-motion actuation // *Chemical Engineering Journal.* – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147246>
 97. S. Wang, Z. Sun, M. Ahmad, and M. Miao, Fabrication of porous MXene/cellulose nanofiber composite membranes for osmotic energy harvesting // *IJMS.* – 2024. <https://doi.org/10.3390/ijms252313226>
 98. Ghilan, A., Nicu, R., Ciolacu, D. E., & Ciolacu, F. Insight into the latest medical applications of nanocellulose // *Materials.* – 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16124447>
 99. Talipova, A. B., Buranych, V. V., Savitskaya, I. S., Bondar, O. V., Turlybekuly, A., & Pogrebnjak, A. D. Synthesis, properties, and applications of nanocomposite materials based on bacterial cellulose and MXene // *Polymers.* – 2023. <https://doi.org/10.3390/polym1520406>
 100. Narkkun, T., Kraithong, W., Ruangdit, S., Klaysom, C., Faungnawakij, K., & Itthibenchapong, V. Pebax/modified cellulose nanofiber composite membranes for highly enhanced CO₂/CH₄ separation // *ACS omega.* – 2023. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04800>
 101. Xing, C., Tian, Y., Yu, Z., Li, Z., Meng, B., & Peng, Z. Cellulose nanofiber-reinforced MXene membranes as stable friction layers and effective electrodes for high-performance triboelectric nanogenerators // *ACS Applied Materials & Interfaces.* – 2022. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c10551>
 102. Ahmed, B., Hossain, M. J., Al Parvez, A., Talukder, A., Al-Amin, M., Al Mahmud, M. A., & Islam, T. Recent advancements of MXene/nanocellulose-based hydrogel and aerogel: a review // *Advanced Energy and Sustainability Research.* – 2024. <https://doi.org/10.1002/aesr.202300231>
 103. Zhang, Y., Chen, D., Li, N., Xu, Q., Li, H., He, J., & Lu, J. High-performance and stable two-dimensional MXene-polyethyleneimine composite lamellar membranes for molecular separation // *ACS Applied Materials & Interfaces.* – 2022. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c20540>
 104. Xu, T., Song, Q., Liu, K., Liu, H., Pan, J., Liu, W & Zhang, K. Nanocellulose-assisted construction of multifunctional MXene-based aerogels with engineering biomimetic texture for pressure sensor and compressible electrode // *Nano-Micro Letters.* – 2023. <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01073-x>

КОМПОЗИТНЫЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ МХене И НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ:
СВОЙСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ В ОЧИСТКЕ ВОДЫ

А. Т. Табынбаева¹, А. Р. Сатаева¹, Н. А. Ахметов², К. Т. Тастамбек^{1,2}, Ж. Т. Тауанов^{1,2*}

¹ «Казахский национальный университет им. Аль-Фараби», Алматы, Казахстан

² «Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави», Туркестан, Казахстан

* E-mail для контактов: tauanov.zhandos@kaznu.kz

В настоящее время нехватка водных ресурсов и снижение их качества являются одной из важнейших экологических и социальных проблем. В результате промышленного производства, сельского хозяйства и бытовой деятельности реки, озера и подземные воды загрязняются тяжелыми металлами, органическими красителями, фармацевтическими остатками, микропластиком и патогенными микроорганизмами. Это приводит к разрушению экосистем, нанесению вреда биоте и увеличению риска для здоровья человека. Традиционные методы очистки воды – отстаивание, хлорирование, адсорбция, использование ионообменных смол – эффективны лишь частично и не способны полностью удалять загрязнители при сложном составе или высокой концентрации. В связи с этим мембранные технологии рассматриваются как перспективное направление, позволяющее эффективно разделять воду на молекулярном уровне, потреблять меньше энергии и обеспечивать экологическую безопасность.

В последние годы особый интерес вызывают композитные мембраны на основе МХене и наноцеллюлозы. МХене – это двухмерные карбиды и нитриды, получаемые из фаз МАХ, обладающие слоистой структурой, высокой электропроводностью, гидрофильностью и функциональными поверхностными группами, что повышает проводимость мембран и эффективность разделения ионов и адсорбции органических загрязнителей. Наноцеллюлоза является биологически разлагаемым наноматериалом, обеспечивающим механическую прочность, стабильность и биосовместимость мембраны, а также повышающим селективность и антифулинговые свойства.

Комбинация МХене и наноцеллюлозы демонстрирует синергетический эффект: наноцеллюлоза предотвращает агрегацию слоев МХене, а прочные межфазные взаимодействия защищают мембрану от дефектов. Это позволяет эффективно удалять соли, тяжелые металлы, органические красители, фармацевтические остатки и микропластик. Кроме того, слоистая структура композита и функциональные группы обеспечивают долгосрочную стабильность и высокую производительность.

В статье подробно рассматриваются свойства МХене и наноцеллюлозы, методы получения композитных мембран, их структурные характеристики и перспективы применения в очистке воды. Исследование демонстрирует потенциал новых поколений мембранных технологий как экологически безопасных, высокоэффективных и стабильных материалов, что имеет важное научное и практическое значение для эффективной очистки воды и долгосрочной стабильности систем.

Ключевые слова: МХене, наноцеллюлоза, селективность, композитная мембрана, тяжелые металлы, очистка воды.

COMPOSITE MEMBRANES BASED ON MXene AND NANOCELLULOSE:
PROPERTIES AND WATER PURIFICATION EFFICIENCY

A. T. Tabynbayeva¹, A. R. Satayeva¹, N. A. Akhmetov², K. T. Tastambek^{1,2}, Zh. T. Tauanov^{1,2*}

¹ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

² *Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*

** E-mail for contacts: tauanov.zhandos@kaznu.kz*

The scarcity of water resources and the deterioration of water quality have become critical environmental and social challenges. Rivers, lakes, and groundwater are increasingly contaminated due to industrial, agricultural, and domestic activities, with pollutants including heavy metals, organic dyes, pharmaceutical residues, microplastics, and pathogenic microorganisms. Such contamination disrupts ecosystems, threatens biota, and poses risks to human health. Conventional water treatment methods, such as sedimentation, chlorination, adsorption, and ion-exchange resins, are often insufficient for the complete removal of complex or highly concentrated pollutants. Consequently, membrane-based technologies have emerged as a promising approach, offering molecular-level separation, low energy consumption, and environmentally safe operation.

Recently, composite membranes based on MXene and nanocellulose have attracted significant attention. MXenes, two-dimensional carbides and nitrides derived from MAX phases, possess a layered structure, high electrical conductivity, hydrophilicity, and functional surface groups, enhancing ion separation efficiency and adsorption of organic contaminants. Nanocellulose, a biodegradable nanomaterial, improves the mechanical strength, stability, and biocompatibility of membranes, while also increasing selectivity and antifouling performance.

The combination of MXene and nanocellulose exhibits a synergistic effect: nanocellulose prevents aggregation of MXene layers, and strong interfacial interactions protect membranes from defects. This synergy enables efficient removal of salts, heavy metals, organic dyes, pharmaceutical residues, and microplastics, while the layered structure and functional groups ensure long-term stability and high performance.

This review highlights the properties of MXene and nanocellulose, methods for fabricating composite membranes, their structural characteristics, and potential applications in water purification. The study underscores the potential of next-generation membrane technologies as environmentally safe, highly efficient, and durable solutions for sustainable water treatment, demonstrating both scientific significance and practical relevance.

Keywords: *MXene, nanocellulose, selectivity, heavy metals, composite membrane, water purification.*