

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Қ.Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты

Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы

Карыбекова Асем Мейрамбековна

**Биоыдырайтын полимерді синтездеу және олардың физика-химиялық
қасиеттерін зерттеу**

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B07125 - Органикалық заттардың химиялық технологиясы

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Қ.Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты

Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ХЖБИ кафедра меңгерушісі
Хим. ғыл. канд., қауым. проф.
_____ Р.А. Мангазбаевна
«_____» _____ 2025 ж.

Дипломдық жұмыс

Тақырыбы: «Биоыдырайтын полимерді синтездеу және олардың физика-
химиялық қасиеттерін зерттеу»

6B07125 - Органикалық заттардың химиялық технологиясы

Орындаған

Карыбекова Асем Мейрамбековна

Рецензент:

Ғылыми жетекшісі:

PhD, қауым. проф.

PhD, қауым. проф.

_____ Тоштай Қайнаубек

_____ Нақан Ұлантай

«_____» _____ 2025 ж.

«_____» _____ 2025ж.

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Қ.Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты

Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы

6B07110 - Химиялық және биохимиялық инженерия

БЕКІТЕМІН

ХжБИ кафедра меңгерушісі
Хим. ғыл. канд., қауым. проф
_____ Р.А. Мангазбаева
« ____ » _____ 2025 ж.

Дипломдық жұмысты орындауға арналған

ТАПСЫРМА

Білім алушы Карыбекова Асем Мейрамбековна

Тақырыбы: «Биоыдырайтын полимерді синтездеу және олардың физика-
химиялық қасиеттерін зерттеу»

Университеттің академиялық жұмыс жөніндегі проректордың 2025 жылғы
«29 қаңтардағы» № 26-П/Ө бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі « ____ » _____ 20 ____ ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері: Қамыстан алынған целлюлозаны
синтездеу және қасиеттерін зерттеу

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

- а) Әдеби шолу;
- ә) Тәжірибелік бөлімі;
- б) Табиғи шикізат ретінде алынған қамыстан целлюлозаны синтездеу;
- в) Зерттеудің физикалық, химиялық әдістері;
- г) Зерттеу нәтижелерін талдау және талқылау;
- д) Пайдаланылған әдебиеттер

Сызба материалдардың тізімі: Нанокристал целлюлозаның сканерлеуші
электронды микроскоптағы микросуреті, ИҚ спектроскопиясы..

Дипломдық жұмысты дайындау

КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Әдебиеттік шолу		орындалды
Қамыстан экстракциялау арқылы целлюлозаны алу.		орындалды
Синтезделген целлюлозаны наноцеллюлозаға дейін айналдыру		орындалды
Олардың физ-химиялық қасиеттерін зерттеу.		орындалды

Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жобаға қойған қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер, аты, әкесінің аты, тегі (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Әдебиеттік шолу	Ph.D, ассоц. проф. Нақан Ұлантай		
Тәжірбелік бөлім: қамыстан экстракциялау арқылы целлюлозаны ал.	Ph.D, ассоц. проф. Нақан Ұлантай		
Жұмыс нәтижелерін талдау	Ph.D, ассоц. проф. Нақан Ұлантай		
Қорғауға жіберілетін презентация дайындау	Ph.D, ассоц. проф. Нақан Ұлантай		
Норматив сәйкестігін тексерту	Ph.D, ассоц. проф. Нақан Ұлантай		

Ғылыми жетекші

Тапсырманы орындауға алған білім алушы

Нақан Ұлантай

Карыбекова А.М

Күні _____

АНДАТПА

Жұмыста: 34 бет, 8 сурет, 2 кесте, 21 қолданылған әдебиеттер.

Кілт сөздер: Наноцеллюлоза, нанокристалды целлюлоза, полимерлер, биополимерлер.

Жұмыстың мақсаты: Табиғи шикізат ретінде пайдаланылатын қамыстан нанокристалды целлюлозаны синтездеу және оған сипаттама беру.

Қолданылған әдістер мен аппаратуралар: сканерлеуші электронды микроскоп (SEM; «JSM-6390LV»; JEOL, Japan), аналитикалық таразы (Sartorius, Германия), инфрақызыл спектроскопия қолданылды.

Жұмыстың нәтижелері: Табиғи шикізат ретінде пайдаланылатын қамыстан нанокристалды целлюлоза синтезделініп алынды. Синтезделген нанокристалды целлюлозаға сипаттама беру үшін сканерлеуші электронды микроскоп, инфрақызыл спектроскопия аппараттары арқылы алынған нәтижелермен зерттелінді.

АННОТАЦИЯ

Работа: 34 страниц, 8 рисунков, 2 Таблица, 21 использованных литератур.

Ключевые слова: Наноцеллюлоза, нанокристаллическая целлюлоза, гидрогель, полимеры, биополимеры.

Цель работы: синтез и характеристика нанокристаллической целлюлозы из тростника, используемой в качестве природного сырья.

Используемые методы и оборудование: сканирующий электронный микроскоп (SEM; «JSM-6390LV»; JEOL, Japan), аналитические весы (Sartorius, Германия), инфракрасная спектроскопия.

Результаты: Из тростника, используемого в качестве природного сырья, синтезирована нанокристаллическая целлюлоза. Для характеристики синтезированной нанокристаллической целлюлозы были изучены результаты, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, аппарата инфракрасной спектроскопии

ESSAY

The work contains: 34 pages, 8 figures, 2 Table, 21 references.

Keywords: Nanocellulose, nanocrystalline cellulose, hydrogel, polymers, biopolymers.

The purpose of the work: The purpose of the work: synthesis and characterization of nanocrystalline cellulose from reed used as a natural raw material.

Methods and equipment used: scanning electron microscope (SEM; "JSM-6390LV"; JEOL, Japan), analytical balance (Sartorius, Germany), infrared spectroscopy.

Results: Nanocrystalline cellulose has been synthesized from reed used as a natural raw material. To characterize the synthesized nanocrystalline cellulose, the results obtained using a scanning electron microscope and an infrared spectroscopy apparatus were studied.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Әдебиеттік шолу	10
1.1. Биодырайтын суда еритін полимерлер	10
1.2 Биодырайтын табиғи полимерлер	14
1.3 Биологиялық ыдырайтын полимерлердің артықшылықтары	19
1.4 Табиғи полимерлер негізіндегі биодырайтын полимер материалдар	19
1.5 Қамыстан наноцеллюлоза алу маңыздылығы	22
1.6 Биодырайтын пластиктың мүмкіндіктері	25
2 Тәжірибелік бөлім	26
2.1 Процесстің сипаттамасы	26
2.2 Шикі қамыстан экстракциялау арқылы целлюлозаның алынуы	26
2.3 Зерттеулердің физика-химиялық әдістері	27
3 Зерттеу нәтижелері және оларды талдау	28
3.1 Қамыс және экстракциялау арқылы алынған целлюлозаның физика-химиялық қасиеттерін салыстыра зерттеу	28
Қорытынды	32
Қолданылған әдебиеттер тізімі	33

КІРІСПЕ

Мәселенің өзектілігі: Қазіргі уақытта полимерлік материалдардың қоршаған ортаға тигізетін кері әсерін азайтуға бағытталған ғылыми зерттеулерге ерекше көңіл бөлінуде. Осыған байланысты жаңартылатын табиғи шикізат негізінде экологиялық таза полимерлер алу және биополимерлік материалдардың жаңа буынын жасау — заман талабы мен ғылыми-техникалық прогрестің маңызды бағыты болып табылады.

Наноцеллюлоза — жоғары технологиялық сипаттамаларға ие, көптеген салаларда қолдану әлеуеті зор биоматериал. Табиғи өсімдік ресурстары целлюлозаның мол көзі болғанымен, соңғы жылдары оның туындыларына деген сұраныстың артуы бұл қажеттілікті толық қамтамасыз етуге мүмкіндік бермей отыр. Осы тұрғыдан алғанда, целлюлозалық материалдарға деген сұранысты өтеу үшін жергілікті және қолжетімді шикізатты тиімді пайдалану — ғылыми және экономикалық тұрғыдан өзекті міндеттердің бірі.

Жобаның мақсаты: Табиғи шикізаттан (қамыстан) экстракциялау арқылы целлюлоза алу. Алынған целлюлозаны нанокристалды целлюлозаға дейін түрлендіру. Олардың физика-химиялық қасиеттерін салыстыра зерттеу.

Түйінді сөздер: Қамыс, целлюлоз; наноцеллюлоза; экстракциялау процесі.

Зерттеу нысандары: Қамыс, целлюлоза; целлюлоза талшығы, наноцеллюлоза.

Зерттеу әдістері: сканерлеуші электронды микроскоп (SEM; «JSM-6390LV»; JEOL, Japan), аналитикалық таразы (Sartorius, Германия), инфрақызыл спектроскопия қолданылды.

Алынған нәтижелер мен олардың практикалық маңыздылығы: Қамыстан нанокристалды целлюлоза экстракциялау процесі арқылы алынып, ағартқыш ұнтақпен ағартылып, диализ процесі арқылы тазартылып алынды.

Алынған қамыс целлюлозасын тотықтыру (қышқылдық) процесі арқылы нанокристаллцеллюлозаға дайын модификацияланды.

Синтезделген және түрлендірілген целлюлозаның физика-химиялық қасиеттері салыстыра зерттелді.

Автордың жеке үлесі: Тәжірибелік бөлімдерді орындап, алынған мәліметтерді тұжырымдап, талқылауға қатысқан.

1 Әдебиеттік шолу

1.1. Биодырайтын суда еритін полимерлер

Полимерлердің биодырауы – бұл материалдың бактериялар, саңырауқұлақтар, ультракүлгін сәулелер, жарық пен күн сәулесінің табиғи әсерінен толықтай ыдырау қабілеті. Бұл ыдырау қалдықсыз және экологиялық таза ортада жүреді. Биополимерлерді жасау негізгі идеясы – табиғи процестерді көрсететін әдістер арқылы табиғи циклдерді имитациялау. Мұндай биополимерлер фотосинтез кезінде өсімдіктер шығаратын компоненттерден тұратын қайта жаңартылатын шикізаттан алынады. Кейбір биополимерлер тыңайтқыш ретінде қолданыла отырып, микроорганизмдер мен ферменттердің көмегімен суды және көмірқышқыл газын табиғи жағдайда түрлендіруге ықпал етеді.

Биодеградация – бұл биологиялық белсенділік нәтижесінде материалдың химиялық құрылымының өзгеріп, метаболизм процестерінен туындайтын табиғи жанама өнімдердің пайда болуымен жүретін химиялық өзгеріс.

Қоршаған ортаға зиян келтірмей, пайдалану мерзімі аяқталғаннан кейін оңай жойылатын биологиялық ыдырайтын полимерлерді химиялық өңдеу, микроағзалар және ферменттер арқылы өндіруге деген қызығушылық соңғы жылдары арта түсті. Алайда, бұл материалдардың тиімділігіне қол жеткізу жолында бірқатар мәселелер туындауда. Осы жұмыста биологиялық ыдырайтын полимерлердің қасиеттері, оларды өңдеу тәсілдері, композиттері, қоспалау әдістері мен модельдеу жолдары қарастырылады. Сонымен қатар, бұл материалдардың қоршаған ортадағы тағдыры мен бағалауы кеңінен талданады. Полимерлердің құрылымы мен қасиеттері, сондай-ақ олардың нақты қолдану алдында, кезінде және кейінгі мінез-құлқы арасындағы байланыстарды түсіну мен инженерлік сараптамаға да ерекше көңіл бөлінеді.

Қазіргі таңда пластик қалдықтарын жою — өзекті экологиялық мәселелердің бірі болып отыр. Пластмассаның күнделікті өмірде кеңінен қолданылуы мен жаппай өндірілуі экологияға айтарлықтай кері әсерін тигізуде. Бұл жағдайлар, әсіресе, полиэтилен, полипропилен және поливинилхлорид сияқты биологиялық ыдырамайтын дәстүрлі полимерлердің жануы кезінде көмірқышқыл газының бөлінуі нәтижесінде жаһандық жылыну қаупінің артуына алып келуде. Осыған байланысты, соңғы жылдары биологиялық ыдырайтын полимерлерді түрлі салаларда балама ретінде қолдану бағытында зерттеулер кеңінен жүргізілуде. Қайта өңдеуге келмейтін және табиғатқа зиян келтіретін пластик түрлерінің орнына, қоршаған ортаға қауіпсіз әрі ыдырай алатын полимерлерді қолдану — қалдықтарды басқарудың тиімді жолдарының бірі ретінде қарастырылуда. Биологиялық ыдырамайтын материалдардың экологиялық ластануына себепкер болуына байланысты, экологиялық таза биоматериалдарды әзірлеу мен зерттеу қарқынды түрде дамып келеді.

Биологиялық ыдырайтын полимерлер — белгілі бір уақыт аралығында қызмет атқарып, кейін реттелген процесс арқылы оңай жойылатын өнімдерге

ыдырайтын материалдар болып табылады. Олар әртүрлі қалдықтардан немесе биоресурстардан, мысалы, тағам қалдықтары, жануарлар текті қалдықтар, ауыл шаруашылығы қалдықтары, сондай-ақ крахмал мен целлюлоза сияқты табиғи ресурстардан алынуы мүмкін. Жаңартылатын көздерден өндірілетін биопластиктер, әдетте, микроорганизмдерден алынатын биопластиктерге қарағанда арзанырақ, сондықтан өндірушілер жаңартылатын ресурстарды қолдануға көбірек назар аударады. Биологиялық ыдырайтын полимерлерді қолданудың қоршаған орта үшін бірқатар артықшылықтары бар, мысалы, бастапқы шикізатты қайта өндіру, табиғи түрде ыдырау және жаһандық жылынуға алып келетін көмірқышқыл газының бөлінуін азайту. Мұндай полимерлерді бактериялар мен саңырауқұлақтар сияқты микроағзалар тұтынып, оларды суға (H_2O), көмірқышқыл газы (CO_2) және метанға айналдыра алады. Бұл ыдырау процесі материалдың құрамына байланысты жүреді. Полимердің морфологиясы, құрылымы, химиялық немесе радиациялық өңделуі, сондай-ақ молекулалық массасы оның ыдырау жылдамдығына тікелей әсер етеді. Биологиялық ыдырайтын полимерлерді кейде биополимерлер деп те атайды. Жаңартылатын ресурстардан алынатын полимерлерді қолданудың екі негізгі себебі бар: (i) пластикалық қалдықтардың көбеюі мен қалдықтарды өртеу кезінде бөлінетін көмірқышқыл газының салдарынан жаһандық жылыну сияқты экологиялық мәселелер және (ii) мұнай ресурстарының шектеулілігі мен сарқылуы.

Биологиялық ыдырайтын пластиктер өндірісі келешегі зор сала болып табылады. Дегенмен, бұл материалдарды тиімді дамыту үшін олардың өмірлік циклінің соңындағы өңдеу процестерін мұқият зерттеп, органикалық қалдықтарды басқарудың жаһандық жүйесімен үйлестіру қажет, әсіресе биоқалдықтарды бөлек жинау кеңейіп жатқан жағдайда. Биопластиктердің басты артықшылығы — олардың өмірлік циклінің соңында биологиялық жолмен қайта өңделу мүмкіндігі, яғни компостқа айналдыру немесе анаэробты ыдырау арқылы жою. Биопластиктерді компосттау процесі ғылыми тұрғыдан кеңінен зерттеліп, әлем бойынша мойындалған. Мұндай материалдардың ыдырауы үй жағдайындағы немесе өндірістік компосттау шарттарында жүзеге асырылуы мүмкін. Оттегі болмаған жағдайда анаэробты ыдырау органикалық қалдықтарды биогазға (көмірқышқыл газы мен метан қоспасы) айналдырады, ал бұл газ әрі қарай жылу немесе энергия өндіруде қолданылуы мүмкін.

Биополимерлерді айналмалы экономика жүйесіне тиімді енгізу үшін баламалы және мақсатты қалдықтарды басқару шешімдерін әзірлеу де үлкен міндеттердің бірі болып отыр. Биологиялық ыдырайтын полимерлер олардың алыну көзіне қарай жіктелуі мүмкін. Қоршаған ортада жиналып қалатын биологиялық ыдырамайтын қалдықтарды азайту мақсатында, көптеген салаларда — мысалы, полиэтилен пакеттер мен орамаларда — олардың орнына биологиялық ыдырайтын материалдар қолданылуда. Сонымен қатар, адам денсаулығын сақтау саласында да бұл полимерлердің маңызы артып келеді. Олар жұмсақ тіндерді қалпына келтіру, гендік терапия және биомедицина сияқты маңызды бағыттарда кеңінен қолданыс табуда.

Полимерлік матрицаға табиғи талшықтарды қосу арқылы табиғи талшықтармен күшейтілген композиттер (NFRCS) алуға болады, бұл қажетті қасиеттер мен өнімділікті тиімді бағада қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Табиғи талшықтар жаңартылатын және мол мөлшерде қолжетімді болғандықтан, қоршаған орта мен экономика үшін бірқатар артықшылықтарға ие. Сонымен қатар, олар шикізат құнын төмендетуге ықпал етеді. Мұндай талшықтар қайта өңделетін, биологиялық ыдырайтын, жоғары қаттылық/салмақ қатынасына ие және жақсы жылу оқшаулағыш қасиеттерімен ерекшеленеді. Табиғи талшықтар көміртек пен шыны талшықтары сияқты синтетикалық талшықтармен салыстырғанда әлдеқайда арзан. Мысалы, 1 тонна үздіксіз шыны талшық өнімін өндіру барысында орта есеппен 1.8 тонна CO₂-эквиваленті шығарындылары бөлінеді, ал табиғи талшықтардан 1 тонна өндіру кезінде бұл көрсеткіш тек 0.3–0.7 тонна CO₂-эквивалентін құрайды.

Табиғи талшықтар шығу тегіне қарай өсімдік (мысалы, зығыр, мақта), жануар текті (жүн, түк) және минералдық (асбест, иносиликаттар мен саздар) болып бөлінеді. Алайда, минералдық талшықтар табиғаттан алынғанымен, олар жаңартылмайтын ресурстарға жатады. Табиғи талшықтардың гидрофильді (су сіңіргіш) қасиеті мен полимерлердің гидрофобты табиғаты арасындағы үйлесімсіздік – бұл материалдарды біріктірудегі басты қиындықтардың бірі. Осы себепті табиғи талшықтардың бетін өңдеудің түрлі әдістері қолданылады. Бұл ылғалды сіңіруді төмендетіп, полимер матрицасымен адгезияны жақсартуға мүмкіндік береді. Мұндай өңдеулер химиялық, физикалық немесе биологиялық тәсілдер арқылы жүзеге асырылады. Талшықтардың химиялық құрамына, қасиеттеріне және құрылымдық ерекшеліктеріне әсер ететін көптеген факторлар бар. Оларға өсетін ортасы, өсімдік жасының кезеңі, климаттық жағдайлар мен талшықты бөліп алу әдістері жатады. Осы зерттеу жұмысында түрлі табиғи талшықтардың қасиеттері мен химиялық құрамы нақты мысалдар арқылы талданады.

Осы бөлімде биологиялық ыдырайтын полимерлердің, табиғи талшықтардың және биокомпозиттердің кейбір қасиеттері сипатталды. Атап айтқанда, бұл материалдардың механикалық қасиеттері, жылу тұрақтылығы, тұтқыр-серпімділік мінез-құлқы, акустикалық сипаттамалары, беткі морфологиясы және химиялық құрамы қарастырылды. Материалдардың термиялық қасиеттері термогравиметриялық талдау әдісі арқылы зерттелді. Ал тұтқыр-серпімділік сипаттамалары динамикалық механикалық талдау көмегімен анықталды. Композиттің химиялық құрамы мен табиғи талшықтарда жүретін реакцияларға жауапты функционалдық топтар, сондай-ақ коваленттік байланыстар туралы ақпараттар Фурье-инфрақызыл спектроскопиясы (FTIR) арқылы айқындалды.

Синтетикалық полимерлер қазіргі таңда күнделікті өмірдің көптеген салаларында кеңінен қолданыс тауып отыр. Алайда, олар биологиялық жолмен ыдырамайтын материалдар болғандықтан, қоршаған ортада жинақталып, экологиялық мәселелер туындатады. Осыған байланысты, дәстүрлі полимерлердің орнына биологиялық ыдырайтын полимерлерге деген

қызығушылық артып келеді. Биополимерлер — микроағзалардың әсерінен табиғи түрде ыдырап, көмірқышқыл газы (CO_2) мен метан (CH_4) сияқты қоршаған ортаға зиянсыз өнімдер түзетін материалдар. Биополимерлердің механикалық және физикалық қасиеттерін жақсарту мақсатында бірнеше биополимерлерді араластыру, сондай-ақ табиғи талшықтармен қосу және олардың беткі қабатын модификациялау әдістері қолданылады.

Биологиялық ыдырайтын полимерлердің қолдану аясы кең: олардан пластикалық пакеттер, автокөлік бөлшектері мен медициналық құрылғылар жасалуы мүмкін. Мұндай материалдардың артықшылығы — оларды қолдану мерзімі аяқталғаннан кейін органикалық қалдықтармен бірге компосттауға немесе биомасса алу үшін пайдалануға болады. Сонымен қатар, биоматериалдар микроағзалардың көмегімен пайдалы мономерлер мен олигомерлерге қайта өңделіп, бастапқы өнімдерді қайта өндіруге мүмкіндік береді. Биополимерлердің бұзылу себептері инженерлік сараптама тұрғысынан қарастырылып, өндіріс және пайдалану кезінде туындауы мүмкін ақауларды болдырмауға немесе азайтуға бағытталған.

Биологиялық ыдырайтын полимерлердің биодеградациясы — бұл микроағзалардың ферментативтік әсері арқылы жүзеге асатын химиялық ыдырау процесі. Бұл процесс заттардың химиялық құрамының, механикалық және құрылымдық қасиеттерінің өзгеруіне алып келеді және нәтижесінде метан, су, биомасса және көмірқышқыл газы сияқты қоршаған ортаға зиянсыз метаболиттік өнімдер түзіледі.

Биодеградация екі негізгі сатыдан тұрады: бірінші кезеңде ұзын тізбекті полимерлер экзоферменттер мен сыртқы факторлардың (мысалы, тотығу, фотодеградация және гидролиз) әсерінен қысқа тізбекті олигомерлерге дейін ыдырайды. Екінші кезең — биоминерализация процесі, бұл кезде түзілген олигомерлер микроағзалар арқылы сіңіріліп, толықтай минерализацияланады.

Бұл процесс аэробты (оттегі бар кезде) немесе анаэробты (оттегі жоқ кезде) жағдайда жүруі мүмкін. Аэробты жағдайда негізгі өнімдерге көмірқышқыл газы (CO_2), су (H_2O), биомасса және қалдықтар жатады. Анаэробты жағдайда қосымша өнім ретінде метан (CH_4) түзіледі.

Биологиялық ыдырау процесіне бірқатар факторлар әсер етеді, олардың қатарында полимердің морфологиясы, құрылымы, химиялық өңделуі және молекулалық массасы бар.

Полимер құрылымы: биологиялық ыдырайтын полимерлердің тізбегінде микроағзалар мен гидролитикалық ферменттердің әсерінен ыдырайтын гидролизге бейім байланыстар болады. Құрамында әрі гидрофильді, әрі гидрофобты бөліктері бар полимерлер тек бір ғана сипаттағы (гидрофильді немесе гидрофобты) құрылымды полимерлермен салыстырғанда ыдырауға көбірек бейім келеді.

Полимер морфологиясы: ферменттер полимердің аморфты аймақтарына кристалды аймақтарға қарағанда жеңіл әсер етеді, өйткені аморфты аймақтарда молекулалар бір-бірінен алшақ орналасқан, бұл оларды ыдырауға бейім етеді. Сонымен қатар, полимерлердің балқу температурасы (T_m) да ферментативтік

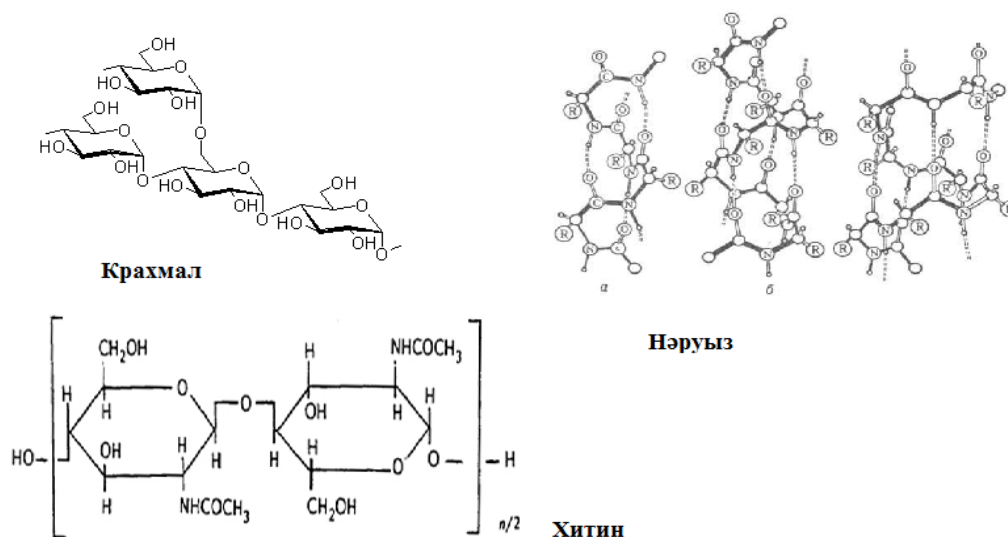
ыдырауға ықпал етеді. Полимердің балқу температурасы артқан сайын, оның биодеградацияға бейімділігі төмендейді.

Қоршаған орта микробиологиялық ыдырауға төзімді пластикалық қалдықтарды тастау мәселесінің күрделенуі салдарынан үлкен экологиялық қиындықтарға тап болып отыр. Сондықтан ғалымдар биологиялық ыдырайтын, ластанбайтын және экологиялық таза материалдарды өндіруге тырысуда. Соңғы жылдары биологиялық ыдырайтын полимерлердің табиғи және синтетикалық шығу тегінен жасалған түрлері жақсы үйлесімділік пен биодеградация қасиеттеріне ие болды. Биологиялық ыдырайтын полимерлердің экологиялық таза әрі улы емес материалдарға ыдырауы оларды кеңінен қолдануға септігін тигізуде.

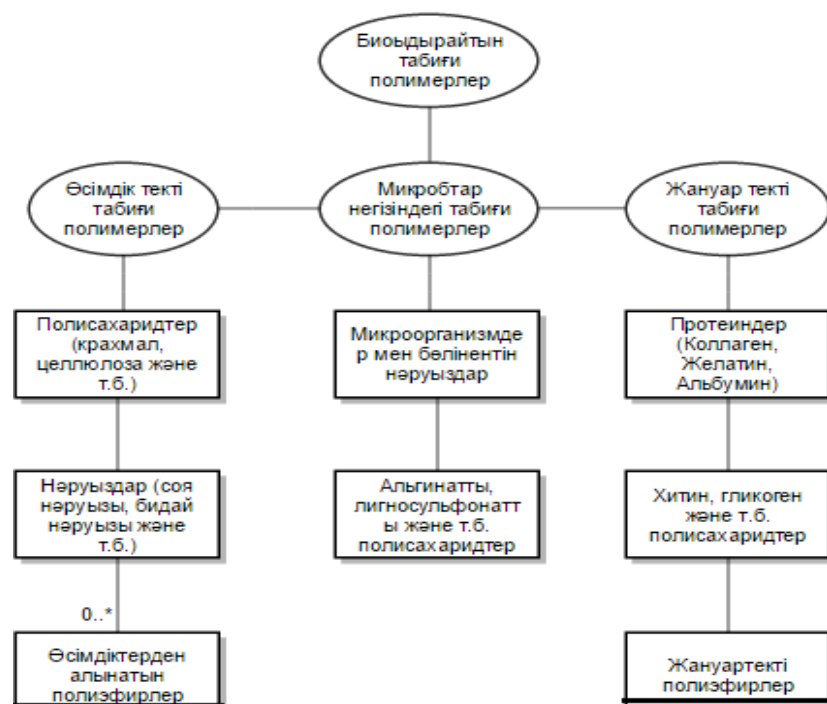
Қалыпты биологиялық ыдырайтын полимерлер мен олардың композиттерінің механикалық беріктігі, жылу және электрлік қасиеттері суретте (а–с) көрсетілген. Мысалы, полиэтиленгликоль (полигликол қышқылы, PGA) жоғары созылу беріктігіне ие — 70–117 МПа аралығында. Ал термопластикалық крахмалдың созылу беріктігі төмен болып, 16–22 МПа құрайды.

1.2 Биодырайтын табиғи полимерлер

Табиғи полимерлердің химиялық структурасы 3-суретте және биодырайтын табиғи полимерлер классификациясы 4-суретте көрсетілген.



1-сурет – Табиғи полимерлердің құрылымы



2-сурет – Биоыдырайтын табиғи полимерлердің классификациясы

Биологиялық ыдырайтын полимерлерді олардың шығу тегі мен синтез әдісіне, химиялық құрамына, экономикалық маңыздылығына, өңдеу технологиясына және қолданылу салаларына қарай жіктеуге болады. Бұл зерттеуде полимерлер олардың шығу тегі бойынша жіктелді. Биологиялық ыдырайтын полимерлер екі топқа бөлінеді. Табиғи биополимерлер табиғи ресурстардан, ал синтетикалық биополимерлер мұнайдан өндіріледі. Табиғи биополимерлер — жануарлар, өсімдіктер, теңіз өнімдері және микроағзалар сияқты қайта қалпына келетін немесе биологиялық көздерден алынған материалдар болса, синтетикалық биологиялық ыдырайтын полимерлер химиялық жолмен өндіріледі.

Табиғи биологиялық ыдырайтын полимерлер

Барлық тірі организмдердің өсу циклдері барысында табиғатта биополимерлер түзіледі. Бұл биополимерлердің түзілуі — клеткалардағы күрделі метаболикалық процестер арқылы түзілген белсенді мономерлерден ферменттік катализделген полимеризация реакцияларын қамтиды. Табиғи биополимерлер өздігінен биологиялық ыдырайды және жақсы биосәйкестілікке ие.

Биомассадан тікелей алынатын биополимерлер. Ауыл шаруашылығы қалдықтары биопластиктер, пластификаторлар және антиоксидант қоспаларын өндірудің негізгі көзі болып табылады. Полисахаридтердің басты көзі — өсімдік негізіндегі ауыл шаруашылығы қалдықтары, онда целлюлоза, крахмал және пектин сияқты биополимерлер өндіріледі. Биологиялық ыдырайтын полимерлерді синтездеу үшін агроқалдықтарды шикізат ретінде қолдану өндіріс шығындарын және қалдықтарды өңдеу шығындарын азайтуға мүмкіндік береді.

Биополимерлер бірнеше әдістер арқылы өндіріледі, атап айтқанда, микробиологиялық әдістер, биополимерлерді араластыру және химиялық әдістер. Ауыл шаруашылығы өсімдік қалдықтарынан алынған биополимерлер биологиялық ыдырағыштыққа, биофункционалдылыққа, биостабилділікке және биосәйкестілікке ие. Олардың химиялық және механикалық қасиеттері кең ауқымды болып, тағам орауыштары, биомедициналық қолданбалар, тері күтімі, электр техникасы, көлік және тұрмыстық қалдық суларды өңдеу салаларында қолданылады.

Табиғи организмдерден немесе генетикалық модификацияланған микроағзалардан тікелей алынатын биополимерлер

Микроағзалар ауыл шаруашылығы қалдықтарын өсіру ортасы ретінде пайдалана отырып, биопластиктер мен биополимерлерді зерттеудің маңызды көзі болып табылады. Мысалы ретінде полигидроксиалканоаттар (РНА) көрсетіледі, олар әртүрлі бактерия топтарынан және арзан, қайта қалпына келетін ресурстардан өндіріледі. Бұл материалдар микроағзалар арқылы толық аэробты ыдырайды. Полигидроксиалканоаттар — биологиялық ыдырайтын алифаттық полиэстерлер тобына жатады. Олар табиғатта қалыптасып, бактериялардың метаболизмі арқылы тікелей өндіріледі. Бұл материалдар шын мәнінде биологиялық ыдырайтын және өте жақсы биосәйкестілігі бар термопластикалық полимерлер болып табылады және әртүрлі қайта қалпына келетін ресурстардан әзірленуі мүмкін.

Полигидроксиалканоат — ыдырамайтын полиэтилен және полипропиленге баламалы материал ретінде үлкен әлеуетке ие. Осы топтағы ең танымал өкіл — поли(3-гидроксибутират) (РНВ). Бұл табиғи полимер бактериялардың әртүрлі тізбектерінен түзіледі. Ол төмен шығынды, қайта қалпына келетін шикізаттан өндіріледі және қоршаған ортаға зиян келтірмейді. РНВ анаэробты және аэробты жағдайларда ыдырайды және ыдырауы барысында улы заттар бөлмейді.

Гидроксибутират (РНВ) және гидроксивалерат (НВ) кополимері поли(3-гидроксибутират)-гидроксивалерат (РНВН) деп аталады. Бұл жоғары кристалдық полимер. НВ үлесі артқан сайын балқу температурасы, шыны өтпелі температурасы, кристалдылығы және созылу беріктігі төмендейді, бірақ соққыға төзімділігі артады. РНВН кополимері РНВ-ге қарағанда аз сынғыш болып табылады. РНВН-нің ыдырау жылдамдығы РНВ-ден жоғары.

Синтетикалық биологиялық ыдырайтын полимерлер дәстүрлі полимеризация әдістерімен өндіріледі, мысалы, алифаттық полиэстерлер, полилактид және алифаттық кополимерлер. Өндіріс көлемінің үлкендігі және ыдырау уақытының тиімділігіне байланысты, ыдырайтын полиэстерлер дәстүрлі пластиктерге қарағанда ең перспективалы материалдар болып саналады. Олар полилактикалық қышқыл, поликапролактон және полибутилен сукцинат сияқты бірнеше түрлерде шығарылады. Бұл полимерлер экологиялық тұрғыдан төмен ластау деңгейіне ие.

Биополимерлердің 90%-дан астамы полиэстерлер болып табылады, себебі оларда оңай гидролизденетін эфир байланыстары бар. Синтетикалық

биологиялық ыдырайтын полимерлер биотегіс полимерлерге, мысалы PLA, және мұнайдан алынатын мономерлерге, мысалы PCL, бөлінеді.

Биологиялық ыдырайтын полимерлердің басты ерекшеліктері — олардың негізінен гидрофильді қасиеті, жоғары ыдырау жылдамдығы және кейде қанағаттанарлықсыз механикалық қасиеттері болып табылады. Бұл қасиеттерді табиғи және синтетикалық полимерлерді араластыру арқылы жақсартуға болады. Полимерлерді араластыру — бұл екі немесе одан да көп полимерлерді біріктіріп, әртүрлі физикалық қасиеттері бар жаңа материал алу әдісі. Мұндай араластырудың мақсаты — әр полимердің ең жақсы қасиеттерін біріктіретін қоспа жасау.

Биологиялық ыдырайтын полимер қоспаларын дайындау әдетте термопластикалық шайырды биологиялық ыдырайтын полимермен араластырумен байланысты болады. Мұндай қоспалар дәстүрлі пластиктерге қарағанда көп биологиялық ыдырайтын болады деп күтіледі. Биологиялық ыдырау процесінен кейінгі қалдықтар экологиялық тұрғыдан қауіпсіз болып, қоршаған ортаға зиян келтірмейді.

Табиғи талшықтар — полимерлік композиттер үшін мінсіз күшейткіш материалдар. Табиғи талшықтар полимерлік композиттерде (термопластиктер, терморективтілер және эластомерлер) күшейткіш ретінде өте қолайлы. Табиғи талшықпен күшейтілген полимерлік композиттер механикалық қасиеттерінің жоғары болуымен, өндірістік артықшылықтарымен және қоршаған ортаға зиянды азайтуға көмектесуімен танымалдылыққа ие болуда. Табиғи талшық негізіндегі композиттер өнеркәсіпте жақсы нәтижелер көрсетеді, себебі бұл талшықтардың тығыздығы төмен, ал арнайы қасиеттері жоғары. Сонымен қатар, олар улы емес болғандықтан, адам денсаулығына зиянсыз.

Табиғи талшықтар қайта жаңғыртылатын, созылу беріктігі жоғары, төмен құны бар және жеңіл материалдар болып табылады. Қоршаған орта мәселелері мен табиғи талшықтардың қасиеттеріне байланысты олар қымбат және қайта жаңғыртылмайтын синтетикалық талшықтардың (шыны, көміртек және кевлар талшықтары) орнына қолданылуда. Табиғи талшықтардың жоғары арнайы беріктік пен модулі, өңдеу кезінде икемділігі және тамаша коррозияға төзімділігі сияқты пайдалы қасиеттері бар.

Дегенмен, оларда кейбір шектеулер де кездеседі, мысалы, жоғары анизотропия, ылғал сіңіруі, дәстүрлі шайырлармен үйлесімділігінің төмен болуы және шыны мен көміртек талшықтарымен салыстырғанда біркелкілігінің нашарлығы. Көп ғасырлар бойы табиғи талшықтар киім тігу, себеттер жасау, арқан және автокөліктердің әртүрлі бөлшектерінде қолданылып келді.

Табиғи талшықтың жасуша қабырғалары үш қабаттан тұрады: негізгі жасуша қабырғасы, екінші қабат жасуша қабырғасы және аралық қабат — люмен деп аталады. 6-бетте табиғи талшық жасуша қабырғасының құрылымдық ұйымдасуы көрсетілген. Бұл құрылым микрофибрил деп аталады. Жасуша түзілу барысында бірінші болып негізгі жасуша қабырғасы пайда болады. Екінші жасуша қабырғасы S1, S2 және S3 деп аталатын үш қабаттан тұрады. Люмен қабаты суды тасымалдау қызметін атқарады.

Жасуша қабырғалары жартылай кристаллды целлюлоза микрофибрилінен, гемицеллюлоза, лигнин, балауыз, пектин және суда еритін қосылыстардан тұрады.

Табиғи талшықтар полимерлік матрицамен үйлесімсіздікке ұшырайды, себебі полимер матрицасының гидрофобты қасиеті мен талшықтардың гидрофилді сипаты арасында қарама-қайшылық бар. Сонымен қатар, олардың ылғал сіңіруі және өлшем тұрақтылығы негізгі шектеулер болып табылады. Талшықтардың жоғары сіңімділігі олардың құрамындағы ОН топтарының және полярлы топтардың болуына байланысты. Ылғал мөлшері артқан сайын, табиғи талшықтардың механикалық қасиеттері төмендейді, бұл өлшем тұрақтылығын жоғалтуға және бұзылуға әкеледі. Нәтижесінде, табиғи талшықтар композитте күшейткіш ретінде қолданылғанда, полимерлік матрица мен талшықтар арасындағы адгезия әлсірейді.

Беттің адгезиясы компоненттің механикалық және физикалық қасиеттерін сипаттауда маңызды рөл атқарады. Бұл мәселелер химиялық, физикалық және биологиялық беткі өңдеу әдістерін қолдану арқылы шешіледі. Табиғи талшықтар гидрофилді, ал полимерлік матрица гидрофобты болғандықтан, олардың арасында табиғи үйлесімсіздік бар, бұл шекаралық аймақта әлсіз байланысқа әкеледі. Химиялық өңдеу әдістері талшықтағы гидрофилді ОН топтарын алып тастап, талшықтың гидрофилділігін төмендетеді. Осы өңдеу полимер матрицасының талшыққа химиялық реакциялар арқылы жақсырақ жабысып, адгезиясын күшейтеді.

Химиялық элементтер табиғатта органикалық молекулалардың (мысалы, полисахаридтер және т.б.) құрамдас бөлігі ретінде және бейорганикалық заттарда (мысалы, NH_3 , CO_2 және т.б.) кездеседі. Биологиялық ыдырау процесінде микроорганизмдер тіршіліксіз органикалық материалдарды бейорганикалық қосылыстарға айналдырады. Мысалы, глюкоза молекулалары аэробты биологиялық ыдырау кезінде өсімдіктердің глюкозаны жасау үшін пайдаланған бейорганикалық қосылыстарына қайта айналады. Бұл процесс минерализация деп аталады, өйткені ол органикалық материал молекулаларының бейорганикалық қосылыстар мен минералдарға айналуын қамтамасыз етеді. Табиғи полимерлер мен кейбір жасанды полимерлер сияқты органикалық молекулалар биологиялық ыдырау процесіне ұшырайды. Биополимерлер топырақта немесе компостта ыдырайтын пластикалық материалдарды жасау үшін қолданылады. Полимерлік қосылыстардың биологиялық ыдырауы кезінде бастапқы көміртектің (Copolymer) бір бөлігі минерализацияланады (CO_2), бір бөлігі микроорганизмдердің өз өсуі мен көбеюі үшін қолданылады (Cbiomass), ал қалғаны полимерлік қалдық ретінде қалады (Cresidue). Анаэробты жағдайларда биологиялық ыдырау процесіне басқа микроорганизмдер қатысады, нәтижесінде CO_2 және CH_4 сияқты өнімдер пайда болады.

Органикалық қалдықтарды қайта өңдеу кезіндегі биологиялық ыдырау

Органикалық қалдықтарды қайта өңдеу — бұл биоқалдықтарды өңдеу процесі, нәтижесінде компост (тұрақтандырылған органикалық материал) пайда

болады, ол ауыл шаруашылығында топырақ тыңайтқыш ретінде қолданылады. Органикалық қалдықтарды қайта өңдеу — бұл анаэробты қорыту құрылғыларында немесе аэробты компосттау зауыттарында көпсатылы биологиялық ыдырау процесін қамтитын стандартталған және өнеркәсіптік биотехнология. Органикалық қалдықтарды қайта өңдеудің үш негізгі әдісі бар: өнеркәсіптік компосттау, үй компосттауы және анаэробты қорыту.

1.3 Биологиялық ыдырайтын полимерлердің артықшылықтары

Биологиялық ыдырайтын полимердің артықшылықтары:

а) кәдімгі полимерлер сияқты қайта өңдеу мүмкіндігі стандартты жабдықтар;

б) оттегінің, су буының өткізгіштігінің төмен кедергісі (тамақ орау саласында пайдалану үшін оңтайлы);

в) қалыпты жағдайда ыдырауға төзімділік;

г) арнайы жасалған кезде тез және толық ыдырау немесе табиғи жағдайлар-кәдеге жарату проблемаларының болмауы қалдықтар;

д) мұнай-химия шикізатынан тәуелсіздік.

Биологиялық ыдырайтын полимерлердің кемшіліктері:

Жоғары өзіндік құны. Биополимерлердің өндірісі көбінесе қымбатқа түседі, себебі шикізат пен өңдеу технологиялары күрделі және қымбат.

Механикалық қасиеттерінің төмендігі. Көптеген биополимерлердің беріктігі, созылғыштығы және тозуға төзімділігі дәстүрлі мұнай негізіндегі полимерлерге қарағанда төмен.

Ылғалға төзімділігінің нашарлығы. Кейбір биополимерлер (мысалы, крахмал негізіндегілер) ылғалдың әсерінен жылдам ыдырап немесе пішінін өзгертіп кетуі мүмкін.

Сақтау мерзімінің қысқалығы. Биологиялық ыдырау қабілеті жоғары болғандықтан, кейбір өнімдердің сақтау мерзімі шектеулі болады.

Технологиялық өңдеудің шектеулігі. Барлық өндірістік жабдықтар биополимерлерге бейімделе бермейді. Арнайы өңдеу жабдықтарын қажет етуі мүмкін.

Экожүйеге толық бейтарап еместігі. Кейбір жағдайларда биополимерлердің ыдырауы арнайы жағдайларды (жоғары температура, ылғалдылық, микроорганизмдер) талап етеді. Яғни, табиғатта толық ыдырау үнемі бола бермейді.

Ауыл шаруашылығы ресурстарын көп қажет етуі. Көптеген биополимерлер өсімдіктерден (жүгері, қант құрағы, картоп т.б.) өндіріледі, бұл өз кезегінде азық-түлікпен бәсекелестік туғызуы мүмкін.

1.4 Табиғи полимерлер негізіндегі биодырайтын полимер материалдар

Биодырайтын қаптама өндірісінде ең көп таралғаны — полисахаридтер. Ең алдымен крахмал, декстриндер, хитозан, целлюлоза және ағашты өңдеуден қалған қалдықтар қолданылады.

Крахмалға негізделген қаптама материалдары жүгері, бұршақ, бидай және басқа да өсімдіктерден алынады. Таза күйінде крахмалды термопластикалық технологиялық жабдықтарда өңдеу қиынға соғады, сондықтан оны пластификаторлармен бірге қолданған жөн. Крахмалдың 30–40% дейін байланысқан ылғалды сақтау қасиеті суды ең қолжетімді пластификатор ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Биологиялық тұрғыдан ыдырайтын қаптамаларды өндіруде ең жиі қолданылатын материалдарға полисахаридтер жатады. Оларға крахмал, декстриндер, хитозан, целлюлоза және ағаш өңдеуден қалған қалдықтар кіреді.

Крахмал, әдетте, құрамында 30–40% байланысқан ылғал ұстайды. Бұл ылғалдылық крахмал негізіндегі полимер материалдарын (ПМ) жасау барысында табиғи жұмсартқыш ретінде пайдаланылады. Сонымен қатар, жұмсартқыш ретінде мочеина мен әртүрлі этиленгликоль түрлері — моно-, ди- және полиэтиленгликольдер де қолданылып жүр. Крахмалдан жасалған көбікті материалдар дыбыс оқшаулауға арналған қаптамаларда кеңінен қолданыс табуда.

Кукуруз крахмалына микрокристалды целлюлоза мен метилцеллюлоза қосу арқылы экструзия әдісімен тағам өнімдерінің салмағын жоғалтуы мен бұзылуынан қорғайтын полимерлік материалдар алынады.

Соңғы уақытта биодырайтын қаптама үлдірлері мен тоқыма талшықтарын жасауға арналған негіз ретінде хитин мен хитозанның қоспаларына сұраныс артып келеді. Хитозан негізіндегі үлдірлер сірке қышқылындағы ерітінділерден жасалады. Бұл үлдірлердің еру қабілетін және ісіну дәрежесін реттеу үшін хитозанды глутар альдегидімен немесе диэпоксидті олигомермен байланыстыру арқылы тұрақтандырады.

Кесте 1 - Полимерлердің биологиялық тұрақтылығын арттыру үшін олардың қасиеттерін арнайы модификацияландыру тәсілдері.

Материал құрылымын өзгерту	Полимердің кристаллдық деңгейін арттыру, макромолекулаларды өзара байланыстырып, тор тәрізді құрылымдар түзу арқылы беріктігін күшейту. Мұндай жоғары ұйымдасқан кристаллдық құрылым суды сіңіруге және ферменттердің полимер матрицасына енуіне кедергі
----------------------------	--

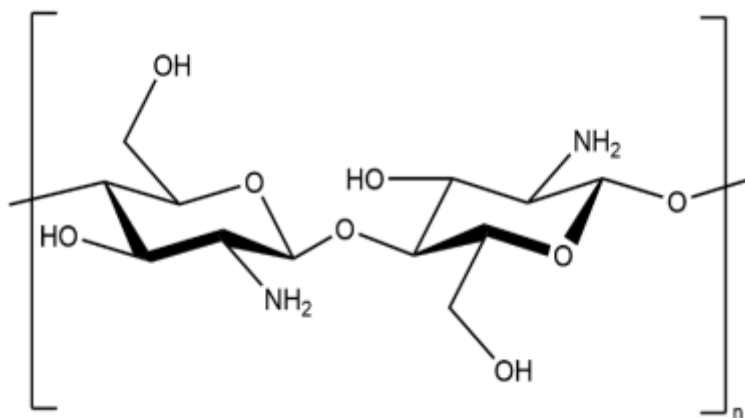
	келтіріп, биодеструкцияға төзімділікті арттырады;
Химиялық құрылымды модификациялау	Полимер тізбектеріне метаболиттердің әлсіз химиялық байланыстарға қол жеткізуін қиындататын кеңістіктік бөгет жасайтын функционалды топтар енгізу арқылы;
Құрамды өзгерту	Полимерге минералдық толтырғыштар қосу. Бұл толтырғыштар материалдың бетіне диффузияланып, бөліну аймағында қорғаныс қабатын түзуге қабілетті;
Беткі қабатты модификациялау	Полимер бетінде сыртқы әсерлерге төзімді, метаболиттерге қарсы тұра алатын арнайы физика-химиялық қасиеттері бар оқшаулаушы қабат қалыптастыру.
Материалдың беткі қабаттарындағы кернеулі күйді өзгерту	Бұйымдар мен бөлшектердің сыртқы қабаттарында қалдық қысу кернеулерін қалыптастыру арқылы. Бұл кернеулер метаболиттердің қатысуымен жарықшақтардың түзілуін қиындатады, нәтижесінде материалдың бұзылуға төзімділігі артады;
Сыртқы орта жағдайларын реттеу	Сорбция, химиялық және электрохимиялық реакциялардың өту жылдамдығын төмендетуге бағытталған орта параметрлерін оңтайландыру. Бұл полимердің биологиялық бұзылуына қарсы қорғаныс ретінде қызмет етеді.

Жүгері крахмалы мен целлюлоза және метилцеллюлозаның микрокристалдары қоспаларына пластификаторлар қосу немесе қоспай-ақ, экструзия арқылы тағам өнімдерінің салмағын жоғалтуы мен бұзылуынан қорғауға арналған биоыдырайтын полимер материалдар (БПМ) алынады.

Крахмал мен карбоксиметилцеллюлозаның натрий тұздарының судағы ерітінділерінен биоыдырайтын пленкалар жасалады.

Хитин мен хитозанның маңызы артып келеді — бұл материалдар биоыдырайтын негіз ретінде қолдануға өте перспективті. Хитин мен хитозан қоспалары қаптама пленкаларын және тоқыма талшықтарын өндіруге арналған

болашағы зор полимер материалдар болып саналады. Хитозан негізіндегі пленкалар сірке қышқылды ерітінділерден қалыптасады, ал олардың еруі мен ісінуі glutar альдегиді немесе олигомерлі диэпоксидпен сшивка арқылы реттеледі.



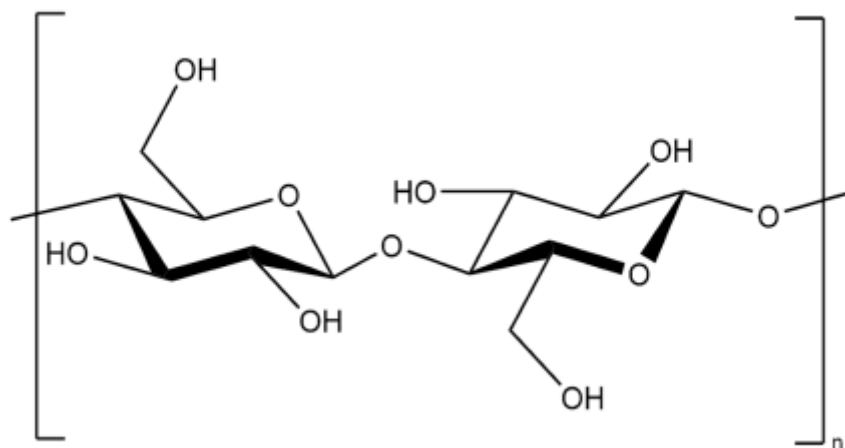
3-сурет – Хитозанның структурасы

Сонымен қатар, этилен мен капролактонның қос полимеризациясы нәтижесінде алынған биоыдырайтын сополимерлер де белгілі. Жүгері крахмалы мен этилен мен капролактонның сополимері қоспалары экструзия әдісімен алынады.

Қазіргі таңда крахмал мен ПЭ, оның сополимерлері негізінде БПМ жасалып, әлемнің дамыған елдерінің өнеркәсібінде қолданысқа енген. Беларусь Республикасында крахмал мен ПЭ негізіндегі композициялық БПМ рецептуралары мен өндіріс технологияларын зерттеу алғаш рет 2000 жылдардың басында Гомель қаласындағы металл-полимер жүйелер механикасы институтында басталды.

1.5 Қамыстан наноцеллюлоза алу маңыздылығы

Целлюлоза – жер бетіндегі ең кең таралған органикалық қосылыстардың бірі және өсімдік талшықтарының негізгі құрамдас бөлігі болып табылады. Химиялық құрамына келетін болсақ, ол глюкозаға бай қосылыс болып табылады, оның молекулалары глюкурон қышқылы ангидридмен гликозидтік байланыстар арқылы байланысқан. Табиғаттағы қызықты полимерлердің бірі — целлюлоза, оның құрылымында реакцияға қабілетті ОН топтары бар. Целлюлоза — полисахарид, молекулалық құрылымы крахмалдың молекулалық құрылымымен ұқсас. Алайда, целлюлозада d-глюкоза қалдықтары β-гликозидтік байланыстар арқылы қосылады, ал крахмалдағы d-глюкоза қалдықтары α-гликозидтік байланыстарға ие.



4-сурет – Целлюлозаның структурасы

Целлюлоза жоғары механикалық беріктілікке ие, суда және органикалық еріткіштерде ерімейді, сондай-ақ ериді де емес. Целлюлоза қышқылмен әрекеттескенде оңай гидролизденеді. Целлюлозалық шайыр алу үшін целлюлозаны натрий гидроксиді мен көміртек тотығы ерітіндісінде еріту қажет екені белгілі. Содан кейін оны күкірт қышқылына айналдырып, целлофан пленкасы өндіріледі. Целлюлозаның ең қарапайым туындысы – метилцеллюлоза. Ол жоғары пленка тұзу қасиетіне, жақсы ерігіштікке және төмен оттек өткізгіштікке ие. Метилцеллюлоза биобидерағыш материалдардың шикізаты ретінде үлкен мүмкіндіктерге ие. Метилцеллюлозадан арнайы экстракттармен, полифенолдар мен антиоксиданттарға байытылған қоспалар енгізілгенде тағамдық пленкалардың қасиеттері зерттелген. Крахмалмен желімделген целлюлозадан майларға жоғары төзімділігі бар және тағам өнімдерімен тікелей жанасуға болатын пленкалық қаптама алынған. Мұндай қаптама жоғары немесе төмен температураларға төзімді болып, пеште немесе микротолқынды пеште пісірілген тағамдарды орауда қолданылады.

Нанокристалды целлюлоза (НКЦ) – бұл қышқылды немесе сілтілі ортада целлюлозалық талшықтың тотығуы нәтижесінде түзілетін целлюлозаның бір түрі. Бұл процестер ерімейтін фракцияны жойып, тек кристалды бөлігін қалдырады. Мұндай материалдар температура мен сыртқы әсерлерге жауап ретінде пішінін өзгерту, көп мөлшерде суды сіңіру және биодеградацияға төзімді болу қасиеттеріне ие. НКЦ қоюлатқыш, тұрақтандырғыш және эмульгатор ретінде жұмыс істейді, сондай-ақ өнімнің құрылымын сақтап тұрады. Алайда, НКЦ қолданылуы орман ресурстарының сарқылу мәселесін туындатады. Осы тұрғыдан алғанда, өндірісте қамысты және басқа да шикізатты пайдалану қызығушылық тудырады.

Қамыс – әлемдегі ең әмбебап өсімдіктердің бірі. Бұл жұмыста қамысты целлюлоза өндірісінде табиғи және болашағы зор шикізат ретінде пайдалану жолдары зерттелген. Бұл технология дәстүрлі өңдеу тәсілдерімен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарға ие, соның ішінде жоғары тиімділік, өңдеу шығындарын азайту және қамыс секілді шикізатты қайта өңдеу мүмкіндігі. Осы зерттеуде қамыс биомассасынан бағалы ресурстарды алу үшін жаңа тәсіл

ұсынылған, мұнда өсімдік қалдықтарын экологиялық тұрғыдан тиімді өңдеу стратегияларын әзірлеу маңызды рөл атқарады.

НКЦ-нің әмбебап қасиеттері – жеңіл салмақ, уытсыздық, механикалық беріктік, гидрофильдік және гигроскопиялық табиғаты, биологиялық ыдырағыштығы мен қайта өңдеуге жарамдылығы – оны түрлі коммерциялық қолданбалар үшін қолжетімді етеді және тұрақты өндірісін қамтамасыз етеді.

Целлюлоза — өсімдіктер арқылы синтезделетін, кең таралған табиғи полисахаридтердің бірі. Бұл тік құрылымды макромолекулалық тізбектерден тұратын полимер, оның қайталанатын құрылымдық бірлігі — целлобиоза. Целлюлозаның кристалдық құрылымы бар, ол балқымайды және органикалық еріткіштерде ерімейді. Биыдырау процесі негізінен ферментативтік тотығу арқылы жүзеге асады, мұнда саңырауқұлақтар бөліп шығаратын пероксидаза ферменті маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, кейбір бактериялар да бұл ыдырау процесіне қатыса алады. Крахмалдағы сияқты, целлюлозаның ыдырау өнімдері уытсыз болып есептеледі.

Целлюлозаның ерімейтіндігі және балқу қабілетінің жоқтығы оны өңдеуде қиындықтар тудырады, сондықтан оны технологиялық мақсатта қолдану үшін химиялық жолмен модификациялау қажет. Целлюлозаның құрылымындағы гидроксил топтарымен әрекеттесу арқылы оның туындылары — эфирлер, күрделі эфирлер мен ацетальдар алынады. Осындай туындылардан жасалған кейбір коммерциялық өнімдерге Tenite(Eastman, АҚШ), Bioceta(Mazzucchelli, Италия), Fasal(IFA, Австрия) және Natureflex(UCB, Германия) жатады.

Целлюлозалық эфирлер мен сірке қышқылының эфирлері модификацияланған полисахаридтер қатарына кіреді. Бұл материалдардың алмастыру деңгейі әртүрлі болуы мүмкін: алмастыру деңгейі артқан сайын олардың механикалық беріктігі мен биодеградациялану қасиеті төмендейді. Мұндай туындылардың ішінде ең маңыздыларының бірі — целлюлоза ацетаты (СА). Өнеркәсіпте ол алмастыру деңгейі 1,7-ден 3-ке дейінгі әртүрлі түрлерде шығарылады. Созылу беріктігі бойынша целлюлоза ацетатынан алынған пленкалар полистиролға ұқсас. Бұл материалдарға мысал ретінде Bioceta (Mazzucchelli, Италия) және EnviroPlastic Z (Planet Polymer, АҚШ) өнімдерін атауға болады.

Целлюлоза ацетатын ауыл шаруашылығы қалдықтарынан да синтездеуге болады. Атап айтқанда, лигноцеллюлозалық шикізат этанол өндіруге қолайлы. Бұл процестің ішінде төрт негізгі кезең бар, оның ішінде ферментативті ыдырату мен гемицеллюлозалық қанттарды ашыту да кіреді. Бұл өңдеуден кейін қалған целлюлоза ацетат өндіру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Целлюлоза ацетаты (СА) қазіргі уақытта талшықтар мен пленкалар өндірісінде кеңінен қолданылады. Алайда, бұл материалдың жоғары шынықу температурасы оның термиялық өңделуін қиындатады. Көбінесе СА-ны термопластикалық бұйымдарда пайдалану үшін пластификаторлар қосу қажет, өйткені оның ыдырау температурасы балқу температурасынан төмен. Осыған байланысты СА-ны икемді полимерлермен араластыру балама шешім ретінде қарастырылады. Сонымен қатар, СА-ның термопластикалық қасиеттерін

жақсарту мақсатында глифтинг реакциясы арқылы туындылары синтезделеді. Диацетат целлюлозасы мен полилактидтің (PLA) глифтинг-кополимеризациясының бірнеше әдістері бар екені хабарланған. Целлюлозалық диацетат пен поли(лактит қышқылы) негізіндегі кополимерлер молочная қышқылының кополимеризациясы немесе L-лактидтің диметилсульфоксидте немесе балқымда ашылуымен дайындалады. Барлық алынған сополимерлердің шынықу температурасы шамамен 60 °C, бұл PLA-ның гомополимерінің көрсеткішіне ұқсас. PLA үлесі артқан сайын сополимерлердің созылғыштығы едәуір өседі, ал PLA мөлшері шамамен 79% болғанда максималды ұзарту шамамен 2000%-ға жетеді.

Альгинаттық қышқыл немесе альгинат — бұл қоңыр балдырларда болатын тағы бір табиғи полисахарид. Оның молекула құрамында әрбір мономерлік буында карбоксиль топтары болады. Альгинаттар балдырлардан сілтілі ерітінді арқылы алынады. Қышқыл өңдеуден кейін альгинат альгинаттық қышқылға айналады. Альгинат — β -D-маннурон қышқылы мен α -L-гукурон қышқылынан тұратын, 1,4-гликозидті байланыстармен байланысқан екікомпонентті қанықпаған сополимер. Бұл екі құрамдас бөліктің қатынасы шикізат көзінен тәуелді. Альгинаттық қышқыл эквивалентті катиондар (мысалы, Ca^{2+}) қатысында гель түзеді. Полимердің торлану дәрежесіне ортадағы рН, иондық агент түрі және полимердегі функционалдық топтардың тығыздығы әсер етеді. Гель түзу қабілетінің арқасында альгинаттар әртүрлі заттарды инкапсуляциялау үшін кеңінен қолданылады.

1.6 Биоыдырайтын пластиктің мүмкіндіктері

Биоыдырайтын пластик жақсы мүмкіндіктерге ие болып, дәстүрлі пластиктерді пайдалану мәселелерін шешудің тартымды нұсқасына айналуы мүмкін. Биоыдырайтын пластиктер — белгілі бір жағдайларда және белгілі бір уақыт аралығында ыдырау қабілеті бар полимерлік негіздегі заттар. 1950 жылдардан бастап биоыдырайтын пластиктердің танымалдығы айтарлықтай артты. Қазіргі кезде жақсартылған қасиеттері мен төмендетілген бағасы бар жаңа биоыдырайтын пластик түрлері жасалды. Биоыдырайтын пластиктен шыққан қалдықтарды азық-түлік, бақша қалдықтары және қағазбен бірге компосттау кәсіпорындарында өңдеуге болады. Сонымен қатар, мұндай қалдықтарды ластанған су тазалау құрылғыларында қайта өңдеуге немесе топыраққа көмуге де болады. Қоқыс төгетін алаңдардың көлемінің азаюына байланысты, компосттауға деген қызығушылық артқандықтан, биоыдырайтын пластик материалдарының әрі қарай дамуына жағдай жасалуы ықтимал. Биоыдырайтын пластик — бұл табиғатта микроорганизмдер арқылы ыдырайтын және қоршаған ортаға зиянсыз болатын пластик түрі. Оның негізгі мүмкіндіктеріне экологиялық тазалық жатады, өйткені ол табиғатта толық ыдырап, қоршаған ортаны ластанбайды. Сонымен қатар, биоыдырайтын пластик қайта өңдеуге жарамды және компосттау арқылы қоректік заттарға айналуы мүмкін.

2 Тәжірибелік бөлім

2.1 Процесстің сипаттамасы

Қамыстан целлюлоза алу процесі – өсімдік талшықтарынан (негізінен лигноцеллюлозалық құрылымдардан) целлюлозаны бөліп алу әдісі. Бұл процесс бірнеше негізгі кезеңнен тұрады және әдетте экстракциялау әдістерін (физикалық, химиялық немесе биохимиялық) қолдануды қамтиды.

Бұл жұмыста біз табиғи шикізаттан (қамыстан) экстракциялау диализдеу процесі арқылы целлюлоза аламыз. Және олардың физика-химиялық қасиеттерін салыстыра зерттейміз.

1. Шикізатты дайындау (қамысты жинау және ұнтақтау)

Ең алдымен біз қамысты ұсақ бөлшектерге бөліп қиып, ұсақтап аламыз. Кейін оның массасын анализдер үшін өлшеп алып трехмерная колбаға 100 мл дистилденген су мен қамысты салып, 1 сағаттай 60 градуста мешалканың көмегімен су моншасында ұстаймыз. Бұл кезеңде ластанған бөлшектер мен қоспалар алынып тасталады.

2. Алдын ала өңдеу

Қамыстың құрамында лигнин, гемицеллюлоза, балауыз және басқа қоспалар болады. Соларды алып тастау үшін алдын ала өңдеу қажет:

- Физикалық әдіс: бу арқылы өңдеу (парогидротермиялық), қысыммен.

Кейін оны фильтрден сүзіп алып, оған 4%-тік 100 мл NaOH ерітіндісін дайындап алып қосамыз. Содан оны қамысқа қосып, тағы да 2 сағатқа су моншасында қайнатып ұстаймыз. Осы орайда оның құрамында лигнин, пиктин және де механикалық қалдықтар айрылады.

- Химиялық әдіс: сілтілік ерітіндімен (мысалы, NaOH) өңдеу.

Содан кейін оны әбден сумен шайып, фильтрден өткізген соң оған 100 мл көлемінде буферлік ерітінді мен ағартқыш ұнтақ қосамыз да, 1 - 2 күндей күтеміз. Ағартылған целлюлозаны сумен бірнеше рет иісі кеткенше шайып оны таза целлюлоза түрінде алып аламыз.

3. Экстракциялау (целлюлозаны бөліп алу)

Бұл кезеңде мақсат — қамыстың құрылымынан таза целлюлозаны бөліп алу.

Қамыс сілтілік ортада (NaOH және Na₂S ерітіндісімен) қайнатылады. Бұл кезде лигнин ыдырап, ерітіндіге кетеді, ал целлюлоза талшықтары қалып қояды.

2.2 Шикі қамыстан экстракциялау арқылы целлюлозаның алынуы

Целлюлоза табиғи шикізаттан экстракциялау процесі арқылы бөлініп алынды. Бұл процесс бірнеше кезеңдерден тұрады және негізінен лигнин мен гемицеллюлозаны жоюға бағытталған. Алдымен шикізат алдын ала тазартылып, кейін сілтілік өңдеуден өтті. Бұл кезеңде натрий гидроксиді (NaOH) сияқты

сілтілер қолданылып, лигнин мен гемицеллюлоза бөлініп шығарылды. Сілтілік ортада целлюлоза құрылымындағы қоспалар ериді, ал целлюлоза талшықтары қатты қалдық түрінде сақталады.

Экстракциялау барысында целлюлоза аморфты және кристалды аймақтардан тұратын құрылымын сақтап қалды. Нәтижесінде, жоғары тазартылған, негізінен кристалды аймақтары басым талшықты материал алынды. Бұл целлюлоза әрі қарай физикалық немесе химиялық әдістермен өңдеуге жарамды, мысалы, наноцеллюлоза алу немесе биополимерлерге қолдану мақсатында.

Экстракцияланған целлюлозаның негізгі қасиеттеріне оның жоғары полимерлену дәрежесі, химиялық тазалығы және құрылымдық тұрақтылығы жатады. Осы қасиеттері оны биологиялық ыдырайтын материалдар, композиттер және медициналық қолданулар үшін тиімді етеді.

2.3 Зерттеудің физикалық, химиялық әдістері

Қамыс және синтезделген целлюлозаға сипаттама беру, қасиеттерін анықтау мақсатында әртүрлі анализдер және талдаулар жасалды.

Зерттелетін сополимердің құрлысын, құрамын, құрлымын анықтауда Инфрақызыл спектрлер (ИК-спектрлер) әдісі қолданылып, ИК-фурье спектрометр Alpha «Platinum ATR» (АҚШ) аппаратында $4000-400\text{см}^{-1}$ диапазонында спектрлер жазылып, талдау жасалды.

Қамыс және целлюлозаның беттік морфологиясын зерттеу мақсатында сканерлеуші электронды микроскопта (SEM; «JSM-6390LV»; JEOL, Japan) зерттеу жасалды.

3 Нәтижелер және оларды талдау

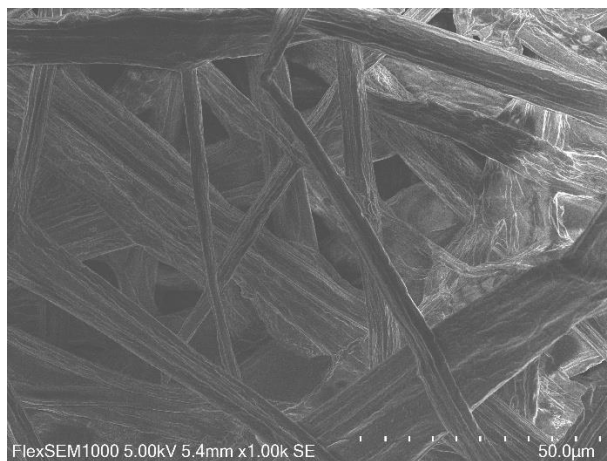
3.1 Қамыс және экстракциялау арқылы алынған целлюлозаның физика-химиялық қасиеттерін салыстыра зерттеу

Шикі қамыс пен одан алынған целлюлозаның беттік морфологиясын зерттеу мақсатында СЭМ анализі арқылы талдау жасалды. Қамыстың беткі қабаты өте біркелкі емес, қиғаш және кедір-бұдырлы көрінеді. Ұсақ талшықтар, терең ойыстар, жарықтар байқалады. Бұл құрылым қамыс сияқты өсімдік материалдарына тән, онда целлюлоза лигнин, гемицеллюлозалар және басқа қоспалармен қатты байланысты.

Мұнда материалдың таза және жеке талшықты сипаты айқын көрінеді. Бастапқы қамыстағы кедір-бұдырлы бет пен ірі құрылымдар жоғалған, орнына жіңішке, айқын ажыратылатын целлюлоза талшықтар тұратын тор қалыптасқан. Бұл талшықтар (фибриллалар) бір-бірімен өзара шиыршықтасып, табиғи талшықты материалдарға тән.



Шикі қамыс



Қамыстан алынған целлюлоза

5-сурет - Қамыс және экстракциялау арқылы алынған целлюлозаның сканерлеуші микроскоптағы микро суреті

Бұл екі сурет экстракция процесінің материалдың морфологиясын (пішіні мен құрылымын) түбегейлі өзгерткенін анық көрсетеді. Қамыстың кедір-бұдырлы, біркелкі емес, қоспаларға толы беті (Сурет 1), экстракциядан кейін таза, жіңішке талшықтардың айқын көрінетін желімделмеген торымен (Сурет 2) алмастырылған. Целлюлоза талшықтарының ашық көрінуі экстракция әдісінің (әдетте химиялық әкпілдеу) бастапқы материалдан целлюлозаны бөліп алуда және лигнин сияқты негізгі қоспаларды тиімді жоюда тиімді болғанын дәлелдейді. Алынған целлюлозаның талшықтылығы мен тазалығы оны қағаз, композиттер, биоыдырайтын материалдар өндірісі сияқты көптеген қолданбалар

үшін қолайлы етеді. Суреттер материалды қайта өңдеудің құрылымдық деңгейдегі сәтті нәтижелерін анық көрсетеді.

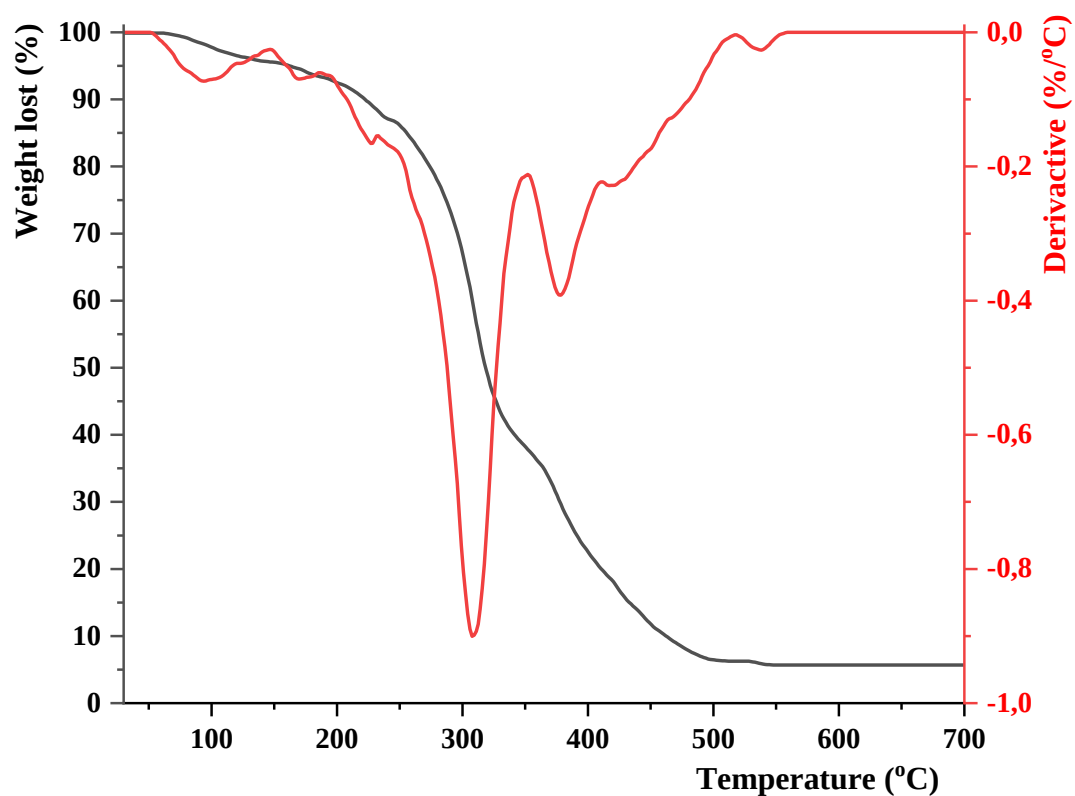
Термиялық қасиеттерді сипаттау мақсатында термогравиметриялық (ТГА) және дифференциалды термогравиметриялық (ДТГ) талдаулар жүргізілді. Бұл талдаулар таза қамыс үлгісі мен экстракциядан кейінгі қамыс қалдығына қатысты жүзеге асырылды.

Қамыс пен экстракциядан кейінгі целлюлозаның термиялық тұрақтылығы PDTmax (максималды термиялық ыдырау температурасы) мәні арқылы салыстырылады. Қамыс үшін бұл мән 307 °C, ал экстракцияланған целлюлоза үшін 328 °C құрайды. Бұл көрсеткіш экстракция процесінен кейін целлюлозаның құрылымы өзгеріп, термиялық тұрақтылығының артқанын дәлелдейді. Яғни, целлюлоза құрамындағы термиялық тұрғыда әлсіз компоненттер (лигнин, гемицеллюлоза, балауыз, т.б.) жойылып, материал ыдырауға анағұрлым кеш түседі.

Қамыстың термиялық қасиеттері бірнеше температуралық диапазондарға бөлінетінін байқауға болады. Әрбір диапазонда белгілі бір компоненттердің ыдырауына байланысты массаның жоғалуы байқалды.

Төмен температуралық аймақта (30–120 °C) үлгіден ылғал мен төменмолекулалы ұшпа қосылыстардың бөлінуі жүреді. Орташа температуралық диапазонда (200–400 °C) негізгі массаның жоғалуы целлюлоза мен гемицеллюлозаның термиялық ыдырауына сәйкес келеді. Жоғары температураларда (400 °C жоғары) лигниннің баяу және кең ауқымды ыдырауы байқалады. Осы диапазондарға негізделе отырып, қамыстың құрамдас бөліктерінің термиялық тұрақтылығы мен ыдырау сипаттамалары бағаланды. Бастапқы температура диапазоны (30–150 °C): ылғал мен ұшпа қосылыстардың жойылуы

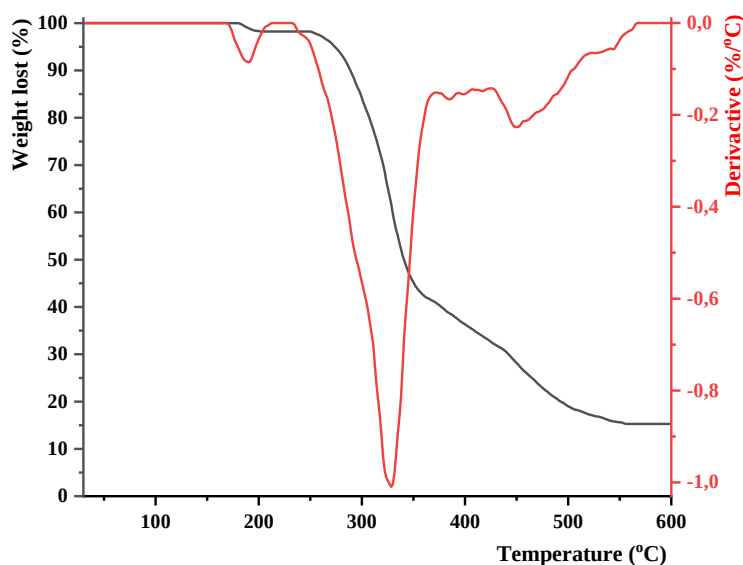
Бұл аралықта байқалған салмақ жоғалту үлгінің құрамындағы бос және байланысқан судың, сондай-ақ төмен температурада буланатын ұшпа қосылыстардың шығуымен түсіндіріледі. Қамыста бұл көрсеткіш 5% болса, экстракцияланған целлюлозада ол небәрі 1% құрайды. Бұл экстракция процесінің нәтижесінде целлюлозаның құрамындағы ылғал және ұшпа заттар айтарлықтай азайғанын көрсетеді. Сонымен қатар, бұл өңделген үлгінің гигроскопиялық қасиеттері төмендегенін білдіреді.



6-сурет - Қамыстың термогравиметриялық және дифференциалды термогравиметриялық талдауы

Кесте 2 – Қамыстың және экстракциялау арқылы алынған целлюлозаның қасиеттері

Үлгі	PDTmax (°C)	Temperature Decomposition (°C)	Weight lost (%)	Residual (%)
Қамыс	307	30-150	5	95
		150-250	9	86
		250-385	59	27
		385-600	22	5
Экстракциялау арқылы алынған целлюлоза	328	30-150	1	99
		150-250	3	96
		250-385	58	38
		385-600	25	15

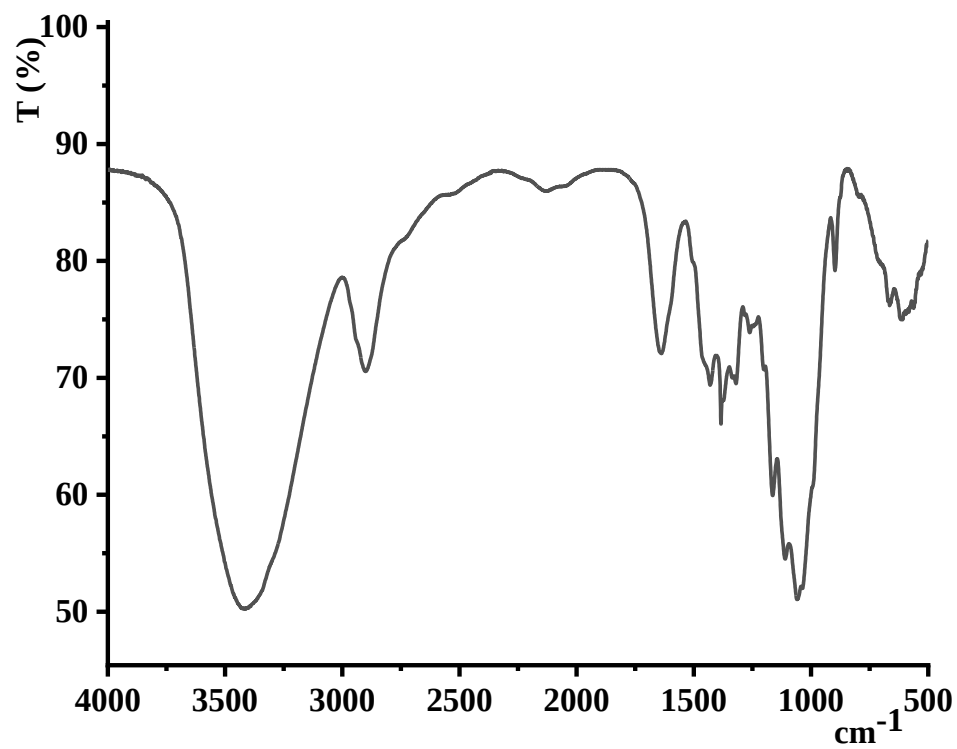
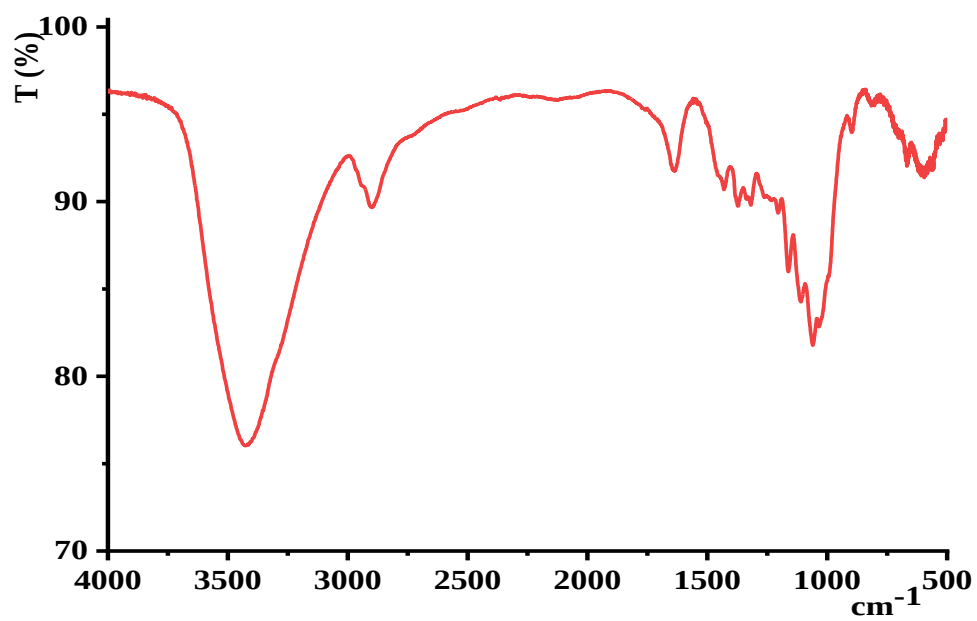


7-сурет - Қамыстан алынған целлюлозаның термогравиметриялық және дифференциалды термогравиметриялық талдауы

Орташа температура диапазоны (150–250 °C): гемицеллюлозаның ыдырауы байқалады. Бұл аралықта негізінен гемицеллюлоза мен кейбір төмен термиялық тұрақтылықтағы органикалық қосылыстар ыдырайды. Қамыс үлгісінде бұл диапазонда 9% салмақ жоғалса, экстракцияланған целлюлозада бар-жоғы 3% жоғалады. Бұл да тағы бір дәлел – целлюлоза құрамындағы гемицеллюлоза сияқты термиялық тұрғыда тұрақсыз компоненттер экстракция кезінде жойылған. Осылайша, экстракцияланған целлюлоза тазалығы жоғары болатынын көреміз.

Негізгі ыдырау кезеңі (250–385 °C): целлюлозаның ыдырауы байқалды. Бұл температура аралығында екі үлгі де айтарлықтай салмақ жоғалтады – қамыс үшін 59%, ал целлюлоза үшін 58%. Бұл кезеңде негізгі термиялық ыдырау процесі – целлюлозаның полимер тізбектерінің бұзылуы жүреді. Екі үлгідегі шамалас салмақ жоғалту мөлшері бастапқыда ұқсас целлюлоза мөлшері болғанын меңзейді. Алайда экстракцияланған үлгідегі термиялық ыдырау сәл жоғары температурада жүретіндіктен, тазартылған целлюлозаның термиялық тұрғыдан тұрақтылығы жоғары деп қорытынды жасауға болады.

Жоғары температура диапазоны (385–600 °C) және қалдық мөлшері есептеледі. Бұл кезеңде қалған органикалық заттар толық ыдырайды. Қамыс үлгісі 22% салмақ жоғалтып, соңында 5% қалдық қалдырса, экстракциядан кейінгі целлюлоза 25% салмақ жоғалтып, 15% қалдық қалдырады. Бұл экстракцияланған үлгінің құрамында термиялық ыдырауға төзімді бейорганикалық қосылыстар (мысалы, минералдар немесе күл) көбірек сақталғанын көрсетеді. Қалдық мөлшерінің көп болуы, бір жағынан, материалдың бейорганикалық құрамының жоғары екенін, екінші жағынан, толық ыдырамаған құрылымдардың бар екенін білдіруі мүмкін.



8-сурет – Үлгінің ИК спектрлері

ҚОРЫТЫНДЫ

1. Табиғи шикізат ретінде пайдаланылатын қамыстан целлюлоза талшықтары синтезделіп алынды. Синтезде барысында әртүрлі әдістер (экстракциялау, ағарту, диализдеу әдістері) қолданылды.

2. Қамыстан алынған целлюлоза мен шикізат ретінде пайдаланған қамыстың физ-химиялық қасиеттері салыстыра зерттелді. Олардың құрлымын, құрамын зерттеу мақсатында ИҚ-спектрлік талдау жүргізілід.

3. СЭМ анализі арқылы целлюлоза мен шикі қамыстың беттік морфологиялары зерттелді. Қамысты өндегенде ішкі құрлымының өзгеретіндігі анықталды.

4. ТГА және ДТГ арқылы целлюлоза мен шикі қамыстың термиялық тұрақтылығы зерттелді. Қамыс өңделгеннен кейін оның термиялық қасиеті өзгеретінін көруге болады. оның термиялық қасиеті бірнеше сатыдан тұратынын көруге болады.

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Суворов Н.В. — Химия и технология полимеров. — М.: Химия, 2003.
2. Быховский М.Я. — Химия высокомолекулярных соединений. — М.: Химия, 2005.
3. Малкин А.Я., Титаренко Н.Ю. — Реология и переработка полимеров. — СПб.: Химия, 2007.
4. Власов В.М. — Физическая химия полимеров. — М.: Наука, 1990. Сычёв В.Н. — Основы химии полимеров. — М.: Академкнига, 2006.
5. Пискунов А.В. — Методы исследования полимеров. — СПб.: Питер, 2011.
6. Новиков В.Н. — Физико-химические свойства макромолекул. — М.: Лань, 2008.
7. Гришин Д.Ф. — Полимерные материалы: Справочник. — М.: Химия, 2002.
8. Бочкарёв В.Н. — Химия и физика биополимеров. — Новосибирск: НГУ, 2010.
9. Ревин В.В., Шнайдер Р.А. — Биополимеры: структура и функции. — Саратов: СГУ, 2014.
10. Seymour R.B., Carraher C.E. — Polymer Chemistry: An Introduction. — CRC Press, 2000.
11. Young R.J., Lovell P.A. — Introduction to Polymers. — CRC Press, 2011.
12. Billmeyer F.W. — Textbook of Polymer Science. — Wiley-Interscience, 1984.
13. Gowariker V.R., Viswanathan N.V., Sreedhar J. — Polymer Science. — New Age International, 1986.
14. Ehrenstein G.W. — Polymeric Materials: Structure, Properties, Applications. — Hanser, 2001.
15. Albertsson A.C., Srivastava R.K. — Recent Developments in Degradable Polymers. — Springer, 2002.
16. Averous L., Pollet E. — Environmental Silicate Nano-Biocomposites. — Springer, 2012.
17. Tokiwa Y., Calabia B.P. — Biodegradability of Plastics. — International Journal of Molecular Sciences, 2009.
18. Scott G. — Degradable Polymers: Principles and Applications. — Springer, 2002.
19. Kumar A.P., Depan D., Tomer N.S., Singh R.P. — Nanoscale particles for polymer degradation and stabilization. — Progress in Polymer Science, 2009.
20. Chandra R., Rustgi R. — Biodegradable Polymers. — Progress in Polymer Science, 1998.
21. Kiran S., Mohanty A.K., Misra M. — Biobased Polymers and Composites. — CRC Press, 2005.