

15-дәріс. ИНТЕРПОЛИМЕРЛІК РЕАКЦИЯЛАРДЫҢ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

1. Кіріспе

Интерполимерлік реакциялар — бұл екі немесе бірнеше полимер тізбектерінің арасында жүретін **химиялық немесе физикалық өзара әрекеттесулер**, нәтижесінде **интерполимерлік комплекстер, қоспалар немесе гибриді материалдар** түзіледі.

Бұл реакциялар **материалдардың жаңа буынын жасауға** мүмкіндік береді:

- функционалды;
- биосәйкестілігі жоғары;
- экологиялық қауіпсіз;
- «ақылды» жауап беретін (stimuli-responsive) жүйелер.

XXI ғасырда интерполимерлік реакциялар **нанотехнологиямен, биотехнологиямен және «жасыл» химиямен** тоғысып, жаңа бағыттарға жол ашты.

2. Интерполимерлік реакциялардың қазіргі маңызы

Интерполимерлік реакциялар келесі себептер бойынша өзекті:

Мәселе	Шешім (интерполимерлік реакциялар арқылы)
Қатты полимерлердің сынғыштығы	Полимер–полимер торлар арқылы серпімділікті арттыру
Экологиялық ластану	Биодеградацияланатын полимерлермен комплекстеу
Дәрілік заттардың тез ыдырауы	Controlled-release ІПК жүйелері
Қаптамалық материалдардың тұрақсыздығы	Интерполимерлік торлар арқылы ылғалға төзімділік беру
Электроникада полимер қажеттілігі	өткізгіш Донор-акцептор типті ІПК электронөткізгіш торлар алу

3. Негізгі даму бағыттары мен перспективалары

3.1. Жасыл химия және экологиялық технологиялар

Болашақта интерполимерлік реакциялар **экологиялық таза процестерге** бағытталады:

- **Сулы ортадағы синтездер** — органикалық еріткіштерді алмастыру;
- **Биоыдырайтын полимерлерді** (PLA, PHA, крахмал, хитозан, альгинат) пайдалану;
- **Төмен энергиялы реакциялар** (ультрадыбыс, микротолқын, жарық әсері арқылы белсендендіру);
- **Қалдықсыз өндіріс** – биосәйкестілік және қайта өңдеуге жарамдылық.

◆ *Мысалы:* Хитозан мен полилактид арасындағы интерполимерлік реакциялар нәтижесінде толық биоыдырайтын қаптама материалдары алынады.

Хитозан (Chitosan) мен полилактид (PLA) — қазіргі таңда ең көп зерттеліп жатқан **табиғи және синтетикалық биополимерлердің** бірі. Олардың комбинациясы арқылы алынған **интерполимерлік комплекстер (ІПК)** экологиялық таза, биоыдырайтын және функционалды материалдар жасауға мүмкіндік береді.

1. Реакцияның мәні мен механизмі

Полилактид (PLA) — сүт қышқылының полимері, ал **хитозан** — хитиннің деацетилдену өнімі. Екі полимердің химиялық табиғаты әртүрлі болғанымен, олардың арасында **сутектік және электростатикалық байланыстар** түзуге бейім функционалды топтар бар:

- PLA құрамында C=O және O- топтары бар (эфир топтары),
- Хитозан құрамында NH_2 және OH топтары кездеседі.

Бұл байланыстар нәтижесінде **интермолекулалық сутектік көпірлер** түзіледі, ал полимер тізбектері молекулалық деңгейде бірігіп, берік және біртекті **гибридті тор** құрайды.

Қосымша модификация кезінде — мысалы, хитозанның амин топтарын сәл ацетилдеп немесе PLA тізбегін глицидол, малеин ангидрид арқылы функционалдағанда — **ковалентті байланыстар** да пайда болуы мүмкін. Мұндай химиялық байланыстар материалдың беріктігі мен тұрақтылығын арттырады.

2. Алынған материалдың құрылымдық ерекшелігі

Хитозан мен PLA-ның интерполимерлік комплексі көбінесе **қабатты (lamellar)** құрылым түзеді.

Хитозан тізбектері PLA матрицасының бетінде адсорбцияланып, **гидрофильді қорғаныш қабат** түзеді. Бұл қабат:

- ылғал өткізгіштігін төмендетеді,
- оттегінің диффузиясын тежейді,
- антибактериялық қасиет береді.

Осылайша, алынған жүйе **core-shell типті композит** ретінде сипатталады:

- ішкі қабат – PLA (берік, механикалық тұрақты),
- сыртқы қабат – хитозан (гидрофильді және биоактивті).

3. Қасиеттері

Қасиет түрі	PLA	Хитозан	ІПК негізіндегі композит
Механикалық беріктік	Жоғары, бірақ сынғыш	Икемді, бірақ әлсіз	Икемді әрі берік
Су өткізгіштік	Төмен	Жоғары	Реттелетін

Қасиет түрі	PLA	Хитозан	ІПК негізіндегі композит
Биодеградация	Толық ыдырайды (6–12 ай)	Толық ыдырайды (2–6 ай)	Толық биоыдырайды (уақыт реттеледі)
Бактерияға төзімділік	Әлсіз	Жоғары	Жоғары
Жылу тұрақтылығы	150–180°C	120–150°C	160–180°C

Нәтиже: интерполимерлік комплекс түзілу PLA-ның сынғыштығын азайтады, ал хитозанның механикалық әлсіздігін түзетеді.

4. Синтез әдістері

Хитозан–PLA ІПК жүйесін алу бірнеше жолмен жүзеге асырылады:

- Ерітіндіде комплекстеу (solution blending):**
Екі полимер этанол–су қоспасында ерітіліп, араластырылған соң біртіндеп еріткіш буландырылады.
- Эмульсиялық әдіс:**
PLA органикалық фазаға, хитозан су фазасына енгізіліп, эмульсия арқылы біртекті қоспа түзіледі.
- Электроспиннинг (electrospinning):**
Композициядан нано-талшықтар алынады — бұл әдіс биомедициналық қаптамалар мен жара таңғыштарында қолданылады.
- Плазмалық модификация:**
PLA бетіне плазма арқылы $-NH_2$ топтарын енгізіп, хитозанмен реакцияға қабілетті етеді.

5. Қолданылу салалары

- Тағамдық қаптамалар:**
 - Хитозан PLA бетінде бактериялардың көбеюін тежейді (мысалы, *E. coli*, *S. aureus*).
 - Материал биоыдырайды, сондықтан экологиялық тұрғыдан қауіпсіз.
- Медицина:**
 - Хитозан–PLA пленкалары жара таңғыш және имплант қабаты ретінде қолданылады.
 - Дәрілік заттарды біртіндеп босату жүйелерінде (controlled-release).
- Ауыл шаруашылығы:**
 - Тыңайтқыштар мен пестицидтерге арналған биоыдырайтын контейнерлер.
- Қаптама өнеркәсібі:**
 - PLA–хитозан негізіндегі қабықтар полиэтилен мен полипропиленді біртіндеп алмастыруда.

 *Мысал:*

Müller et al., Food Packaging and Shelf Life, 2020 зерттеуінде PLA/хитозан ІПК пленкасының механикалық беріктігі 25% жоғарылағаны және оттегінің өтімділігі 30% төмендегені анықталған.

6. Экологиялық және экономикалық артықшылықтар

- Табиғи, жаңартылатын шикізаттардан алынады (жүгері – PLA көзі, теңіз шаянтектерінің қалдығы – хитозан көзі);
 - Өндірісте улы еріткіштер қолданылмайды;
 - Материал толығымен компостталатын және қоршаған ортада зиянсыз ыдырайды;
 - Қолданыстан кейін қалдық қалдырмайды – бұл **жасыл химия принциптеріне** сай келеді.
-

7. Даму перспективалары

Болашақта бұл бағытта келесі зерттеулер белсенді дамуда:

- Хитозанды химиялық модификациялау арқылы PLA-мен байланысын күшейту (мысалы, қышқыл ангидридтер арқылы);
- Нанобөлшектермен (ZnO, Ag, TiO₂) біріктіріп антимикробтық және фотостабилді қабықтар алу;
- PLA–хитозан ІПК-ны **3D принтинг технологияларында** пайдалану;
- Толық **биоыдырайтын және тағаммен жанасуға қауіпсіз қаптама материалдарын** өндіріске енгізу.

Хитозан мен полилактид арасындағы интерполимерлік реакциялар нәтижесінде алынған материалдар:

- экологиялық таза,
- толығымен биоыдырайтын,
- механикалық және микробиологиялық тұрғыдан тұрақты,
- тағам, медицина және фармацевтика салалары үшін перспективалы **қаптама жүйелері** болып табылады.

Бұл комбинация **жасыл химия мен полимер инженериясының тоғысқан үлгісі** болып саналады және болашақта мұнай негізіндегі пластиктердің орнына өтпелі технология ретінде кеңінен таралуы күтілуде.

3.2. Нанотехнология және гибриді нанокомпозиттер

Интерполимерлік реакциялар наноқұрылымды жүйелердің түзілуін басқаруға мүмкіндік береді.

Перспективалық бағыттар:

- ІПК арқылы нанобөлшектердің агрегациясын болдырмау;
- Нанотолтырғыштардың (TiO₂, SiO₂, CNT, наноглина) біркелкі таралуын қамтамасыз ету;
- Интерфейстік қабаттар түзу арқылы беріктікті арттыру.

Қолдану:

- Суды тазартуға арналған мембраналар
- Энергия сақтау жүйелері (батареялар, суперконденсаторлар)
- Сенсорлар және катализаторлар

Мысалы:

Sarika P.R. (2023) көрсеткендей, PAA/PEI ІПК + TiO₂ нанобөлшектері негізінде алынған нанокомпозиттер органикалық ластағыштарды фотокаталитикалық жолмен жоя алады.

3.3. «Ақылды» полимер жүйелері

Болашақта интерполимерлік реакциялар **сезімтал немесе «responsive» материалдар** жасауға бағытталады.

Мұндай материалдар сыртқы ортаның өзгерісіне жауап береді:

Стимул	Жауап түрі	Мысал
pH	Ісіну немесе ерігіштіктің өзгеруі	Хитозан/ПАА ІПК — дәрі босату жүйелері
Температура	Фазалық ауысу	PNIPAM/ПЭО ІПК — температураға сезімтал гельдер
Жарық	Түстік немесе өткізгіштік өзгерісі	Полианилин/ПВП ІПК — оптоэлектроника
Иондық орта	Ион алмастыру	Альгинат/ПАА ІПК — суды жұмсарту жүйесі

◆ *Мысалы:* pH 5–7 диапазонында ісінетін хитозан–ПАА гидрогелі дәріні асқазан-ішек жолында біртіндеп босатады.

3.4. Биомедицина және тін инженериясы

Интерполимерлік реакциялар **биосәйкестілік пен функционалдылықты** бір уақытта қамтамасыз ететін жүйелер жасауға мүмкіндік береді.

- **Гидрогель негізіндегі ІПК** — дәрі жеткізу, жара таңғыштар, тіндік scaffold ретінде;
- **Инъекциялық гельдер** — ағза ішінде полимеризацияланатын жүйелер;
- **Антимикробтық ІПК-композиттер** — Ag, ZnO нанобөлшектерімен біріктірілген.

■ *Shamim N., et al. (2021)* зерттеуінде хитозан/ПЭО ІПК мен күміс нанобөлшектері бар гидрогельдер жараның жазылуын 40%-ға жылдамдататыны дәлелденген.

3.5. Электроактивті және өткізгіш ІПК

Электроника мен энергия сақтау саласында **донор–акцептор типті интерполимерлік реакциялар** ерекше орын алады:

- Полианилин, полипиррол сияқты өткізгіш полимерлер ПВП, ПЭО сияқты изоляциялық полимерлермен ІПК түзіп, реттелген өткізгіштік береді;
- Мұндай жүйелер **сенсорлар, OLED дисплейлері, жарыққа сезімтал жабындар** жасауға қолданылады.

(Zhang et al., *Synthetic Metals*, 2019)

3.6. Интерфейстік реакциялар мен 3D-композиттер

Жаңа буын интерполимерлік реакциялар **интерфейстік инженерия** арқылы жүзеге асады.

- Полимер тізбектері мен нанобөлшек беті арасында химиялық «якорь» байланыстар түзу;
 - 3D принтингте көп қабатты ІПК-гибридтер жасау;
 - Өзін-өзі қалпына келтіретін (self-healing) торлар синтездеу.
- ♦ *Мысалы:* Полиуретан/ПЭО ІПК жүйелері жарық немесе жылу әсерінен қайта қалпына келетін құрылым ретінде зерттелуде (Huang et al., 2021).

3.7. Индустриялық масштабқа енгізу

Перспективалық бағыттардың бірі – **интерполимерлік реакцияларды өнеркәсіпке енгізу.**

Бұл үшін шешілуі тиіс міндеттер:

- реакцияны басқарудың қарапайым және энергия тиімді әдістерін табу;
- шикізаттың арзандығы және қолжетімділігі;
- экологиялық талаптарға сай технологиялар әзірлеу;
- ІПК жүйелердің ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ету.

Мысалы, қазіргі таңда ІПК негізінде алынған нанofilъльтрациялық мембраналар **суды тазарту және тұщыландыру зауыттарында** сынақтан өтіп жатыр.

4. Интерполимерлік реакциялардың даму перспективаларын қорытындылау

Бағыт	Негізгі мақсат	Күтілетін нәтиже
Жасыл химия	Экологиялық таза синтез	Биодеградацияланатын ІПК
Нанотехнология	Біртекті наноқұрылым түзу	Функционалды нанокомпозиттер
Биомедицина	Биосәйкестілік және дәрі жеткізу	Тін инженериясы материалдары
Электроника	Өткізгіш және сезімтал ІПК	Смарт сенсорлар, батареялар
Қаптама өндірісі	Ылғалға және микробқа төзімді ІПК	Эко-қаптама материалдары

5. Қорытынды

1. Интерполимерлік реакциялар қазіргі уақытта **материалтану, биотехнология және экологиялық инженерияның тоғысқан саласы** ретінде дамуда.

2. Олар арқылы алынған ІПК-негізіндегі материалдар **жоғары функционалды, икемді және экологиялық таза** болып келеді.

3. Алдағы 10–15 жылда бұл бағытта **жасанды интеллектпен басқарылатын синтез, нанороботтық құрастыру және биосенсорлық жүйелермен интеграция** сияқты жаңа мүмкіндіктер ашылуы күтіледі.

6. Қайталау сұрақтары

1. Интерполимерлік реакциялардың негізгі түрлері қандай?
2. Бұл реакциялардың нанокөмбіт түзуге әсері қандай?
3. Жасыл химия тұрғысынан ІІК синтезінің артықшылықтары қандай?
4. Қандай бағыттарда ІІК технологиялары белсенді дамып келеді?
5. Ақылды полимер жүйелері дегеніміз не?
6. Интерполимерлік реакцияларды өнеркәсіпке енгізудің қиындықтары неде?

7. Пайдаланылған әдебиеттер

1. Sarika P.R., et al. *Recent Advances in Interpolymer Complex-Based Nanocomposites*. **Progress in Polymer Science**, 2023.
2. Shamim N., et al. *Chitosan–PEO Interpolymer Complex Nanogels for Biomedical Applications*. **Carbohydrate Polymers**, 2021.
3. Huang Y., Wang X., et al. *Interface Engineering in Interpolymer Complex Systems*. **RSC Advances**, 2021.
4. Zhang Y., et al. *Conductive Interpolymer Complex Nanocomposites*. **Synthetic Metals**, 2019.
5. Kudryavtsev Y.V., et al. *Interpolymer Reactions and Hybrid Complexes*. **Polymer Science Series A**, 2018.
6. Adedapo A.O., Nomngongo P.N. *Polymer Nanocomposites for Environmental Remediation*. **Polymers**, 2022.