

3-ДӘРІС. ЕРІТІНДІДЕГІ ИНТЕРПОЛИМЕРЛІК РЕАКЦИЯЛАР

1. Дәрістің мақсаты

- Ерітіндіде макромолекулалар арасындағы өзара әрекеттесулердің (интерполимерлік реакциялар) негізгі ұғымдарын түсіндіру.
- Полимер-полимер арасындағы комплексті түзу, ерігіштік шарттары, кинетикасы мен термодинамикасын қарастыру.
- Практикалық мысалдар арқылы интерполимерлік реакциялардың материалтану, технологиялық процестердегі маңызын ашу.
- Заманауи зерттеулер мен мақалаларға сүйене отырып, осы саланың бағыттарын таныстыру.

2. Қол жеткізілетін оқу нәтижелері

Студент дәріс соңында келесі қабілеттерге ие болады:

1. Ерітіндідегі интерполимерлік реакция не екенін айта алады.
2. Интерполимерлік реакцияларды қозғаушы факторларды (рН, ион сәулесі, молекулалық масса, гидрофоб-гидрофиль балансы) сипаттай алады.
3. Интерполимерлік комплекстерді (ІРС) түзу термодинамикасы мен кинетикасы туралы түсінік алады.
4. Зерттеу мақалаларын оқып, интерполимерлік жүйелердің практикалық қолдануын түсіндіре алады.
5. Ерітіндіде интерполимерлік реакцияларды бақылайтын шарттарды материалдық жүйелерге қолдана алады.

3. Дәріс конспектісі

3.1. Интерполимерлік реакциялар туралы жалпы түсінік

Интерполимерлік реакциялар (ИПР) — екі немесе одан да көп полимер тізбектерінің ерітіндіде өзара әрекеттесіп, тұрақты **интерполимерлік комплекстер (ІРС)** немесе **гибридтік құрылымдар** түзу процесі.

Бұл реакциялар кезінде **макромолекулалар арасында сутектік, электростатикалық, гидрофобтық және донор-акцепторлық байланыстар** түзіледі. Кей жағдайларда коваленттік байланыстар да пайда болуы мүмкін, бірақ көбінесе ИПР — физикалық өзара әрекеттесулердің нәтижесі.

Негізгі ерекшеліктері:

- Реакция ерітіндіде жүреді (су немесе органикалық еріткіштерде);
- Әдетте қайтымды, яғни шарттарды өзгерткенде (рН, температура) комплекс ыдырай алады;
- Нәтижесінде жаңа физикалық қасиеттерге ие полимерлік жүйелер түзіледі.

Мысал:

Полиакрил қышқылы (РАА) мен полиэтиленгликоль (PEG) ерітіндіде әрекеттесіп, сутектік байланыстар арқылы интерполимерлік комплекс түзеді. Бұл комплекс суда ерімейтін, бірақ төмен температурада қайта қалпына келетін гидрогельге айналуы мүмкін.

3.2. Интерполимерлік комплекстердің түзілу механизмдері

Интерполимерлік комплекстер түзілуінің негізгі түрлері:

1. **Сутектік байланыс негізіндегі комплекстер**
 - Донор ретінде электрон тығыздығы жоғары топтар ($-C=O$, $-COOH$, $-OH$), ал акцептор ретінде сутек атомы бар топтар ($-NH$, $-OH$) қатысады.
 - Мысалы: поли(винил спирт) + поли(акрил қышқылы).
2. **Электростатикалық (иондық) комплекстер**
 - Қарама-қарсы зарядталған полимерлердің (полиэлектролиттер) әрекеттесуі нәтижесінде түзіледі.
 - Мысалы: полиакрилат натрийі (анионды) + поли(диметилдидаллил аммоний хлориді) (катионды).
 - Мұндай кешендер *интерполиэлектролиттік комплекстер (IPEC)* деп аталады.
3. **Гидрофобтық әрекеттесу негізіндегі комплекстер**
 - Полимерлердің бейполярлы бөліктерінің су ортасынан «қашуы» нәтижесінде түзіледі.
 - Бұл механизм көбіне беттік белсенді полимерлер мен биополимерлер үшін тән.
4. **Донор-акцептор типті әрекеттесулер**
 - Полимердің π -электрон жүйесі бар топтары (мысалы, ароматты фрагменттер) мен электрон жетіспейтін фрагменттері арасында пайда болады.
 - Мұндай комплекстер оптикалық және электрохимиялық қасиеттерімен ерекшеленеді.

3.3. Интерполимерлік реакцияларға әсер ететін факторлар

1. **pH және ортаның иондық күші**
 - Полимер тізбектеріндегі функционалды топтардың иондану дәрежесі pH-қа тәуелді.
 - Мысалы, PAA + PEG жүйесінде pH төмендеген сайын сутектік байланыс күшейіп, комплекс түзілуі артады.
 - Электролиттер концентрациясы артқан сайын электростатикалық әрекеттесулер әлсірейді.
2. **Температура**
 - Көптеген интерполимерлік комплекстер экзотермиялық жолмен түзіледі, яғни температура жоғарылағанда олардың тұрақтылығы төмендейді.
 - Кейбір жүйелерде (мысалы, термосезімтал гидрогельдер) температураны арттыру комплекстің түзілуін керісінше күшейтеді.
3. **Еріткіштің табиғаты**
 - Полярлы еріткіштер сутектік байланыстарды әлсіретеді;
 - Аз полярлы еріткіштерде комплекстер тұрақтырақ болады.
4. **Полимердің молекулалық массасы мен құрылымы**
 - Ұзын тізбекті және көпфункционалды полимерлер интерполимерлік байланыстар түзуге бейім;
 - Тізбек иілгіштігі мен тармақталуы да әсер етеді.
5. **Полимерлердің қатынасы және концентрациясы**

- Стехиометриялық емес қатынастарда (мысалы, артық бір компонент) комплекс түзілу толық болмайды.
- Концентрация өскен сайын агрегаттар және тұнбалар пайда болуы мүмкін.

3.4. Интерполимерлік комплекстердің қасиеттері мен қолданылуы

Интерполимерлік реакциялар мен комплекстердің ерекше құрылымдық және физика-химиялық қасиеттері олардың ғылым мен техникадағы көптеген салаларда кеңінен қолданылуына мүмкіндік береді. Мұндай комплекстердің басты артықшылығы — **жоғары тұрақтылық, бақыланатын еруі, биосәйкестілік, және бейімделгіш (responsive) мінез-құлық.**



1. Фармацевтика және медицина саласы

Интерполимерлік комплекстер дәрілік заттарды **бағытты жеткізу (targeted drug delivery)** және **баяу босату (controlled release)** жүйелерін жасау үшін белсенді қолданылады.

Мысалы:

- **PAA/PEG (полиакрил қышқылы / полиэтиленгликоль)** жүйесі сутектік байланыстар арқылы интерполимерлік комплекс түзеді. Бұл комплекс дәрілік молекулаларды өз құрылымына ендіріп, оларды сыртқы орта (рН, температура) өзгергенде біртіндеп босатады.
- Мұндай жүйелер **асқазан-ішек жолында бағытты әсер ету, тері арқылы (transdermal) тасымалдау, және ісікке бағытталған терапия (tumor-targeting)** мақсатында қолданылады.
- Кейбір ІРС негізіндегі гидрогельдер дәрілік заттың дозасын реттеп, оның биожетімділігін арттырады.
- 2022 жылы *Polymers* журналында жарияланған [Nekrasova et al., 2022] зерттеуінде фосфорилхолин мен полиқышқылдар негізіндегі интерполимерлік комплекстердің **жасушалық биосәйкестігі жоғары** екені дәлелденген.

◆ Қолдану мысалдары:

- Дәрілік тасымалдағыш гидрогельдер (PAA/PEG, PVP/PAA жүйелері);
- Контакт линзаларында дәріні ұзақ босату жүйелері;
- Жасанды тері мен жара таңғыш материалдары;
- Импланттарға арналған биосәйкесті қабықшалар.



2. Материалтану және интеллектуалды материалдар

Интерполимерлік комплекстер материалтануда **stimuli-responsive (сыртқы әсерге жауап беретін)** немесе **ақылды материалдар** жасау үшін кеңінен қолданылады.

- Мұндай материалдар температура, рН, жарық, иондық күш немесе электр өрісінің әсерінен өз қасиетін өзгертеді.
- Интерполимерлік кешендер бұл өзгерістерге **қайтымды** жауап береді: мысалы, гель → ерітінді немесе гидрофоб → гидрофиль күйіне көше алады.

- Мұндай жүйелердің мысалы — **PNIPAAm/PAA** интерполимерлік гидрогелі: 35 °C жоғары температурада су тебуші күйге ауысып, өз көлемін азайтады.

- ◆ **Қолдану мысалдары:**

- Сенсорлар мен актюаторлар (pH немесе температура сезгіш құрылғылар);
- Интеллектуалды мембраналар (заттардың өткізгіштігін бақылайтын қабаттар);
- Өзін-өзі жөндейтін және механикалық беріктігі артқан композиттер;
- Электропроводты немесе жарыққа жауап беретін полимерлер (электроника және оптоэлектроника саласында).

2025 жылы *Polymers* журналында жарияланған Korishev және әріптестерінің зерттеуінде целлюлоза туындылары мен полиакрил қышқылы негізіндегі интерполимерлік комплекстердің **беттік сезімтал қасиеттері** сипатталған — олар сенсорлар мен мембраналық құрылғыларда қолдануға болатыны анықталды.



3. Биотехнология және экологиялық биоматериалдар

Интерполимерлік комплекстердің **биосәйкестілік, биоыдырау, және экологиялық тазалық** қасиеттері олардың биотехнология саласында ерекше маңызға ие екенін көрсетеді.

- Биополимерлер (мысалы, хитозан, альгинат, желатин) мен синтетикалық полимерлер (мысалы, PAA, PVP) арасында түзілген комплекстер тін инженериясында, биокатализде және ферменттік иммобилизацияда қолданылады.

- Мұндай материалдар тірі жасушалармен үйлесімді, улы емес және денеде ыдырай алады.

- Интерполимерлік гидрогельдер жасушалардың өсуі үшін **матрица (scaffold)** ретінде пайдаланылады, өйткені олардың құрылымы табиғи ұлпаға ұқсас.

- ◆ **Қолдану мысалдары:**

- Биоматрица және жасанды тіндер жасау (tissue engineering scaffolds);
- Ферменттер мен микробтық жасушаларды иммобилизациялау;
- Биосенсорлар мен диагностикалық жүйелер;
- Экологиялық биопленкалар және биodeградацияланатын қаптамалар.

Мысалы, хитозан/полиакрил қышқылы негізіндегі интерполимерлік гидрогельдер ферменттерді тұрақтандыруда және экологиялық биосорбенттер ретінде тиімді қолданылып жүр.



4. Сорбциялық процестер және экологиялық технологиялар

Интерполимерлік комплекстер ауыр металл иондарын, органикалық бояғыштарды және басқа да ластаушы заттарды ерітіндіден тиімді сіңіре алады.

- Бұл олардың құрамындағы **карбоксил, амин, гидроксил топтарының көптігіне**, сонымен қатар **кеуекті және кең беткі ауданға** байланысты.

- Интерполимерлік матрицалар көбіне **су тазарту, өнеркәсіптік ағындарды бейтараптандыру, қалдық сулардан иондарды бөлу** процестерінде қолданылады.

- Мысалы, полиакрил қышқылы мен хитозаннан түзілген комплекстер Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{6+} иондарын 95–99% дейін сіңіреді.

- Мұндай материалдар қайта қолдануға жарамды және экологиялық қауіпсіз.

◆ **Қолдану мысалдары:**

- Ауыр металл иондарын сорбциялау және регенерациялау жүйелері;

- Радиоактивті және органикалық ластағыштарды сіңіретін сорбенттер;

- Газ бөлу және катализдік процестерге арналған селективті мембраналар;

- Экологиялық биоыдырайтын сүзгілер мен композиттер.

2024 жылы *Materials* журналында жарияланған зерттеуде (DOI:10.3390/ma14133491) интерполимерлік матрицалар сирек жер элементтерін және ауыр металдарды тиімді сіңіретіні көрсетілген — бұл технология қалдықсыз металлургия мен жасыл химияда қолданылуда.

Сонымен, Интерполимерлік комплекстердің қолданылу аясы жылдан-жылға кеңейіп келеді. Олар:

- Фармацевтикада — дәрілік заттардың тасымалдаушысы ретінде;
- Материалтануда — интеллектуалды және өзін-өзі реттейтін материалдардың негізі ретінде;

- Биотехнологияда — экологиялық таза, биосәйкесті жүйелер ретінде;

- Экологияда — ауыр металл иондарын және ластаушыларды сіңіретін сорбенттер ретінде маңызды рөл атқарады.

Мұндай көпфункционалды материалдар — болашақтағы **“жасыл” және интеллектуалды полимерлік технологиялардың** ғылыми негізі.

3.5. Интерполимерлік реакциялардың зерттеу әдістері

- **Изотермиялық титрлеу калориметриясы (ИТС):** реакцияның энтальпиясын анықтайды;

- **FTIR және NMR спектроскопиясы:** сутектік байланыстардың түзілуін бақылайды;

- **Динамикалық жарық шашырауы (DLS):** комплекстердің өлшемін анықтайды;

- **Беттік плазмон резонансы (SPR):** кинетикалық параметрлер мен тұрақтылықты зерттейді.

Бұл әдістер интерполимерлік комплекстердің табиғатын толық сипаттауға мүмкіндік береді.

4. Қорытынды

Ерітіндідегі интерполимерлік реакциялар — жоғары молекулалы қосылыстар химиясының маңызды бөлігі. Олар макромолекулалар арасындағы физика-химиялық өзара әсердің нәтижесінде пайда болып, жаңа қасиеттерге ие материалдар түзуге жол ашады. Интерполимерлік комплекстердің түзілуін термодинамикалық, кинетикалық және құрылымдық факторлар анықтайды. Қазіргі таңда бұл реакциялар биомедицинада, нанотехнологияда және экологиялық таза материалдар жасауда кеңінен қолданылады.

5. Қайталауға арналған сұрақтар

1. Интерполимерлік реакция дегеніміз не?
2. Интерполимерлік комплекстер қандай байланыстар арқылы түзіледі?
3. рН пен иондық күштің әсерін мысалмен түсіндіріңіз.
4. Су тектік және электростатикалық комплекстердің айырмашылығы неде?
5. Еріткіштің табиғаты комплекстің тұрақтылығына қалай әсер етеді?
6. Интерполимерлік жүйелердің негізгі қолдану салалары қандай?
7. Температура өзгергенде интерполимерлік комплекстердің мінезі қалай өзгереді?
8. Интерполимерлік реакцияларды зерттеу үшін қандай әдістер қолданылады?
9. Интерполимерлік комплекстердің құрылымдық ерекшеліктерін атаңыз.
10. Заманауи зерттеулерден бір мысал келтіріңіз (автор және журнал атауы).

6. Қолданылған әдебиеттер

1. **Kopishev E., Jafarova F., Tolymbekova L., Seitenova G.,** *Interpolymer Complexation Between Cellulose Ethers, Poloxamers, and Polyacrylic Acid: Surface-Dependent Behavior*, **Polymers**, 2025, 17(10):1414. DOI:10.3390/polym17101414.
2. **Nekrasova T., Vlasova E., Zolotova Y.,** *Interpolymer Complexes of Poly(methacryloyloxyethyl phosphorylcholine) and Polyacids*, **Polymers**, 2022, 14(3):407.
3. **Bizley S.C., Williams A.C., Khutoryanskiy V.V.,** *Thermodynamic and kinetic properties of interpolymer complexes assessed by ITC and SPR*, **Soft Matter**, 2014, 10:8254–8260.
4. **Shaikhutdinov E., Mun G.,** *Complex formation processes of nonionic polymers with polyacrylic acid in aqueous solutions*, *Chemical Bulletin of KazNU*, 2012.
5. **Smirnova N.N.,** *Интерполимерные реакции и интерполиэлектролитные комплексы*, *Известия вузов. Химия и химическая технология*, 2016.