ДӘРІС 4. НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ КӨМІРТЕКТІ СОРБЕНТТЕРДІҢ НЕГІЗГІ ТҮРЛЕРІ

Дәрістің мақсаты. Наноқұрылымды көміртекті сорбенттердің негізгі топтарын, олардың құрылымы, алу жолдары, адсорбциялық қасиеттері мен қолданылу ерекшеліктерін салыстыра білу.

1. Көміртекті сорбенттерді жіктеу принциптері

Көміртекті сорбенттер — газдар мен сұйықтықтардан әртүрлі компоненттерді ұстап қалуға арналған, негізін көміртек құрайтын қатты материалдар. Оларды тек бөлшек өлшемі арқылы емес, құрылымы, кеуектілігі, бастапқы шикізаты және беттік химиясы бойынша жіктейді. «Наноқұрылымды» термині материалда нанометрлік түтікшелер, талшықтар, қабаттар немесе кеуектер бар екенін білдіреді; ол барлық түйіршіктердің өлшемі нанометрлік деген сөз емес.

Негізгі топтарға белсендірілген көмірлер, биокөмір, көміртекті нанотүтікшелер, наноталшықтар, графен және оның туындылары, кеуекті көміртек аэрогельдері, реттелген мезокеуекті көміртектер және функционалданған композиттер жатады [1, 2].

2. Белсендірілген көмір және белсендірілген көмір талшықтары

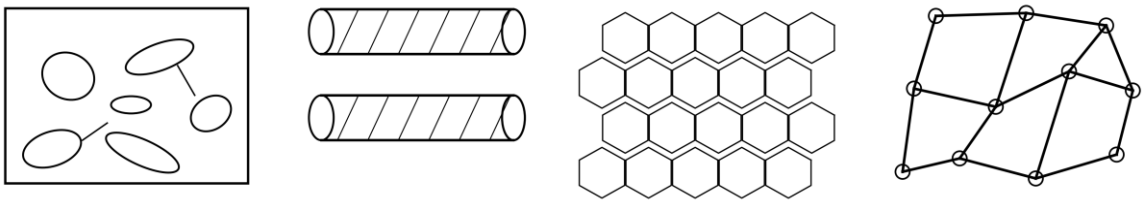
Белсендірілген көмір (activated carbon). Ағаш, көмір, кокос қабығы немесе полимер тәрізді шикізатты карбонизациялап, кейін су буымен, CO_2-пен немесе химиялық реагенттермен активтендіру арқылы алады. Соның нәтижесінде микрокеуектер мен мезокеуектер дамиды. Ұнтақ (PAC), түйіршік (GAC) және қалыпталған нұсқалары су мен газды тазартуда қолданылады. Кеуектің қолжетімділігі мен беттік химия сорбциялық тиімділікті анықтайды.

Белсендірілген көмір талшықтары. Жіңішке талшық пішіні сыртқы беттің қолжетімділігін арттырып, кей жағдайда масса тасымалын жылдамдатады. Олар сүзгі мата, төсем және газтазалау элементтері түрінде пайдаланылады; механикалық беріктік пен дайын бұйымның құны ескеріледі.

3. Биокөмір және көміртекті наноталшықтар

Биокөмір (biochar). Биомассаны оттегі шектелген ортада термиялық өңдеуден алынатын көміртекті өнім. Қасиеттері шикізат пен пиролиз шарттарына тәуелді. Биокөмір міндетті түрде жоғары микрокеуекті сорбент емес: оның адсорбциялық қабілетін арттыру үшін қосымша активтендіру немесе бетін модификациялау қажет болуы мүмкін.

Көміртекті наноталшықтар (CNF). Талшық тәрізді графиттік не ретсіз көміртек қабаттары бар материалдар. Беттік қасиеттерін тотығу, гетероатомдар енгізу және композит жасау арқылы өзгертуге болады; сүзгілеу қабаттары мен адсорбциялық тасымалдағыштарда қолданылады.



1-сурет. Солдан оңға қарай: кеуекті белсендірілген көмір, көміртекті нанотүтікшелер, графен қабаты және көміртекті аэрогель қаңқасы. Шартты сызбалар.

4. Көміртекті нанотүтікшелер

Көміртекті нанотүтікшелер (CNT) — графен торына ұқсас көміртекті қабаттың цилиндрлік құрылымдары. Олар бірқабырғалы (SWCNT) және көпқабырғалы (MWCNT) болып бөлінеді. Адсорбция сыртқы қабырғада, түтікшелер арасындағы кеңістікте және ашық, қолжетімді ішкі қуыстарда жүре алады. Алайда агломерация, түтікше ұштарының жабық болуы және су ортасында диспергирлену қиындығы тиімді бетті азайтады.

CNT бетіне –COOH, –OH және басқа функционалдық топтарды енгізу суланғыштық пен кейбір металл иондарына аффинділікті арттыруы мүмкін. Бірақ өңдеу әдісі түтікшелердің құрылымын өзгертіп, қайта пайдалануға әсер етеді.

5. Графен, графен оксиді және қалпына келтірілген графен оксиді

Графен (GR). Көміртек атомдары алтыбұрышты торда орналасқан бір атомдық қабат. Екі өлшемді беті органикалық молекулалармен π–π әрекеттесулеріне мүмкіндік береді, бірақ қабаттар бір-біріне жабысып қалса, қолжетімді бет кемиді.

Графен оксиді (GO). Құрамында гидроксил, эпоксид және карбоксил секілді оттекті топтары бар қабатты материал. Бұл топтар суда диспергирленуге және иондармен беттік әрекеттесуге ықпал етеді. GO өзі міндетті түрде жоғары микрокеуекті материал емес; кеуектілік көбіне өңдеу мен кеңістіктік құрастыруға байланысты.

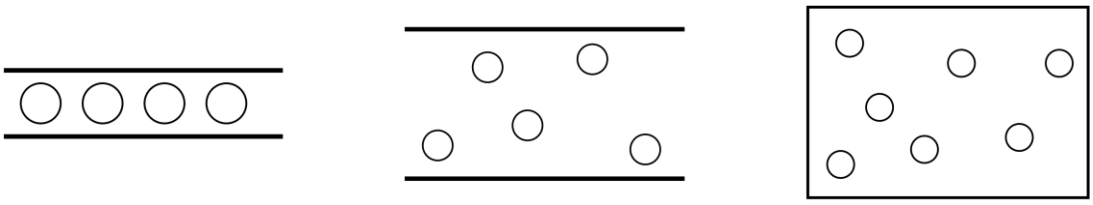
Қалпына келтірілген графен оксиді (rGO). GO-ны химиялық немесе термиялық қалпына келтіру арқылы алынады. Оттекті топтар әдетте азаяды, графитке ұқсас аймақтар артады. Сорбциялық таңдамалылық қалдық функционалдық топтар мен құрылымға байланысты өзгереді.

6. Кеуекті көміртек аэрогельдері және реттелген көміртектер

Көміртекті аэрогельдер — өзара байланысқан үшөлшемді жеңіл қаңқалар; оларды органикалық гельдерді карбонизациялау немесе графен/нанотүтікшелер негізінде құрастыру арқылы алуға болады. Мезокеуектер ерітінді ағыны мен ірі молекулалардың тасымалын жеңілдетеді. Реттелген мезокеуекті көміртектер көбіне қалып (темплат) көмегімен синтезделеді және кеуек геометриясын мақсатты басқаруға мүмкіндік береді.

7. Кеуек өлшемі бойынша айырмашылығы

IUPAC бойынша микрокеуектердің ені 2 нм-ден кіші, мезокеуектер — 2–50 нм, макрокеуектер — 50 нм-ден үлкен [3]. Микрокеуектер ұсақ молекулаларды ұстауға маңызды, ал мезо- және макрокеуектер заттың материал ішіне өтуін жеңілдетуі мүмкін. Ең тиімді материал әрдайым ең үлкен меншікті бет ауданына ие материал емес.



2-сурет. Солдан оңға қарай: микро-, мезо- және макрокеуектердің шартты көрінісі. Өлшемдер масштабқа сай көрсетілмеген.

8. Композитті және функционалданған көміртекті сорбенттер

Көміртекті материалдар полимерлермен, металл оксидтерімен немесе басқа белсенді компоненттермен біріктіріліп, композиттер түзіледі. Мысалы, магниттік Fe_3O_4/көміртек композитін ерітіндіден магнитпен бөліп алуға болады. Азот- және күкіртқұрамды топтар белгілі металл иондарымен әрекеттесетін орталықтар түзе алады. Дегенмен функционалдандырудың пайдалы әсері нақты ластағыш пен орта pH-на тәуелді, ал қосылған компоненттердің шайылуын тексеру қажет.

9. Негізгі түрлерін қысқаша салыстыру

Материал түрі	**Басты құрылымдық ерекшелік**	**Негізгі шектеуі**
Белсендірілген көмір	Дамыған микро-/мезокеуек торы	Ірі молекулаларға кеуек шектеуі
CNT, CNF	Түтікше не талшық пішіні	Агломерация, құны
GO, rGO	Қабатты құрылым, өзгермелі бет химиясы	Қабаттардың бірігуі, бөлу қиындығы
Аэрогель, мезокеуекті C	Үшөлшемді не реттелген кеуек жүйесі	Механикалық тұрақтылық, синтез құны

10. Сорбентті таңдаудың негізгі өлшемдері

Органикалық бояғыштарды және мұнай тектес молекулаларды ұстауда қолжетімді кеуектер, гидрофобтық аймақтар және π–π әрекеттесулері маңызды болуы мүмкін. Pb(II), Cd(II), Cu(II) секілді металл иондары үшін оттекті, азотты не күкіртті беттік топтар, ерітінді pH-ы және бәсекелес иондар ескеріледі. Газ адсорбциясында ұсақ молекулаларға сәйкес микрокеуектер мен жұмыс температурасы және қысымы маңызды.



3-сурет. Сол жақта — көміртек бетінде органикалық молекулалардың ұсталуын; оң жақта — функционалдық орталықтардың ерітіндідегі иондармен әрекеттесуін көрсететін шартты сызба.

Материалды сипаттау үшін N_2 адсорбциясы (BET бет ауданы, кеуек таралуы), SEM/TEM (морфология), Raman (көміртек құрылымының реттелуі), FTIR немесе XPS (беттік топтар) және pH_pzc секілді өлшеулер қолданылады. Адсорбциялық тәжірибеде сыйымдылықпен қатар бөлу дәрежесін, кинетиканы, регенерацияны және сорбенттің ерітіндіге бөлінуін бағалау керек.

Қорытынды және бақылау сұрақтары

Наноқұрылымды көміртекті сорбенттердің негізгі айырмашылығы — құрылымдық пішін, кеуек архитектурасы және беттік функционалдық топтар. Олардың қолдануға жарамдылығы ластағыш қасиеті мен технологиялық жағдайларға сәйкес таңдалады.

1. Белсендірілген көмір мен биокөмірдің айырмашылығы қандай? 2. GO мен rGO қалай ерекшеленеді? 3. Микро- және мезокеуектердің рөлі қандай? 4. Композитті сорбенттер қандай мақсатпен жасалады?

Ұсынылатын әдебиеттер

1. Sabzehmeidani M. M. et al. Materials Advances, 2021, 2, 598–627. DOI: 10.1039/D0MA00087F. 2. Tewari S. et al. Discover Nano, 2026, 21, 57. DOI: 10.1186/s11671-026-04473-1. 3. Thommes M. et al. Pure Appl. Chem., 2015, 87, 1051–1069.