

## Металл органикалық қаңқаны (ZIF-8) синтездеу және оның ағынды суды тазартуға қолданылуы: шолу

Назгуль Далабаева<sup>1\*</sup>, George Kostakis<sup>2</sup>, Нұрбану Сарова<sup>3</sup>, Гулия Сдикова<sup>4</sup>, Жанар Қорғанбаева<sup>5</sup>, Тұрар Ақылбекова<sup>5</sup>

<sup>1</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, химия және химиялық технология факультеті, жалпы және бейорганикалық химия кафедрасы, Алматы, Қазақстан, [nazgulds81@gmail.com](mailto:nazgulds81@gmail.com)

<sup>2</sup>Сассекс университеті, Тіршілік ғылымы мектебі, Ұлыбритания, [G.Kostakis@sussex.ac.uk](mailto:G.Kostakis@sussex.ac.uk)

<sup>3</sup>Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан, [n.sarova@abaiuniversity.edu.kz](mailto:n.sarova@abaiuniversity.edu.kz)

<sup>4</sup>М.Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан Университеті, Орал, Қазақстан, [sdikova.guliya@mail.ru](mailto:sdikova.guliya@mail.ru)

<sup>5</sup>Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан, [korganbaeva.zhan@mail.ru](mailto:korganbaeva.zhan@mail.ru), [t.akylbekova@abaiuniversity.edu.kz](mailto:t.akylbekova@abaiuniversity.edu.kz)

\*Корреспонденция: [nazgulds81@gmail.com](mailto:nazgulds81@gmail.com)

**Аңдатпа.** Өнеркәсіп пен ауыл шаруашылығының қарқынды өсуіне байланысты қоршаған ортаның ауыр металдар иондарымен ластануы жылдан жылға күшейе түсуде. Ауыр металдар адам үшін өте қауіпті және қоршаған орта мен

экожүйеге зиянды әсер етеді. Ауыр металдар ағынды суларға төгіліп, адам ағзасына ену қаупі бар. Сондықтан, ағынды сулардан ауыр металл иондарын жою қоршаған ортада да, бизнесте де үлкен назар аударатын өзекті мәселе болып табылады. Осыған орай қазіргі кезде суды тазартудың дәстүрлі әдіс-тәсілдерін ауыстыру немесе заманауи технологияларды енгізу үшін жетілдірілген материалдарды әзірлеу қарастырылуда. Осы мәселелерді шешу үшін үш өлшемді органикалық-бейорганикалық кешеннің жаңа түрі болып табылатын металл-органикалық қаңқалар (MOF) осы мәселелердің шешімі ретінде, әсіресе адсорбция саласында аса маңызды. Бұл шолу мақалада MOF материалының бір түрі - Zn металл атомынан және 2-метилимидазолдан тұратын цеолитті имидазол қаңқасын (ZIF-8) синтездеу тәсілдерінің түрлері және олардың ерекшеліктері келтірілген. Сондай-ақ (ZIF-8) ағынды суларды тазартуда белгілі материал болып табылатындығы, оның жоғары адсорбциялық қабілеті мен фотокаталитикалық материалдар үшін ерекше қасиеттері бар екені туралы қарастырылады. Сонымен қатар судан ауыр металдарды тиімді жоюда MOF-терді қолдану, синтездеу және олардың суды тазартудан басқа да қолданыстарға пайдаланудың соңғы жетістіктері талқыланған.

**Түйін сөздер:** металл-органикалық қаңқалар (MOF); ZIF-8; ауыр металдарды жою; суды тазарту, ластану

**Дәйексөз:** Далабаева, Н., Kostakis, G., Сарова, Н., Сдикова, Г., Қорғанбаева, Ж., Ақылбекова, Т. (2026). Металл органикалық қаңқаны (ZIF-8) синтездеу және оның ағынды суды тазартуға қолданылуы: шолу. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 154(1), 37-59. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-37-59>

Академиялық редактор:  
Э.Е. Копишев

Редакцияға түсті: 21.11.2025  
Түзетілді: 18.12.2025  
Қабылданды: 19.12.2025  
Басылымға шықты: 31.03.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## 1. Кіріспе

Адамдардың өнеркәсіптік ағынды суларды қайта қалпына келтіріп қолдануы әлемдегі ең маңызды экологиялық мәселелердің біріне айналды (Fayemiwo et al., 2018). Ауыр металдар биологиялық ыдырамайды және қоршаған ортада жиналуға бейім болғандықтан, ауыр металдардың ластануы қоршаған ортаға да, халықтың денсаулығына да үлкен қауіп төндіреді. Сонымен қатар, тіпті концентрациясы төмен көптеген ауыр металл иондары да қауіпті және адам денсаулығына өте зиян.

Судың ластануы адам денсаулығына үлкен қауіп төндіретін экологиялық мәселелердің бірі болып табылады (Shannon et al., 2008; Vorosmarty et al., 2000; Vorosmarty et al., 2010). Сондықтан судың ластануын бақылау және тазарту өте маңызды. Судың ластануына әртүрлі көздерден алынған көптеген күрделі құрауыштар ықпал етеді. Фармацевтикалық препараттар, жеке күтім заттары, өнеркәсіптік ластаушы заттар және басқа да заттар соңғы жылдары су көздерін ластайтыны анықталған. Бұлар жүздеген органикалық ластаушы заттардың (ОЛЗ) қатарына жатады (Lapworth et al., 2012; Liang et al., 2021). Концентрациясы төмен болса да суды тазартудың әдеттегі әдістерімен олардың физикалық немесе химиялық сипаттамаларына (мысалы, суда еритін) байланысты толығымен жою қиын (Joseph et al., 2019).

Өнеркәсіп қарқынды дамып келе жатқандықтан, өнеркәсіптік ағынды сулар қоршаған ортаны көбірек ластайды. Ауыр металдар өте улы және табиғи және жасанды ластанудың көптеген түрлері өмірге елеулі қауіпті. Адамдарға және басқа экожүйелерге зиянды әсер ететіндіктен, су ортасындағы ауыр металдардың, әсіресе өнеркәсіптік ағынды сулардың ластануы күрделі мәселеге айналды. Ауыр металдарды судан тиімді жоюдың немесе жою мүмкін болмағандықтан, олардың аздаған мөлшері денеге енгеннен кейін денсаулыққа қатысты маңызды мәселелерді тудыруы мүмкін. Қорғасын, сынап, мышьяк, кадмий және мыс иондары шынымен ластанған судан тазартылуы керек ластаушы заттар ретінде қарастырылады. Қорғасын мен сынап миды, бүйректі және бауырды зақымдауы мүмкін, сәйкесінше қан кету, энцефалопатия және гепатит ауруын тудыруы, сондай-ақ гемопозтикалық жүйені бұзуы мүмкін. Сонымен қатар, олар тірі ағзаларға және неврологиялық жүйеге, әсіресе бауыр мен өт қабына зиян келтіреді, бұл цирроз мен невритке әкеледі (Ahmad et al., 2021).

Меншікті беттік аудандары жоғары және белсенділіктері жоғары заттар мен ауыр металл иондарын су жүйелерінен балама әдістерді қолдану арқылы жоюға болады. Мысалы, құрысулар, диарея, асқазан-ішек жолдарының аурулары, бауыр мен бүйректің зақымдануы сияқты ауыр аурулар қоғамдық ауыз су жүйелеріндегі  $\text{Cu}^{2+}$  ионының шамадан тыс болғандығынан туындайды (Ajmal et al., 2005; Larous et al., 2005).

Мыспен ластанудың аква жұмыстарында дезинфекциялық құралдар мен құрамында мыс бар алгицидтерді кеңінен қолдану кезінде артқан. Уыттылық және қалпына келтірулерді зерттеулер бүгінгі күнге дейін бір ғана ластаушы жүйелерде жүргізілген. Жануарлар мен экожүйелер үшін уыттылықты түбегейлі өзгертуі мүмкін ластаушы заттардың арасындағы синергетикалық және антагонистік әсерлердің мүмкіндігін аздаған зерттеулер зерттеді, бірақ іс жүзінде екі ластаушы заттардың бір мезгілде көбеюі аралас ластаушы жүйелердің болашақта әлдеқайда кең таралғанын білдіреді (Jia et al., 2016; Shujing et al., 2017). Сондықтан, нақты тазарту үшін аралас ластанған жүйелерде айтарлықтай көп зерттеуді қажет етеді (Weng et al., 2013). Осылайша, су жүйелерінен өз деңгейінде ауыр металл иондарын тиімді жоюдың тиісті әдістерін жасау өте маңызды. Осы уақытқа дейін ауыр металдардың ағынды суларын тазартудың бірнеше әдістері анықталған, соның ішінде химиялық тұндыру, ион алмасу, мембраналық фильтрация, адсорбция және ион алмасу. Икемділігі мен құрылымының қарапайымдылығы, төмен пайдалану шығындары және күшті адсорбциялық қабілетіне байланысты адсорбция ауыр металдардың ағынды суларын тазартудың ең үнемді және тиімді әдістерінің бірі ретінде қарастырылды. Сонымен қатар,

адсорбция біршама қайтымды болғандықтан, адсорбенттер кейде тиісті десорбция процедурасы арқылы қалпына келтірілуі мүмкін (Chen et al., 2009; Gharabaghi et al., 2012; Vilensky et al., 2002; Ritchie et al., 2001., Celis et al., 2000; Wingensfelder et al., 2005; Yuvaraja et al., 2012).

Сондықтан өнеркәсіптік ағынды сулардан ауыр металдарды жоюда нақты пайдалану үшін адсорбциялық қабілеті және тиімділігі жоғары арзан адсорбенттер жасау өте қиын, бірақ өте қажет (Zhang et al., 2016).

Тіршілік суға тәуелді, таза суға деген қажеттілік күн сайын индустрияландыруға да, халық санының да көбеюіне байланысты артып келеді. Алайда, ағынды суларды қайта пайдалану үшін тұщы су көздерінің ластануын тиімді және тұрақты жою қажет. Биологиялық тазарту - химиялық, физикалық және биологиялық тазартуды қоса алғанда, кеңінен зерттелген бірнеше тазарту процедураларының ішінде ең үнемді және экологиялық таза болып саналады. Ауыр металдар мен күрделі, биологиялық ыдырамайтын заттар бұл үнемді әдісті қолдануды шектейді. Қарапайым синтез әдісі бар цеолитті имидазол қаңқасы (ZIF-8), арзанырақ, суға төзімді металл-органикалық каркас бұл зерттеуде оны сулы ерітінділерден ауыр металдарды жоюда тұрақты пайдалану үшін қарастырылған (Li et al., 2021).

Әлемдегі өнеркәсіптің қарқынды өсуіне байланысты бүкіл әлемде халық денсаулығы үшін артып келе жатқан экологиялық проблемалардың бірі коммуналдық және өндірістік ағынды суларды қайта жарату болып табылады (Nghah et al., 2008; Zhang et al., 2015). Электрлік қаптау, тау-кен өнеркәсібі, аккумулятор өндірісі, металлургия, былғары және металл жеткізу - мыс, кадмий, никель, сынап, қорғасын және т.б. сияқты ауыр металдардың салыстырмалы түрде жоғары концентрациясын қамтитын ағынды суларды шығаратын кәсіпорындардың бірнешеуі ғана. Бұл өндірістердің тазартылмаған ағынды сулары қоршаған ортаға және адам денсаулығына зиян келтіреді. Ауыр металдар иондары адамның ағзасына түскенде, олар адам денсаулығына өте қауіпті, өйткені олар органикалық ластаушылар сияқты ыдырамайды (Gavrilescu et al., 2004; Fu et al., 2010; Wang et al., 2011). Бұл металдар канцерогенді болумен қатар, көптеген ағзаларға зиян келтіруі мүмкін. Ағынды сулардағы ауыр металдар иондарының концентрациясы осы қауіптерге байланысты дүние жүзіндегі басты мәселе болып табылады (Kim et al., 2015).

Көлдер, өзендер және мұхиттар қазіргі кездегі ағынды сулардың жаппай төгілетін орны болды (Mahfuza et al., 2022; Saad et al., 2020). Қазіргі уақытта жер шары су тапшылығын бастан кешіруде, өйткені табиғи су көздері ластанған жерде халық саны артып жатыр. Ал ағынды суларды тазарту маңызды (Asano et al., 2002; Wirzal et al., 2015). Өнеркәсіптік ағынды сулардың ауыр металдар иондарымен ластануының артуы дүние жүзіндегі басты мәселе ретінде анықталды. Ауыр металл иондарының негізгі көздері гальваника, аккумулятор өндірісі, металлургия, тері өңдеу және металл өңдеу сияқты салалар болып табылады (Abo-Farha et al., 2019; Bakhtiari et al., 2015). Ауыр металл иондарының органикалық ластаушылардан айырмашылығы, биологиялық ыдырамайтын және теңіз жануарлары арқылы адамның ағзасына түскенде денсаулыққа қауіп төндіруі мүмкін (Babel et al., 2003; Nghah et al., 2007). Адсорбция, тұндыру, ион алмасу, мембраналық бөлу, электродиализ және фотокатализ ауыр металдарды ағынды сулардан тазарту үшін жылдар бойы зерттелген әдістердің бірі ретінде қарастырылады (Al-Saydeh et al., 2017). Су ерітіндісіндегі ауыр металл иондары MOF көмегімен экстракцияланады (Gnanasekaran et al., 2019).

## **2. Материалдар мен әдістер**

### *2.1. Цеолитті имидазол қаңқасы - 8 (ZIF-8) туралы ұғым*

Имидазол лигандтары бар Zn иондары дәстүрлі алюмосиликатты цеолиттермен құрылымдық ұқсастықтары бар (ZIF-8) деп аталатын металл-органикалық негіз класын құрайды. Бұл материалдың химиялық және термиялық тұрақтылығы жоғары, рН-сезімтал және табиғи кеуектілік қасиеттері бар. ZIF-8 синтез әдістері, меншікті сипаттамалары, дәрі

дәрмектер тасымалдау сияқты өзекті тақырыптар бойынша көптеген зерттеулер жүргізілді (Feng et al., 2021).

Алғаш рет 2006 жылы сипатталған цеолитті имидазол қаңқалар (ZIFs) термиялық тұрақтылығы жоғары цеолиттердің Si-O-Si бұрышына ұқсас кеуекті металл органикалық қаңқалардың (MOF) қосалқы класына жатады. Кеуекті металл органикалық қаңқаларының (MOFs) қосалқы класы болып табылатын цеолитті имидазол қаңқалары (ZIFs) металл мен имидазолды байланыстыратын (M-Im-M бұрышы) арасындағы  $145^\circ$  бірегей байланыс бұрышы бастапқыда 2006 жылы ашылған. Бұл бұрыш цеолиттердің Si-O-Si бұрышына ұқсайды. ZIF-8 кеуекті құрылымы 2-метилимидазол лигандтарымен тетраэдрлік байланысқан мырыш металл орталықтарынан тұрады. Бұл шамамен  $1600 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$  бетінің ауданы және  $3,4 \text{ \AA}$  алты сақиналы тесігі бар SOD (содалит) топологиясына жатады.  $400^\circ\text{C}$  дейін ZIF-8 өте термиялық тұрақты (Park et al., 2006).

ZIF-8 химиялық зондтауда (Lu et al., 2010), дәрілік заттарды енгізуде (Vasconcelos et al., 2012) және газды сақтауда немесе бөлуде (Peralta et al., 2012) пайдаланылады. Density Functional Theory - DFT (Тығыздық функционалдық теориясы) есептеулері ZIF-8-дің сыртқы бетінде Льюис қышқылы мен негіздік топтардан басқа Бронстед қышқылының топтары бар екенін көрсетеді. Кеуектердің ішкі жағында бұл белсенді топтар болмайды (Chizallet et al., 2010). ZIF-8 металл органикалық қаңқасы Фридел Крафт ацилденуі (Nguyen et al., 2012), трансэтерификация (Chizallet et al., 2010) және Кневенагель конденсациясы (Tran et al., 2011) сияқты үдерістерді катализдейтіні белгілі. Бұл реакциялардың барлығы сольвотермиялық әдіспен жасалған және BASF компаниясы Basolite Z1200® ретінде коммерциялық түрде сататын микроөлшемді ZIF-8 көмегімен жүзеге асырылды. Бөлме температурасында толуолдағы бензальдегид пен малонитрил арасындағы Кневенагель реакциясы гетерогенді катализаторлар ретінде микро өлшемді (100–200 нм) ZIF-8 бөлшектері пайдаланылған кезде тек ZIF-8 сыртқы бетінде катализденді. Кіші бөлшектер үлкендерге қарағанда үлкен каталитикалық белсенділік көрсетті (Zhao et al., 2014). Бөлме температурасында метанолдағы реагенттерді біріктіру арқылы ZIF-8 нанокристалдарын (nZIF-8) жасауға болады (Farrusseng et al., 2011). Нуклеация, кристалдық өсу және стационарлық фаза – метанолдағы ZIF-8 кристалының дамуының үш кезеңі (Venna et al., 2010). Кристалдың жылдам дамуы баяу нуклеациямен бірге жүреді (Cravillon et al., 2011) және 2-метилимидазол реагент бейтарап болғанда тұрақтандырғыш бірлік немесе протонсызданған кезде байланыстырушы бірлік ретінде қызмет ете алады (Jian et al., 2015). Ұсақ кристалдар 2-метилимидазол лигандын негізбен депротондау кезінде түзіледі, бұл нуклеация жылдамдығын тездетеді. Бұл катализге қол жетімді сыртқы бет аймағына әсер ететіндіктен, бөлшектердің өлшемі мен таралуын бақылау өте маңызды. 200-400 нм бөлшектердің өлшемдері және жоғары шығымдылыққа ZIF-8 өндірісі кезінде бөлшектердің өлшемін реттеуге көмектесетін қоспалар ретінде беттік белсенді заттар мен полимерлерді пайдалану арқылы қол жеткізілді (Yao et al., 2013). pH-тұрақталған сонокристалдау үдерісі шамамен 200 н және 85% кірістілігі бар кішірек бөлшектерді түзді (Cho et al., 2013). Метанол қатысындағы бөлме температурасында жылдам жүретін коллоидтық реакция 100 нм-ден кіші нанобөлшектерді жасау үшін пайдаланылды;  $\text{Zn}^{2+}$ , 2-метилимидазол және метанол үшін қатынасы тиісінше 1:8:700 болды. Бөлшектердің өлшемі 46 нм XRD шыңының кеңеюі арқылы табылды, ал 40 нм SEM және HRTEM (Cravillon et al., 2011) көмегімен табылды.

Бөлшектердің өлшемдері 9-дан 55 нм-ге дейін, бөлме температурасында метанолдағы реакциялық қоспаға әртүрлі қатынаста n-бутиламинді қосу арқылы алынды (Venna et al., 2010). Ең жоғары шығымдылық пен өнім тазалығы метанолды қолдану арқылы алынады, дегенмен ZIF-8 нанобөлшектерін су немесе (N,N-Диметилформамид) DMF сияқты басқа полярлық еріткіштермен де жасауға болады (Gross et al., 2012). Бөлме температурасында судағы n-ZIF-8 синтезі орташа мөлшері 85 нм болатын 80% шығымды бөлшектерді түзді (Pan et al., 2011). Бөлшектерінің өлшемі шамамен 100 нм болатын ZIF-8 метанол мен судың комбинациясын қолданатын бұрку арқылы кептіру/буланған индукциялық өздігінен

құрастыру (EISA) үдерісі арқылы жасалды (Marquez et al., 2013). Беттік-белсенді заттар кішірек бөлшектердің артуын ынталандыру үшін басқа әдістерде жабу агенттері ретінде қолданылады.

Беттік-белсенді заттармен тұрақтандырылған майдағы су эмульсияларын (Brij® кері мицелла жүйелері) пайдалана отырып, синтезделген ZIF-8 нанобөлшектерінің өлшемін бақылау әдісі 30-дан 160 нм-ге дейінгі өте тар өлшемді үлестірімді бөлшектерді шығарды. 30 нм-ден аз бөлшектердің өлшемдері жүйенің температурасын 50°C-тан 37°C-қа дейін төмендету және прекурсор концентрациясын екі есе азайту арқылы алынды (Tran et al., 2011).

Термиялық, химиялық және гидротермиялық тұрақты цеолитті имидазолды қаңқалардың (ZIFs) беттік ауданы үлкен және ерекше адсорбциялық қасиеттері бар (Wu et al., 2015; Omar et al., 2010; Lee et al., 2015; Doonan et al., 2017). Дәрілік заттарды енгізу, газды сақтау, бөлу, катализ және химиялық датчиктерді қоса алғанда, әртүрлі мақсатта қолдану үшін бұл қасиеттер материалдарды қажет етеді (Demir et al., 2014; Li et al., 2010; Zhou et al., 2012). Әртүрлі имидазол байланыстырғыштары мен металл иондарының әртүрлі комбинациялары ZIF сипаттамаларының, түрлерінің және құрылымдарының негізгі детерминанттары болып табылады (Park et al., 2006; Kida et al., 2013). Көптеген ZIF құрылымдары әдебиетте құжатталған және әртүрлі ауыспалы металдарды (мысалы, Zn және Co), имидазол байланыстырғыштарын (мысалы, 2-метилимидазол және бензимидазол) және этанол, метанол, су, DMF сияқты еріткіштерді қолдану арқылы синтезделуі мүмкін (Zhou et al., 2012; Fathy et al., 2025).

ZIFs гидротермиялық немесе сольвотермиялық синтез әдістерін пайдалана отырып, 298-ден 423 К-ге дейінгі температурада, көбінесе имидазолдың артық мөлшерімен өндірілуі мүмкін (Lee et al., 2015; Qian et al., 2012).

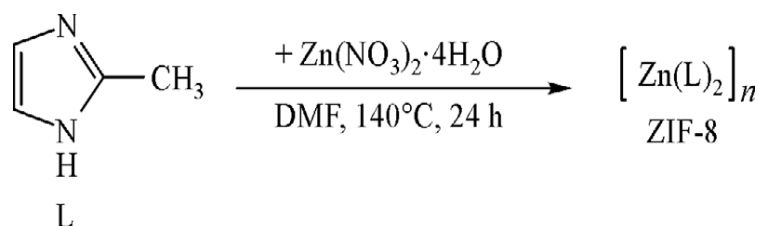
Химиялық өндірісті арттыратын және қоршаған ортаға әсерді азайтатын тиімдірек әдістерді жасау да соңғы зерттеулердің басты назарында болды (Yao et al., 2015).

## 2.2. ZIF-8 материалының синтезделуі

ZIF-8 синтездеуде гидротермиялық синтез, сольвотермиялық синтез, механохимиялық синтез және ультрадыбыстық/сонохимиялық синтезді қоса алғанда, бірқатар синтез әдістері ұсынылған. ZIF-8-тің дәрілік заттарды жеткізу, адсорбенттер мен катализаторлар ретінде қолданылуы оның кеуектілігінің жоғары және құрылымдарының өзгермелі болуымен ерекшеленеді (Lee et al., 2015).

### 2.2.1. Сольвотермиялық синтез

Бұл үдеріс ZIF-8 материалдарын алу үшін органикалық еріткіштерді пайдаланады. Park және т.б. (Park et al., 2006) N,N-диметилформаид (DMF), N-метилпирролидин және N,N-диэтилформаид сияқты органикалық еріткіштерді қолданып, алғаш рет ZIF-8 кристалдарын жасады. 1-суретте 1-метилимидазол (MIM) және мырыш нитраты тетрагидратының Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O DMF-те еруі, содан кейін 140°C температурада 24 сағаттық инкубациялық кезең көрсетілген (Park et al., 2006). Дегенмен, DMF молекулалары содалитті торлы молекулалардан үлкен болғандықтан, еріткіш алмасу арқылы ZIF-8 алу қиын (Lee et al., 2015).

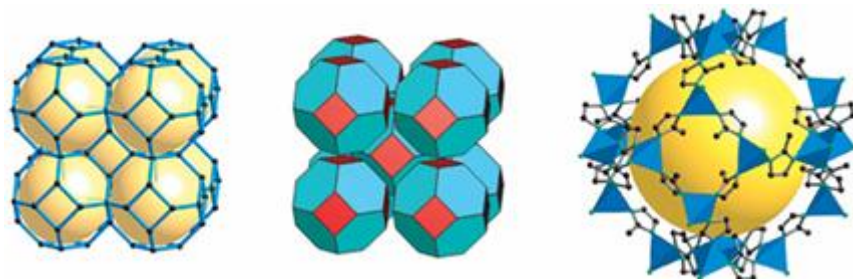


Сурет 1. ZIF-8 сольвотермиялық синтездеу процесі (Park et al., 2006)

Әдеби шолуларға сәйкес, метанол, DMF алмастырғыш болып табылады, өйткені ол ZIF-8 кеуектерінен оңай алынады, өйткені оның кинетикалық диаметрі DMF-ге қарағанда төмен (Lee et al., 2015). ZIF кристалдарын жасау үшін құрамында  $Zn(OH)_2$  бар сулы аммиак ерітіндісі құрамында MIM немесе 2-этилимидазол бар метанол ерітіндісімен біріктірілді (Kida et al., 2013). Осы жаңашыл зерттеуге сәйкес ZIF-8 кристалдары бірдей құрауыштарды біріктіріп, оларды бөлме температурасында бес сағат бойы ұстау арқылы жасалды (Huang et al., 2006; Zhang et al., 2011). Сонымен қатар, Zn иондары мен MIM арасындағы 1:8 молярлық қатынасы наноөлшемді ZIF-8 материалдарын синтездеу үшін пайдаланылуы мүмкін екендігі анықталды (Zhu et al., 2012).

Кейінгі зерттеулер бойынша метанол негізіндегі ZIF-8 синтезделді. Натрий форматы/ MIM және n-бутиламинді Cravillon және т.б. (Cravillon et al., 2009) 10-нан 65 нм-ге дейінгі диапазондағы ZIF-8 нанокристалдарының өлшемін реттеу үшін модификациялаушы лигандтар ретінде қолданды. Бөлме температурасында модификациялаушы лигандтар ZIF-8 кристалдануын да жылдамдатты (Cravillon et al., 2011). Алтыбұрышты пішінді ZIF-8 нанокристалдары метанолды жоғары молекулалы полимермен (диаллидиметиламмоний хлориді) тұрақтандыру арқылы жасалды (Cravillon et al., 2012). Сонымен қатар, ZIF-8 қосымша органикалық еріткіштерді, соның ішінде этанол (Bennett et al., 2013) және изопропил спирті (Nune et al., 2010) арқылы дайындалды.

Park және басқа ғалымдар (Park et al., 2006) 2 суретте көрсетілгендей кеуектілігі жоғары ZIF-8 монокристалды түрдегі құрылымын жасады. Одан кейін  $CH_3OH/NH_3 \cdot H_2O$  аралас ерітіндісімен синтезделді. Метанол мен аммиак ерітіндісінің қоспасын еріткіш ретінде қолдану тұрақты SOM-ZIF-8 материалының түзілуіне ықпал етеді. Бірақ метанол тұрақты ZIF-8 түзілуіне еріткіш ретінде қолданылатыны белгілі (Shen et al., 2018., Hu et al., 2019). Ал таза аммиак ZIF-8 көп мөлшерде түзілуіне ықпал етіп гомогенді ZIF-8 түзіледі және кристалдану жылдамдығы өте жоғары (Chen et al., 2019). Аммиак жоқ кезде барлық кристалдар ZIF-8 пайда болады және ZIF-8 нанокристал ретінде өседі. Екі еріткіштің әсерінің өте жақсы болатынына көз жеткізген Shen (Shen et al., 2018) және басқалар SOM-ZIF-8 (3, 0,5) аралықта түзілетіндігін анықтады.



**Сурет 2.** ZIF-8 кристалдық құрылымы. Сол жағы: таяқша диаграмма; Ортасы: ретпен орналасқан; Оң жағы: Ең үлкен топ (Park et al., 2006). Авторлық құқық: PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences, Ұлттық Академиялық ғылымдар еңбектері). <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>

### 2.2.2. Гидротермиялық синтез

Бұл тәсіл арқылы ZIF-8 қолдануға оңай және экологиялық таза түрде шығарылуы мүмкін, өйткені солвотермиялық синтез үдерістерінде қолданылатын органикалық еріткіштер улы, қымбат, жанғыш және қоршаған ортаға зиянды. Қоршаған орта температурасында ZIF-8 синтезін зерттеу үшін соңғы жылдары сулы ерітінділер қолданылды; соған қарамастан, сулы ерітіндіде кеуекті қаңқасы жоқ тығыз құрылымды ZIF-8 синтезі алынуы өте қиын. Рап және т.б. (Troiano et al., 2019) алдымен бұл мәселені шешіп, сулы жүйеде қарапайым үдеріс арқылы бөлме температурасында ZIF-8 дайындады. Олар MIM ерітіндісін мырыш нитратының ерітіндісімен қоспаны шамамен 5 минут араластырды,

содан кейін центрифугалау арқылы өнімді алды. Дегенмен, МІМ мөлшері бұл әдісте қолданылатын Zn иондарынан шамамен 70 есе көп. Ол МІМ артық шығынын тудырады, себебі ZIF-8-дегі МІМ және Zn иондары арасындағы стехиометриялық молярлық қатынас теориялық тұрғыдан 2 болады. ZIF-8 препаратына 100-ден 20-ға дейінгі МІМ/Zn молярлық қатынасының әсері пайдаланылды (Pan et al., 2011). Zn иондары мен МІМ арасындағы әртүрлі стехиометриялық молярлық қатынаста синтез жағдайлары зерттелді. Сондай-ақ, синтез ерітіндісінің рН мәні ZIF-8 кристалдануына әсер ететіні анықталды. ZIF-8 су негізіндегі синтез әдістерін МІМ пайдалануды азайту үшін триэтанолламин (ТЕА), гидроксид және аммоний сияқты протондану агенттерін қолдану арқылы өзгертуге болады. Gross және т.б. (Tanaka et al., 2012) 4:1 МІМ және Zn иондары арасындағы молярлық қатынасты пайдаланып, триэтанолламин (ТЕА) қосу арқылы бөлме температурасында сулы жүйеде ZIF-8 синтездеді. Әдісте ешқандай жанама өнімдер пайда болған жоқ.

Wang және оның әріптестері одан әрі МІМ/металл молярлық қатынасы 2:1 болатын концентрлі аммоний гидроксиді сулы ерітінділерінде ZIF-8 синтезін жасады (Yao et al., 2013). Сулы аммиак ерітіндісінде ZIF-8 құрылымдарын, бөлшектердің өлшемдерін және текстуралық қасиеттерін реттеуге болатын өнім алуға болады. Бұл үнемді синтез әдістері ZIF-8 материалдарын кең көлемде өндіруді жеңілдетеді.

### 2.2.3. Ультрадыбыстық /сонохимиялық синтез

ZIF-8-ді ультрадыбыстық немесе сонохимиялық әдістермен де синтездеуге болады. Seoane және т.б. (He et al., 2014) ультрадыбыстық (АҚШ) және сольвотермиялық (ST) жағдайында ZIF-8, ZIF-7, ZIF-11 және ZIF-20 кристалдарын синтездеді. ZIF-8 жиілігі 47 кГц және қуаты 110Вт ультрадыбыстық өңдеу кезінде 45°C температурада өндірілді. Дәстүрлі сольвотермиялық әдістермен салыстырғанда ультрадыбыстық немесе сонохимиялық синтездің ұзақтығы қысқарады. Сондай-ақ, ZIF-8 кристалдары кәдімгі сольвотермиялық тәсілдермен жасалғандардан айырмашылығы кішірек бөлшектердің өлшеміне және өлшемі кіші бөлшектердің таралуына ие екендігі анықталды (He et al., 2014).

рН реттей отырып NaOH және ТЕА пайдалану арқылы Cho т.б. (Seoane et al., 2012) ZIF-8-ді сонохимиялық әдіспен синтездеді. Өте жоғары субстрат концентрацияларында (Zn<sup>2+</sup>: DMF=1:3) ZIF-8 екі сағат ішінде көп мөлшерде синтезделді. Жоғары субстрат концентрациясын, рН және сонохимияны орынды пайдалану арқылы ZIF-8 синтезіне қол жеткізуге болады. Сонымен қатар, синтез уақытын дәстүрлі синтез әдістері үшін бірнеше күннен, ультрадыбыстық немесе сонохимиялық әдістер үшін 1-2 сағатқа дейін қысқартуға болады (Cho et al., 2013). Сонохимиялық әдіс жоғары температураны, қысымды және ерекше жылдам жылу беруді тудыратын әдістің бірі. Бұл үдерістер кезінде ерітінділерде көпіршіктер пайда болады (Suslick et al., 1986). ZIF-8 синтезі үшін дәстүрлі пешті қыздырудан айырмашылығы, сонохимиялық әдістер ерітінділердегі бөлшектердің біртекті нуклеациясын тездетеді (Son et al., 2008).

### 2.2.4. Механохимиялық синтез

Синтез үдерісінде еріткіштер мен тұздарды қолданбай, механохимиялық синтез әдісі қоршаған ортаның ластануын және кристалдық торға қоспалардың қосылуын азайтады (Schlesinger et al., 2010). Тығыз Zn(IM)<sub>2</sub> ZnO-ны имидазолдың (IM) көп мөлшерімен қолмен ұнтақтау арқылы (Fernández-Bertrán et al., 2006) немесе ZnCl<sub>2</sub> (Adams et al., 2007) қолданатын механохимиялық әдісті қолдану арқылы дайындалды. Құрғақ ұнтақтау нәтижесіндегі тотығуды болдырмау үшін ZIF-8 синтезіне сұйық немесе иондық ұнтақтау үдерістері ұсынылды (Beldon et al., 2010). Сұйық фаза бұл бөлшектердің жылжымалы қозғалғыштығын күшейте алады (Braga et al., 2006). Сонымен қатар, тұз қоспалары ZIF-8 түзілуін жеңілдетеді (Friscic et al., 2010). Ең бастысы, ұнтақтау үдерісінде сұйықтық пен тұз қоспаларынан синтезделген ZIF-8 түзіледі. Сондай-ақ еріткіштер мен қоспаларды қолданбай, ZnO-дан ZIF-8-ге механикалық химиялық құрғақ түрлендіру туралы айтылды (Tanaka et al., 2013).

1-Кестеден әр әдістің субстраттар, үдерістер және морфологиясынан өзіндік ерекшеліктері бар екенін көруге болады.

**Кесте 1.** ZIF-8 синтездеу әдістері (Qiaoling Zhou et al., 2025)

Әдістер	Субстраттар	Үдерістер	Морфология	Авторлық құқық
<b>Сольвотермиялық</b>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, 2-метилимидазол, N,N-диметилформаид (DMF)	Еріту араластыру → қыздыру → бөлме температурасына дейін суыту → сүзу → жуу → кептіру	Полигидратты ZIF-8 кристалдары	101, 2021, <i>Food and Chemical Toxicology</i> .
<b>Гидротермиялық</b>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, 2-метилимидазол, су, метанол	Еріту → араластыру → гидротермиялық синтез → центрифуга → жуу → кептіру	Ірі ZIF-8 кристалдар	102, 2020, <i>Journal of Alloys and Compounds</i> .
<b>Ультрадыбыстық/сонохимиялық</b>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, 2-метилимидазол, метанол	Dissolving separately → mixing → ultrasonic irradiation → centrifugation → washing → drying	Бірдей түрдегі ZIF-8 кристалдар	103, 2013, <i>Microporous and Mesoporous Materials</i> .
<b>Механохимиялық</b>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, 2-метилимидазол (ұнтақ)	Ұнтақты диірменде араластыру → електен өткізу → жуу → кептіру	Біріктірілген ZIF-8 бөлшектері	104, 2021, <i>Materials Today</i> .

### 3. Талдау

#### 3.1. ZIF-8 қолдана отырып ауыр металдарды ағынды сулардан жою

Өндіріс, құрылыс және пайдалы қазбаларды өндіру өнеркәсібінен жинақталған ағынды сулардың төгілуінен туындаған экологиялық мәселелер соңғы жылдары экономикалық және өнеркәсіптің жылдам артуына байланысты өзекті болып келеді. Қазіргі уақытта суды қоршаған ортаны қорғау алдында тұрған өзекті мәселелердің бірі су объектілерінің ауыр металдармен ластануы болып табылады. Ауыр металл иондарының көпшілігі мутагенді, канцерогенді және биологиялық ыдырамайтын болғандықтан адамдарға және судағы тіршілікке орны толмас зиян келтіреді.

Мыс пен қорғасынның негізгі антропогендік көздері, суды ластайтын ауыр металл иондары тау-кен және балқыту, аккумулятор өндірісі және басқа да өндіріс пен өндеу кәсіпорындары болып табылады (Hong et al., 2020; Baby et al., 2010). Яғни, суды ластаудың антропогендік көздері ауыр металдар болғандықтан бұл экологиялық мәселеге жатады. Суды ластайтын мыс пен қорғасынның биологиялық жинақталуы және уыттылығы жоғары, ластанған су ағзаға, балықтарға және адам денсаулығына зиян келтіреді (мысалы,

неврологиялық зақымдар, бүйрек аурулары). Адам қолынан жасалатын антропогендік көздердің сипаттамасы 2-кестеде келтірілген.

**Кесте 2.** Адам қолынан жасалатын антропогендік көздер (Baby et al., 2010)

Антропогендік көз	Сипаттамасы	Мысалдар
Тау - кен және балқыту	Кен өндіру және металды балқыту кезінде қалдық сулар арқылы металл иондары жіберіледі.	Мыс кеніштері, қорғасын-мырыш комбинаттары.
Аккумулятор өндірісі	Қорғасын-қышқыл аккумуляторларын өндіруде қорғасын қолданылады.	Барлық елдегі автомобиль аккумуляторларын шығаратын зауыттар.
Басқа өндіріс және өңдеу	Металлургия, бояу өндірісі, электроника, химия өнеркәсібі.	Түтін түтіктерінен немесе тазартылмаған ағын сулардан шығатын ластану.

Зерттеулерге сәйкес, судың құрамында мыс немесе қорғасын болса адамдарға қайтымсыз зиян келтіруі мүмкін. Мысалы, тым көп мыс бауыр циррозына және бүйрекке, миға және басқа мүше тіндеріне (Gaetke et al., 2003) зақым келтіруі мүмкін, ал тым көп қорғасын сүйектерді өзгертіп, қызыл қан жасушаларымен проблемаларды тудыруы мүмкін, бұл анемия мен қатерлі ісікке әкелуі мүмкін (Briffa et al., 2020).

Адам ағзасына тікелей немесе жанама ену арқылы мыс пен қорғасын ағзада жиналып, көптеген аурулар мен өлімге әкеледі (Zeitoun et al., 2014; Li et al., 2021).

Сондықтан, қоршаған ортаға жіберілмес бұрын құрамында ауыр металл иондары бар ағынды суларды аз мөлшерде тазарту керек. Қазіргі кезде ауыр металл иондары ағынды сулардан химиялық тұндыру, мембраналық бөлу, ион алмасу және электрохимиялық тазарту сияқты әртүрлі тазарту әдістерінің көмегімен жойылады (Fu et al., 2011; Arbabi et al., 2016).

Көптеген химиялық реагенттерді пайдаланудан басқа, флокуляция және коагуляция мәселесіне әкеледі. Мембрананы бөлу процесі ауыр металл иондарын жоюда айтарлықтай тиімді болғанымен, ол экономикалық тұрғыдан тиімсіз және көп күтімді қажет етеді. Электродиализ тәсілінің жоғары сепарациялық селективтілігі айтарлықтай техникалық күрделілікпен және ион алмасумен қатар жүреді (Azimi et al., 2017; Qasem et al., 2021; Ahmed N et al., 2016). Бұл пайдаланудың қарапайымдылығына, үнемділігіне және қоршаған ортаға зиянсыздығына байланысты адсорбциялық технология құрамында ауыр металл иондары бар ағынды суларды тазалаудың ең кең таралған әдістерінің бірі болып табылады (Lei et al., 2019; Aklil et al., 2004).

Адсорбент, ең алдымен, адсорбция технологиясын қолдана отырып, ауыр металл иондарын адсорбциялау кезінде химиялық немесе физикалық әрекет арқылы ауыр металл иондарын адсорбциялау және бөлу үшін қолданылады және адсорбентті таңдау өте маңызды. Ағынды суларды тазарту үшін белсендірілген көмір, саз минералдары, полимерлер, цеолит және басқа адсорбциялық материалдар пайдаланылды. Алайда, ауыр металл иондарының адсорбциясына келетін болсақ, бұл материалдарда адсорбциялық кемшіліктер немесе адсорбциялық тиімділігі төмен болды (Orolínova et al., 2010, Naat et al., 2021).

ZIF-8 адсорбция үдерісінің ішкі кемшіліктерін басқа материалдардың функционалдық топтарында ерекшеліктері бар, бұл композиттік катализатордың меншікті бетінің ауданы мен адсорбцияны арттырады (Mo et al., 2022; Qu et al., 2021).

Алдыңғы зерттеулер ZIF-8 нанобөлшектерінің қанықпаған металл торлары ( $Zn^{2+}$ ) өздігінен құрастыру кезінде координациялық, иондық және сутектік байланыстары арқылы өзара әрекеттесуі мүмкін екенін көрсетті (Wang et al., 2020; Yang et al., 2018; Li et al., 2021; Chen et al., 2019).

Келтірілген әдебиеттерде айтылғандай әр материалдың артықшылықтары мен кемшіліктері болады. Мысалы, материал ретінде белсендірілген көмір мен ZIF-8 салыстыратын болсақ, табиғи зат - белсендірілген көмір арзан, қолжетімді болғанымен адсорбция тиімділігі төмен және қайта қалпына келтіру мүмкін емес. Ал ZIF-8 адсорбция тиімділігі жоғары, кеуектеріне металдардың енуі өте жақсы және металдар имидазол топтарымен хелаттасады. Бірақ хлорсутек немесе натрий гидроксидімен қайта қалпына келтіру кезінде адсорбция тиімділігі төмендейді.

Дәстүрлі адсорбенттерді (цеолиттер, белсендірілген көмір, биокөмір, хитозан, кремний диоксиді, саз минералдары және графен) салыстырғанда, ZIF-8 ластанған сулардан көптеген ауыр металл иондарын тазартуда тамаша адсорбциялық қабілетіне байланысты жоғары тиімділік көрсетеді (3-кесте). 3-кестеде көрсетілгендей, ZIF-8 эксперименталды жағдайларда сулы ерітінділерден ауыр металдарды жоғары деңгейде адсорбциялайды. Басқа адсорбенттермен салыстырғанда ZIF-8 әлдеқайда тиімді жұмыс істейді және әртүрлі ауыр металдарға айтарлықтай жоғары адсорбция сыйымдылығын қамтамасыз етеді. Қысқа адсорбция уақыты, бейтарап немесе әлсіз қышқыл ортадағы жағдайлар, оңай бақылау және қолдану ыңғайлылығы ZIF-8-нің ауыр металл иондарын адсорбциялауда өте тиімді болуына ықпал етеді. Дегенмен, MIL сериялы металлорганикалық қаңқа немесе UiO-66 сияқты жетілдірілген адсорбенттерге ұқсас ZIF-8 бірнеше маңызды шектеулерге ие: (1) мақсатты функционалдық топтардың болмауына байланысты төмен селективтілік, (2) экстремалды рН жағдайларындағы төмен тұрақтылық және (3) салыстырмалы түрде жоғары синтез шығындары. Осы мәселелерді шешу үшін ZIF-8-ді стратегиялық функционализациялау немесе жаңа ZIF-8 негізіндегі композиттік материалдарды әзірлеу оның селективтілігін, химиялық тұрақтылығын және ауыр металдарды жою тиімділігін бір мезетте арттырып, өндіріс шығындарын онтайландыруға мүмкіндік береді.

**Кесте 3.** Әртүрлі адсорбенттердің ауыр металдарды сіңіруінің адсорбциялық қабілетін салыстыру (Qiaoling Zhou et al., 2025)

Ластаушы	Материалдар	Бастапқы концентрация (мг/л)	рН	Жанасу уақыты (мин)	Адсорбциялық қабілеті (мг/г)
<b>Cu(II)</b>	ZIF-8	120	5,0	90	378,5
	Күріш қабығы	128	–	20	2,30
	CS/SA/SiO <sub>2</sub>	100	6,0	240	47,50
<b>Pb(II)</b>	PANI@APTS-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /ATP-0,7	100	5,0	15	142,5
	SH/GG@MIL-100	100	6,0	300	311,48
	ZIF-8	100	6,0	15	475,54
<b>Cr(VI)</b>	PANI@APTS-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /ATP-0,7	100	5,0	15	270,27
	A-MZF	100	3,0	300	160
	IDS-Mt5	300	8,0	10	214,73
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @UiO-66-PDA	50	5,0	800	121,42
	ZIF-8	50	5,0	45	34,3
<b>As(V)</b>	ZnO NPs	20	6,0	35	48,50
	AO-CS	200	2,0	10	130,0
	MAF-LDOs	100	3,0	75	26,76
	UiO-66-(OH) <sub>2</sub>	20	3,0	200	18,20
	ZIF-8	20	7,0	480	81,40

	CS-FMO	40	3,0	1200	26,65
	Zr-Mn	10	7,0	900	52
	MIL-100(Fe)/1%GO-400	10	6,0	120	26,55
<b>Cd(II)</b>	ZIF-8	100	7,0	15	209,79
	MRBC	100	7,0	480	49,93
	MgAl-LDH	50	7,0	60	4,18
	MCTS@GO@DIP	50	6,0	30	39,35
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @UiO-66-Lcys	50	7,0	420	430,89
<b>Hg(II)</b>	ZIF-8	20	6,5	90	1271,27
	K-HAS	120	4,0	480	128,4
	Fe-Mn@SCAs	100	6,0	90	324,42
	PANI@SA-SNM	50	4,0	120	352,76
	NH <sub>2</sub> -MIL-101@PES	100	5,0	24 сағ	237,45

Судағы ауыр металдарды кетіруге арналған ZIF-8 негізіндегі адсорбенттердің адсорбциялық қабілетіне қарап ZIF-8 туындылары ауыр металдарды адсорбциялау бойынша көптеген басқа адсорбенттермен салыстырғанда әлдеқайда жоғары нәтиже көрсететіндігін байқауға болады. Олар ZIF-8-дің кеуекті құрылымын сақтай отырып, көміртектендіруден кейін кеуектік жүйеге (микрокеуектер мен мезокеуектер) және үлкен меншікті бет ауданына ие болады, бұл әртүрлі гидратталған радиустары бар ауыр металл иондары (мысалы, Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup> иондары үшін адсорбция алаңдарының санын арттырады. Олардың адсорбциялық сыйымдылығы көбіне дәстүрлі адсорбенттерге қарағанда бірнеше есе жоғары болады.

Кеуектердің өзара байланысқан құрылымы массаның тасымалдануын жеделдетіп, адсорбция кинетикасының жылдам жүруіне және тепе-теңдікке жету уақытын қысқартуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ZIF-8-ден сақталған азотты функционалдық топтар және көміртектендіру кезінде түзілген оттекті топтар белгілі бір ауыр металдарға селективтілікті арттыра түседі. Ең маңыздысы, бұл туындылар қышқылдық және сілтілік орталарда бастапқы ZIF-8-ге қарағанда жоғары тұрақтылық танытады; олардың көміртекті құрылымы еру үдерісіне төзімді болып, Zn<sup>2+</sup> бөлінуін азайтады және көп циклді қолдану барысында тиімділігін сақтайды. Осы сипаттамаларына байланысты олар ауыр металдарды қайта қалпына келтіру үшін болашағы бар адсорбенттер болып табылады және өнімділігі арттырылған ZIF-8 композиттеріне жақсы сәйкес келеді (4-кесте). Допингтен кейін алынған ZIF-8-композиттердің адсорбциялық өнімділігі өзгертілмеген материалдармен салыстырғанда ауыр металдарды жою тұрғысынан айтарлықтай артқан. 4-кестеде көрсетілгендей, ZIF-8 қосылғаннан кейінгі композиттердің адсорбциялық қабілеті мен тиімділігі бастапқы, өзгеріссіз адсорбенттерге қарағанда шамамен 2-80 есе жоғары болды, бұл ZIF-8-дің матрицалық материалды айтарлықтай күшейтетініне дәлел. Ең жоғары модификациялық әсер Cu(II) иондарын адсорбциялау кезінде байқалады. ZIF-8 енгізілгеннен кейін әртүрлі субстраттарға негізделген адсорбенттердің әсері күшейеді. Ең жақсы модификация нәтижелері металл материалдарға негізделген астыңғы құрылымдарда байқалады, ал органикалық материалдар үшін де күшейту әсері өте жоғары. Сондықтан жаңа матрицалық материалдарды зерттеу және шикізаттың табиғатын ескере отырып, ZIF-8 допингі арқылы адсорбциялық қасиеттерді әрі қарай оңтайландыру болашақта зерттеуге әлі де лайық бағыт.

**Кесте 4.** Судағы ауыр металдарды кетіруге арналған ZIF-8 негізіндегі адсорбенттердің адсорбциялық қабілеті (Qiaoling Zhou et al., 2025)

Ластаушы	Шикізат	ZIF-8 негізінде	Бастапқы концентрация (мг/л)	pH	Жанасу уақыты	Адсорбциялық қабілет/тиімділік (мг/г)
Cu(II)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZIF-8	40	5,0	24 сағ	дейін 5,7 / кейін 305
	GO	ZIF-8@GO-7,83%	40	6,0	120 мин	дейін 5 / кейін 380
	CS	CS-ZIF-8-1,2	100	5,0	5 сағ	дейін 16 / кейін 38
	MS	ZIF-8/MS	30	5,0	25 мин	дейін 50 / кейін 140
Pb(II)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZIF-8	35	5,0	24 сағ	дейін 14,4 / кейін 714,7
	SF	SFZIF-8 (1:15)	100	7,0	12сағ	дейін 75 /кейін 380
	GO	ZIF-8@GO	25	5,0	100 мин	дейін 273 /кейін356
	MMT	ZIF-8/MMT	400	5,0	120 мин	дейін 79 кейін 297
	GO	ZG3	100	5,5	10 мин	дейін 150 /кейін 500
	BC	SA@ZIF-8/BC	200	5,0	90 мин	дейін 126,1/кейін 300,3
	CS	CS-ZIF-8-1,2	100	5,0	120 мин	дейін 23 / кейін 38
	CS	ZIF-8@CS/HAP	200	6,0	50 мин	дейін 98,74 / кейін 291,2
Cr(VI)	MS	ZIF-8/MS	30	5,0	25 мин	дейін 40 / кейін 150
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @PmPD(Z)	200	2,0	14 сағ	дейін 37,5 / кейін 255
	Mg(OH) <sub>2</sub> /GO	ZIF-8/NH <sub>2</sub> /Mg(OH) <sub>2</sub> /GO	10	7,0	60 мин	дейін 1,82 / кейін 4,88
As(V)	PAN	ZIF-8@ZIF-8/PAN-мз	20	2,0	90 мин	дейін 10,19 /кейін 39,68
	CL-2	CSL-2	20	5,0	30 мин	дейін 225 / кейін 378
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZIF-8	50	3,0	24 сағ	76
As(III)	CS	ZIF-8/CS-N	20	6,0	60 мин	39,2
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZIF-8	27	8,0	4 сағ	100
Ni(II)	FA	ZIF-8/FA	100	5,5	4 сағ	дейін 1,6% / кейін 36,1%
Ni(II)	PAA/PVDF	PAA/ZIF-8/PVDF-0,05	50	5,5	–	дейін 16,54 / кейін 219.09

#### 4. Қорытынды

Бұл шолу мақалада металлорганикалық қаңқа (ZIF-8) синтездеудің бірнеше әдіс-тәсілдері мен оның ағынды суды тазартуға қолданылуы келтірілген. Зерттеу жұмыстарында ZIF-8 синтездеу үшін арнайы үш еріткішті қолданған. Олар: DMF, метанол және су мен аммиак.

Соңғы жылдары металл органикалық қаңқалардың түрлері әр түрлі салада қолданылып келеді. Осыған орай кеуектілігі, адсорбциялық белсенділігі жоғары ZIF-8 синтезделуі, оның әр салада қолданылуына көптеген зерттеушілердің ғылыми қызығушылықтары артқан. Соған қарамастан, ZIF-8 бөлшектерінің топтасуға бейім екендігі, бұл меншікті бет ауданының төмендеуіне әкелетіндігі де ескерілуі қажет. Сондай-ақ ZIF-8 синтездеуде еріткіш таңдауда ерекше назар аударылады. Ластаушы заттар жойылғаннан кейін оларды судан бөліп алу қиын болғандықтан, олардың қайта өңделуі де нашар болатындықтан, ауыр металл иондарын тиімді жою үшін белгілі бір MOF синтездеу үшін қосымша зерттеулерді қажет

етеді. Бұл ағынды суды тазартуда ZIF-8 механизмі мен табиғатын тереңірек түсінуге және инновациялық шешімдерге қолданудың тиімділігін арттыруға жол ашады. Зерттеу жұмыстарын ескере отырып, суды ауыр металдардан тазартатын ZIF-8-тің басқа металлорганикалық қаңқалардан химиялық тұрақтылығы жоғары екенін байқауға болады. Құрылымы имидазолат байланыстырушысының әсерінен ауыр металл иондарына селективтілігі жеткілікті. Бейтарап ортада адсорбция сыйымдылығы 2-3 есе жоғары, шамамен 400-600 мг/г құрайды. Соңғы зерттеулерде ZIF-8-тің Cr(VI) үшін 30 минут ішінде 95% тиімділік көрсететінін, магнитті композиттер ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@ZIF-8$ ) сыртқы өріс арқылы 5 минутта бөлінетінін дәлелдеген.

#### Ұсыныс

Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып мынадай ұсыныстарды ұсынамыз:

1. Ағынды суларды сирек жер металдарынан және ауыр металдарды сіңіретін жаңа металлорганикалық қаңқалы наноматериалдарды синтездеу бағытында ғылыми зерттеу жұмыстарын жасау. Синтез параметрлерін оңтайландыру, нанокұрылымдар, үздіксіз ағын реакторлары және фотокатализатор-мембрана жүйелері өнеркәсіптік қолдануға жол ашу.

2. ZIF-8 - тің суды ауыр металдардан тазартуға пайдаланудың тиімділігін анықтауда экологиялық таза синтездеу әдістерін жетілдіруде еріткішті тиімді қолдана білу.

3. ZIF-8 композиттерін дамыту үшін магнитті ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@ZIF-8$ ), графика оксид ( $ZIF-8@GO$ ) және полимерлік ( $ZIF-8@PVA$ ) гибридтерді тиімді қолдану бағытында зерттеуді арттыру.

4. ZIF-8 композиттерін регенерациялауға сұйытылған 0,1 н HCl және EDTA ерітінділерін қолдану материал сіңірімділігін сақтап қалады. Тазартуға ультрадыбыстарды қолдану және магнитпен бөлу тәсілдерін қарастыру

5. Жасыл синтез тәсілдерін арттыруға DMF орнына су + аммиак жүйесін, еріткіш ретінде су: этанол қолдану

6. Адсорбциялық қасиеті бар заттардың басқа функционалдық топтармен топтасумен күресуде ZIF-8 құрылымдарын қолдану, синтездеуде стабилизатор қосу құрылымдық тұрақтылықты арттыру

**5. Қосымша материалдар:** бұл мақала үшін қосымша материалдар жоқ.

#### 6. Авторлық үлестер

Концептуализация – Н.Д.; әдістеме – Г.К.; бағдарламалық қамтамасыз ету – Г.К., Н.Д.; валидация – Г.К., Н.Д.; формальды талдау – Н.Д., Н.С.; зерттеу – Г.К., Н.Д.; ресурстар – Н.Д., Т.А., Н.С.; деректер кураторы – Г.К., Н.Д.; жазу – түпнұсқа жоба – Н.Д.; жазу – рецензиялау және редакциялау – Н.Д.; визуализация – Г.С., Ж.Қ.; қадағалау – Н.Д.; жобаны басқару – Г.К., Н.Д.; қаржыландыруды сатып алу – Г.К. Барлық авторлар танысып мақаланы жариялауға келіседі.

#### 7. Автор туралы ақпарат

Далабаева, Назгуль – химия ғылымдарының кандидаты, жалпы және бейорганикалық химия кафедрасының аға оқытушысы, химия және химиялық технология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан, 050040; [nazgulds81@gmail.com](mailto:nazgulds81@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1350-5054>

Kostakis, George – тіршілік ғылымы кафедрасының физикалық/бейорганикалық химия бойынша қауымдастырылған профессоры, Сассекс университеті, Ұлыбритания, Фалмер, BN1 9RH; [G.Kostakis@sussex.ac.uk](mailto:G.Kostakis@sussex.ac.uk), <https://orcid.org/0000-0002-4316-4369>

Сарова, Нұрбану - химия ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің қауымдастырылған профессоры, Алматы, Қазақстан, 050000; [n.sarova@abaiuniversity.edu.kz](mailto:n.sarova@abaiuniversity.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7541-2224>

Сдикова, Гулия - химия ғылымдарының кандидаты, М. Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан Университеті, Орал, Қазақстан, 090000; [sdikova.guliya@mail.ru](mailto:sdikova.guliya@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7949-1521>

Қорғанбаева, Жанар - химия ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан, 30, Қазыбек би, кеңсе 721, 050000; [korganbaeva.zhan@mail.ru](mailto:korganbaeva.zhan@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8046-9586>

Акылбекова, Турар - химия ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан, 30, Қазыбек би, кеңсе 721, 050000; [t.akylbekova@abaiuniversity.edu.kz](mailto:t.akylbekova@abaiuniversity.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-6028-6229>

**8. Қаржыландыру:** бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Болашақ Халықаралық бағдарламасындағы «500 Ғалым» жобасы бойынша Ұлыбритания елінде жасалды.

**9. Алғыстар:** біз Сассекс университетінің Тіршілік ғылымы кафедрасының ұжымына шын жүректен алғысымызды білдіргіміз келеді. Бұл жобаны жүзеге асыруда олардың тәжірибесі мен адалдығы маңызды рөл атқарды.

**10. Мүдделер қақтығыстары:** авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді. Демеушілер зерттеуді әзірлеуде, деректерді жинауда, талдауда немесе түсіндіруде; қолжазбаны жазуда немесе нәтижелерді жариялау туралы шешім қабылдауда ешқандай рөл атқарған жоқ.

## 11. Әдебиеттер тізімі

1. Fayemiwo, O., Daramola, M., & Moothi, K. (2018). Tannin-based adsorbents from green tea for removal of monoaromatic hydrocarbons in water: preliminary investigations. *Chem. Eng. Commun. J*, 174, 310-317. <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1409738>
2. Dutta, R., Mohammad, S. S., Chakrabarti, S., Chaudhuri, B., Bhattacharjee S., & Dutta, B. K. (2010). Unveiling the adsorption mechanism of zeolitic imidazolate framework-8 with high removal efficiency on copper ions from aqueous solutions. *Dalton Trans*, 82, 138-146. <https://doi.org/10.1039/C6DT01827K>
3. Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301-310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
4. Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289, 284-288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>
5. Vorosmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09549>
6. Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M. E., & Ward, R. S. (2012). Emerging organic contaminants in groundwater: a review of sources, fate and occurrence environ. *Pollut*, 163, 287-303. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034>
7. Liang, W., Wang, B., Cheng, J., Xiao, D., Xie, Z., & Zhao, J. (2021). Preparation of Co/Cr-MOFs for efficient removal of fleroxacin and rhodamine B. *J. Hazard. Mater*, 401, 123718. <https://doi.org/10.1515/gps-2024-0195>
8. Joseph, L., Jun, B. M., Jang, M., Park, C. M., Munoz-Senmache, J. C., Hernandez Maldonado, A. J., Heyden, A., Yu, M., & Yoon, Y. (2019). Removal of contaminants of emerging concern by metal-organic framework nanoadsorbents: a review. *Chem. Eng. J*, 369, 928-946. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.173>

9. Khalil, A., Habib-ur-Rehman, Sh., Muhammad, A., Syed, Sh., Ejaz, H., Hafiza, A., Sajidah, P., & Asif, A. (2021). Effect of metal atom in zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-8 & 67) for removal of  $Pb^{2+}$  &  $Hg^{2+}$  from water. *Food and Chemical Toxicology*, 149, 112008. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112008>
10. Ajmal, M., Rao, R. A. K., & Khan, M. (2005). Adsorption of copper from aqueous solution on *Brassica cumpestris* (mustard oil cake). *J. Hazard. Mater.*, 122, 177-183. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.029>
11. Larous, S., Meniai, A. H. & Lehocine, M. B. (2005). Experimental study of the removal of copper from aqueous solutions by adsorption using sawdust. *Desalination*, 185, 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.090>
12. Jia, S., Yang, Z., Yang, W., Zhang, T., Zhang, S., Yang, X., & Dong, Y. (2016). Removal of Cu(II) and tetracycline using an aromatic rings-functionalized chitosan-based flocculant: enhanced interaction between the flocculant and the antibiotic. *Chem. Eng. J.*, 283, 495-503. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.003>
13. Ye, S. J., Zeng, G. M., Hu Zhang, H. P., Liang, C., Dai, J., Liu, Z. F., Xiong, W. P., Wan, J., Xu, P., & Cheng, M. (2017). Co-occurrence and interactions of pollutants, and their impacts on soil remediation - a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 47, 1528-1553. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1386951>
14. Weng, X. L., Lin, S., Zhong, Y. H., & Chen, Z. L. (2013). Chitosan stabilized bimetallic Fe/Ni nanoparticles used to remove mixed contaminants-amoxicillin and Cd(II) from aqueous solutions. *Chem. Eng. J.*, 229, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.096>
15. Chen, Q., Luo, Z., Hills, C., Xue, G., & Tyrer, M. (2009) Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Research*, 43, 10, 2605-2614. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.007>
16. Gharabaghi, M., Irannajad, M., & Azadmehr, A. R. (2012). Selective sulphide precipitation of heavy metals from acidic polymetallic aqueous solution by thioacetamide. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 954-963. <https://doi.org/10.1021/ie201832x>
17. Vilensky, M. Y., Berkowitz, B., & Warshawsky, A. (2002). In situ remediation of groundwater contaminated by heavy- and transition-metal ions by selective ion-exchange methods. *Environ. Sci. Technol.*, 36, 1851-1855. <https://doi.org/10.1021/es010313>
18. Ritchie, S. M. C., Kissick, K. E., Bachas, L. G., Sikdar, S. K., Parikh, C., & Bhattacharyya, D. (2001). Polycysteine and other polyamino acid functionalized microfiltration membranes for heavy metal capture. *Environ. Sci. Technol.*, 35, 3252-3258. <https://doi.org/10.1021/es010617w>
19. Celis, R., Hermosin, M. C., & Cornejo, J. (2000). Heavy metal adsorption by functionalized clays. *Environ. Sci. Technol.*, 34, 4593-4599. <https://doi.org/10.1021/es000013c>
20. Wingenfelder, U., Hansen, C., Furrer, G., & Schulin, R. (2005). Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 4606-4613. <https://doi.org/10.1021/es048482s>
21. Yuvaraja, G., Subbaiah, M. V., & Krishnaiah, A. (2012). *Caesalpinia bonducella* leaf powder as biosorbent for Cu(II) removal from aqueous environment: kinetics and isotherms. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 11218-11225. <https://doi.org/10.1021/ie203039m>
22. Yujie, Zh., Zhiqiang, X., Zhuqing, W., Xuhui, F., Ying, W., & Aiguo, W. (2016). Unveiling the adsorption mechanism of zeolitic imidazolate framework-8 with high efficiency for removal of copper ions from aqueous solutions. *Dalton Trans. The Royal Society of Chemistry*, 45, 12653-12660. <https://doi.org/10.1039/C6DT01827K>
23. Ke Li., Nicholas, M., Lei, Ch., Huang, J., Paulette, S., Desmond, A., David, E., Wencong, X., Guang, Li., & Hai L. (2021). Sustainable application of ZIF-8 for heavy-metal removal in aqueous solutions. *Sustainability*, 13, 984. <https://doi.org/10.3390/su13020984>

24. Wan, N., & Hanafiah, W. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: a review. *Bioresource Technology*, 99, 3935-3948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.011>
25. Yutian, Zh., Xudong, Zh., Hongliang, H., & Li, Zh. (2015). Selective removal of transition metal ions from aqueous solution by metal-organic frameworks. *Royal Society of Chemistry*, 5(88), 72107-72112. <https://doi.org/10.1039/c5ra09897a>
26. Gavrilescu, M. (2004). Removal of heavy metals from the environment by biosorption. *Eng. Life Sci*, 4, 219-232. <https://doi.org/10.1002/elsc.200420026>
27. Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
28. Kim, H. S., Kim, Y. J., & Seo, Y. R. (2015). An overview of carcinogenic heavy metal: molecular toxicity mechanism and prevention. *J. Cancer Prev*, 20, 232-240. <https://doi.org/10.15430/JCP.2015.20.4.232>
29. Mahfuza, F., Md. Marjanul, H., Shamsunnahar, S., Anindita, S., Md. Razzak., & Ruhul, A. (2022). Types and treatment technology of industrial wastewater. *Journal of Chemical, Environmental and Biological Engineering*, 6, 56-69. <https://doi.org/10.11648/j.jcebe.20220602.12>
30. Muhammad, S., Lila, B., Mohd, D., Nur, S., Muhammad, R., Nik, A., Zulfan, A., & Fuad, N. (2020). Integrated membrane–electrocoagulation system for removal of celestine blue dyes in wastewater. *Membranes*, 10(8), 184. <https://doi.org/10.3390/membranes10080184>
31. Asano, T. (2002). The 2001 Stockholm water prize laureate lecture, water science and technology, 45, 23-33. Edition: LD/BI-499-06. Publisher: Technological Centre Gaiker, Zamudio, Spain
32. Wirzal, M. D. H., Mohd, Y. A. R., Zima, J., & Barek, J. (2015). Voltammetric determination of nifedipine at a hanging mercury drop electrode and a mercury meniscus modified silver amalgam electrode. *Int. J. Electrochem. Sci*, 10, 4571-4584. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01243-w>
33. Abo-Farha, S. A., Abdel-Aal, A. Y., Ashour, I. A., & Garamon, S. E. (2009). Removal of some heavy metal cations by synthetic resin purolite C100. *Journal of Hazardous Materials*, 169 (1–3), 190-194. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.086>
34. Bakhtiari, N., & Azizian, S. (2015) Adsorption of copper ion from aqueous solution by nanoporous MOF-5: a kinetic and equilibrium study. *Journal of Molecular Liquids*, 206, 114-118. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.02.009>
35. Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2004). Cr(VI) removal from synthetic wastewater using coconut shell charcoal and commercial activated carbon modified with oxidizing agents and/or chitosan. *Chemosphere*, 54, 951–967. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.001>
36. Wan N. W. S., & Hanafiah, M. A. K. M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: a review. *Bioresource Technology*, 99, 3935-3948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.011>
37. Al-Saydeh, S. A., El-Naas, M. H., & Zaidi, S. J. (2017). Copper removal from industrial wastewater: A comprehensive review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 56, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026>
38. Gnanaselvan, G., Sasikumar, B., Gangasalam, A., & Diganta, B. (2019). Removal of hazardous material from wastewater by using metal organic framework (MOF) embedded polymeric membranes. *Separation science and technology*, 54, 3, 434-446. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1508232>
39. Simin, F., Xiaoli, Zh., Dunnyun, Sh., & Zheng, W. (2021). Zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) for drug delivery: a critical review. *Chem. Sci. Eng*, 15(2), 221-237. <https://doi.org/10.1007/s11705-020-1927-8>

40. Park, K. S., Ni, Z., Cote, A. P., Yong, J., Huang, R., Uribe-Romo, F. J., Chae, H. K., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2006). Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks. *PNAS*, 103(27), 10186-10191. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>
41. Lu, G., & Hupp, J. T. (2010). Metal-organic frameworks as sensors: a ZIF-8 based fabry-perot device as a selective sensor for chemical vapors and gases. *J. Am. Chem. Soc.*, 132(23), 7832-3. <https://doi.org/10.1021/ja101415b>
42. Vasconcelos, I. B., Da Silva, T. G., Militao, G. C. G., Soares, T. A., Rodrigues, N. M., Rodrigues, M. O., Da Costa, N. B., Freire, R. O., & Junior, S. A. (2012). Cytotoxicity and slow release of the anti-cancer drugdoxorubicin from ZIF-8. *RSC Adv*, 2, 9437-9442. <https://doi.org/10.1039/C2RA21087H>
43. Peralta, D., Chaplais, G., Simon-Masseron, A., Barthelet, K., Chizallet, C., Quoineaud, A. A., & Pirngruber, G. D. (2012). Comparison of the behavior of metal-organic frameworks and zeolites for hydrocarbon separations. *J. Am. Chem. Soc.*, 134, 8115-8126. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja211864w>
44. Chizallet, C., Lazare, S., Bazer-Bachi, D., & Bonnier, F. (2010). Catalysis of transesterification by a nonfunctionalized metal-organic framework: acido-basicity at the external surface of ZIF-8 probed by FTIR and ab initio calculations. *J. Am. Chem. Soc.*, 132 (35), 12365-12377. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja103365s>
45. Nguyen, L. T. L., Le, K. K. A., Phan, N. T. S., & Chin, A. (2012). Zeolite imidazolate framework ZIF-8 catalyst for friedel-crafts acylation. *J. Catal*, 33, 688-696. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(11\)60368-9](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(11)60368-9)
46. Tran, U. P. N., Le, K. K. A., & Phan, N. T. S. (2011). Expanding applications of metal-organic frameworks: zeolite imidazolate framework ZIF-8 as an efficient heterogeneous catalyst for the knoevenagel reaction. *ACS Catal*, 1, 120-127. <https://doi.org/10.1021/cs1000625>
47. Zhao, X.-J., Fang, X.-L., Wu, B.-H., Zheng, L.-S., & Zheng, N.-F. (2014). Facile synthesis of size-tunable ZIF-8 nanocrystals using reverse micelles as nanoreactors. *Sci. China Chem*, 57, 141-146. <https://doi.org/10.1007/s11426-013-5008-4>
48. Farrusseng, D. (2011). Metal-organic frameworks: applications from catalysis to gas storage, Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527635856>
49. Venna, S. R., Jasinski, J. B., & Carreon, M. A. (2010). Structural evolution of zeolitic imidazolate framework-8. *J. Am. Chem. Soc.*, 132, 18030-18033. <https://doi.org/10.1021/ja109268m>
50. Cravillon, J., Nayuk, R., Springer, S., Feldhoff, A., Huber, K., & Wiebcke, M. (2011). Controlling zeolitic imidazolate framework nano- and microcrystal formation: insight into crystal growth by time-resolved *in situ* static light scattering. *Chem. Mater*, 23, 2130-2141. <https://doi.org/10.1021/cm103571y>
51. Meipeng, J., Bao, L., Ruiping, L., Jiuhui, Q., Huanting, W., & Xiwang, Zh. (2015). Water-based synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 with high morphology level at room temperature. *RSC Advances*, 5(60). <https://doi.org/10.1039/C5RA04033G>
52. Yao, J., He, M., Wang, K., Chen, R., Zhong, Z., & Wang, H. (2013). High-yield synthesis of zeolitic imidazolate frameworks from stoichiometric metal and ligand precursor aqueous solutions at room temperature. *Cryst Eng Comm*, 15, 3601-3606. <https://doi.org/10.1039/C3CE27093A>
53. Cho, H.-Y., Kim, J., Kim, S.-N., & Ahn, W.-S. (2013). High yield 1-L scale synthesis of ZIF-8 via a sonochemical route. *Microporous Mesoporous Mater*, 169, 180-184. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.11.012>
54. Gross, A., Sherman, E., & Vajo, J. (2012). Aqueous room temperature synthesis of cobalt and zinc sodalite zeolitic imidizolate frameworks. *Dalton Trans*, 41, 5458-5460. <https://doi.org/10.1039/c2dt30174a>
55. Pan, Y., Liu, Y., Zeng, G., Zhao, L., & Lai, Z. (2011). Rapid synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanocrystals in an aqueous system. *Chem. Commun.*, 47, 2071-2073. <https://doi.org/10.1039/c0cc05002d>

56. Marquez, A. G., Horcajada, P., Grosso, D., Ferey, G., Serre, C., Sanchez, C., & Boissiere, C. (2013). Green scalable aerosol synthesis of porous metal–organic frameworks. *Chem. Commun*, 49, 3848-3850. <https://doi.org/10.1039/c3cc39191d>
57. Wu, C. S., Xiong, Z. H., Li, C., & Zhang, J. M. (2015). Zeolitic imidazolate metal organic framework ZIF-8 with ultra-high adsorption capacity bound tetracycline in aqueous solution. *RSC Adv*, 5, 82127–82137. <https://doi.org/10.1039/c5ra15497a>
58. Omar, K., & Joseph, T. (2010). Rational design, synthesis, purification, and activation of metal-organic framework materials. *Accounts of Chemical Research*, 43(8), 1166-1175. <https://doi.org/10.1021/ar1000617>
59. Yu-Ri, L., Min-Seok, J., Hye-Young, Ch., Hee Jin, K., Sangho, K., & Wha-Seung, A. (2015). ZIF-8: a comparison of synthesis methods. *Chemical Engineering Journal*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.094>
60. Christian, D., Raffaele, R., Kang, L., Darren, B., & Paolo, F. (2017). Metal–organic frameworks at the biointerface: synthetic strategies and applications. *American Chemical Society*, 50(6), 1423-1432. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.accounts.7b00090>
61. Nilay, K., Berna, T., Levent, Y., & Halil, K. (2014). Synthesis of ZIF-8 from recycled mother liquors. *Microporous Mesoporous Mater*, 198, 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.07.052>
62. Li, Y. S., Liang, F. Y., Bux, H., Feldhoff, A., Yang, W. S., & Caro, J. (2010). Molecular sieve membrane: supported metal-organic framework with high hydrogen selectivity. *Angew. Chem. - Int. Ed*, 49, 548-551. <https://doi.org/10.1002/ange.200905645>
63. Zhou, H. C., Long, J. R., & Yaghi, O. M. (2012). Introduction to metal-organic frameworks. *Chem. Rev*, 112, 673. <https://doi.org/10.1021/cr300014x>
64. Park, K. S., Ni, Z., Côté, A. P., Choi, J. Y., Huang, R., Uribe-Romo, F. J., Chae, H. K., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2006). Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 103, 10186-10191. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>
65. Kida, K., Okita, M., Fujita, K., Tanaka, S., & Miyake, Y. (2013). Formation of high crystalline ZIF-8 in an aqueous solution. *Cryst Eng Comm*, 15, 1794. <https://doi.org/10.1039/C2CE26847G>
66. Lin, W., Rieter, W. J., & Taylor, K. M. L. (2009). Modular synthesis of functional nanoscale coordination polymers. *Angew Chem, Int Ed*, 48, 650-658. <https://doi.org/10.1002/ange.200803387>
67. Aya, T., Mohamed, A., Ezzat, A., Abdalla, El., & Fatma, M. (2025). Effective removal of heavy metal ions (Pb, Cu, and Cd) from contaminated water by limestone mine wastes. *Sci Rep*, 15, 1680. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82861-2>
68. Junfeng, Q., Fuan, S., & Lizhen, Q. (2012). Hydrothermal synthesis of zeolitic imidazolate framework-67 (ZIF-67) nanocrystals. *Mater Lett*, 82, 220-223. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.077>
69. Yao, J., He, M., & Wang, H. (2015). Strategies for controlling crystal structure and reducing usage of organic ligand and solvents in the synthesis of zeolitic imidazolate frameworks. *Cryst Eng Comm*, 17, 4970-4976. <https://doi.org/10.1039/C5CE00663E>
70. Lee, Yu-Ri., Min-Seok, J., Hye-Young, Ch., Hee-Jin, K., Sangho, Kim., & Wha-Seung, A. (2015) ZIF-8: a comparison of synthesis methods. *Chemical Engineering Journal*, 271, 276-280. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.094>
71. Kida, K., Okita, M., Fujita, K., Tanaka, S., & Miyake, Y. (2013). Formation of high crystalline ZIF-8 in an aqueous solution. *Cryst Eng Comm*, 15(9), 1794. <https://doi.org/10.1039/C2CE26847G>
72. Huang, X. C., Lin, Y. Y., Zhang, J. P., & Chen, X. M. (2006). Ligand-directed strategy for zeolite-type metal-organic frameworks: zinc(II) imidazolates with unusual zeolitic topologies. *Angewandte Chemie International Edition*, 45(10), 1557-1559. <https://doi.org/10.1002/anie.200503778>

73. Zhang, J. P., Zhu, A. X., Lin, R. B., Qi, X. L., & Chen, X. M. (2011). Pore surface tailored sod-type metal-organic zeolites. *Advanced Materials*, 23(10), 1268-1271. <https://doi.org/10.1002/adma.201004028>
74. Zhu, A. X., Lin, R. B., Qi, X. L., Liu, Y., Lin, Y.Y., Zhang, J. P., & Chen, X. M. (2012). Zeolitic metal azolate frameworks (MAFs) from ZnO/Zn(OH)<sub>2</sub> and monoalkyl-substituted imidazoles and 1,2,4-triazoles: efficient syntheses and properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, 157, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.11.033>
75. Cravillon, J., Münzer, S., Lohmeier, S.J., Feldhoff, A., Huber, K., & Wiebcke, M. (2014). Rapid room-temperature synthesis and characterization of nanocrystals of a prototypical zeolitic imidazolate framework. *Chem. Commun*, 50, 13260. <https://doi.org/10.1039/C4CC06491G>
76. Cravillon, J., Nayuk, R., Springer, S., Feldhoff, A., Huber, K., & Wiebcke, M. (2011). Controlling zeolitic imidazolate framework nano- and microcrystal formation: Insight into crystal growth by time-resolved in situ static light scattering. *Chemistry of Materials*, 23(8), 2130-2141. <https://doi.org/10.1021/cm103571y>
77. Cravillon, J., Schröder, C. A., Bux, H., Rothkirch, A., Caro, J., & Wiebcke, M. (2012). Formate modulated solvothermal synthesis of ZIF-8 investigated using time-resolved in situ X-ray diffraction and scanning electron microscopy. *Cryst Eng Comm*, 14(2), 492-498. <https://doi.org/10.1039/C1CE06002C>
78. Bennett, T. D., Saines, P. J., Keen, D. A., Tan, J. C., & Cheetham, A. (2013). Ballmilling-induced amorphization of zeolitic imidazolate frameworks (ZIFs) for the irreversible trapping of iodine. *Chemistry (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)*, 19(22), 7049-7055. <https://doi.org/10.1002/chem.201300216>
79. Nune, S. K., Thallapally, P. K., Dohnalkova, A., Wang, C., Liu, J., & Exarhos, G. J. (2010). Synthesis and properties of nano zeolitic imidazolate frameworks. *Chemical Communications*, 46(27), 4878-4880. <https://doi.org/10.1039/c002088e>
80. He, M., Yao, J., Li, L., Wang, K., Chen, F., & Wang, H. (2013). Synthesis of zeolitic imidazolate framework-7 in a water/ethanol mixture and its ethanol-induced reversible phase transition. *ChemPlusChem*, 78(10), 1222-1225. <https://doi.org/10.1002/cplu.201300193>
81. Shen, K., Zhang, L., Chen, X., Liu, L., Zhang, D., Han, Y., Chen, J., Long, J., Luque, R., Li, Y., & Chen, B. (2018). Ordered macro-microporous metalorganic framework single crystals. *Science*, 359(6372), 206-210. <https://doi.org/10.1126/science.aao3403>
82. Hu, L., Yan, Z., Zhang, J., Peng, X., Mo, X., Wang, A., & Chen, L. (2019). Surfactant aggregates within deep eutectic solvent-assisted synthesis of hierarchical ZIF-8 with tunable porosity and enhanced catalytic activity. *Journal of Materials Science*, 54(16), 11009-11023. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03644-z>
83. Chen, Y., & Tang, S. (2019). Solvothermal synthesis of porous hydrangea-like zeolitic imidazole framework-8 (ZIF-8) crystals. *Journal of Solid State Chemistry*, 85, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.04.034>
84. Troyano, J., Carne-Sanchez, A., Avci, C., Imaz, I., & MasPOCH, D. (2019). Colloidal metal-organic framework particles: The pioneering case of ZIF-8. *Chemical Society Reviews*, 48(23), 5534–5546. <https://doi.org/10.1039/C9CS00472F>
85. Pan, Y., Liu, Y., Zeng, G., Zhao, L., & Lai, Z. Rapid synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanocrystals in an aqueous system. (2011). *Chemical Communications*, 47(7), 2071-2073. <https://doi.org/10.1039/c0cc05002d>
86. Tanaka, S., Kida, K., Okita, M., Ito, Y., & Miyake, Y. (2012). Size-controlled synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) crystals in an aqueous system at room temperature. *Chemistry Letters*, 41(10), 1337-1339. <https://doi.org/10.1246/cl.2012.1337>
87. Yao, J., He, M., Wang, K., Chen, R., Zhong, Z., & Wang, H. (2013). High-yield synthesis of zeolitic imidazolate frameworks from stoichiometric metal and ligand precursor aqueous solutions at room temperature. *Cryst Eng Comm*, 15(18), 3601. <https://doi.org/10.1039/C3CE27093A>

88. He, M., Yao, J., Liu, Q., Wang, K., Chen, F., & Wang, H. (2014). Facile synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 from a concentrated aqueous solution. *Microporous and Mesoporous Materials*, 184, 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.10.003>
89. Seoane, B., Zamaro, J. M., Tellez, C., & Coronas, J. (2012). Sonocrystallization of zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-7, ZIF-8, ZIF-11 and ZIF-20). *Cryst Eng Comm*, 14(9), 3103. <https://doi.org/10.1039/C2CE06382D>
90. Cho, H. Y., Kim, J., Kim, S. N., & Ahn, W. S. (2013). High yield 1-L scale synthesis of ZIF-8 via a sonochemical route. *Microporous and Mesoporous Materials*, 169, 180-184. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.11.012>
91. Suslick, K. S., Hammerton, D. A., & Cline, R. E. (1986). Sonochemical hot spot. *Journal of the American Chemical Society*, 108(18), 5641-5642. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja00278a055>
92. Son, W. J., Kim, J., Kim, J., & Ahn, W. S. (2008). Sonochemical synthesis of MOF-5. *Chemical Communications*, (47), 6336–6338. <https://doi.org/10.1039/b814740j>
93. Schlesinger, M., Schulze, S., Hietschold, M., & Mehring, M. (2010). Evaluation of synthetic methods for microporous metal-organic frameworks exemplified by the competitive formation of [Cu<sub>2</sub>(btc)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>3</sub>]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 132(1-2), 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.02.008>
94. Fernández-Bertrán, J. F., Hernández, M. P., Reguera, E., Yee-Madeira, H., Rodriguez, J., Paneque, A., & Llopiz, J. C. (2006). Characterization of mechanochemically synthesized imidazolates of Ag<sup>+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Hg<sup>2+</sup>: solid state reactivity of cations. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 67(8), 1612-1617. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2006.02.006>
95. Adams, C. J., Colquhoun, H. M., Crawford, P. C., Lusi, M., & Orpen, A. G. (2007). Solid-state interconversions of coordination networks and hydrogen-bonded salts. *Angewandte Chemie International Edition*, 119(7), 1142–1146. <https://doi.org/10.1002/anie.200603593>
96. Beldon, P. J., Fabian, L., Stein, R. S., Thirumurugan, A., Cheetham, A. K., & Friscic, T. (2010). Rapid room-temperature synthesis of zeolitic imidazolate frameworks by using mechanochemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(50), 9640-9643. <https://doi.org/10.1002/anie.201005547>
97. Braga, D., Curzi, M., Johansson, A., Polito, M., Rubini, K., & Grepioni, F. (2006). Simple and quantitative mechanochemical preparation of a porous crystalline material based on a 1D coordination network for uptake of small molecules. *Angewandte Chemie International Edition*, 45(1), 142-146. <https://doi.org/10.1002/anie.200502597>
98. Friscic, T., Reid, D. G., Halasz, I., Stein, R. S., Dinnebier, R. E., & Duer, M. J. (2010). Ion- and liquid-assisted grinding: Improved mechanochemical synthesis of metal-organic frameworks reveals salt inclusion and anion templating. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(4), 712-715. <https://doi.org/10.1002/anie.200906583>
99. Tanaka, S., Kida, K., Nagaoka, T., Ota, T., & Miyake, Y. (2013). Mechanochemical dry conversion of zinc oxide to zeolitic imidazolate framework. *Chemical Communications*, 49(72), 7884-7886. <https://doi.org/10.1039/c3cc43028f>
100. Qiaoling, Zh., Tian, Yu., Rongkang, Y., Xin, G., & Yao, Ch. (2025). ZIF-8 and its derivative adsorbents for heavy metal removal in water: a review. *ACS Omega*, 10, 47790-47801. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c05692>
101. Ahmad, K., Shah, H.-U.-R., Ashfaq, M., Shah, S. S. A., Hussain, E., Naseem, H. A., Parveen, S., & Ayub, A. (2021). Effect of metal atom in zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-8 & 67) for removal of Pb<sup>2+</sup> & Hg<sup>2+</sup> from water. *Food Chem. Toxicol*, 149, 112008. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112008>
102. Li, R., Li, W., Jin, C., He, Q., & Wang, Y. (2020). Fabrication of ZIF-8@TiO<sub>2</sub> micron composite via hydrothermal method with enhanced absorption and photocatalytic activities in tetracycline degradation. *J. Alloys Compd*, 825, 154008. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154008>

103. Nalesso, S., Varlet, G., Bussemaker, M. J., Sear, R. P., Hodnett, M., Monteagudo-Olivan, R., Sebastian, V., Coronas, J., & Lee, J. (2021). Sonocrystallisation of ZIF-8 in water with high excess of ligand: effects of frequency, power and sonication time. *Ultrason. Sonochem*, 76, 105616. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105616>
104. Głowniak, S., Szczeńniak, B., Choma, J., & Jaroniec, M. (2021). Mechanochemistry: toward green synthesis of metal-organic frameworks. *Mater. Today*, 46, 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.01.008>
105. Hong, Y., Liao, W., Yan, Z., Bai, Y., Feng, C., Xu, Z., Xu, D., & Lim, K. (2020). Progress in the research of the toxicity effect mechanisms of heavy metals on freshwater organisms and their water quality criteria in China, *J. Chem.-NY*. <https://doi.org/10.1155/2020/9010348>
106. Baby, J., Raj, J. S., Biby, E. T., Sankarganesh, J., Jeevitha, M. V, Ajisha, S. U. & Rajan, S. S. (2010). Toxic effect of heavy metals on aquatic environment. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 4(4), 939-952. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i4.62976>
107. Gaetke, L. M., & Chow, C. K. (2003). Copper toxicity, oxidative stress, and antioxidant nutrients. *Toxicology*, 189, 147-163. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(03\)00159-8](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(03)00159-8)
108. Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6, 4691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
109. Zeitoun, M. M., & Mehana, E. E. (2014). Impact of water pollution with heavy metals on fish health: overview and updates. *Global Veterinaria*, 12, 219-231. <https://doi.org/10.5829/idosi.gv.2014.12.02.82219>
110. Li, Z., Wang, L., Qin, L., Lai, C., Wang, Z., Zhou, M., Xiao, L., Liu, S., & Zhang, M. (2021). Recent advances in the application of water-stable metal-organic frameworks: adsorption and photocatalytic reduction of heavy metal in water. *Chemosphere*, 285, 131432. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131432>
111. Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *J. Environ. Manage*, 92, 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
112. Arbabi, M. N., & Golshani, N. (2016). Removal of copper ions Cu(II) from industrial wastewater: a review of removal methods. *Int. J. Epidemiol. Res*, 3, 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026>
113. Azimi, A., Azari, A., Rezakazemi, M., & Ansarpour, M. (2017). Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *Chem Bio Eng Rev*, 37-59. <https://doi.org/10.1002/cben.201600010>
114. Qasem, N. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *Clean Water*, 4, 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
115. Ahmed H. Algureiri Yossor Abdulmajeed (2016). Removal of heavy metals from industrial wastewater by using ro membrane. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 17(4), 125-136. <https://doi.org/10.31699/IJCPE.2016.4.12>
116. Lei, C., Gao, J., Ren, W., Xie, Y., Abdalkarim, S. Y. H., Wang, S., Ni, Q., & Yao, J. (2019). Fabrication of metal-organic frameworks@ cellulose aerogels composite materials for removal of heavy metal ions in water. *Carbohydr. Polym*, 205, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.029>
117. Aklil, A., Mouflih, M., & Sebti, S. (2004). Removal of heavy metal ions from water by using calcined phosphate as a new adsorbent. *J. Hazard. Mater*, 112, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.05.018>
118. Orolínova, Z., Mockovčiakov, A., & Škvarla, J. (2010). Sorption of cadmium(II) from aqueous solution by magnetic clay composite. *Desalin Water Treat*, 24, 284-292. <https://doi.org/10.13189/eee.2013.010206>
118. Naat, J. N., Neolaka, Y. A., Lapailaka, T., Tj, R. T., Sabarudin, A., Darmokoesoemo, H., & Kusuma, H. S. (2021). Adsorption of Cu(II) and Pb(II) using silica@ mercapto (hs@m)

- hybrid adsorbent synthesized from silica of Takari sand: optimization of parameters and kinetics. *Rasayan J. Chem*, 14, 550-560. <https://doi.org/10.31788/RJC.2021.1415803>
120. Mo, Z., Tai, D., Zhang, H., & Shahab, A. (2022). A comprehensive review on the adsorption of heavy metals by zeolite imidazole framework (ZIF-8) based nanocomposite in water. *Chem. Eng. J*, 136320. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136320>
121. Qu, H., Huang, L., Han, Z., Wang, Y., Zhang, Z., Wang, Y., Chang, Q., Wei, N., Kipper, M. J., & Tang, J. (2021). A review of graphene-oxide/metal-organic framework composites materials: characteristics, preparation and applications. *J. Porous Mat*, 28, 1837-1865. <https://doi.org/10.1007/s10934-021-01125-w>
122. Wang, Q., Sun, Y., Li, S., Zhang, P., & Yao, Q. (2020). Synthesis and modification of ZIF-8 and its application in drug delivery and tumor therapy. *RSC Adv*, 10, 37600-37620. <https://doi.org/10.1039/D0RA07950B>
123. Yang, H., Wang, N., Wang, L., Liu, H., An, Q., & Ji, S. (2018). Vacuum-assisted assembly of ZIF-8@GO composite membranes on ceramic tube with enhanced organic solvent nanofiltration performance. *J. Membrane Sci.*, 545, 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.09.074>
124. Li, D., & Xu, F. (2021). Removal of Cu (II) from aqueous solutions using ZIF-8@GO composites. *J. Solid State Chem.*, 302, 122406. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122406>
125. Chen, B., Wan, C., Kang, X., Chen, M., Zhang, C., Bai, Y., & Dong, L. (2019). Enhanced CO<sub>2</sub> separation of mixed matrix membranes with ZIF-8@GO composites as fillers: effect of reaction time of ZIF-8@GO. *Sep. Purif. Technol.*, 223, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.063>

## Synthesis of metal-organic framework (ZIF-8) and application in wastewater treatment: review

Nazgul Dalabayeva, George Kostakis, Nurbanu Sarova, Gulyia Sdikova, Zhanar Korganbayeva, Turar Akylbekova

**Abstract:** Environmental pollution with heavy metal ions is increasing year after year due to the rapid growth of industry and agriculture. Heavy metals are a major concern due to their extreme toxicity to humans and their detrimental impact on the environment and ecosystems. The effective removal of heavy metal ions from wastewater is a critical necessity, driven by strict environmental regulations and the potential for resource recovery (metal value) in industrial contexts.

The development of advanced materials is key to overcoming the limitations (such as sludge generation, low efficiency at low concentrations, and high cost) of traditional heavy metal removal methods like chemical precipitation. Metal-Organic Frameworks (MOFs) have emerged as a paradigm-shifting class of materials for the adsorption of heavy metal ions from wastewater. Their unique structural and chemical properties directly address the limitations of traditional adsorbents. This article presents various methods for the synthesis of the zeolite framework of imidazole-8 (ZIF-8), consisting of one type of MOF material - from atoms of metallic zinc and 2-methylimidazole, as well as their characteristics. It is also believed that (ZIF-8) is a well-known wastewater treatment material with high adsorption capacity and unique properties for photocatalytic materials. In addition, recent advances in the use, synthesis and other applications of MOF for the effective removal of heavy metals from water were discussed.

**Keywords:** metal-organic frameworks (MOF); ZIF-8; heavy metal removal; water purification; pollution.

## **Синтез металлоорганического каркаса (ZIF-8) и применение для очистки сточных вод: обзор**

**Назгуль Далабаева, George Kostakis, Нурбану Сарова, Гулия Сдикова, Жанар Корманбаева, Турар Акылбекова**

**Аннотация.** В связи с интенсивным ростом промышленности и сельского хозяйства из года в год усиливается загрязнение окружающей среды ионами тяжелых металлов. Тяжелые металлы чрезвычайно опасны для человека и оказывают пагубное воздействие на окружающую среду и экосистемы. Удаление ионов тяжелых металлов из сточных вод является неотложной задачей, требующей значительного внимания как с экологической, так и с коммерческой точки зрения. Для решения таких проблем, как повышение экономической эффективности, масштабируемость, удаление нескольких металлов, возможность повторного использования и т. д., разрабатываются передовые материалы, которые призваны заменить традиционные методы очистки воды или внедрить современные технологии. Для решения этих проблем особое значение имеют металлоорганические каркасы (MOF), являющиеся новым типом трехмерных органическо-неорганических гибридов, особенно в области адсорбции. В данной статье представлены различные методы синтеза цеолитового каркаса имидазола-8 (ZIF-8), состоящего из одного вида материала MOF - из атомов металлического цинка и 2-метилимидазола, а также их характеристики. Также считается, что (ZIF-8) является хорошо известным материалом для очистки сточных вод, обладающим высокой адсорбционной способностью и уникальными свойствами для фотокаталитических материалов. Кроме того, были обсуждены последние достижения в области использования, синтеза и другие применения MOF для эффективного удаления тяжелых металлов из воды.

**Ключевые слова:** металлоорганические каркасы (MOF); ZIF-8; удаление тяжелых металлов; очистка воды, загрязнение.