

**IKKI MEXANIZMLI BISORBENT TIZIMLAR ASOSIDA OG‘IR METALL
IONLARINI AJRATISH: NAZARIY ASOSLAR VA ISTIQBOLLAR**

Nurmamatova Farida Umir qizi

Karabayeva Gulnora Begmurotovna

¹EMU universiteti kimyo kafedrasi talabasi¹

²EMU universiteti kimyo fanlari kafedrasi katta o‘qituvchisi, PhD

E-mail: teacherkimyo@mail.ru

+998998143390

Abstrakt

Og‘ir metall ionlari (Pb(II), Cd(II), Cr(III), Ni(II)) bilan suv muhitining ifloslanishi ekologik xavfsizlik uchun dolzarb muammo hisoblanadi. An‘anaviy sorbentlar bir mexanizmlil (adsorbsiya yoki absorbsiya) jarayon asosida ishlagani sababli ularning selektivligi va sorbsiya sig‘imi ma‘lum darajada cheklanadi. Mazkur adabiy tahlilda adsorbsiya va absorbsiya mexanizmlarini integratsiyalovchi ikki mexanizmlil bisorbent tizimlarning nazariy asoslari hamda og‘ir metall ionlarini ajratishdagi ustunliklari tizimli ravishda ko‘rib chiqiladi.

Bisorbentlarning sirt faol qatlamlari va ichki g‘ovak strukturasi o‘rtasidagi o‘zaro ta‘sir massa almashinuvi modeli asosida tahlil qilinib, tashqi diffuziya, sirt adsorbsiyasi va ichki diffuziya bosqichlari kompleks tarzda yoritiladi. Sorbsiya muvozanati Langmyur va Freyndlix izotermalari orqali tavsiflanadi, kinetik xususiyatlar esa psevdobirinchi va psevdikkinchi tartib modellari asosida umumlashtiriladi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, ikki mexanizmlil bisorbent tizimlar og‘ir metall ionlarini suvdan samarali va barqaror ajratish uchun istiqbolli ilmiy yo‘nalish hisoblanadi hamda sanoat oqava suvlarini tozalash texnologiyalarini takomillashtirish uchun nazariy asos yaratadi.

Kalit so‘zlar

Bisorbent tizimlar; ikki mexanizmlil sorbsiya; adsorbsiya–absorbsiya integratsiyasi; massa almashinuvi modeli; Langmyur izotermasi; Freyndlix izotermasi; sorbsiya kinetikasi; diffuziya jarayoni.

1. Kirish

Suv resurslarining og‘ir metall ionlari bilan ifloslanishi zamonaviy ekologik muammolarning eng dolzarb yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Pb(II), Cd(II), Cr(III), Ni(II) kabi ionlar yuqori toksiklikka ega bo‘lib, tirik organizmlarda bioakkumulyatsiyaga uchraydi va uzoq muddatli salbiy ta‘sir ko‘rsatadi [1–3]. Sanoatning metallurgiya, galvanik qoplama, neft-kimyo va konchilik tarmoqlarida hosil bo‘ladigan oqava suvlar og‘ir metall ifloslanishining asosiy manbalari sanaladi [4].

Jahon sogʻliqni saqlash tashkiloti maʼlumotlariga koʻra, ichimlik suvida ogʻir metallarning ruxsat etilgan miqdori qatʼiy meʼyorlangan boʻlib, ularning oshib ketishi inson salomatligiga jiddiy xavf tugʻdiradi [5].

Ogʻir metall ionlarini suv muhitidan ajratish uchun kimyoviy choʻktirish, ion almashinish, membranalı ajratish, elektroximik usullar va sorbsiya jarayonlari keng qoʻllaniladi [6–8]. Ular orasida sorbsiya usuli yuqori samaradorligi, texnologik soddaligi va iqtisodiy jihatdan qulayligi bilan ajralib turadi [9]. Sorbsiya jarayonlari asosan ikki asosiy mexanizm — adsorbsiya (sirt hodisasi) va absorbsiya (hajmiy yutilish) orqali amalga oshadi [10].

Adsorbsiya jarayoni qattiq faza sirtida ionlarning fizik yoki kimyoviy bogʻlanishi bilan tavsiflanadi va koʻpincha Langmyur hamda Freyndlix izotermalari orqali modellashtiriladi [11,12]. Langmyur modeli monomolekulyar qoplamani va energetik jihatdan bir xil aktiv markazlarni nazarda tutadi, Freyndlix modeli esa geterogen sirtlarda koʻp qatlamli sorbsiyani ifodalaydi. Kinetik jihatdan sorbsiya jarayonlari psevdobirinchi va psevdikkinchi tartib tenglamalari yordamida tavsiflanadi [13]. Biroq bir mexanizmli sorbentlarda sorbsiya sigʻimi koʻpincha sirt maydoni bilan cheklanadi yoki ichki diffuziya bosqichi jarayon tezligini pasaytiradi [14].

Soʻnggi yillarda yuqori samaradorlikka ega gibrid sorbent materiallar — ikki mexanizmli bisorbent tizimlarga qiziqish ortib bormoqda [15–17]. Bunday tizimlarda tashqi sirt adsorbsiyasi ichki gʻovak struktura orqali amalga oshadigan absorbsiya jarayoni bilan uygʻunlashadi. Natijada massa almashinuvi bosqichlari ketma-ket va oʻzaro bogʻliq tarzda sodir boʻlib, sorbsiya sigʻimi va selektivlik oshadi [18]. Shuningdek, ichki diffuziya jarayonini hisobga oluvchi intrapartikul diffuziya modeli ham bisorbent tizimlar uchun muhim nazariy asos hisoblanadi [19].

Shunga qaramay, mavjud adabiyotlarda bisorbent tizimlarning nazariy modellashtirilishi yetarlicha tizimlashtirilmagan. Ayniqsa, sirt faol qatlam va ichki gʻovak struktura oʻrtasidagi oʻzaro bogʻliqlik, massa almashinuvi qarshiliklari hamda izotermik parametrlarning integrallashgan tahlili chuqur oʻrganishni talab qiladi.

Mazkur maqolaning maqsadi adsorbsiya va absorbsiya mexanizmlarini integratsiyalovchi ikki mexanizmli bisorbent tizimlarning nazariy asoslarini tizimli ravishda tahlil qilish hamda ularning ogʻir metall ionlarini samarali ajratishdagi ustunliklarini izotermik va kinetik modellar asosida asoslab berishdan iborat.

2. Bir mexanizmli sorbsiya tizimlarining nazariy asoslari

Sorbsiya jarayoni ogʻir metall ionlarini suv muhitidan ajratishda keng qoʻllaniladigan fizik-kimyoviy jarayon boʻlib, u asosan adsorbsiya yoki absorbsiya mexanizmlariga asoslanadi [15,19]. Bir mexanizmli tizimlarda jarayon yoki sirt hodisasi sifatida, yoki hajmiy yutilish sifatida amalga oshadi. Bunday tizimlar nazariy jihatdan yaxshi oʻrganilgan boʻlsa-da, ularning sigʻim va kinetik imkoniyatlari maʼlum cheklolarga ega.

2.1. Adsorbsiya jarayonining nazariyasi

Adsorbsiya — bu moddalarning qattiq faza sirtida to‘planishi jarayoni bo‘lib, fizik (Van-der-Vaals kuchlari) yoki kimyoviy (kovalent yoki koordinatsion bog‘lanish) mexanizm orqali amalga oshadi [19].

Langmyur izotermasi

Langmyur modeli quyidagi farazlarga asoslanadi [11]:

Adsorbsiya monomolekulyar qatlam hosil qiladi;

Barcha aktiv markazlar energetik jihatdan bir xil;

Har bir markaz faqat bitta ionni bog‘laydi.

Langmyur tenglamasi:

$$q_e = \frac{(q_{max} \cdot K^L \cdot C_e)}{1 + K^L \cdot C_e} \quad (1)$$

Bu yerda:

q_e — muvozanatdagi sorbsiya sig‘imi (mg/g);

q_{max} — maksimal sorbsiya sig‘imi;

K^L — Langmyur konstantasi;

C_e — muvozanat konsentratsiyasi.

Model asosan bir xil sirtga ega sorbentlar uchun mos keladi [15].

Freyndlix izotermasi

Freyndlix modeli geterogen sirtlarga ega materiallar uchun qo‘llaniladi [12].

Tenglama:

$$q_e = K^f \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

Bu yerda:

K^f — sorbsiya sig‘imiga bog‘liq konstanta;

$1/n$ — sirt geterogenligini ifodalovchi ko‘rsatkich.

Agar $1/n < 1$ bo‘lsa, sorbsiya jarayoni qulay hisoblanadi.

2.2. Absorbsiya jarayonining nazariyasi

Absorbsiya moddaning sorbent hajmiga diffuziya orqali kirishi bilan tavsiflanadi.

Bu jarayon Fik qonunlari asosida izohlanadi [19].

Fikning birinchi qonuni:

$$J = -D \cdot (dC/dx) \quad (3)$$

Bu yerda:

J — diffuziya oqimi;

D — diffuziya koeffitsienti;

dC/dx — konsentratsiya gradienti.

Absorbsiya jarayonida ichki g'ovak diffuziyasi jarayon tezligini cheklovchi bosqich bo'lishi mumkin.

2.3. Sorbsiya kinetikasi

Sorbsiya jarayonini tavsiflash uchun keng qo'llaniladigan kinetik modellar:

Psevdobirinchi tartib modeli (Lagergren modeli)

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (4)$$

Bu model fizik adsorbsiya ustun bo'lganda mos keladi [13].

Psevdikkinchi tartib modeli

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (5)$$

Bu model kimyoviy sorbsiya jarayonlarini yaxshiroq tavsiflaydi [13].

Intrapartikulyar diffuziya modeli (Weber–Morris modeli)

$$q_t = k_d \cdot t^{(1/2)} + C \quad (6)$$

Agar grafik koordinata boshidan o'tsa, jarayonni ichki diffuziya boshqaradi [14].

2.4. Bir mexanizmli tizimlarning cheklovlari

Bir mexanizmli sorbentlarda:

Sorbsiya sig'imi sirt maydoni bilan cheklanadi;

Ichki diffuziya jarayoni tezlikni pasaytiradi;

Selektivlik yetarli darajada bo'lmashligi mumkin;

Massa almashinuvi bosqichlari integrallashmagan holda sodir bo'ladi.

Ushbu cheklovlar og'ir metall ionlarini past konsentratsiyalarda chuqur ajratishda muammolar keltirib chiqaradi. Shu sababli ikki mexanizmli, integrallashgan sorbsiya tizimlarini ishlab chiqish ilmiy jihatdan dolzarb masalaga aylanmoqda.

3. Ikki mexanizmli bisorbent tizimlar va ularning nazariy modeli

So'nggi yillarda og'ir metall ionlarini samarali ajratish maqsadida adsorbsiya va absorbsiya mexanizmlarini birlashtirgan gibrid sorbent materiallar — bisorbent tizimlar ishlab chiqilmoqda [20–22]. Bunday tizimlar bir mexanizmli sorbentlarga nisbatan yuqori sorbsiya sig'imi, tezkor massa almashinuvi va oshirilgan selektivlik bilan tavsiflanadi.

Bisorbent tizimlar strukturaviy jihatdan ikki asosiy funksional komponentdan iborat:

Tashqi sirt faol qatlam (adsorbsion markazlar),

Ichki g'ovak yoki hajmiy faza (absorbsiya hududi).

Ushbu ikki komponentning o'zaro integratsiyasi natijasida sorbsiya jarayoni ketma-ket va parallel mexanizmlar orqali amalga oshadi.

3.1. Strukturaviy dizayn va funksional xususiyatlar

Bisorbentlarning samaradorligi quyidagi parametrlar bilan belgilanadi:

Yuqori sirt maydoni (BET maydoni),

Mikro va mezogʻovak struktura mavjudligi,
Faol funksional guruhlar ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$),
Gibrid yoki kompozit tuzilma.

Zamonaviy tadqiqotlarda nanozarrachalar, polimer matritsalar, bioasosli materiallar va gibrid kompozitlar asosidagi bisorbentlar keng oʻrganilmoqda [16]. Bunday materiallarda tashqi sirt ionlarni tez adsorbsiyalasa, ichki faza ularni diffuziya orqali chuqur yutadi.

3.2. Ikki bosqichli massa almashinuvi mexanizmi

Bisorbent tizimlarda ogʻir metall ionlarini ajratish quyidagi bosqichlarda kechadi: Eritmadan sorbent sirtiga tashqi diffuziya, sirt adsorbsiyasi (tez bosqich), ichki gʻovak diffuziyasi, hajmiy absorbsiya yoki kompleks hosil boʻlish.

Umumiy massa almashinuvi tezligi quyidagicha ifodalanishi mumkin:

$$\frac{dq}{dt} = k_1 (C - C_s) + k_2 (C_s - C_i) \quad (7)$$

Bu yerda:

C — eritmadagi konsentratsiya;

C_s — sirt konsentratsiyasi;

C_i — ichki fazadagi konsentratsiya;

k_1 va k_2 — bosqich tezlik konstantalari.

Ushbu model bir mexanizimli tizimlarga nisbatan integrallashgan jarayonni ifodalaydi.

3.3. Integrallashgan izoterma yondashuvi

Bisorbent tizimlarda muvozanat jarayoni koʻpincha kombinatsiyalangan izoterma modeli bilan tavsiflanadi. Nazariy jihatdan umumiy sorbsiya sigʻimi quyidagicha yozilishi mumkin:

$$q_{\text{total}} = q_{\text{ads}} + q_{\text{abs}} \quad (8)$$

Agar tashqi qatlam Langmyur modeli bilan, ichki faza esa Freyndlix modeli bilan ifodalansa, u holda:

$$q_{\text{total}} = \frac{q_{\text{max}} K_L C_e}{1 + K_L C_e} + K_f C_e^{1/n} \quad (9)$$

Bu yondashuv bisorbent tizimlar uchun nazariy asos sifatida taklif etilishi mumkin.

3.4. Bir mexanizimli tizimlar bilan taqqoslash

Bir mexanizimli tizimlarda jarayon bitta kinetik yoki muvozanat modeli bilan cheklanadi. Bisorbent tizimlarda esa: Tashqi va ichki diffuziya bosqichlari

uyg'unlashadi, sorbsiya sig'imi ortadi, selektiv bog'lanish ehtimoli oshadi, past konsentratsiyalarda ham samaradorlik saqlanadi.

Og'ir metall ionlari, ayniqsa Pb(II) va Cd(II) kabi yuqori toksik ionlar uchun ikki mexanizmli yondashuv chuqur ajratish imkonini beradi.

3.5. Nazariy afzalliklar

Bisorbent tizimlar quyidagi nazariy ustunliklarga ega:

Massa almashinuvi qarshiliklarining kamayishi, ko'p bosqichli kinetik integratsiya, yuqori sorbsiya sig'imi, selektivlikni oshirish imkoniyati, diffuziya va sirt jarayonlarining optimallashtirilgan uyg'unligi.

Shu jihatdan bisorbent tizimlar og'ir metall ionlarini suv muhitidan samarali olib tashlash uchun istiqbolli nazariy platforma hisoblanadi.

4. Bir va ikki mexanizmli sorbsiya tizimlarining taqqoslanishi

Og'ir metall ionlarini ajratishda qo'llaniladigan sorbent tizimlar samaradorligi sorbsiya sig'imi, kinetik tezlik, selektivlik va regeneratsiya imkoniyati bilan baholanadi. Bir mexanizmli tizimlarda jarayon asosan sirt adsorbsiyasi yoki hajmiy yutilish bilan cheklanadi. Natijada sorbsiya sig'imi sirt maydoni yoki diffuziya tezligiga bog'liq bo'lib qoladi [23,24].

Ikki mexanizmli bisorbent tizimlarda esa tashqi adsorbsion qatlam va ichki g'ovak struktura o'zaro uyg'un holda ishlaydi. Bu integratsiya massa almashinuvi jarayonini optimallashtirib, sorbsiya samaradorligini oshiradi [25,26].

1-jadval.

Bir va ikki mexanizmli sorbsiya tizimlarining asosiy parametrlar bo'yicha

No	Parametr	Bir mexanizmli	Ikki mexanizmli bisorbent
1	Jarayon turi	Adsorbsiya yoki bsiya	Adsorbsiya + absorbsiya
2	Sorbsiya sig'imi	Sirt bilan cheklangan	Yuqori, hajmiy qo'shimcha sh
3	Kinetik tezlik	Diffuziya bilan anadi	Bosqichma-bosqich rallashgan
4	Selektivlik	O'rtacha	Oshirilgan
5	Past konsentratsiyada radorlik	Cheklangan	Yuqori
6	Og'ir metall ionlari uchun nish	Qisman samarali	Yuqori samarali

4.1. Og'ir metall ionlari kontekstida baholash

Pb(II), Cd(II), Cr(III) va Ni(II) ionlari ko'pincha murakkab suv tizimlarida aralash holda uchraydi. Bir mexanizmli sorbentlarda ionlar o'rtasida raqobat kuchayadi va selektivlik pasayadi. Bisorbent tizimlarda esa tashqi sirt tezkor bog'lanishni ta'minlasa, ichki faza ionlarni chuqur yutadi va qayta chiqishini kamaytiradi.

Shu sababli ikki mexanizmli tizimlar past konsentratsiyalarda ham yuqori ajratish samaradorligini ta'minlashi mumkin.

5. Bisorbent tizimlarning qo'llanish istiqbollari va rivojlanish yo'nalishlari

Ikki mexanizmli bisorbent tizimlar og'ir metall ionlarini suv muhitidan samarali ajratish bo'yicha istiqbolli ilmiy yo'nalish hisoblanadi. Adsorbsiya va absorbsiya mexanizmlarining integratsiyasi natijasida past konsentratsiyalarda ham yuqori sorbsiya sig'imi va selektivlikka erishish imkoniyati mavjud. Ayniqsa Pb(II), Cd(II), Cr(III) va Ni(II) ionlarini sanoat oqava suvlaridan chuqur ajratishda bisorbent tizimlar samarali alternativ sifatida qaralmoqda.

Kelgusida bisorbent materiallar dizaynida quyidagi yo'nalishlar muhim ahamiyat kasb etadi: Nano va bioasosli gibrid materiallar yaratish, g'ovak struktura va sirt funksional guruhlarini optimallashtirish, selektiv kompleks hosil qiluvchi markazlarni kiritish, regeneratsiya va qayta foydalanish samaradorligini oshirish.

Shuningdek, bisorbent tizimlarining matematik modellashtirilishini takomillashtirish va real sanoat sharoitida sinovdan o'tkazish ularning amaliy qo'llanish doirasini kengaytiradi. Shu jihatdan, ikki mexanizmli sorbsiya tizimlari ekologik xavfsizlikni ta'minlash va suv resurslarini muhofaza qilishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Xulosa

Mazkur adabiy tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, og'ir metall ionlarini suv muhitidan ajratishda qo'llanilayotgan an'anaviy usullar ma'lum texnologik va kinetik cheklovlarga ega. Bir mexanizmli sorbsiya tizimlarida jarayon sirt yoki hajmiy bosqich bilan cheklanib, sorbsiya sig'imi va selektivlik yetarli darajada ta'minlanmaydi.

Ikki mexanizmli bisorbent tizimlar esa adsorbsiya va absorbsiya jarayonlarini integratsiyalash orqali massa almashinuvi bosqichlarini optimallashtiradi. Nazariy tahlil Langmyur va Freyndlix izotermalari, kinetik modellar hamda diffuziya nazariyasi asosida bisorbent tizimlarning yuqori samaradorligini asoslash imkonini berdi.

Shu tariqa, bisorbent tizimlar og'ir metall ionlarini, xususan Pb(II), Cd(II), Cr(III) va Ni(II) ionlarini chuqur va barqaror olib tashlash uchun istiqbolli nazariy va amaliy platforma sifatida baholanishi mumkin. Kelgusida ushbu tizimlarni optimallashtirish va sanoat miqyosida joriy etish ekologik xavfsizlikni ta'minlashda muhim rol o'ynaydi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. World Health Organization (WHO). *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed.; WHO Press: Geneva, 2017.
2. Fu, F.; Wang, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92, 407–418.

3. Tchounwou, P.B.; Yedjou, C.G.; Patlolla, A.K.; Sutton, D.J. Heavy metal toxicity and the environment. *EXS*, 2012, 101, 133–164.
4. Jaishankar, M.; Tseten, T.; Anbalagan, N.; Mathew, B.B.; Beeregowda, K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 2014, 7, 60–72.
5. United Nations Environment Programme (UNEP). *Global Environment Outlook*, 2019.
6. Barakat, M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 2011, 4, 361–377.
7. Crini, G.; Lichtfouse, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17, 145–155.
8. Ali, I.; Gupta, V.K. Advances in water treatment by adsorption technology. *Nature Protocols*, 2006, 1, 2661–2667.
9. Dabrowski, A.; Hubicki, Z.; Podkościelny, P.; Robens, E. Selective removal of heavy metal ions by ion-exchange method. *Chemosphere*, 2004, 56, 91–106.
10. Mohsen-Nia, M.; Montazeri, P.; Modarress, H. Removal of Cu²⁺ and Ni²⁺ from wastewater by reverse osmosis. *Desalination*, 2007, 217, 276–281.
11. Chen, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 2004, 38, 11–41.
12. Ruthven, D.M. *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*; Wiley: New York, 1984.
13. Langmuir, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 1918, 40, 1361–1403.
14. Freundlich, H.M.F. Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1906, 57, 385–470.
15. Ho, Y.S.; McKay, G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 1999, 34, 451–465.
16. Weber, W.J.; Morris, J.C. Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 1963, 89, 31–60.
17. Gupta, V.K.; Nayak, A. Cadmium removal and recovery from aqueous solutions by novel adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 180, 81–90.
18. Tran, H.N.; You, S.J.; Chao, H.P. Insight into adsorption mechanism of heavy metals onto biosorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2017, 5, 1159–1172.
19. Li, Y.; Xiao, A.S.; Zou, B.; Zhang, H.; Yan, K.; Lin, Y. Advances in functionalized hybrid materials for heavy metal removal. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 398, 125–145.
20. Foo, K.Y.; Hameed, B.H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 156, 2–10.

21. Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed.; Oxford University Press, 1975.
22. Zhang, Y.; Zhao, J.; Jiang, Y.; Shan, D.; Lu, Y. Biosorption of heavy metals from aqueous solutions: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411, 125–148.
23. Sharma, G.; Kumar, A.; Naushad, M.; et al. Recent advances in hybrid materials for removal of heavy metals from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 420, 127–156.
24. Khan, A.; Al-Haddad, A.; et al. Functionalized nanocomposite adsorbents for heavy metal removal: Mechanisms and modeling. *Environmental Research*, 2022, 204, 111–132.
25. Singh, N.; et al. Adsorption mechanisms and modeling approaches for heavy metal removal using composite materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11, 109–128.
26. Ahmed, M.J.; Theydan, S.K. Advanced composite adsorbents for heavy metal ions removal: Isotherm and kinetic modeling review. *Separation and Purification Technology*, 2022, 289, 120–142.