

Original Research Paper

ABERLİTE TIPLİ SORBENT İLƏ AĞIR ƏLVAN METAL İONLARININ SORBSİYASI

Mahnur Cəfərli^{1,2}

<https://orcid.org/0009-0000-6894-0136>

¹Naxçıvan Dövlət Universiteti, Naxçıvan, Azərbaycan

²Təbii Ehtiyatlar İnstitutu, Naxçıvan, Azərbaycan

Article history

Received: 01.10.2026

Revised: 08.10.2026

Accepted: 19.10.2026

*Corresponding Author: Mahnur Cəfərli, Naxçıvan Dövlət Universiteti, Naxçıvan, Azərbaycan
Email: mahnurceferli@ndu.edu.az

Xülasə

Məqalədə Amberlite IR-120 tipli ionmübadilə sorbentinin ağır əlvən metal ionlarının, xüsusilə Cu^{2+} (mis) və Pb^{2+} (qurğuşun) ionlarının sulu məhlullardan çıxarılmasında effektivliyi, sorbsiya mexanizmi, kinetikasi və termodinamik xüsusiyyətləri tədqiq edilmişdir. Təcrübələr ionit-məhlul nisbəti 1:100 olan statik şəraitdə, pH 5,5–7,5 intervalında və 25–55°C temperatur aralığında aparılmışdır. Metal ionlarının qalığ konsentrasiyaları kompleksometrik və atom-absorbsion spektrometrik üsullarla müəyyən edilmişdir. Tədqiqat nəticələrinə əsasən, Amberlite IR-120 qatranı metal ionlarını əsasən ion mübadiləsi və qatranın funksional qrupları ilə qarşılıqlı təsir vasitəsilə udur. Sorbsiya prosesinin maksimum effektivliyi pH 6,5–7,0 intervalında müşahidə edilmişdir. Mis ionlarının məhluldan çıxarılma dərəcəsi 90%-ə, qurğuşun ionlarının isə 92%-ə çatmışdır. Bu göstəricilər sorbentin xüsusilə qurğuşun ionlarına qarşı yüksək sorbsiya qabiliyyətinə malik olduğunu göstərir. Sorbsiya izotermələrinin təhlili prosesin təsvirində Langmuir və Freundlich modellərinin tətbiqinin mümkünlüyünü göstərmişdir. Langmuir modelində korrelyasiya əmsalının $R^2=0,97-0,98$ olması təcrübə nəticələrlə model arasında yüksək uyğunluğun olduğunu təsdiqləyir. Kinetik tədqiqatlar sorbsiya tarazlığının təxminən 2,5–3 saat ərzində yarandığını və prosesin sürətinə əsasən daxili diffuziyanın təsir göstərdiyini ortaya qoymuşdur. Termodinamik nəticələr sorbsiya prosesinin ekzotermik xarakter daşdığını göstərir. Temperaturun 25°C-dən 55°C-yə yüksəldilməsi sorbsiya sürətini təxminən 1,5–2,5 dəfə artırmışdır. Beləliklə, Amberlite IR-120 sorbentinin metal ionlarının məhlullardan çıxarılması və suyun təmizlənməsi proseslərində tətbiqi üçün perspektivli ionmübadilə materialı olduğu müəyyən edilmişdir.

Açar sözlər: Amberlite IR-120, sorbsiya, mis və qurğuşun ionları, ion mübadiləsi, sorbsiya kinetikasi, termodinamika, suyun təmizlənməsi

GİRİŞ

Zəhərli metallar ilə ətraf mühitin çirklənməsi hərbi, sənaye və kənd təsərrüfatı prosesləri və tullantıların xaric edilməsi vasitəsilə global şəkildə baş verir [2]. Ətrafa buraxılan və ya nəql edilən metallar transformasiya uğrayaraq ətraf mühitə, ictimai sağlamlığa və iqtisadiyyata təsir edə bilər.

Yüksək qatılıqlarda ağır metalların çıxarılması üçün istifadə edilən metodlar arasında, çöküntü-filtrasiya, ion mübadiləsi və s. nəzərdə tutulmalıdır [3; 8; 9;10].

Təqdim edilən araşdırmanın məqsədi Amberlite İR-120 kationitlə Cu^{2+} və Pb^{2+} ionlarının sorbsiyasını öyrənməklə texnoloji tələblərə cavab verən kationit təklif etmək və prosesləri xarakterizə edən parametrləri hesablamaqdır [4-6].

EKSPERİMENTAL HİSSƏ

Təcrübələr ionit-məhlul nisbəti 1:100 olan statik şəraitdə və pH 5,5 ilə 7,5 aralığında aparılmışdı. Sorbsiya prosesindən sonra məhlulda metal ionlarının qalan konsentrasiyası (Cu^{2+} və Pb^{2+}) kompleksometrik üsullarla ölçülmüşdü. Hər bir metal üçün xüsusi göstəricilərdən istifadə edilmişdir: mis üçün piredil-azo-naftalin-PAN, sink və kadmium üçün erioxrom qara T, qurğuşun üçün ksilenol narıncı [7; 11]. Tarazlıq məhlullarında tədqiq edilmiş ionların qalıq miqdarı Thermo Scientific iCE 3500 AA ikili atomizatorlu atom absorbsiya spektrometrində ölçülməklə yoxlanılmışdır. pH ölçmələri otaq temperaturunda “Akvilon” pH – 410 ilə aparılmışdır. Proseslərin temperaturdan asılılığı U-10 termostatında tədqiq edilmişdir. Mikrokolorimetrdən istifadə edərək 298 K (otaq temperaturu) şəraitində aparılan eksperimental tədqiqatda entalpiya dəyişiklikləri kolorimetrik üsulla ölçülmüşdü.

Amberlite İR-120 qatranının metal ionları ilə qarşılıqlı təsir mexanizmləri fərqlidir. Məhluldakı metal ionları qatranla qarşılıqlı təsirə girir. Qatranın ionları (məsələn, H^+) məhlulda olan metal ionları (məs, Cu^{2+} və ya Pb^{2+}) ilə əvəz olunur. İonlar qatranın səthinə ya elektrostatik qüvvələrlə, ya da kompleks əmələ gətirməklə bağlanır. Sorbsiyadan sonra metal ionları məhluldan çıxarılır və qatranın üzərində saxlanılır. Məhluldan çıxarılan Me^{2+} ionlarının faizi 1-ci düsturla müəyyən edilir:

$$\text{Removal percentage} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100$$

Bu düsturda ilkin konsentrasiya (C_0) məhlulun əvvəlində nə qədər Me^{2+} ionunun olduğunu, son konsentrasiya (C_t) isə sorbsiya prosesindən sonra nə qədər ionun qaldığını göstərir. Hər iki göstərici mq/l (milliqram/litr) ilə ölçülür.

Adsorbentin tarazlıqda olan adsorbsiya tutumu (q_e) aşağıdakı (2) düsturdan istifadə olunaraq müəyyən edilmişdir:

$$q_e = \frac{C_0 - C_t}{m} \times V \quad (2)$$

Burada q_t — adsorbent tərəfindən tutulan ionların miqdarını ifadə edir, mq/q; V — məhlulun həcmi, l; C_0 və C_t — sorbsiya prosesindən əvvəl və sonra ionların konsentrasiyasını göstərir, mq/l olaraq; m isə ion mübadilə materialının kütləsini bildirir, qramla.



Biz sorbsiya kinetikasını ilkin konsentrasiyası $1,00 \text{ q Me}^{2+} \cdot \text{L}^{-1}$ olan məhlullarla tədqiq etdik. Effektiv diffuziya əmsallarını hesablamaq üçün “məhdud həcm” metodundan istifadə etdik və bu məqsədlə G. Boyd və həmkarları tərəfindən təklif edilmiş düsturdan istifadə olundu. (2):

$$F = \frac{Q_t}{Q_\infty} = \frac{1-6}{\pi^2} \sum \frac{1}{n^2} \cdot \exp(-Bt \cdot n^2)$$

F ion mübadiləsinin sürətini ifadə edir. Burada Q_t müəyyən bir vaxtda (t) sorbsiya olunmuş ionun miqdarı, Q_∞ isə tarazlıqda olan ion miqdarıdır. Bt parametri isə belə tərif olunur (3):

$$Bt = D \pi^2 t / r^2 \quad (3)$$

D diffuziya əmsalını ifadə edir, t vaxtdır və r ionit hissəciyinin radiusudur. Effektiv diffuziya əmsalları aşağıdakı tənlikdən istifadə olunaraq hesablanmışdır (4):

$$D = Bt \cdot r_0^2 / t \cdot \pi^2 \quad (4)$$

r_0 şişmiş ionit hissəciyinin orta radiusunu ifadə edir (santimetrlərlə ölçülür). Diffuziya üçün aktivləşmə enerjisi (E_{akt}) Arrhenius tənliyindən istifadə olunaraq hesablanmışdır. (5):

$$D = D_0 \exp(-E_{akt}/RT) \quad (5)$$

D_0 pre-eksponensial amili, E_{akt} aktivləşmə enerjisini, R universal qaz sabitini, T isə temperaturu ifadə edir. Sorbsiya elementlərinə temperaturun (25°C -dən 55°C -yə qədər) təsirini təhlil etmək üçün U-10 termostatından istifadə olunmuşdur. Aktivləşmə entropiyası (ΔS_0) R.M. Barrer və həmkarları tərəfindən təklif edilən (6) nömrəli tənlikdən istifadə olunaraq hesablanmışdır:

$$D_0 = d^2 (ekT/h) \exp(\Delta S^0/R) \quad (6)$$

Burada: d diffuziya yolu məsafəsini ifadə edir (0.5 nm), k Boltzmann sabiti, h isə Plank sabitidir. Nəhayət, entropiya vurğunu $\lambda^2 \cdot \exp(\Delta S/R)$ S. Glasston tərəfindən təklif olunan üsulla hesablanmışdır (7):

$$D = e \lambda^2 kT / h \cdot \exp(\Delta S^* / R) \cdot \exp(-E_{akt} / RT) \quad (7)$$

NƏTİCƏLƏR VƏ MÜZAKİRƏLƏR

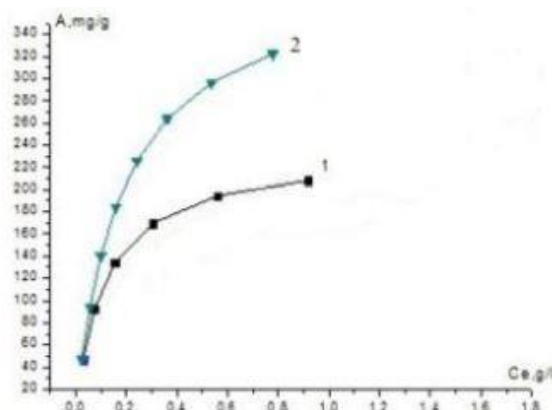
Amberlite İR-120 -SO₃H funksional qruplu ionitdir [1]. İki valentli metal ionları (Me^{2+}), qatranın tərkibindəki H^+ ionlarını əvəz edərək, polimerin azot/oksigen atomları ilə koordinasiya bağları əmələ gətirir. Amberlite IRC748-in sorbsiya tutumu 4.40 mq-ekv/q olaraq göstərilir ki, bu da qatranın hər qramına düşən metal ion mübadiləsinin miqdarını göstərir. Bu, qatranın əsas funksiyasının məhluldakı metal ionlarını ion mübadiləsi və koordinasiya yolu ilə aradan qaldırmaq olduğunu göstərir.

Sorbsiya məlumatları Langmuir tənliyi ilə xətti hala gətirilmişdir (Şəkil 1):



$$1/ST=1/ST_{\max}+1/ST_{\max}\cdot K\cdot 1/C_e$$

Sorbsiya izotermnlərinin konveks hissələri Lenqmyür tənliyindən(7): $A=A_{\max}\cdot K\cdot C_t/1+K\cdot C_t$ istifadə edərək xətti bir formaya keçirilir: $1/A=1/A_{\max} + 1/A_{\max}\cdot K\cdot 1/C_t$ (7). İon kationlarının udulması C_t/A - C_t koordinatlarında ($R^2 = 0.97-0.98$) yüksək korrelyasiya əmsalı ilə xətti olaraq ifadə edilir. Bu, asılılıqdan maksimum udma dəyərini - $A_{\max}$ və dəyişmə sabit K dəyərini etibarlı şəkildə hesablamağa imkan verir. Freundlich tənliyi aşağı konsentrasiya diapazonunda (0.5-1.25 gMe/l) sorbsiya prosesini təsvir etmək üçün istifadə olunur.



Şəkil 1. Amberlite İR-120 ioniti ilə Cu(II) və Pb(II), ionlarının sorbsiya izotermnləri

Dəyişən qatılıqlar metodu ilə qurulmuş bütün izotermnlər ionitlərin konkret iona olan seçiciliyindən asılı olaraq qabarlıqları, təbii ki, həm də seçicilikləri ilə fərqlənir. İzotermnlərin başlanğıc sahələri xətti asılılığa yaxın olmaqla (Henri bölgəsi) udulan ionların miqdarı praktik olaraq metal ionlarının məhluldakı qatılıqlarına mütənasib olur. İzotermnlərdə əyrilərin olmaması udulmanın əsasən funksional qruplar hesabına gerçəkləşdiyini düşünməyə əsas verir. Freyndlix tənliyinə $-x/m = a \cdot C_t^{1/n}$ daxil olan a və n $\lg x/m - \lg C_t$ qrafik asılılığından tapılmışdır. Qrafik asılılıqda ordinat oxundan kəsilən parçanın uzunluğu a -nın, düz xəttin absis oxu ilə əmələ gətirdiyi bucağın tangensi isə n -in qiymətini verir. Göstərilən izotermnlər üçün Freyndlix və Lenqmyür tənliklərinin hesablama formaları aşağıda verilir:

Amberlite İR-120 Cu^{2+} : $A = 126,0(3,96) (4,21 \pm 0,04) \cdot C_e/1 + (4,21 \pm 0,04) \cdot C_e$; $b = 154,88 \cdot C_e^{0,675}$
 Pb^{2+} : $A = 336,70 (3,25) (4,57 \pm 0,03) \cdot C_e/1 + (4,57 \pm 0,03) \cdot C_e$; $b = 537 \cdot C_e^0$

İki element ionunu selektiv sorbsiya üsulu ilə kəmiyyətcə ayırmaq üçün yaxşı və zəif sorbsiya olunan ionların paylama əmsalları belə olmalıdır: $P_{\text{Me1}} > 100-300$, $P_{\text{Me2}} < 3-10$ və ya $P_{\text{Me1}}/P_{\text{Me2}} \geq 10-30$. Burada əsas diqqət paylama əmsalı (P) üzərindədir və bu əmsalın maddələrin müxtəlif ionları sorbsiya qabiliyyətini necə əks etdirdiyidir. Konsentrasiyanın 0.5-1.0 g/l aralığında olduğu zaman, mis ionlarının sulu məhlullardan maksimum çıxarılması 90% təşkil edir. Amberlite IR 120 ilə isə hər iki ion üçün paylanma əmsallarının qiymətləri bir-birinə yaxın olduğundan ayrılma əmsalının da

qiyməti 15-dən yüksək olmur. Paylanma əmsallarına əsaslanaraq ionların selektiv adsorbsiya qabiliyyəti, qarışıq məhlullardakı ionların uğurlu ayrılması üçün çox önəmlidir.

İonların ayrılması yalnız dinamik şəraitdə uğurludur. Çünki dinamik sistemdə ion mübadilə təbəqəsi daim yeni məhlulla təzələnir, doymanın qarşısını alır və effektiv adsorbsiya komponentlərinin davamlı təmin olunmasını təmin edir. Məhlulda birdən çox ionun mövcud olduğu şəraitdə ayrılma effektivliyinin sınaqdan keçirilməsi, qatranın selektivliyi və qarışıq metal ion sistemlərində tutumuna dair əlavə məlumatlar verə bilər.

Amberlite İR-120: $Pb^{2+} > Cu^{2+}$

Maksimal sorbsiya İR-120 Pb^{2+} ionlarının udulmasında müşahidə olunur: 92%. Hər iki ionun Amberlite İR-120 -də maksimal udulması pH 6.5-7 intervalında qeydə alınmışdır.

Bu, qurğuşun üçün nisbətən yüksək ion-mübadilə tutumunu ifadə edir və göstərir ki, qatran litr məhlul başına kifayət qədər qurğuşun ionlarını adsorbsiya edə bilər. Bu tutum su və ya tullantı axınlarından qurğuşunun çıxarılması və ya bərpası üçün vacibdir. Kiçik hissəciklər ionların qatran matriksi daxilinə daha sürətli diffuziyasına imkan verir və bu da müşahidə olunan sürətli kinetik davranışa (tarazlıq 2.5-3 saat) töhfə verir. Nisbətən kiçik hissəcik ölçüsü ion mübadiləsi üçün mövcud olan səth sahəsini artırmaq baxımından önəmlidir, bu isə adsorbsiya səmərəliliyini yaxşılaşdırır. Bu, sənaye və ya ekoloji təbiqlərdə əlaqə vaxtının optimallaşdırılması üçün vacib məlumatdır, çünki qurğuşun ionlarının nisbətən qısa müddətdə effektiv şəkildə adsorbsiya olunduğunu göstərir. İon-mübadilə qatranının hissəcik ölçüsü HITACHI TM 3000 elektron mikroskopu ilə ölçülmüş və hissəcik diametri təxminən 0.05 sm olduğu müəyyən edilmişdir.

Proseslərin kinetikasının öyrənilməsi bütün hallarda sorbsiya tarazlığının 2,5-3 saat ərzində yarandığını göstərir. Sərhədlənmə mərhələsinin təcrübədə təyini üçün sadə və etibarlı “kinetik yaddaş”, başqa sözlə arakəsmə metodundan istifadə edilmişdir. Arakəsmədən sonra bütün hallarda sorbsiya sürətinin ilkin sürətlə müqayisədə artması proseslərin daxili diffuziyanın nəzarətində olduğunu təsdiq edir. Aşağı doyma dərəcələrində $-\lg(1-F)$ -in zamandan asılılığı düz xətlə ifadə edilmir, doymanın yuxarı qiymətlərində isə ($F > 0,5-0,6$) asılılıq düz xətlə ifadə olunur. Doyma dərəcəsi F -in $t^{1/2}$ -dən asılılığının 0,4-0,5 qiymətlərinə qədər koordinat başlanğıcından çıxan düz xətlə ifadə olunması və Bio kriteriyasının mütləq qiymətləri üçün hesablanan kəmiyyətlər ($Bi > 50$) öyrənilən proseslərin daxili diffuziyanın nəzarətində olduğunu təsdiq edir. Nəticələr statistik olaraq standartlaşdırılmış və iki paralel eksperimentdə səhv nisbəti 5%-i keçməyib.

Qeyd olunan aktivləşmə enerjiləri sorbsiya prosesində məhdudlaşdırıcı mərhələnin daxili diffuziya ilə əlaqəli olduğunu göstərir, yəni temperatur bu ionların katyon mübadilə materialına diffuziya sürətinə təsir edir. Sorbsiyanın mənası ionların (məsələn, qurğuşun) bir səthə (bu halda



kationit) udulması və ya adsorbsiya olunması prosesidir. Sorbsiyada aktivləşmə enerjisi (E_a) ionların bir vəziyyətdən digərinə keçməsi üçün aradan qaldırılmalı enerji baryerini ifadə edir, adətən bu, kation mübadilə materialının daxili strukturuna keçməkdir. Temperatur bu aktivləşmə enerji baryerinin aşılması üçün lazım olan enerjini təmin etməklə sorbsiyanın sürətinə təsir göstərə bilər. Temperatur nə qədər yüksək olarsa, ionların diffuziyası bir o qədər sürətli olur və bu, ümumiyyətlə sorbsiya sürətinin yüksəlməsinə səbəb olur. Aktivləşmə enerjisi nə qədər böyükdürsə, sorbsiyanın sürəti temperatur dəyişikliklərinə o qədər həssas olur. Bu o deməkdir ki, temperaturda kiçik dəyişiklik sorbsiya sürətində daha əhəmiyyətli dəyişiklik yaradır. Kadmium və qurğuşun ionları kationitin (onların qarşılıqlı təsir göstərdiyi materialların) matris fərqlərinə baxmayaraq oxşar sorbsiya nümunələri göstərir. Daxili diffuziyanın məhdudlaşdırıcı faktor olması sorbsiya sürətinin ionların qatranın daxilinə nə qədər tez diffuziya edə bilməsindən asılı olduğunu göstərir. Arrhenius tənliyi sorbsiyanın temperatur və sürət arasındakı əlaqəni təsvir etmək üçün tez-tez istifadə olunur: $k = A \cdot e^{(-E_a/RT)}$

Bu tənlik göstərir ki, temperatur artdıqca sorbsiya sürəti eksponensial olaraq artır, xüsusilə aktivləşmə enerjisi (E_a) yüksək olduqda. Sorbsiya sürətinin temperaturla dəyişməsinə göstərən qrafik kadmium və qurğuşun ionları üçün fərqli ola bilər. Daha yüksək temperaturlar daha yüksək sorbsiya sürətləri ilə nəticələnməlidir və əgər ionlar arasında aktivləşmə enerjisi baxımından əhəmiyyətli fərq varsa, onların qrafikləri fərqli görünəcək. Sorbsiya sürətinin təbii logaritmi $\ln(k)$ ilə $1/T$ (mütləq temperatur) qrafiki tez-tez düz xətt verir. Bu xəttin meyli aktivləşmə enerjisi ilə əlaqəlidir:

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

Bu xəttin meylinin müəyyən edilməsi aktivləşmə enerjisinin daha dəqiq hesablanmasında faydalı ola bilər.

Cədvəl. Tədqiq olunan ionit tərəfindən Cu^{2+} və Pb^{2+} ionlarının sorbsiyasının kinetik və termodinamik parametrləri

$D_i \cdot 10^{-8}$, $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$	$D_o \cdot 10^{-3}$, $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$	E_a , $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$-\Delta S$, $\text{C} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$	$-\Delta H^0$, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$-\Delta G^0$, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	K	$\lambda^2 \exp(\Delta S/R)$, cm^2
Amberlite İR-120: Cu^{2+}							
4,40	14,07	25,70	28,29	10,0	1,58	1,89	$3,49 \cdot 10^{-17}$
Amberlite İR-120: Pb^{2+}							
3,55	24,45	27,60	23,69	7,63	0,57	1,26	$14,47 \cdot 10^{-17}$



Hesablamalar ideal ion mübadiləsi fazasını qəbul edir, yəni ion mübadiləsi fazasında udulmuş ionların fəaliyyət əmsalları nəzərə alınmır. Fəaliyyət əmsalları, ionların məhluldakı qeyri-ideal davranışını təsvir edən amillərdir. Onların nəzərə alınmaması hesablamaları sadələşdirir, lakin əgər məhlul və ya qatran sistemi tam ideal deyilsə, müəyyən dəqiqlik itkilərinə səbəb ola bilər. Buna baxmayaraq, əksər hallarda ideal davranışın qəbul edilməsi faydalı yaxınlaşmadır. Birinci tənlik (Tənlik 8) :

$$K = C_1^{1/2} \text{resin} \cdot C_N \text{solution} / (C_{Na_resin} \cdot C_1^{1/2} \text{solution})$$

Bu tənlik, monovalent ion (məsələn, natrium) ilə iki valentli ion (məsələn, kadmium və ya qurğuşun) arasında katyon mübadiləsini təsvir edir. Faza konsentrasiyaları nisbəti (qatran və məhlul arasında) tarazlıq sabiti (K) ölçüsünü verir ki, bu da ionların fazalar arasında nə dərəcədə asan mübadilə olduğunu göstərir. İkinci tənlik (Tənlik 9):

$$K = A^2 / (C_0 \cdot V - A) \cdot (A_{max} \cdot m - A)$$

Bu tənlik, eyni valentlikdə olan ionların (məsələn, monovalent-monovalent və ya divalent-divalent) sorpsiyasını təsvir edir. Tənlik, ionların məhlul və qatran arasında hərəkəti zamanı konsentrasiyanın dəyişməsinə nəzərə alır, $A_{max} \cdot m$ isə qatranın maksimum ion mübadiləsi tutumu ilə əlaqələndirilir.

Birinci tənlik (tənlik 8) monovalent və divalent ionlar arasında mübadilə ilə bağlıdır və ehtimal ki, bis-pikolilamin kimi funksional qruplarla əlaqəlidir ki, bu da müəyyən ionlara xüsusi yaxınlıq göstərir. İkinci tənlik (tənlik 9) isə eyni valent ionların sorpsiyasına aid tədqiqatlarda istifadə olunur, burada isə iminodiasetat qrupları kimi fərqli funksional qruplar nəzərdə tutulur. Əgər bu tənliklərdən hesablanan K dəyərləri “çox kiçik” (yəni çox aşağı) olarsa, bu, sorpsiya prosesinin nisbətən zəif olduğunu göstərir, yəni:

K-nın yüksək dəyəri reaksiyanın məhsullar tərəfə meyilli olduğunu (daha çox ionun sorpsiyası) göstərir, kiçik K isə sorpsiya prosesinin daha az əlverişli olduğunu bildirir. Aşağı ilkin konsentrasiyalarda K kiçikdir və sorpsiya daha az effektiv olur. Konsentrasiyalar artdıqca, K da artır və bu daha effektiv sorpsiyayı göstərir. Bu, adsorbatın (burada ionların) konsentrasiyasının adsorbentin konsentrasiyası ilə sabit temperaturda necə dəyişdiyini təsvir edir. Sorpsiya izotermiləri ionların sorbent qatranla necə qarşılıqlı təsirdə olduğunu anlamaq üçün əsasdır və adətən adsorbsiyanın tutumunu xarakterizə etmək üçün istifadə olunur.

Çıxan istilik (çünki $\Delta H < 0$) göstərir ki, sorpsiya prosesi ekzotermikdir, yəni ionlar ion mübadiləçiyə udulduqda enerji sərbəst buraxılır. MID 200 istilik ötürücü mikrokəlimetr ilə aparılmış ölçmələrin nəticələri molar əsasda (1 mol maddə üçün) qiymətləndirilib və kolorimetrik ölçmələr ilə nəzəri hesablanan entalpiya dəyərləri arasındakı fərq 5%-dən çox olmayıb. Bu da ionların



sorbent qatran üzərinə udulmasının enerji baxımından əlverişli olduğunu göstərir. Bu, sorpsiya prosesinin aşağı temperaturlarda və ya tədqiq edilən temperaturlarda özbaşına (spontan) baş verdiyini bildirir. Entropiya (ΔS) sistemdəki nizamsızlıq və ya təsadüfilik ölçüsüdür. Entropiyanın azalması adətən sistemin daha nizami hala gəldiyini göstərir (ionların ion mübadilə qatranına udulması zamanı). Sistemin entropiyası azalarkən, sorpsiya selektivliyi artır, bu da aşağı entropiyada daha effektiv və məqsədyönlü sorpsiya prosesini göstərir.

Nəticə

Aparılmış tədqiqatlar göstərir ki, Amberlite IR-120 ionmübadilə qatranı ağır əlvan metal ionlarının sulu məhlullardan çıxarılması üçün effektiv sorbentdir. Sorbentin sorpsiya qabiliyyəti metal ionlarının təbiətindən, məhlulun pH göstəricisindən, temperaturdan və diffuziya proseslərindən asılıdır. Maksimum sorpsiya pH 6,5–7,0 intervalında qeydə alınmış, qurğuşun ionlarının çıxarılma dərəcəsi 92%, mis ionlarının isə 90% olmuşdur.

Kinetik analizlər sorpsiya prosesinin daxili diffuziya ilə məhdudlaşdığını və tarazlığın 2,5–3 saat ərzində yarandığını göstərmişdir. Temperaturun yüksəlməsi ionların sorbent daxilində hərəkətini sürətləndirmişdir. Termodinamik göstəricilər isə prosesin ekzotermik olduğunu və ionların qatran tərəfindən udulması zamanı istiliyin ayrıldığını təsdiqləyir.

Bununla yanaşı, mis və qurğuşun ionlarının qarışıq məhlullardan tam selektiv ayrılması üçün sorbentin seçiciliyinin məhdud ola biləcəyi nəzərə alınmalıdır. Tədqiqatda ayrılma əmsalının 15-dən yüksək olmaması bu ionların bir-birindən effektiv ayrılması üçün əlavə optimallaşdırmanın vacibliyini göstərir. Dinamik şəraitdə aparılan əlavə təcrübələr sorbentin real tətbiq imkanlarının qiymətləndirilməsinə kömək edə bilər.

Ümumilikdə, Amberlite IR-120 ağır metal ionlarının sudan çıxarılması üçün yüksək potensiala malikdir və xüsusilə qurğuşun ionlarının sorbsiyasında yaxşı nəticələr göstərir. Gələcək tədqiqatlarda qarışıq metal sistemlərində selektivliyin artırılması, regenerasiya imkanlarının və sorbentin təkrar istifadəsinin araşdırılması məqsəduyğundur.

ƏDƏBİYYATLAR

- [1]. Chromatography. Products for analysis and purification / Sigma-aldrich.com/ supelco, 2003/2004, p. 453
- [2]. Duffus, J. H. (2002). "Heavy metals"—A meaningless term? *Pure and Applied Chemistry*, 74, 793–807.
- [3]. Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92, 407–418.



- [4]. Jafarli, M., & Abbasov, A. (2017). Ion-exchange properties of Diaion CR 11, Amberlite IRC 748, and Dowex M 4195. *Journal of the Turkish Chemical Society*, 4(1), 449–462.
- [5]. Jafarli, M. M. (2022). Selective sorption of heavy metal ions from aqueous solutions using ionites. *Science and World*, (5)(105), 26–28.
- [6]. Jafarli, M. M., & Imanov, H. E. (2024). The sorption of non-ferrous metal ions by chelating resins. *Nature and Science International Scientific Journal*, 6(3), 21–27. <https://doi.org/10.36719/2707-1146/42/21-27>
- [7]. Korostelev, P. P. (1985). *Титриметрический и гравиметрический анализ в металлургии* [Titrimetric and gravimetric analysis in metallurgy]. Металлургия.
- [8]. Kołodzyńska, D. (2009). Complexing ion exchange resins in removal of heavy metal ions from waters and wastewaters in the presence of a complexing agent. *Przemysł Chemiczny*, 88(2), 182–189.
- [9]. Lambert, A., Drogui, P., Daghrir, R., Zaviska, F., & Benzaazoua, M. (2014). Removal of copper in leachate from mining residues using electrochemical technology. *Journal of Environmental Management*, 133, 78–85.
- [10]. Panda, S., Parhi, P. K., Pradhan, N., Mohapatra, U. B., Shukla, L. B., & Park, K. H. (2012). Extraction of copper from bacterial leach liquor of a low-grade chalcopyrite test heap using LIX 984N-C. *Hydrometallurgy*, 121–124, 116–119.
- [11]. Rzayev B.Z, Huseynaliyev M.H., Rzayeva A.B. (2007). Analysis of conditions of CuIn₂ obtaining from the CuCl-In₂S₃-H₂O. *Chemistry Problems*. (1) p. 163-166.

ABSTRACT

SORPTION OF HEAVY NON-FERROUS METAL IONS USING AN AMBERLITE-TYPE SORBENT

Mahnur Jafarli^{1,2}

¹Nakhchivan State University, Nakhchivan, Azerbaijan

²Institute of Natural Resources, Nakhchivan, Azerbaijan

This study investigates the sorption of heavy non-ferrous metal ions from aqueous solutions using Amberlite IR-120 ion-exchange resin, with particular emphasis on copper (Cu²⁺) and lead (Pb²⁺) ions. The sorption process was examined under static conditions at an ionite-to-solution ratio of 1:100, within a pH range of 5.5–7.5 and a temperature range of 25–55°C. Residual metal ion concentrations were determined using complexometric titration and atomic absorption spectrometry. The results demonstrated that Amberlite IR-120 exhibits high sorption efficiency, with maximum removal rates of 90% for copper ions and 92% for lead ions. The highest sorption efficiency was observed at pH 6.5–7.0. The experimental sorption isotherms were analyzed using the Langmuir and Freundlich models. The high correlation coefficients obtained for the Langmuir model (R²=0.97–



0.98R² = 0.97–0.98) indicate good agreement between the experimental data and the model. Kinetic studies revealed that sorption equilibrium was established within approximately 2.5–3 hours and that intraparticle diffusion was the main rate-limiting mechanism. Increasing the temperature from 25°C to 55°C enhanced the sorption rate by approximately 1.5–2.5 times. Thermodynamic analysis indicated that the sorption process was exothermic. However, the separation of copper and lead ions from mixed solutions remained limited by the relatively low separation factor. Overall, Amberlite IR-120 is a promising ion-exchange material for removing heavy metal ions from aqueous solutions, particularly for lead removal, and may have potential applications in wastewater treatment and environmental protection.

Keywords: Amberlite IR-120, sorption, copper and lead ions, ion exchange, sorption kinetics, thermodynamics, water treatment

АННОТАЦИЯ

СОРБЦИЯ ИОНОВ ТЯЖЁЛЫХ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОРБЕНТА ТИПА AMBERLITE

Махнур Джафарли^{1,2}

¹Нахчыванский государственный университет, Нахчыван, Азербайджан

²Институт природных ресурсов, Нахчыван, Азербайджан

В данной работе исследуется сорбция ионов тяжёлых цветных металлов из водных растворов с использованием ионообменной смолы Amberlite IR-120, с особым акцентом на ионы меди (Cu²⁺) и свинца (Pb²⁺). Процесс сорбции изучался в статических условиях при соотношении ионита и раствора 1:100, в диапазоне pH 5,5–7,5 и при температуре 25–55 °C. Остаточные концентрации ионов металлов определяли комплексонометрическим титрованием и методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Результаты показали, что Amberlite IR-120 обладает высокой сорбционной эффективностью: степень извлечения ионов меди достигает 90%, а ионов свинца — 92%. Наибольшая эффективность сорбции наблюдалась при pH 6,5–7,0. Экспериментальные изотермы сорбции анализировались с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха. Высокие коэффициенты корреляции для модели Ленгмюра ($R^2=0,97-0,98$) свидетельствуют о хорошем соответствии экспериментальных данных данной модели. Кинетические исследования показали, что сорбционное равновесие устанавливается приблизительно за 2,5–3 часа, а основным лимитирующим механизмом процесса является внутридиффузионный перенос. Повышение температуры с 25 до 55 °C увеличивало скорость сорбции примерно в 1,5–2,5 раза. Термодинамический анализ показал, что процесс сорбции носит экзотермический характер. Однако разделение ионов меди и свинца из смешанных растворов ограничено относительно низким коэффициентом разделения. В целом Amberlite IR-120 является перспективным ионообменным материалом для удаления ионов тяжёлых металлов из водных растворов, особенно для извлечения свинца, и может найти применение в очистке сточных вод и охране окружающей среды.

Ключевые слова: Amberlite IR-120, сорбция, ионный обмен, ионы меди, ионы свинца, кинетика сорбции, термодинамика, очистка воды

