ترموديناميك جذب رنيوم توسط رزين آنيوني قوي

سيد خطيب‌الاسلام صدرنژاد*[۱]، عليرضا محموديان[۲] و عباس رضوي منش[۳]

[۱]استاد دانشكده مهندسي و علم مواد - دانشگاه صنعتي شريف

[۲]دانش آموخته كارشناسی ارشد دانشكده مهندسي و علم مواد - دانشگاه صنعتي شريف

[۳]دانش آموخته كارشناسی ارشد دانشكده مهندسي و علم مواد - دانشگاه صنعتي شريف

(تاريخ دريافت ۸۱/۲/۱۷، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۴/۹/۱۵، تاريخ تصويب ۸۴/۱۱/۱۵)

چكيده

اكسيد رنيوم بدست آمده در فرآيندهاي صنعتي معمولا" به فرم Re_2O_7 است. اين ماده در آب حلاليت بالايي داشته و پس از حل شدن بصورت آنيون ReO_4^- در مي‌آيد كه براي جداسازي آن از محلول از رزين‌هاي مبادله يوني استفاده مي شود. محققين قبلي، ضريب استوكيومتري واكنش مبادله يونی را بطور ساده انگارانه يك درنظر گرفته اند؛ در حالي كه مقدار واقعي اين ضريب بر كميات ترموديناميكي و سينتيكي لازم براي محاسبات طراحي و بهينه سازي فرايند تاثير بسزايي دارد. در اين تحقيق، ابتدا ضريب استوكيومتري واكنش مبادله آنيون ReO_4^- با Cl^- در رزين با استفاده از روابط تعادلي و اندازه گيريهاي آزمايشگاهي تعيين شد؛ سپس با بكارگيري مقدار بدست آمده و اندازه گيري تاثير دما بر ضريب توزيع رنيوم بين محلول و رزين، رابطه تغيير انرژي آزاد استاندارد ظاهري واكنش مبادله يونی بر اساس حالات استاندارد (الف) مبادله كننده يوني: رزين خيس شده در آب مقطر حاوي اسيد كلريدريك يك نرمال، (ب) محلول حاوي فلز: پررنات پتاسيوم يك نرمال و (ج) نمك توليد شده در اثر واكنش تبادلي: محلول كلرور پتاسيوم يك نرمال محاسبه شد. در نتيجه مقادير تغيير انرژي آزاد استاندارد ظاهري براي سه نوع رزين آنيوني (الف) امبرلايت[۱] برابر $\Delta G^\circ_{app} = 56.781 - 0.274\,T$ ژول بر مول، (ب) واريان[۲] برابر $\Delta G^\circ_{app} = 53.047 - 0.257\,T$ ژول بر مول و (ج) پيورلايت[۳] برابر $\Delta G^\circ_{app} = 50.205 - 0.247\,T$ ژول بر مول مشخص شد.

واژه هاي كليدي: رنيوم - جذب - رزين - تبادل يونی - ترموديناميك - استخراج - امبرلايت - واريان - پيورلايت

مقدمه

رنيوم با عيار $5-7\times10^{-7}$ درصد وزني در پوسته زمين يكي از نادرترين عناصر بشمار مي‌آيد [۱] و مهمترين كاربرد آن در صنايع پتروشيمي براي توليد بنزين بدون سرب، در صنايع هواپيما سازي براي ساخت سوپرآلياژ موتور جت و در صنايع مواد و الكترونيك براي ساخت بي متال، ترموكوپل، سيم مقاومت، طيف سنج جرمي، سوئيچ الكتريكي، پوشش فلزي، لوله خلاء، بوته ديرگداز، الكترومغناطيس و نيمه هادي است[۱،۲] .

رنيوم هيچ‌گونه كانه‌اي از خود ندارد؛ ولي در مينرال‌هاي مولیبدنيت، مس، سرب، روي، پلاتين، تنگستن و نايوبيم وجود دارد. بيشترين مقدار رنيوم بصورت سولفيد بوده و همراه مولیبدنيت است. از مولیبدنيت براي توليد مولیبدن و فرومولیبدن استفاده مي‌شود. براي اين منظور لازم است سولفيد مولیبدن از طريق تشويه به اكسيد تبديل شود. طي اين عمليات، سولفيد رنيوم نيز طبق واكنش ۱ به اكسيد تبديل شده و تبخير می شود:

$$2ReS_2(s) + \frac{15}{2}O_2(g) \leftrightarrow Re_2O_7(g) + 4SO_2(g) \quad (۱)$$

بخار هپتااكسيد رنيوم از سيستم تشويه خارج شده و اگر جذب و بازيابی نشود همراه گرد و غبار وارد محيط شده و هدر خواهد رفت. اما از آنجاييكه اين اكسيد در آب محلول است، لذا با استفاده از تاسيساتي نظير اسكرابر در آب حل شده و بصورت آنيون ReO_4^- تشكيل اسيد پررنيک می دهد. براي جداسازي آنيون ReO_4^- از ساير يونهاي محلول در آب، از رزين‌هاي تعويض يوني مانند امبرلايت، واريان و پيورلايت مي توان استفاده كرد [۳-۵] .

در فرايندهاي مبادله‌يوني، ضريب توزيع D_{Re} طبق رابطه ۲ و فاكتور جدايش α_{Cl}^{Re} طبق رابطه ۳ تعريف مي‌شود [۶] :

$$D_{Re} = \frac{y_{Re}.Q}{x_{Re}.C} = \frac{q_{Rem}}{C_{Rem}} \quad (۲)$$

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۶۰۰۵۷۱۷ , فاكس : ۶۶۰۰۵۷۱۷ , Email: sadrnezh@sharif.edu

$$\alpha_{Cl}^{Re} = \frac{D_{Re}}{D_{Cl}} = \frac{y_{Re}(1-x_{Re})}{x_{Re}(1-y_{Re})}$$

(٣)

y_{Re} كسر مولي رنيوم در رزين، x_{Re} كسر مولي رنيوم در محلول، Q ظرفيت كل رزين و C غلظت كل محلول است. همانطور كه ديده مى شود، فاكتور جدايش برابر نسبت ضريبهاى توزيع دو يون مختلف بوده و تمايل رزين به يون Re نسبت به يون Cl را نشان مي‌دهد [٦] . در طراحي سيستم‌هاي استحصال اين دو كميت بكار مى روند و از اين رو اهميت ويژه اى يافته اند.

واكنش‌هاي مبادله يوني، عموما" تعادلي هستند [٧،٨]. ضرايب استوكيومتري آنها تا كنون تعيين نشده؛ لذا مقدارشان براى راحتى معمولا" يک فرض شده است[٩،١٠]. با اين فرض، اگر عامل تبادل يون، "$R-$" باشد، واكنش جذب به صورت زير نوشته خواهد شد [٦]:

$$R-Cl + K\,ReO_4 \leftrightarrow R-ReO_4 + KCl$$

(٤)

براي اثبات يك بودن ضرايب استوكيومتري هيچ دليلي وجود ندارد. شواهد تجربي، برعكس، نشان مي دهد كه مكانيزم واكنش تعويض به نوع رزين، نوع يون تعويض شونده، غلظت و دما بستگى داشته و ضرايب استوكيومتري متغيرى دارند. ميزان ظرفيت رزين نيز با شرايط محيط جذب تغيير مي‌كند. در نتيجه انتظار مي رود نسبت ضرايب استوكيومتري نيز تغيير كرده و فرض ثابت ماندنشان هم درست نباشد.

از آنجا كه تعيين مقدار دقيق ضرايب استوكيومتري براي انجام هر نوع محاسبات ترموديناميكي براى يافتن شرايط تعادل ضروري است، لذا در اين تحقيق، واكنش مبادله يوني به صورت رابطه كلي ٥ در نظر گرفته شده و سپس ضرايب استوكيومتري آن با تطبيق نتايج تجربى با روابط نظرى تعيين مى شوند.

$$R^{m+} - Cl_m^{m-} + mK\,ReO_4 \leftrightarrow R^{m+} - (ReO_4)_m^{m-} + mKCl$$

(٥)

پس از تعيين ضرايب استوكيومتري، شرايط ترموديناميكي سيستم مطالعه شده و تغييرات انتالپى، انتروپى و انرژى آزاد استاندارد ظاهرى واكنش نيز تعيين خواهند شد.

ثابت تعادل واكنش ٥ را مي توان بصورت معادله ٦ نوشت [٦] :

$$K_a = \frac{a'^{m}_{ReO_4} \times a^{m}_{KCl}}{a'^{m}_{Cl} \times a^{m}_{K\,ReO_4}}$$

(٦)

در رابطه فوق a' اكتيويته يون جذب شده توسط رزين و a اكتيويته يون در محلول است. در كارهاي عملي معمولا" يك ضريب تعادلي بر اساس اكي‌والان بصورت معادله ٧ نيز تعريف مي‌شود [٦] :

$$K_{Cl}^{Re} = \frac{[q_{Re\,m}].[C_{Cl\,m}]^m}{[q_{Cl\,m}].[C_{Re\,m}]^m}$$

(٧)

كه در آن $q_{Re\,m}$ مولاريته رنيوم در رزين، $q_{Cl\,m}$ مولاريته كلر در رزين و K_{Cl}^{Re} ثابت غلظتي واكنش ٥ است. بايد توجه داشت كه K_{Cl}^{Re} يك ثابت ترموديناميكي واقعي نيست؛ بلكه با تغيير غلظت، تغيير پيدا مي‌كند. حال اگر تغييرات K_{Cl}^{Re} و K_a با غلظت و دما مشخص شود، محاسبه ضرايب اكتيويته با كمك رابطه ٦ و معادله گيبس دوهم به شرط داشتن ضرايب استوكيومترى نيز امكان پذير خواهد شد.

تعيين ضرايب اكتيويته عوامل واكنش و حل معادله گيبس دوهم براى سيستم هاى چند جزئي حاوى رزين نيازمند انجام تحقيقات مفصل و پيچيده اى است كه در محدوده بحث اين مقاله نمى گنجد. لذا لازم است بعدا" بطور مستقل مورد تحقيق قرار گيرد. هدف اين مقاله تعيين ضرايب استوكيومترى و تاثير دما و نوع رزين بر شرايط واكنش جذب به عنوان داده هاى اوليه لازم براى نزديک شدن به شرايط ترموديناميكى حاكم بر سيستم جدا سازى رنيوم با استفاده از رزين هاى آنيونى قوى است.

نحوه انجام آزمايشها

براي تهيه محلول حاوي رنيوم، از كريستال هاى پررنات پتاسيم و آمونيم كه با روش مبادله يوني از محلول حل‌سازي غبار تشويه مولیبدنیت بدست آمده و سه نوع رزين آنيوني قوي امبرلايت، واريان و پيورلايت بكار برده شد. براي تسريع تعادل، يك لرزاننده داراي قابليت تنظيم فركانس، دما و زمان استفاده شد. جرم حجمي و ظرفيت دو نوع رزين امبرلايت و پيورلايت مورد استفاده در اين تحقيق كه از طريق تجربي بدست آمده [٩] در جدول (١) ذكر شده است.

جدول ۱: مشخصات رزين‌هاي مورد استفاده در اين تحقيق [۹].

Amberlite		Varion		Purolite	
$\rho(kg/liter)$	$Q(eq/liter)$	$\rho(kg/liter)$	$Q(eq/liter)$	$\rho(kg/liter)$	$Q(eq/liter)$
۰/۷۵	۳/۵۹	۰/۶۷	۳/٤۸	۰/٦۹	۳/۳٤

جدول ۲: تاثير غلظت پررنات پتاسيم بر ميزان جذب رنيوم در دماي ثابت K ۲۹۸.
وزن رزين در حالت خشک در همه آزمايشها ۰/۰۵۰۰ گرم بوده است.

C^0_{Re}	C^e_{Re} (Amb)	C^e_{Re} (Pur)
۱۰	۳/٤۹	۰/۵
۵۰	۵/٤۹	۸/۸۲
*۸۰	٦/٤۰	۹/۲۰
۱۷۷/۵٦	۱۷/۲٦	٤٤/۸
٤۱٤/۳۱	۱۷۳/۸۸	۱۰٦/۷۸
۷۱۰/۲۵	٤٦۸/۲٤	٤۰۲/۱۸
۹٤۰	٦۹۷/۷۸	٦۳۲/۳۳

* اين آزمايش با كريستال پررنات آمونيم صورت گرفته است.

جدول ۳: تاثير غلظت پررنات پتاسيم بر جذب رنيوم (نسبت غلظت به وزن رزين ثابت).

وزن رزين	C^0_{Re} (ppm)	C^e_{Re} (Amb.)	C^e_{Re} (Pur.)
۰/۰۳۱۲	۵۰	۱۰/۲۳	۱۰/۳۷
۰/۰٦۲۵	۱۰۰	۱۰/۳۷	۱۳/٤۵
۰/۱۲۵۰	۲۰۰	۹/۲۹	۱۳/٤۵
۰/۲۵۰۰	٤۰۰	۱۰/۳۷	۱۹/٦
۰/۵۰۰۰	۸۰۰	۱۰/۳۷	۲۱/۳۷

جدول ٤: تاثير دما بر ميزان جذب رنيوم از محلول پررنات آمونيم داراي غلظت اوليه ۸۰ پي پي ام.

دما ($^\circ C$)	C^e_{Re} (Amb.)	C^e_{Re} (Var.)	C^e_{Re} (Pur.)
*۱/۵-۲/۵	٤٤/۱۹	٤۹/۷۱	۵۱/۵۵
*٤/۵-۵/۵	۲۲/۵۱	۲۹/۳۰	۲۲/۸۷
۹/۰	٤/۹۰	۲/٤۰	۷/۲۰
۲۵/۰	٦/٤۰	٤/۳۰	۹/۲۰
۳۵/۰	۱/۸٤	۳/۵۹	۳/۵۹
٤۵/۰	۱/۸٤و ۷/۸۰	٦/۵۹	۱۳/۱۰
٦۰/۰	۱/۱۸	۱/۹۸	۲/۱۸

* : اين دماها توسط حمام آب و يخ فراهم شد. علت اختلاف دما، تفاوت ارتفاع آب و يخ در حمام بود. بدليل محدوديت سرعت همزدن حمام آب و يخ (بدليل سنگين بودن مجموعه)، اين آزمايشها در فركانس همزن ۱۸۰rpm بمدت ۳ ساعت انجام شد.

براي دسته اول آزمايشها، كريستال پررنات پتاسيم در آب مقطر حل شد و محلول‌هايي با غلظتهاي اوليه داده شده در جدول (۲) بدست آمد. سپس ۰/۰۵۰۰gr از هر كدام از رزين‌هاي خشك بعد از قرار گرفتن در آب مقطر و متورم شدن بداخل يك ارلن مايز ريخته شده و ۱۵۰ml از محلول به آن اضافه شد. واكنش جذب با فركانس همزن ۲۳۰rpm به مدت ٤ ساعت در دماي $25\pm1^\circ C$ به تعادل رسيد. آناليز شيميايي محلول قبل و بعد از جذب به دو روش ICP[٤] و اسپكتروفتومتری با شناساگر تيوسيانات اندازه گيری شد. مقدار رنيوم جذب شده از طريق موازنه

جرمی و فرض توزیع بین فاز آبی و رزین تعیین شد. اسپکتروفتومتر استفاده شده مدل Unicam 8700 بود و برای آنالیز از محدوده نور مرئی استفاده شد. نتایج آزمایش در جدول (٢) ذکر شده است. براي افزايش دقت آزمايش، تعدادي از اندازه گيريها تكرار شد و نتايج در صورت يكسان بودن ملاك محاسبه قرار گرفت. جدول (٣) نتايج بدست آمده را ارائه مي دهد. همانطور كه در بالاى جدول قيد شده، نسبت غلظت به وزن رزين در همه آزمايشها ثابت بوده و برابر مقادير ذكر شده در جدول است.

براي انجام آزمايشهاى دسته دوم، كريستال‌هاي پررنات آمونيم در آب مقطر حل شده و محلولى با غلظت ٨٠ppm تهيه شد. عمل جذب آنگاه مشابه آزمايشهاى دسته اول ولي با غلظت ثابت و دماي متغير انجام شد. نتايج بدست آمده در جدول (٤) ذكر شده اند.

نتايج و بحث

با توجه به وجود دو نوع آنيون Cl^- و ReO_4^- در سيستم و خنثي بودن محيط داريم:

$$q_{Rem} + q_{Clm} = Q_m \qquad (\frac{eq}{liter})$$

(٩)

كه در آن ظرفيت جذب رزين با Q_m نشان داده شده است. حال با دانستن مقدار رنيوم اوليه و نهايي محلول، مي‌توان مقدار رنيوم جذب شده را بدست آورد:

$$q_{Rem} = \frac{[(ppm)_{Re}^{initial} - (ppm)_{Re}^{e}] \times 0.15 \times \rho_{Resin}}{M_{Re}.W_{Resin} \times 1000}$$

(١٠)

كه در آن W_{Resin} وزن رزين بكار گرفته شده است. با توجه به شرايط استوكيومتري واكنش مبادله‌يوني، رابطه زير برقرار است:

$$[C_{Clm}] = \frac{q_{Rem}.W_{Resin}}{0.15\rho_{Resin}}$$

(١١)

رابطه زير نيز براحتي بدست مي‌آيد:

$$[C_{Rem}] = \frac{(ppm)_{Re}^{e}}{1000M_{Re}}$$

(١٢)

حال اگر از رابطه ٧ لگاريتم بگيريم، با توجه به روابط ٩ تا ١٢ ، روابط ١٣ تا ١٥ بدست مي‌آيد:

$$A + Bm = \log K_{Cl}^{Re}$$

(١٣)

$$A = \log D_{Re} - \log[q_{Clm}] + \log[C_{Rem}]$$

(١٤)

$$B = \log[C_{Clm}] - \log[C_{Rem}]$$

(١٥)

اگر مقادير A و B را در غلظت‌هاي اوليه متفاوت رنيوم بدست آوريم، با ترسيم A بر حسب B، ضريب زاويه m و عرض از مبدا $\log K_{Cl}^{Re}$ بدست خواهد آمد. اين عمل براي داده‌هاي جدولهاي (٢) و (٣) طبق جدول (٥) و شكل (١) انجام شد. نتايج در جدول (٦) خلاصه شده است. همانطور كه ديده مى شود مقدار ضريب استوكيومترى براى رزين امبرلايت ٠/٦٥ و براى رزين پيورلايت ٠/٧١ است.

اگر واكنش مبادله يوني را بصورت زير درنظر بگيريم:

$$Re\underset{in\ Sol.}{O_4^-} \Leftrightarrow Re\underset{in\ Resin}{O_4^-}$$

(١٦)

ΔG° اين واكنش را مي‌توان بصورت زير نوشت:

$$\Delta G^\circ = -RT.\ln\frac{q_{Rem}.\gamma'}{C_{Rem}.\gamma}$$

(١٧)

با فرض اينكه نسبت ضرايب اكتيويته در فاز آبي و رزين برابر با ١ باشد[١١-١٤]، مي‌توان نوشت:

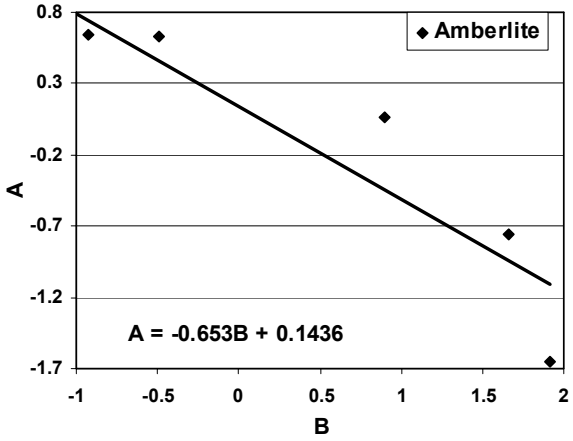
$$\Delta G_{app}^\circ = -RT.\ln D_{Re} = \Delta H_{app}^\circ - T.\Delta S_{app}^\circ$$

(١٨)

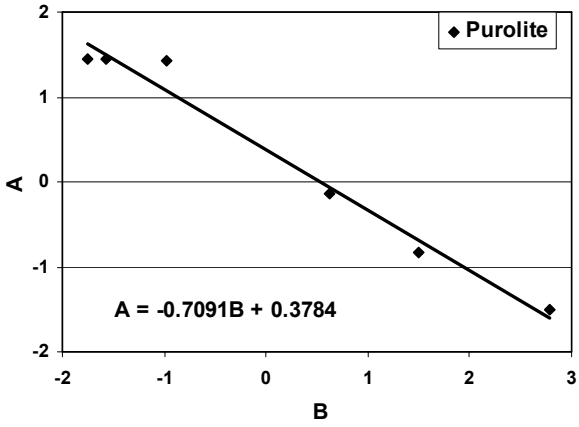
حال با محاسبه تغييرات ضريب توزيع بر حسب دما، ΔH_{app}° و ΔS_{app}° واكنش را مي‌توان تعيين كرد. فرض يک بودن نسبت ضرايب اكتيويته توسط محققين قبلى نيز بكار رفته [١١-١٤] و براى محاسبه ΔH_{app}° و ΔS_{app}° واكنش، در اين مقاله هم مورد استفاده قرار مى گيرد. انجام فرض فوق محاسبه مقادير ΔH_{app}° ، ΔS_{app}° و ΔG_{app}° واكنش جذب را امكان پذير ساخته و به عنوان گام نخست براى دستيابى به داده هاى كاملتر ترموديناميكى مى تواند تلقى شود. در جدول (٧) تغييرات $\ln D_{Re}$ بر حسب $\frac{1000}{T}$ را مشاهده مي‌كنيد.

جدول ٥: مقادير A بر حسب B براي رنيوم.

Amberlite		Purolite	
A	*B*	*A*	*B*
-١/٦٥	١/٩٢	-١/٥١	٢/٧٩
-٠/٧٥	١/٦٦	-٠/٨٣	١/٥٠
٠/٠٧	٠/٩٠	-٠/١٥	٠/٦٢
٠/٦٣	-٠/٤٩	١/٤٣	-٠/٩٧
٠/٦٤	-٠/٩٣	١/٤٥	-١/٥٧
٠/٦٤	-١/١٠	١/٤٤	-١/٧٥



(الف)



(ب)

شكل ١: محاسبه ضريب استوكيومتري واكنش جذب رنيوم (الف) رزين امبرلايت و (ب) رزين نوع پيورلايت.

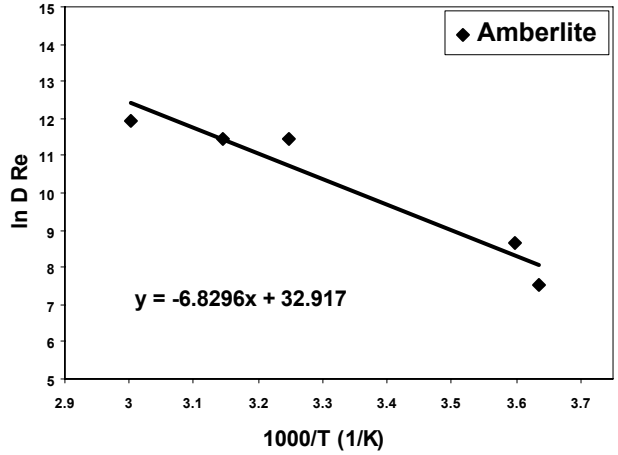
جدول ٦: مقادير m و K_{Cl}^{Re} براي رزين‌هاي مختلف.

Amberlite		Purolite	
m	K_{Cl}^{Re}	m	K_{Cl}^{Re}
٠/٦٥٣	١/٣٩	٠/٧٠٩١	٢/٣٩

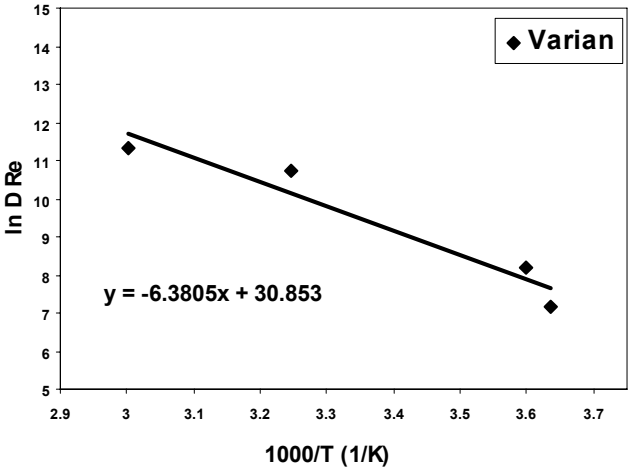
در شكل‌هاي (٢)، (٣) و (٤) تغييرات لگاريتم ضريب توزيع رنيوم بر حسب معكوس دما رسم شده اند. بنابراين، با فرض ثابت بودن كميات ترموديناميكي انتالپي و انتروپي واكنش مبادله يوني در محدوده دماى مورد نظر، مقدار اين كميات را مي‌توان بدست آورد. مقادير اين كميات در جدول (٨) فهرست شده اند.

جدول ٧: ضريب توزيع رنيوم در دماهاي مختلف.

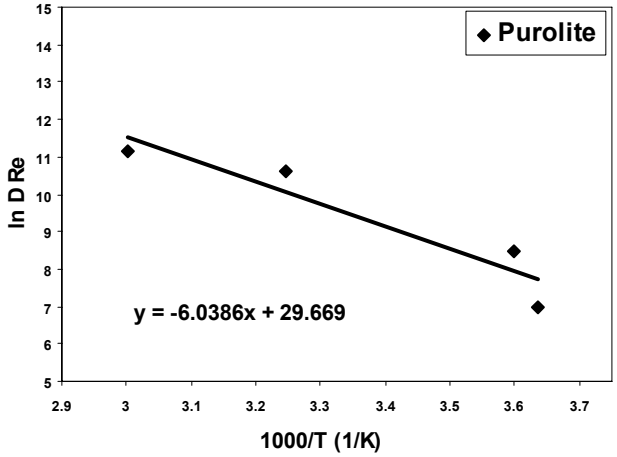
$\frac{1000}{T}$	$\ln D_{Re}$		
	Amberlite	Varion	Purolite
٣/٦٤	٧/٥١	٧/١٥	٦/٩٨
٣/٦٠	٨/٦٦	٨/٢٠	٨/٤٩
٣/٢٥	١١/٤٧	١٠/٧١	١٠/٦٣
٣/١٤	١١/٤٧		
٣/٠٠	١١/٩٢	١١/٣٢	١١/١٥



شكل ٢: تغييرات ضريب توزيع رنيوم بر حسب معكوس دما براي رزين نوع امبرلايت.



شكل ٣: تغييرات ضريب توزيع رنيوم بر حسب معكوس دما براي رزين نوع واريان.



شكل ٤: تغييرات ضريب توزيع رنيوم بر حسب معكوس دما براي رزين نوع پيورلايت.

جدول ٨: كميات ترموديناميكي مبادله آنيون رنيوم با كلر.

نام رزين	$\Delta H^{\circ}_{app}(\frac{kJ}{mol})$	$\Delta S^{\circ}_{app}(\frac{kJ}{mol.^{\circ}K})$	$\Delta G^{\circ}_{app}(\frac{J}{mol})$
Amberlite	٥٦/٧٨١	٠/٢٧٤	٥٦/٧٨١-٠/٢٧٤**T**
Varion	٥٣/٠٤٧	٠/٢٥٧	٥٣/٠٤٧-٠/٢٥٧**T**
Purolite	٥٠/٢٠٥	٠/٢٤٧	٥٠/٢٠٥-٠/٢٤٧**T**

جمع بندي

علي‌رغم اينكه در اكثر منابع ضريب استوكيومتري واكنش مبادله يوني يك درنظر گرفته شده، پس از بررسيهاي مفصل معلوم شد كه اين ضريب حدود ٠/٦٥ است. علاوه بر ضريب استوكيومتري، ضريب تعادلي انتخابي بودن نيز براي دو رزين مختلف بدست آمد كه نتايج در جدول (٧) ذكر شده‌اند. اين نتايج نشان دهنده توان بالاتر رزين پيورلايت نسبت به امبرلايت برای جذب آنيون حاوی رنيوم بجای يون كلر است. كميات ترموديناميكي مبادله آنيون رنيوم با كلر نيز براي رزين‌هاي مختلف مطابق جدول (٨) بدست آمد. اين كميات براي طراحي و بهينه سازي سيستمهاي مبادله يوني براي استخراج فلز با ارزش رنيوم كاربرد داشته و برای تعيين كميات ترموديناميكی تعادلی كه از پيچيدگی قابل توجهی برخوردارند نيز قابل استفاده خواهد بود.

فهرست علائم

C: غلظت محلول $\frac{keq}{m^3}$

D: ضريب توزيع ($\frac{q}{C}$ يا $\frac{Q}{C_0}$)

K_a: ثابت تعادل ترموديناميكي

K_C: ضريب انتخابي بودن

K^A_{mB}: ضريب تعادلي مولاري

K^A_B: ضريب تعادلي بر پايه غلظت‌هاي اكي‌والاني

q: غلظت رزين $\frac{keq}{m^3}$

q_m: غلظت رزين $\frac{kmol}{m^3}$

Q: ظرفيت كلي رزين

T: دما

x: كسر اكي‌والان در محلول

y: كسر اكي‌والان در رزين

α^A_B: فاكتور جدايش

γ: ضريب اكتيويته محلول

ρ: چگالي محلول $\frac{kg}{m^3}$

مراجع

1 - Alverson, L. J. (1979). “Rhenium.” *Mineral Commodity Profiles*.

2 - Kirk, R. E. and Othmer, D. F. (1965). *Encyclopedia of Chemical Technology.* Vol. 17, John Wiley and Sons, Inc.

3 - Davenport, W. H. (1964). “Rhenium sources and methods and extraction and refining.” *AIME Annual Meeting,* PP.16-20.

4 - Zimmerky, S. K. and Malouf, E. E. (1957). *Extraction of Rhenium Incidental to Manufacture of Molybdenum Oxide*, United States Patent No. 2809092.

5 - Prater, J. D. and Platzke, R. N. (1971). *Process for Recovering Rhenium Values from Ion Exchange Materials*. United States Patent No. 3,558,268.

6 - Korkisch, J. (1989). *Handbook of Ion Exchange Resins: Their Application to Inorganic Analytical Chemistry.* CRC Press.

7 - Konrad Dorfner (1991). *Ion Exchangers*, Walter de Gruyter Berlin . New York .

8 - Salter, M. J. (1991). *Principle of Ion Exchange Technology*, Butterworth-Heimann Ltd.

9 - Fisher, S. A., (1996). “Anion resins and the law of mass action.” *Ion Exchange Developments and Applications, Proceedings of IEX’96,* 14-19 July, 1996, Churchill College, UK, SCI 1996, Hartnolls, Ltd., Bodmin, UK, PP.499-505.

10 - Sadrnezhaad, S. K. and Keshavarz Alamdari, E. (2001). “Thermodynamics of extraction of ReO_4^- from aqueous sulfuric acid media with Tri-n-Butyl phosphate dissolved in kerosene.” *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 32B, No. 1, PP. 5-10.

11 - Keshavarz Alamdari, E. and Sadrnezhaad, S. K. (2000). “Thermodynamics of Extraction of MoO_4^{2-} from aqueous sulfuric acid media with TBP dissolved in kerosene.” *Hydrometallurgy*, Vol. 55, PP. 327-341.

12 - Sadrnezhaad, S. K. and Keshavarz Alamdari, E. (2004). "Thermodynamics of Extraction of Zn^{2+} from sulfuric acid media with a mixture of DEHPA and MEHPA." *IJE Transactions B: Applications*, Vol. 17, No. 2B, PP. 193-202.

13 - Keshavarz Alamdari, E., Darvishi, D., Sadrnezhaad, S. K., Mos'hefi Shabestari, Z., O’hadizadeh, A. and Akbari, M. (2002). “Effect of TBP as a modifier for extraction of zinc and cadmium with a mixture of DEHPA and MEHPA.” *International Solvent Extraction Conference*, Cape Town, South Africa, March 18-21, PP. 1052-1057.

14 - Keshavarz Alamdari, E., Darvishi, D., Sadrnezhaad, S. K., Mos'hefi Shabestari, Z., O’hadizadeh, A. and Akbari, M. (2002). “Effect of TBP as a modifier for extraction of zinc and cadmium with a mixture of DEHPA and MEHPA.” *Proceedings of the International Solvent Extraction Conference ISEC*, March 18-21, Cape Town, South Africa, PP.1052-1057.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Amberlite
2 - Varion
3 - Purolite
4 - Inductive Coppled Plasma