

ترمودینامیک جذب رنیوم توسط رزین آنیونی قوی

سید خطیب‌الاسلام صدرنژاد^{۱*}، علیرضا محمودیان^۲ و عباس رضوی منش^۳

^۱استاد دانشکده مهندسی و علم مواد - دانشگاه صنعتی شریف

^۲دانشکده مهندسی و علم مواد - دانشگاه صنعتی شریف

^۳دانشکده مهندسی و علم مواد - دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت ۸۱/۲/۱۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۹/۱۵، تاریخ تصویب ۸۴/۱۱/۱۵)

چکیده

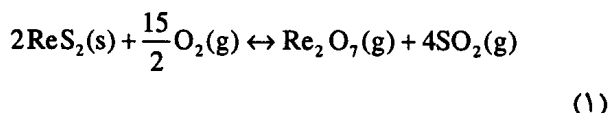
اکسید رنیوم بدست آمده در فرایندهای صنعتی معمولاً به فرم Re_2O_7 است. این ماده در آب حلالیت بالایی داشته و پس از حل شدن بصورت آنیون ReO_4^- در می‌آید که برای جداسازی آن از محلول از رزین‌های مبادله یونی استفاده می‌شود. محققین قبلی، ضریب استوکیومتری واکنش مبادله یونی را بطور ساده انگارانه یک در نظر گرفته‌اند؛ در حالی که مقدار واقعی این ضریب بر کمیات ترمودینامیکی و سینتیکی لازم برای محاسبات طراحی و بهینه سازی فرایند تاثیر بسزایی دارد. در این تحقیق، ابتدا ضریب استوکیومتری واکنش مبادله آنیون ReO_4^- با Cl^- در رزین با استفاده از روابط تعادلی و اندازه گیریهای آزمایشگاهی تعیین شد؛ سپس با بکارگیری مقدار بدست آمده و اندازه گیری تاثیر دما بر ضریب توزیع رنیوم بین محلول و رزین، رابطه تغییر انرژی آزاد استاندارد ظاهری واکنش مبادله یونی بر اساس حالات استاندارد (الف) مبادله کننده یونی: رزین خیس شده در آب مقطر حاوی اسید کلریدریک یک نرمال، (ب) محلول حاوی فلز: پررئات پتاسیوم یک نرمال و (ج) نمک تولید شده در اثر واکنش تبادلی: محلول کلرور پتاسیوم یک نرمال محاسبه شد. در نتیجه مقادیر تغییر انرژی آزاد استاندارد ظاهری برای سه نوع رزین آنیونی (الف) امبرلایت^۱ برابر $\Delta G_{app}^\circ = 56.781 - 0.274 T$ ژول بر مول، (ب) واریان^۲ برابر $\Delta G_{app}^\circ = 53.047 - 0.257 T$ ژول بر مول و (ج) پیورلایت^۳ برابر $\Delta G_{app}^\circ = 50.205 - 0.247 T$ ژول بر مول مشخص شد.

واژه های کلیدی: رنیوم - جذب - رزین - تبادل یونی - ترمودینامیک - استخراج - امبرلایت - واریان - پیورلایت

مقدمه

رنیوم با عیار $5-7 \times 10^{-7}$ درصد وزنی در پوسته زمین یکی از نادرترین عناصر بشمار می‌آید [۱] و مهمترین کاربرد آن در صنایع پتروشیمی برای تولید بنزین بدون سرب، در صنایع هواپیما سازی برای ساخت سوپراآلیاژ موتور جت و در صنایع مواد و الکترونیک برای ساخت بی متال، ترموکوپل، سیم مقاومت، طیف سنج جرمی، سونیچ الکتريکی، پوشش فلزی، لوله خلاء، بوته دیرگذاز، الکترومغناطیس و نیمه هادی است [۱،۲].

رنیوم هیچ‌گونه کانه‌ای از خود ندارد؛ ولی در مینرال‌های مولیبدنیت، مس، سرب، روی، پلاتین، تنگستن و نایوبیم وجود دارد. بیشترین مقدار رنیوم بصورت سولفید بوده و همراه مولیبدنیت است. از مولیبدنیت برای تولید مولیبدن و فرومولیبدن استفاده می‌شود. برای این منظور لازم است سولفید مولیبدن از طریق تشویه به اکسید تبدیل شود. طی این عملیات، سولفید رنیوم نیز طبق واکنش ۱ به اکسید تبدیل شده و تبخیر می‌شود:



بخار هیپتااکسید رنیوم از سیستم تشویه خارج شده و اگر جذب و بازیابی نشود همراه گرد و غبار وارد محیط شده و هدر خواهد رفت. اما از آنجاییکه این اکسید در آب محلول است، لذا با استفاده از تاسیساتی نظیر اسکرابر در آب حل شده و بصورت آنیون ReO_4^- تشکیل اسید پررنیک می‌دهد. برای جداسازی آنیون ReO_4^- از سایر یونهای محلول در آب، از رزین‌های تعویض یونی مانند امبرلایت، واریان و پیورلایت می‌توان استفاده کرد [۳-۵].

در فرایندهای مبادله یونی، ضریب توزیع D_{Re} طبق رابطه ۲ و فاکتور جدایش α_{Cl}^{Re} طبق رابطه ۳ تعریف می‌شود [۶]:

$$D_{Re} = \frac{y_{Re} \cdot Q}{x_{Re} \cdot C} = \frac{q_{Re,m}}{C_{Re,m}} \quad (2)$$

$$K_a = \frac{a'_{\text{ReO}_4} \times a_{\text{KCl}}^m}{a'_{\text{Cl}} \times a_{\text{KReO}_4}^m} \quad (۶)$$

در رابطه فوق a' اکتیویته یون جذب شده توسط رزین و a اکتیویته یون در محلول است. در کارهای عملی معمولاً یک ضریب تعادلی بر اساس اکی‌والان بصورت معادله ۷ نیز تعریف می‌شود [۶]:

$$K_{\text{Cl}}^{\text{Re}} = \frac{[q_{\text{Re}m}] \cdot [C_{\text{Cl}m}]^m}{[q_{\text{Cl}m}] \cdot [C_{\text{Re}m}]^m} \quad (۷)$$

که در آن $q_{\text{Re}m}$ مولاریته رنیوم در رزین، $q_{\text{Cl}m}$ مولاریته کلر در رزین و $K_{\text{Cl}}^{\text{Re}}$ ثابت غلظتی واکنش ۵ است. باید توجه داشت که $K_{\text{Cl}}^{\text{Re}}$ یک ثابت ترمودینامیکی واقعی نیست؛ بلکه با تغییر غلظت، تغییر پیدا می‌کند. حال اگر تغییرات K_a و $K_{\text{Cl}}^{\text{Re}}$ با غلظت و دما مشخص شود، محاسبه ضرایب اکتیویته با کمک رابطه ۶ و معادله گیبس دوم به شرط داشتن ضرایب استوکیومتری نیز امکان پذیر خواهد شد.

تعیین ضرایب اکتیویته عوامل واکنش و حل معادله گیبس دوم برای سیستم های چند جزئی حاوی رزین نیازمند انجام تحقیقات مفصل و پیچیده ای است که در محدوده بحث این مقاله نمی‌گنجد. لذا لازم است بعداً بطور مستقل مورد تحقیق قرار گیرد. هدف این مقاله تعیین ضرایب استوکیومتری و تاثیر دما و نوع رزین بر شرایط واکنش جذب به عنوان داده های اولیه لازم برای نزدیک شدن به شرایط ترمودینامیکی حاکم بر سیستم جدا سازی رنیوم با استفاده از رزین های آنیونی قوی است.

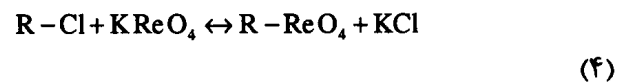
نحوه انجام آزمایشها

برای تهیه محلول حاوی رنیوم، از کریستال های پرنات پتاسیم و آمونیم که با روش مبادله یونی از محلول حل‌سازی غبار تشویه مولیبدنیت بدست آمده و سه نوع رزین آنیونی قوی امبرلایت، واریان و پیورلایت بکار برده شد. برای تسریع تعادل، یک لرزاننده دارای قابلیت تنظیم فرکانس، دما و زمان استفاده شد. جرم حجمی و ظرفیت دو نوع رزین امبرلایت و پیورلایت مورد استفاده در این تحقیق که از طریق تجربی بدست آمده [۹] در جدول (۱) ذکر شده است.

$$\alpha_{\text{Cl}}^{\text{Re}} = \frac{D_{\text{Re}}}{D_{\text{Cl}}} = \frac{y_{\text{Re}}(1-x_{\text{Re}})}{x_{\text{Re}}(1-y_{\text{Re}})} \quad (۳)$$

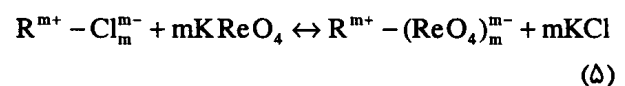
y_{Re} کسر مولی رنیوم در رزین، x_{Re} کسر مولی رنیوم در محلول، Q ظرفیت کل رزین و C غلظت کل محلول است. همانطور که دیده می‌شود، فاکتور جدایش برابر نسبت ضریبهای توزیع دو یون مختلف بوده و تمایل رزین به یون Re نسبت به یون Cl را نشان می‌دهد [۶]. در طراحی سیستم‌های استحصال این دو کمیت بکار می‌روند و از این رو اهمیت ویژه ای یافته‌اند.

واکنش‌های مبادله یونی، عموماً تعادلی هستند [۸،۷]. ضرایب استوکیومتری آنها تا کنون تعیین نشده؛ لذا مقدارشان برای راحتی معمولاً یک فرض شده است [۹،۱۰]. با این فرض، اگر عامل تبادل یون، R^- باشد، واکنش جذب به صورت زیر نوشته خواهد شد [۶]:



برای اثبات یک بودن ضرایب استوکیومتری هیچ دلیلی وجود ندارد. شواهد تجربی، برعکس، نشان می‌دهد که مکانیزم واکنش تعویض به نوع رزین، نوع یون تعویض شونده، غلظت و دما بستگی داشته و ضرایب استوکیومتری متغیری دارند. میزان ظرفیت رزین نیز با شرایط محیط جذب تغییر می‌کند. در نتیجه انتظار می‌رود نسبت ضرایب استوکیومتری نیز تغییر کرده و فرض ثابت ماندنشان هم درست نباشد.

از آنجا که تعیین مقدار دقیق ضرایب استوکیومتری برای انجام هر نوع محاسبات ترمودینامیکی برای یافتن شرایط تعادل ضروری است، لذا در این تحقیق، واکنش مبادله یونی به صورت رابطه کلی ۵ در نظر گرفته شده و سپس ضرایب استوکیومتری آن با تطبیق نتایج تجربی با روابط نظری تعیین می‌شوند.



پس از تعیین ضرایب استوکیومتری، شرایط ترمودینامیکی سیستم مطالعه شده و تغییرات انتالپی، انترپی و انرژی آزاد استاندارد ظاهری واکنش نیز تعیین خواهند شد.

ثابت تعادل واکنش ۵ را می‌توان بصورت معادله ۶ نوشت [۶]:

جدول ۱: مشخصات رزین‌های مورد استفاده در این تحقیق [۹].

Amberlite		Varion		Purolite	
ρ (kg / liter)	Q(eq / liter)	ρ (kg / liter)	Q(eq / liter)	ρ (kg / liter)	Q(eq / liter)
۰/۷۵	۳/۵۹	۰/۶۷	۳/۴۸	۰/۶۹	۳/۳۴

جدول ۲: تاثیر غلظت پرنات پتاسیم بر میزان جذب رنیوم در دمای ثابت ۲۹۸ K. وزن رزین در حالت خشک در همه آزمایشها ۰/۰۵۰۰ گرم بوده است.

C_{Re}^0	C_{Re}^e (Amb)	C_{Re}^e (Pur)
۱۰	۳/۴۹	۰/۵
۵۰	۵/۴۹	۸/۸۲
* ۸۰	۶/۴۰	۹/۲۰
۱۷۷/۵۶	۱۷/۲۶	۴۴/۸
۴۱۴/۳۱	۱۷۳/۸۸	۱۰۶/۷۸
۷۱۰/۲۵	۴۶۸/۲۴	۴۰۲/۱۸
۹۴۰	۶۹۷/۷۸	۶۳۲/۳۳

* این آزمایش با کریستال پرنات آمونیم صورت گرفته است.

جدول ۳: تاثیر غلظت پرنات پتاسیم بر جذب رنیوم (نسبت غلظت به وزن رزین ثابت).

وزن رزین	C_{Re}^0 (ppm)	C_{Re}^e (Amb.)	C_{Re}^e (Pur.)
۰/۰۳۱۲	۵۰	۱۰/۲۳	۱۰/۳۷
۰/۰۶۲۵	۱۰۰	۱۰/۳۷	۱۳/۴۵
۰/۱۲۵۰	۲۰۰	۹/۲۹	۱۳/۴۵
۰/۲۵۰۰	۴۰۰	۱۰/۳۷	۱۹/۶
۰/۵۰۰۰	۸۰۰	۱۰/۳۷	۲۱/۳۷

جدول ۴: تاثیر دما بر میزان جذب رنیوم از محلول پرنات آمونیم دارای غلظت اولیه ۸۰ پی پی ام.

دما ($^{\circ}C$)	C_{Re}^e (Amb.)	C_{Re}^e (Var.)	C_{Re}^e (Pur.)
* ۱/۵-۲/۵	۴۴/۱۹	۴۹/۷۱	۵۱/۵۵
* ۴/۵-۵/۵	۲۲/۵۱	۲۹/۳۰	۲۲/۸۷
۹/۰	۴/۹۰	۲/۴۰	۷/۲۰
۲۵/۰	۶/۴۰	۴/۳۰	۹/۲۰
۳۵/۰	۱/۸۴	۳/۵۹	۳/۵۹
۴۵/۰	۱/۸۴ و ۷/۸۰	۶/۵۹	۱۳/۱۰
۶۰/۰	۱/۱۸	۱/۹۸	۲/۱۸

* این دماها توسط حمام آب و یخ فراهم شد. علت اختلاف دما، تفاوت ارتفاع آب و یخ در حمام بود. بدلیل محدودیت سرعت همزدن حمام آب و یخ (بدلیل سنگین بودن مجموعه)، این آزمایشها در فرکانس همزن ۱۸۰ rpm بمدت ۳ ساعت انجام شد.

محلول به آن اضافه شد. واکنش جذب با فرکانس همزن ۲۳۰ rpm به مدت ۴ ساعت در دمای $25 \pm 1^{\circ}C$ به تعادل رسید. آنالیز شیمیایی محلول قبل و بعد از جذب به دو روش ICP و اسپکتروفتومتری با شناساگر تیوسیانات اندازه گیری شد. مقدار رنیوم جذب شده از طریق موازنه

برای دسته اول آزمایشها، کریستال پرنات پتاسیم در آب مقطر حل شد و محلول‌هایی با غلظتهای اولیه داده شده در جدول (۲) بدست آمد. سپس ۰/۰۵۰۰ gI از هر کدوم از رزین‌های خشک بعد از قرار گرفتن در آب مقطر و متورم شدن بداخل یک ارلن مایر ریخته شده و ۱۵۰ ml از

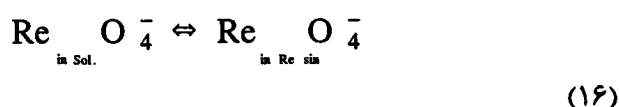
$$A + Bm = \log K_{Cl}^{Re} \quad (13)$$

$$A = \log D_{Re} - \log[q_{Clm}] + \log[C_{Rem}] \quad (14)$$

$$B = \log[C_{Clm}] - \log[C_{Rem}] \quad (15)$$

اگر مقادیر A و B را در غلظت‌های اولیه متفاوت رنیوم بدست آوریم، با ترسیم A بر حسب B ، ضریب زاویه m و عرض از مبدا $\log K_{Cl}^{Re}$ بدست خواهد آمد. این عمل برای داده‌های جدول‌های (۲) و (۳) طبق جدول (۵) و شکل (۱) انجام شد. نتایج در جدول (۶) خلاصه شده است. همانطور که دیده می‌شود مقدار ضریب استوکیومتری برای رزین امبرلایت ۰/۶۵ و برای رزین پیورلایت ۰/۷۱ است.

اگر واکنش مبادله یونی را بصورت زیر در نظر بگیریم:



ΔG° این واکنش را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\Delta G^\circ = -RT \cdot \ln \frac{q_{Rem} \cdot \gamma}{C_{Rem} \cdot \gamma} \quad (17)$$

با فرض اینکه نسبت ضرایب اکتیویته در فاز آبی و رزین برابر با ۱ باشد [۱۱-۱۴]، می‌توان نوشت:

$$\Delta G_{app}^\circ = -RT \cdot \ln D_{Re} = \Delta H_{app}^\circ - T \cdot \Delta S_{app}^\circ \quad (18)$$

حال با محاسبه تغییرات ضریب توزیع بر حسب دما، ΔH_{app}° و ΔS_{app}° واکنش را می‌توان تعیین کرد. فرض یک بودن نسبت ضرایب اکتیویته توسط محققین قبلی نیز بکار رفته [۱۱-۱۴] و برای محاسبه ΔH_{app}° و ΔS_{app}° واکنش، در این مقاله هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. انجام فرض فوق محاسبه مقادیر ΔH_{app}° ، ΔS_{app}° و ΔG_{app}° واکنش جذب را امکان پذیر ساخته و به عنوان گام نخست برای دستیابی به داده های کاملتر ترمودینامیکی می‌تواند تلقی شود. در جدول (۷) تغییرات $\ln D_{Re}$ بر حسب $\frac{1000}{T}$ را مشاهده می‌کنید.

جرمی و فرض توزیع بین فاز آبی و رزین تعیین شد. اسپکتروفوتومتر استفاده شده مدل Unicam 8700 بود و برای آنالیز از محدوده نور مرئی استفاده شد. نتایج آزمایش در جدول (۲) ذکر شده است. برای افزایش دقت آزمایش، تعدادی از اندازه گیریها تکرار شد و نتایج در صورت یکسان بودن ملاک محاسبه قرار گرفت. جدول (۳) نتایج بدست آمده را ارائه می‌دهد. همانطور که در بالای جدول قید شده، نسبت غلظت به وزن رزین در همه آزمایشها ثابت بوده و برابر مقادیر ذکر شده در جدول است.

برای انجام آزمایشهای دسته دوم، کریستال‌های پرنات آمونیم در آب مقطر حل شده و محلولی با غلظت ۸۰ ppm تهیه شد. عمل جذب آنگاه مشابه آزمایشهای دسته اول ولی با غلظت ثابت و دمای متغیر انجام شد. نتایج بدست آمده در جدول (۴) ذکر شده اند.

نتایج و بحث

با توجه به وجود دو نوع آنیون Cl^- و ReO_4^- در سیستم و خنثی بودن محیط داریم:

$$q_{Rem} + q_{Clm} = Q_m \left(\frac{\text{eq}}{\text{liter}} \right) \quad (9)$$

که در آن ظرفیت جذب رزین با Q_m نشان داده شده است. حال با دانستن مقدار رنیوم اولیه و نهایی محلول، می‌توان مقدار رنیوم جذب شده را بدست آورد:

$$q_{Rem} = \frac{[(\text{ppm})_{Re}^{\text{initial}} - (\text{ppm})_{Re}^e] \times 0.15 \times \rho_{Resin}}{M_{Re} \cdot W_{Resin} \times 1000} \quad (10)$$

که در آن W_{Resin} وزن رزین بکار گرفته شده است. با توجه به شرایط استوکیومتری واکنش مبادله یونی، رابطه زیر برقرار است:

$$[C_{Clm}] = \frac{q_{Rem} \cdot W_{Resin}}{0.15 \rho_{Resin}} \quad (11)$$

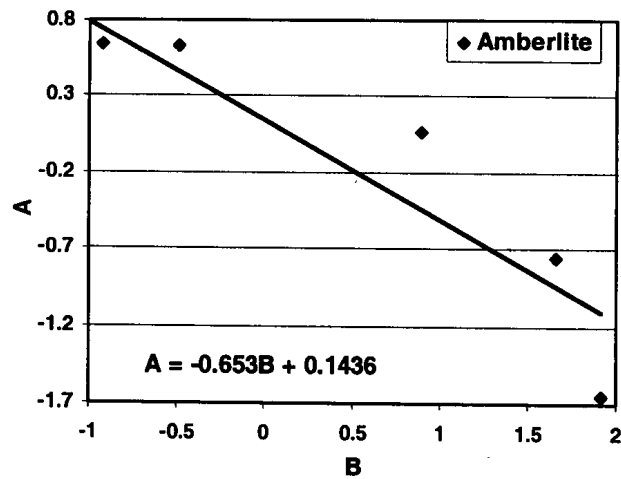
رابطه زیر نیز براحتی بدست می‌آید:

$$[C_{Rem}] = \frac{(\text{ppm})_{Re}^e}{1000 M_{Re}} \quad (12)$$

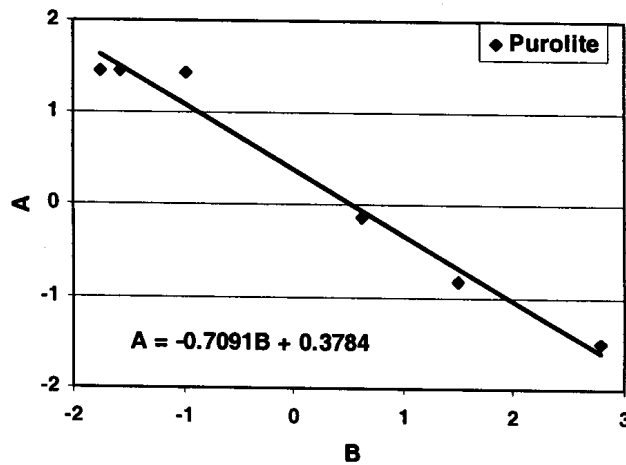
حال اگر از رابطه ۷ لگاریتم بگیریم، با توجه به روابط ۹ تا ۱۲، روابط ۱۳ تا ۱۵ بدست می‌آید:

جدول ۵: مقادیر A بر حسب B برای رنیوم.

Amberlite		Purolite	
A	B	A	B
-۱/۶۵	۱/۹۲	-۱/۵۱	۲/۷۹
-۰/۱۷۵	۱/۶۶	-۰/۸۲	۱/۵۰
-۰/۰۷	-۰/۹۰	-۰/۱۵	-۰/۶۲
-۰/۱۶۳	-۰/۴۹	۱/۴۳	-۰/۹۷
-۰/۱۶۴	-۰/۹۳	۱/۴۵	-۱/۵۷
-۰/۱۶۴	-۱/۱۰	۱/۴۴	-۱/۷۵



(الف)



(ب)

شکل ۱: محاسبه ضریب استوکیومتری واکنش جذب رنیوم (الف) رزین امبرلایت و (ب) رزین نوع پیورلایت.

جدول ۶: مقادیر m و K_{Cl}^{Re} برای رزین‌های مختلف.

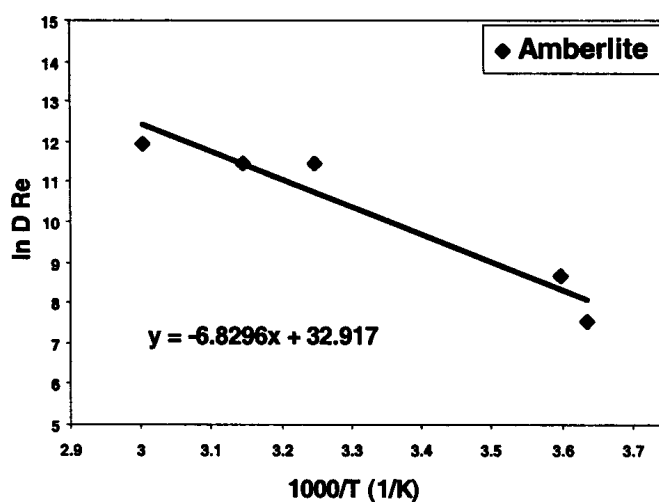
Amberlite		Purolite	
m	K_{Cl}^{Re}	m	K_{Cl}^{Re}
-۰/۱۶۵۳	۱/۳۹	-۰/۷۰۹۱	۲/۳۹

واکنش مبادله یونی در محدوده دمای مورد نظر، مقدار این کمیات را می‌توان بدست آورد. مقادیر این کمیات در جدول (۸) فهرست شده‌اند.

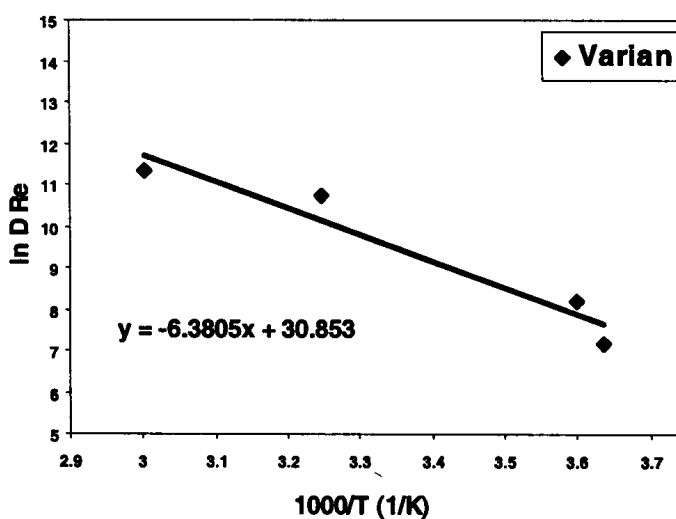
در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) تغییرات لگاریتم ضریب توزیع رنیوم بر حسب معکوس دما رسم شده‌اند. بنابراین، با فرض ثابت بودن کمیات ترمودینامیکی انتالپی و انتروپی

جدول ۷: ضریب توزیع رنیوم در دماهای مختلف.

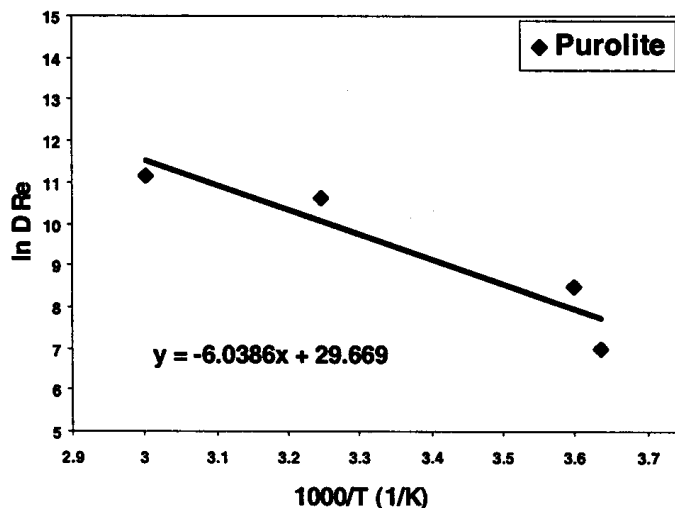
$\frac{1000}{T}$	$\ln D_{Re}$		
	Amberlite	Varion	Purolite
۳/۶۴	۷/۵۱	۷/۱۵	۶/۹۸
۳/۶۰	۸/۶۶	۸/۲۰	۸/۴۹
۳/۲۵	۱۱/۴۷	۱۰/۷۱	۱۰/۶۳
۳/۱۴	۱۱/۴۷		
۳/۰۰	۱۱/۹۲	۱۱/۳۲	۱۱/۱۵



شکل ۲: تغییرات ضریب توزیع رنیوم بر حسب معکوس دما برای رزین نوع امبرلایت.



شکل ۳: تغییرات ضریب توزیع رنیوم بر حسب معکوس دما برای رزین نوع واریان.



شکل ۴: تغییرات ضریب توزیع رنیوم بر حسب معکوس دما برای رزین نوع پیورلایت.

جدول ۸: کمیات ترمودینامیکی مبادله آنیون رنیوم با کلر.

نام رزین	$\Delta H_{app}^{\circ} (\frac{kJ}{mol})$	$\Delta S_{app}^{\circ} (\frac{kJ}{mol \cdot K})$	$\Delta G_{app}^{\circ} (\frac{J}{mol})$
Amberlite	۵۶/۷۸۱	۰/۲۷۴	۵۶/۷۸۱--۰/۲۷۴T
Varion	۵۳/۰۴۷	۰/۲۵۷	۵۳/۰۴۷--۰/۲۵۷T
Purolite	۵۰/۲۰۵	۰/۲۴۷	۵۰/۲۰۵--۰/۲۴۷T

جمع بندی

علی‌رغم اینکه در اکثر منابع ضریب استوکیومتری واکنش مبادله یونی یک در نظر گرفته شده، پس از بررسیهای مفصل معلوم شد که این ضریب حدود ۰/۶۵ است. علاوه بر ضریب استوکیومتری، ضریب تعادلی انتخابی بودن نیز برای دو رزین مختلف بدست آمد که نتایج در جدول (۷) ذکر شده‌اند. این نتایج نشان دهنده توان بالاتر رزین پیورلایت نسبت به امبرلایت برای جذب آنیون حاوی رنیوم بجای یون کلر است. کمیات ترمودینامیکی مبادله آنیون رنیوم با کلر نیز برای رزین‌های مختلف مطابق جدول (۸) بدست آمد. این کمیات برای طراحی و بهینه سازی سیستمهای مبادله یونی برای استخراج فلز با ارزش رنیوم کاربرد داشته و برای تعیین کمیات ترمودینامیکی تعادلی که از پیچیدگی قابل توجهی برخوردارند نیز قابل استفاده خواهد بود.

D: ضریب توزیع ($\frac{q}{C}$ یا $\frac{Q}{C_0}$)

K_a : ثابت تعادل ترمودینامیکی

K_C : ضریب انتخابی بودن

K_{MB}^A : ضریب تعادلی مولاری

K_B^A : ضریب تعادلی بر پایه غلظت‌های اکی‌والانی

q: غلظت رزین $\frac{keq}{m^3}$

q_m : غلظت رزین $\frac{kmol}{m^3}$

Q: ظرفیت کلی رزین

T: دما

x: کسر اکی‌والان در محلول

y: کسر اکی‌والان در رزین

α_B^A : فاکتور جدایش

γ : ضریب اکتیویته محلول

ρ : چگالی محلول $\frac{kg}{m^3}$

فهرست علائم

C: غلظت محلول $\frac{keq}{m^3}$

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 های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

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