



بررسی رفتار جذبی یون‌های ایتیریم (III) و استرانسیم (II) بر روی رزین آمبرلیت XAD-4 آغشته به استخراج‌کننده‌ی HDEHP در محیط‌های اسیدی

علیرضا خانچی*، اکرم پورماتین، ندا اکبری، محمدحسین مجربی تبریزی، امراه ابهری
پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: ایتیریم-۹۰ به عنوان یک بتاگسیل با انرژی بیشینه‌ی ۲/۳ MeV و به واسطه‌ی عمر طولانی مادر- هسته‌اش (استرانسیم-۹۰)، یکی از مهم‌ترین رادیونوکلیدهای مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای است. استفاده از ایتیریم به عنوان یک رادیودارو، مستلزم به کارگیری یک روش سریع و انتخابی برای جداسازی آن از مادر- هسته‌اش است. در این مقاله، رفتار جذبی یون‌های ایتیریم (III) و استرانسیم (II) بر روی رزین XAD-4 آغشته به بیس (۲-اتیل هگزیل) فسفات (HDEHP) در دو حالت پیوسته و ناپیوسته مورد بررسی قرار گرفته است. اثر زمان استخراج در محیط‌های مختلف، و اثر غلظت نیتریک و هیدروکلریک اسید بر میزان جذب و واجذب این یون‌ها بررسی شد. مدل‌های مختلف سینتیکی نیز به منظور تعیین سازوکار جذب ایتیریم مورد بررسی قرار گرفت. برای جداسازی ایتیریم از استرانسیم در محیط نیتریک اسید ۰/۰۵M، محلول شامل ۵ میلی‌گرم برلیتر ایتیریم و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر استرانسیم با آهنگ ۱ ml/min از ستون کروماتوگرافی عبور داده شد. تحت این شرایط در حالی که ایتیریم بر روی رزین نگه داشته شده بود، استرانسیم از ستون خارج و نسبت Y/Sr در محصول شویش برابر ۲۰۰ محاسبه شد. از نتایج حاصل می‌توان در جداسازی ایتیریم-۹۰ از استرانسیم-۹۰ استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: رزین آمبرلیت XAD-4، استخراج‌کننده‌ی HDEHP، ایتیریم، استرانسیم

Investigation of the Adsorption Behavior of Strontium (II) and Yttrium (III) on the Impregnated XAD-4 Resin with HDEHP in Acidic Media

A.R. Khanchi*, A. Pourmatin, N. Akbari, M.H. Mojarabi, A. Abhari

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Abstract: Yttrium-90 as a β emitting with the maximum energy of 2.3MeV, and due to the long half-life of its parent-strontium-90, is considered as one of the most important radionuclides in nuclear medicine. In this context, a highly selective and rapid method for the separation of ^{90}Y from its parent is required for its use in nuclear medicine. In this study, adsorption behavior of yttrium (III) and strontium (II) ions were studied on the Amberlite XAD-4 resin impregnated with (2-ethylhexyl) phosphate (HDEHP) by batch and continuous methods. The effects of extraction time in different media, nitric acid and hydrochloric acid concentrations on the sorption and desorption of ions were investigated. Different kinetic models were examined to determine the adsorption mechanism of yttrium. For the separation of yttrium from strontium in 0.05M nitric acid media, a solution containing 5ppm yttrium and 1000ppm strontium was passed with a flow rate of 1ml/min through a chromatography column. In this condition, while yttrium was retained by the resin, strontium passed through the column. A ratio of 200 was calculated for Y/Sr in eluate. The results of the present experiment can be used for separation of yttrium-90 from strontium-90.

Keywords: XAD-4 Resin, HDEHP, Yttrium, Strontium

*email: akhanchi@aeoi.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۳/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۴/۱۷



۱. مقدمه

ایتیریم عنصری تقریباً پایدار، از نظر شیمیایی شبیه لانتانیدها و دارای ۱۷ ایزوتوپ ناپایدار است که از میان آن‌ها ایتیریم-۹۰ در تعادل با استرانسیم-۹۰ (حاصل از فرایند شکافت اورانیم)، از اهمیت خاصی برخوردار است. ایتیریم-۹۰ یکی از رادیونوکلیدهای مهم در پزشکی هسته‌ای است که به طور گسترده در درمان بیماری‌های سرطانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. این رادیوایزوتوپ یک بتاگسیل با انرژی بیشینه 2.3MeV ، نیم-عمر نسبتاً کوتاه 64.1 ساعت است که برد پرتو بتای آن در بافت حداکثر 12mm است. به دلیل ناچیز بودن پرتو گامای ایتیریم-۹۰، استفاده از آن در دزهای بالا امکان‌پذیر شده است.

تاکنون تلاش‌هایی برای جداسازی ایتیریم از استرانسیم انجام شده که نتایج آن‌ها به صورت روش‌های مختلف گزارش شده است. این روش‌ها شامل الکترولیز، تبادل یون، استخراج با حلال، هم‌رسوبی و کروماتوگرافی استخراجی است [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸]. از محدودیت‌های روش هم‌رسوبی، تعداد زیاد مراحل و در نتیجه زمان‌بر بودن آن است، ضمن این‌که در این روش در صورت عدم استفاده از همراه‌بر^(۱) درصد بازیابی پایین است. از طرف دیگر استفاده از همراه‌بر شرایط کار را از جنبه‌ی پزشکی هسته‌ای دشوار می‌سازد [۹]. در روش‌های تبادل یون نیز درصد بازیابی عناصر در بیش‌تر موارد کم‌تر از روش کروماتوگرافی استخراجی است. روش الکترولیز از جنبه‌ی عملیاتی پیچیده و متکی بر دستگاه‌های الکترولیز است که این، شرایط کار را سخت‌تر از کروماتوگرافی استخراجی می‌کند.

کروماتوگرافی استخراجی نوع خاصی از کروماتوگرافی مایع-مایع است که از ترکیب هر دو روش استخراج با حلال و رزین‌های تبادل یون شکل گرفته است. اساس کروماتوگرافی استخراجی، رزین‌های آغشته به استخراج‌کننده است که در آن استخراج‌کننده به صورت یکنواخت در منافذ یک ماتریس پلی‌مری پخش می‌شود. یکی از اصول مهم در کار با رزین‌های آغشته به استخراج‌کننده این است که استخراج‌کننده باید به شدت جذب رزین شود. این عدم تحرک از تشکیل امولسیون در طول استخراج جلوگیری کرده و جداسازی را آسان‌تر می‌کند [۱۰]. رزین‌های با تخلخل بالا، با ساختار محکم سه بعدی، به واسطه‌ی مساحت سطح ویژه‌ی بالا، مناسب‌ترین شرایط برای پخش

یکنواخت مقادیر زیاد استخراج‌کننده را فراهم می‌کنند. آمبرلیت XAD-4 به دلیل دارا بودن مساحت سطح ویژه‌ی 150 تا $900\text{m}^2/\text{g}$ ، تخلخل 0.4 تا 0.6 ، قطر متوسط خلل و فرج 4 تا 9nm و حجم ویژه‌ی 0.6 تا $1/\text{cm}^3/\text{g}$ رزین مناسبی برای آغشته‌شدن است [۱۱].

در این پژوهش استخراج‌کننده‌ی بیس (۲- اتیل‌هگزیل) فسفات (HDEHP) برای آغشته‌سازی آمبرلیت XAD-4 به کار گرفته شد.

۲. بخش تجربی

۲.۱ واکنش‌گرها و مواد شیمیایی

نمک‌های استرانسیم نترات $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ و ایتیریم نترات $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ با خلوص تجزیه‌ای از شرکت مرک تهیه شدند. رزین آمبرلیت XAD-4 با ساختار شیمیایی استایرن دی‌وینیل‌بنزن در ابعاد 300 تا 850 میکرون از شرکت فلوکا تهیه و به کار برده شد. استرانسیم-۸۵ و ایتیریم-۸۸ به عنوان ردیاب به وسیله‌ی پژوهشکده‌ی تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج فراهم شدند.

۲.۲ دستگاه‌ها

طیف‌سنج نشری اتمی- پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP-AES) برای تعیین غلظت یون‌های ایتیریم و استرانسیم در نمونه‌های شبیه‌سازی شده به کار رفت. از پمپ Peristaltic به منظور کنترل سرعت عبور محلول از ستون در آزمایش‌های ستونی استفاده شد. برای اندازه‌گیری فعالیت پرتوزایی استرانسیم-۸۵ و ایتیریم-۸۸ از طیف‌سنج گامای مجهز به آشکارساز ژرمانیم فوق خالص (HPGe) بهره گرفته شد.

۲.۳ آماده‌سازی رزین آمبرلیت XAD-4

هدف از آماده‌سازی رزین، شستشوی آن به منظور حذف ناخالصی‌ها و باز کردن خلل و فرج داخل رزین است تا فرایند آغشته‌سازی به صورت مطلوب انجام شود. در مرحله‌ی شستشو ابتدا رزین چندین بار با متانول و آب شسته و در دمای 50°C خشک شد. آن‌گاه رزین با مقدار مشخصی از محلول استخراج‌کننده، HDEHP، و متانول به نسبت مساوی مخلوط شد. درصد وزنی استخراج‌کننده در رزین از اختلاف وزن رزین در قبل و بعد از آغشته‌شدن محاسبه شد.

۴.۲ آماده‌سازی ستون جداسازی

ستونی به ارتفاع ۱۵cm و قطر ۱/۵cm با رزین آغشته به استخراج کننده پر شد. یک تکه پشم شیشه به منظور جلوگیری از شناور شدن رزین (به دلیل چگالی پایین آن نسبت به آب) روی آن قرار داده شد. سپس رزین درون ستون با ۵۰ میلی‌لیتر نیتریک اسید ۰/۰۵M به تعادل رسید.

۵.۲ اندازه‌گیری درصد جذب در حالت ناپیوسته

برای اندازه‌گیری درصد جذب استرانسیم و ایتیریم در حالت ناپیوسته، ۱۰mL از محلول ۵ میلی‌گرم بر لیتر این عناصر با ۰/۱g رزین استخراجی در دمای ۲۵°C درون تکاننده^(۲) قرار گرفته و مقدار تعادلی این دو یون فلزی تعیین شد. درصد جذب از رابطه زیر محاسبه شد

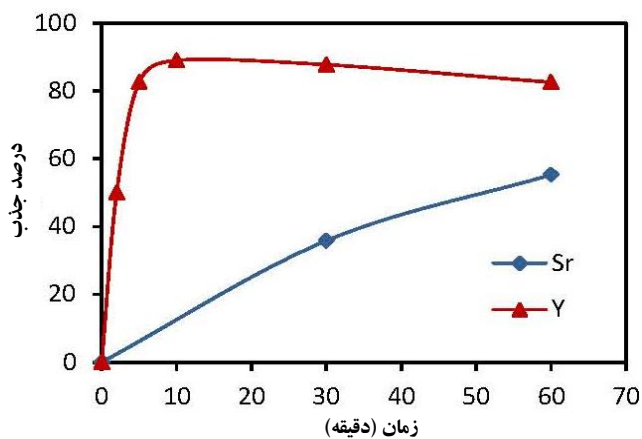
$$\text{Uptake\%} = \left[\frac{(C_o - C_e)}{C_o} \right] \times 100 \quad (1)$$

که در آن C_o و C_e به ترتیب، غلظت اولیه و تعادلی یون فلزی در فاز آبی است.

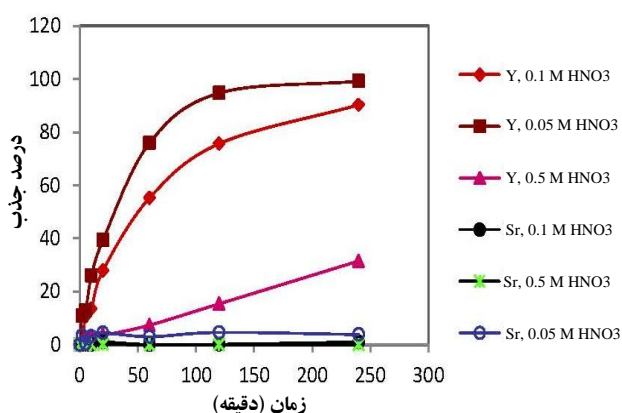
۳. نتایج و بحث

۱.۳ اثر زمان تماس روی جذب در محیط‌های مختلف

به منظور بررسی اثر زمان تماس روی جذب استرانسیم و ایتیریم در محیط‌های مختلف، ۱۰ml از محلول حاوی استرانسیم و ایتیریم به غلظت ۵ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به هر کدام در محیط‌های آبی، نیتریک اسید و هیدروکلریک اسید با ۰/۱g رزین استخراجی، در دمای ۲۵°C در زمان‌های مختلف در درون تکاننده قرار داده شد. تغییرات درصد جذب یون‌های فلزی استرانسیم و ایتیریم در محیط آبی برحسب زمان در شکل ۱ نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که جذب ایتیریم در محیط آبی به راحتی انجام پذیر است به طوری که تحت این شرایط حداکثر جذب آن در ۵ دقیقه اول حاصل می‌شود. تغییرات درصد جذب برحسب زمان در محیط نیتریک اسید در شکل ۲ نشان می‌دهد که در محیط ۰/۰۵ مولار نیتریک اسید، جذب ایتیریم در ۲ ساعت به بیشینه مقدار خود می‌رسد در صورتی که استرانسیم با روندی کندتر جذب رزین می‌شود. با افزایش غلظت نیتریک اسید از ۰/۰۵ به ۰/۱ مول بر لیتر این زمان افزایش می‌یابد که حاکی از آن است که غلظت اسید نقش مهمی روی سینتیک جذب دارد.



شکل ۱. تغییرات درصد جذب یون‌های ایتیریم و استرانسیم برحسب زمان تماس در محیط آبی.



شکل ۲. تغییرات درصد جذب یون‌های ایتیریم و استرانسیم برحسب زمان تماس در محیط نیتریک اسید.

تغییرات درصد جذب برحسب زمان در محیط هیدروکلریک اسید (شکل ۳) نشان می‌دهد که در محلول‌های ۰/۱ و ۰/۲ مول بر لیتر این اسید، میزان جذب استرانسیم بر روی رزین، از میزان جذب آن در محیط نیتریک اسید بیش‌تر است.

مقایسه‌ی جذب استرانسیم در این سه محیط، نشان‌دهنده‌ی آن است که استرانسیم در هر دو محیط آبی و هیدروکلریک اسید بیش‌تر از محیط نیتریک اسید جذب رزین می‌شود. بنابراین در محیط‌های آبی و هیدروکلریک اسید، جداسازی این دو یون به نحو مطلوب انجام نخواهد شد. لذا از نیتریک اسید برای واجذب یون‌های استرانسیم جذب شده بر روی رزین استفاده شد.

۲.۳ اثر غلظت نیتریک اسید

تغییرات درصد جذب ایتیریم در محلول‌های ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۵ مولار نیتریک اسید در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل

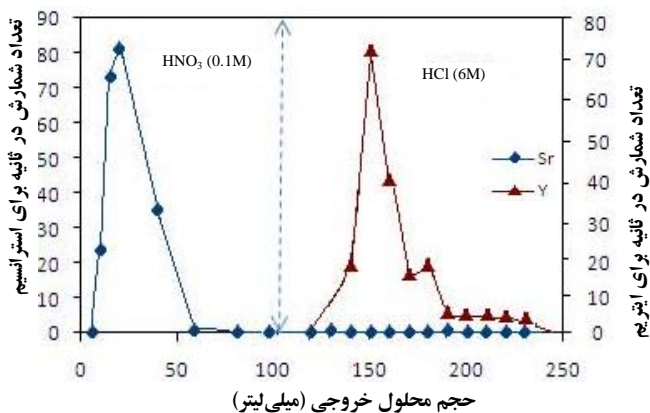


با توجه به رابطه‌ی (۲) با افزایش قدرت اسیدی، واکنش به سمت چپ جابه‌جا و از تشکیل کمپلکس ایتريم جلوگیری می‌شود. بنابراین، جذب با افزایش قدرت اسیدی کاهش می‌یابد.

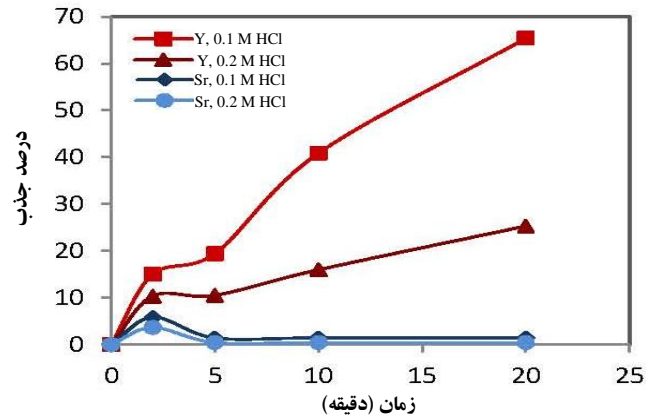
۳.۳ جداسازی Y^{3+} و Sr^{2+} با استفاده از روش پیوسته

در جداسازی به روش پیوسته، به ۲۰ میلی‌لیتر محلول حاوی ۱۰۰۰ ppm استرانسیم و ۵ ppm ایتريم در محیط نیتريك اسید ۰٫۰۵M، ۵۰ میکرولیتر ردیاب استرانسیم-۸۵ و ایتريم-۸۸ اضافه و با سرعت ۱ml/min، از یک بستر ثابت حاوی ۷g رزین در یک ستون عبور داده شد. در این مرحله ایتريم از طریق تشکیل کمپلکس با استخراج‌کننده، روی رزین تثبیت شد در حالی که استرانسیم از ستون خارج شد. برای خروج استرانسیم باقی‌مانده از بستر رزین، ۵۰ میلی‌لیتر محلول نیتريك اسید ۰٫۰۵M استفاده شد. با توجه به پایدار بودن کمپلکس ایتريم با استخراج‌کننده‌ی HDEHP، واجذب آن مستلزم استفاده از غلظت‌های بالای اسید بود. بنابراین، طبق جدول ۱ محلول‌هایی با غلظت‌های مختلف هیدروکلريك و نیتريك اسید برای واجذب ایتريم مورد بررسی قرار گرفت. بهترین نتایج با هیدروکلريك اسید ۶ مولار به دست آمد. با توجه به این که در محیط‌های با قدرت اسیدی بالا امکان وارد شدن آسیب به ستون نامحتمل نبود، لذا از آزمایش در این محیط‌ها صرف نظر شد.

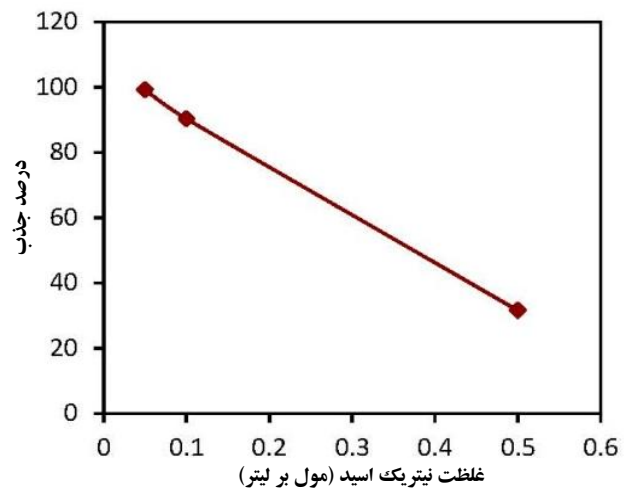
با نمونه‌برداری از حجم‌های مختلف محلول خروجی منحنی جداسازی برای این دو یون رسم شد (شکل ۵). نسبت ایتريم به استرانسیم در محصول شویش برابر ۲۰۰ به دست آمد.



شکل ۵. جداسازی یون‌های استرانسیم و ایتريم در روش پیوسته با نرخ جریان خوراک یک میلی‌لیتر بر دقیقه.



شکل ۳. تغییرات درصد جذب یون‌های ایتريم و استرانسیم بر حسب زمان تماس در محیط هیدروکلريك اسید.



شکل ۴. رابطه‌ی بین درصد جذب یون ایتريم و غلظت نیتريك اسید.

به وضوح دیده می‌شود که با افزایش غلظت اسید، جذب ایتريم به شدت کاهش می‌یابد. این پدیده را می‌توان به اثر یون مشترک نترات در تشکیل کمپلکس استرانسیم و ایتريم و هم‌چنین پروتونه شدن لیگاند HDEHP به وسیله‌ی نیتريك اسید و در نتیجه کاهش اثرات متقابل با رزین نسبت داد. واکنش استخراج ایتريم به وسیله‌ی HDEHP را می‌توان چنین نوشت [۱۲]



که در آن HA نماینده‌ی استخراج‌کننده‌ی HDEHP است که با کاتیون ایتريم تشکیل کمپلکس می‌دهد.



جدول ۱. درصد واجذب یون‌های ایتريم با نیتريك و هیدروكلريك اسيد با غلظت‌های مختلف

HNO ₃				HCl				اسيد
غلظت				غلظت				غلظت
(مول بر ليتر)				(مول بر ليتر)				(مول بر ليتر)
۶	۵	۳	۱	۶	۵	۳	۱	درصد واجذب
۵۱,۸۴	۳۵,۰۹	۲۰,۴۲	۵,۵۶	۸۳,۳۴	۶۳,۲۶	۳۵,۳۸	۱۵,۲۵	Y(III)

۴.۳ سازوکار جذب

که در آن X ، کسر دست‌یابی به تعادل^(۶)، و k به ترتیب، به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$X = \frac{\text{میزان جذب کاتیون در لحظه } t}{\text{میزان جذب تعادلی کاتیون}} \quad (۴)$$

$$k = \frac{D_r \pi^2}{r_o^2} \quad (۵)$$

که در آن، D_r ضریب نفوذ در داخل فاز جامد برحسب $(m^2 s^{-1})$ و r_o شعاع ذره برحسب m است. و اگر نفوذ در لایه‌ی نازک اطراف رزین، تعیین‌کننده‌ی سرعت باشد از رابطه زیر استفاده می‌شود

$$-\ln(1-X) = k_{li} t \quad (۵)$$

که k_{li} در آن به صورت زیر تعریف می‌شود

$$k_{li} = \frac{3D_o C}{r_o \delta C_r} \quad (۶)$$

که در آن، D_o ضریب نفوذ در فاز محلول برحسب $m^2 s^{-1}$ و δ ضخامت لایه‌ی نازک اطراف رزین برحسب m ، C_r و C به ترتیب، غلظت گونه در محلول و در رزین است.

برای ایتريم و استرانسیم منحنی‌های $-\ln(1-X)$ و $-\ln(1-X^2)$ برحسب زمان در شکل ۶ رسم شده‌اند. همان‌طور که از این شکل دیده می‌شود مرحله‌ی کنترل‌کننده‌ی فرایند جذب ایتريم، نفوذ در لایه‌ی نازک است.

۲.۴.۳ مدل هسته‌ی انقباضی

مدل هسته‌ی انقباضی توسط باندارى برای سیستم تبادل یون توسعه داده شد [۱۵]. از این مدل برای توصیف جذب یون‌های فلزی روی رزین‌های آمبرلیت XAD آغشته به استخراج‌کننده‌ی HDEHP استفاده شده است [۱۶]. زمانی که اندازه‌ی منافذ پلی‌مر کوچک باشد برای واکنش‌دهنده عملاً غیرقابل نفوذ می‌شود، لذا واکنش از مدل هسته‌ی انقباضی پیروی می‌کند.

برای شناخت سازوکار جذب، مدل‌های مختلف سینتیکی بررسی شد. واکنش استخراج یون‌های فلزی با رزین‌های آغشته شده، واکنش‌های ناهمگن بین دو فاز جامد و مایع هستند. یکی از عوامل مؤثر بر سرعت این واکنش‌ها، پدیده‌ی نفوذ است که می‌تواند به صورت یکی از مراحل زیر تعیین‌کننده‌ی سرعت واکنش باشد:

- نفوذ یون در فیلم مایع اطراف ذره‌ی رزین،
- نفوذ یون در ماتریس پلی‌مری رزین.

یکی از این مراحل که معمولاً مقاومت بیش‌تری دارد می‌تواند به عنوان مرحله‌ی تعیین‌کننده‌ی سرعت واکنش در نظر گرفته شود. زمانی که هم‌رفت در محلول ناچیز و یا پیوندهای عرضی در پلی‌مر کم است، مقاومت در برابر نفوذ در فاز مایع کم‌تر است ولی زمانی که پیوندهای عرضی زیاد باشد رزین‌ها به صورت پیوسته‌اند و انتقال جرم به داخل ذرات مشکل‌تر انجام می‌شود.

دو مدل به طور گسترده برای بررسی سینتیک واکنش مورد

استفاده قرار گرفت

- مدل نفوذ ذره‌ی همگن^(۳)

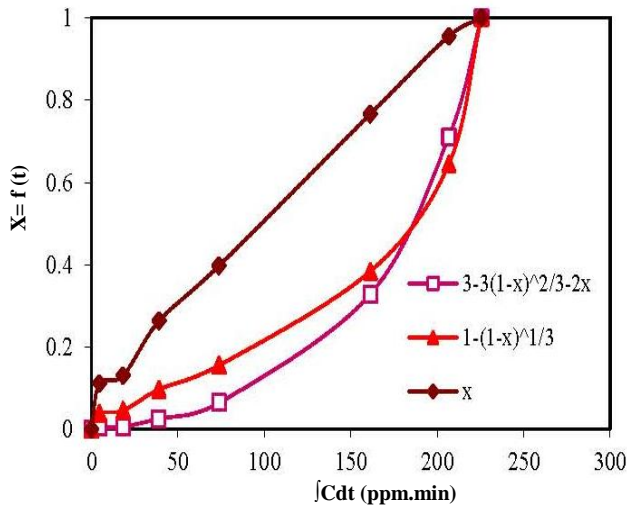
- مدل پیشرو پسته‌ای^(۴) یا مدل هسته‌ی انقباضی^(۵)

۱.۴.۳ مدل نفوذ ذره‌ی همگن

در این مدل، گونه‌ها ابتدا با نفوذ از فاز محلول در لایه‌ی نازک اطراف رزین آغشته شده به استخراج‌کننده، به سطح ذره منتقل و سپس به درون رزین آغشته شده نفوذ کرده و با مولکول‌های استخراج‌کننده برهم‌کنش می‌کنند.

این مدل برای نفوذ گونه‌ها در محیط شبه‌همگن به کار می‌رود. نفوذ گونه‌ها از محلول به درون ذرات کروی اگر فاز رزین آن را کنترل کند به صورت زیر توصیف می‌شود [۱۳، ۱۴]

$$-\ln(1-X^2) = 2kt \quad (۳)$$



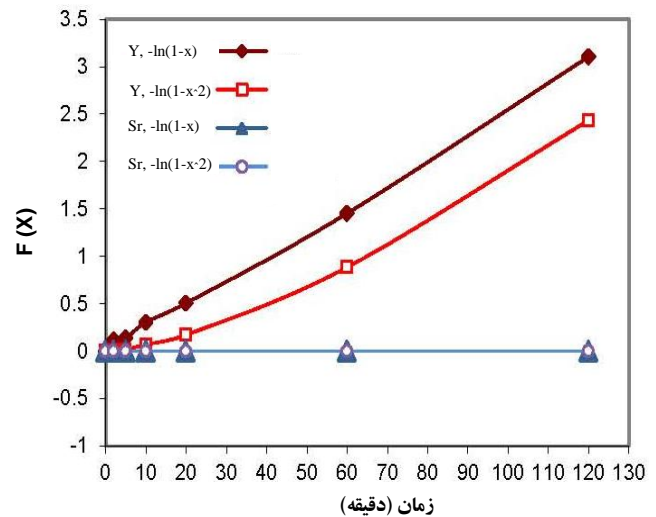
شکل ۷. رابطه‌ی بین کسر دست‌یابی به تعادل و زمان برای ایتیریم در مدل هسته‌ی انقباضی.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های روش ناپیوسته نشان داد که رزین آمبرلیت XAD-4 آغشته به استخراج‌کننده‌ی HDEHP، توانایی جداسازی جذبی ایتیریم و استرانسیم را دارد. بررسی اثر زمان تعادل در محیط‌های آبی و اسیدی نشان داد که با افزایش مقدار اسید، سینتیک واکنش کندتر می‌شود. ولی از آن‌جا که در محیط‌های آبی و هیدروکلریک اسید استرانسیم نیز به همراه ایتیریم جذب رزین می‌شود لذا محیط نیتریک اسید برای جداسازی ایتیریم از استرانسیم انتخاب شد. علاوه بر این بررسی اثر غلظت نیتریک اسید نشان داد که با افزایش غلظت نیتریک اسید، جذب ایتیریم کاهش می‌یابد. لذا محیط ۰٫۰۵ مول بر لیتر نیتریک اسید برای جداسازی ایتیریم و استرانسیم استفاده شد.

بررسی سینتیکی نشان داد که طبق هر دو مدل سینتیکی بررسی شده (مدل هسته‌ی انقباضی و مدل نفوذ ذره‌ی همگن) مرحله‌ی کنترل‌کننده‌ی سرعت برای جذب ایتیریم نفوذ در لایه‌ی نازک است.

آزمایش‌های جذب پیوسته نشان داد که استرانسیم در همان مراحل اولیه از ستون خارج ولی ایتیریم جذب رزین شد. بنابراین، با توجه به مقدار به دست آمده برای نسبت Y/Sr در محصول شویش، جداسازی ایتیریم از استرانسیم از طریق کروماتوگرافی استخراجی امکان‌پذیر است و از این روش می‌توان در جداسازی ایتیریم - ۹۰ از استرانسیم - ۹۰ استفاده کرد.



شکل ۶. نمودار تغییرات تابع $F(X)$ با زمان در مدل نفوذ ذره‌ی همگن.

رابطه‌ی کسر دست‌یابی به تعادل با زمان چنین است

$$X = \frac{\rho D}{C_r R \delta} \int_0^t C dt \quad (8)$$

اگر فیلم مایع یا لایه‌ی نازک کنترل‌کننده‌ی سرعت باشد،

$$3 - 3(1-x)^{2/3} + 2(1-x) = \frac{\rho D_e}{C_r R \rho} \int_0^t C dt \quad (9)$$

اگر نفوذ درون ذره‌ی کنترل‌کننده‌ی سرعت باشد،

$$1 - (1-x)^{1/3} = \frac{K}{\rho R} \int_0^t C dt \quad (10)$$

اگر جذب شیمیایی کنترل‌کننده‌ی سرعت باشد.

در روابط بالا، C غلظت M^{n+} (ppm) در زمان t ، C_r غلظت جای‌گاه‌های فعال (ppm)، D ضریب نفوذ کاتیون در محلول ($cm^2 min^{-1}$)، D_e ضریب نفوذ مؤثر کاتیون در رزین آغشته به استخراج‌کننده ($cm^2 min^{-1}$)، K ثابت سرعت ($mmol min^{-1}$)، t زمان (ثانیه)، R شعاع دانه‌های رزین (cm) و ρ چگالی رزین آغشته به استخراج‌کننده ($g cm^3$) است.

منحنی‌های تغییرات $X=f(t)$ برای ایتیریم در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی تغییرات X برحسب $\int_0^t C dt$ به خطی است که این، بیان‌گر آن است که نفوذ در لایه‌ی نازک، مرحله‌ی تعیین‌کننده‌ی سرعت است.



پی‌نوشت‌ها:

1. Carrier
۲. Shaker
۳. Homogeneous Particle Diffusion Model
۴. Shell Progressive Model
۵. Shrinking Core Model
۶. Fractional Attainment of Equilibrium

تشکر و قدردانی

بدین وسیله بر خود لازم می‌دانیم از همکاری صمیمانه‌ی جناب آقای دکتر ابودزاده که نمونه‌ی استرانسیم-۸۵ و ایتیریم-۸۸ را از پژوهشکده کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج تهیه نمودند و هم‌چنین از دیگر دوستانی که در این کار ما را یاری رساندند به ویژه سرکار خانم صرفی و آقایان دکتر قنادی، دکتر احمدی و دکتر میلانی، تشکر و قدردانی نماییم.

مرجع‌ها:

1. Thomas E. Witzig, Leo I. Gordon, Fernando Cabanillas, Myron S. Czuczman, Randomized controlled trial of Yttrium-90-Labeled ibritumomab tiuxetan radioimmunotherapy versus rituximab immunotherapy for patients with relapsed or refractory low-grade, follicular, or transformed B-cell non-hodgkin's lymphoma, *J. Clinical Oncology*, 20 (10) (2002) 2453-2463.
2. D.F. Peppard, G.W. Mason, S.W. Moline, The use of dioctyl phosphoric acid extraction in the isolation of carrier-free ^{90}Y , ^{140}La , ^{144}Ce , ^{143}Pr , and ^{144}Pr , *J. Inorg. Nucl. Chem*, 5 (1957) 141-146.
3. M.Y. Mirza, A new method for the carrier-free production of ^{90}Y from ^{90}Sr - ^{90}Y mixture and ^{89}Sr from neutron-irradiated Y_2O_3 , *J. Analytica Chimica Acta*, 40 (1968) 229-233.
4. G. Barrio, J.A. Osso Junior, Development of ^{90}Sr - ^{90}Y generators using the cation exchange technique, *J. Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 54 (2010) 73-74.
5. T. Kawashima, Separation of carrier-free ^{90}Y from ^{90}Sr by cation exchange in a methanol-ammonium acetate medium, *J. Appl. Radiation Isotopes* 20 (1969) 806-808.
6. J. Korkisch, *Handbook of ion exchange resins*, crc Press, Boca Raton (1989).
7. Y. Koda, Separation of pure ^{90}Y from a ^{90}Sr - ^{90}Y mixture by co-precipitation with ferric hydroxide, *J. Inorganic and Nuclear Chemistry*, 25(6) (1963) 733-734.
8. S. Dutta, P.K. Mohapatra, D.R. Raut, V.K. Manchanda, Chromatographic separation of carrier free ^{90}Y from ^{90}Sr using a diglycolamide based resin for possible pharmaceutical applications, *J. Chromatogr. A*, 1218(37) (2011) 6483-8.
9. G.E. Kodina, G.V. Korpusov, A.T. Filyanin, Production of high-purity ^{90}Y on specially developed centrifugal semicounterflow extractors, 44(1) (2002) 62-66.
10. A. Warshawsky, Extraction with solvent-impregnated resin, *Ion Exchange and Solvent Extraction*, 18 (1981) 229.
11. G.A. Juang, Synthetic polymers for accumulation organic compounds from water, *Organic Pollutants in Water. J. Sampling Analysis and Toxicity*, 214 (1987) 201.
12. J. Kraikaew, W. Srinuttrakul, C. Chayavadhanakur, Solvent extraction study of rare earths from nitrate medium by the mixtures of TBP and D_2EHPA in kerosene, *J. Metals, Materials and Minerals*, 15 (2005) 89-95.
13. L. Liberti, R. Passino, Ion-exchange and solvent extraction, 7(3) (1977).
14. F. Helfferich, *Ion-exchange*, McGraw-Hill, New York, USA (1962).
15. V.M. Bhandari, V.A. Juvekar, S.R. Pathwardhan, Modified shrinking core model for reversible sorption on ion-exchange resins, *J. Sep. Sci. Technol.* 27 (1992) 1043-1064.
16. R.S. Juang, H.C. Lin, Metal sorption with extractant-impregnated macroporous resins, *Particle Diffusion Kinetics, J. Chem. Tech. Biotechnol.* 62 (1995) 132-140.