



بررسی پارامترهای مؤثر بر استخراج حلالی ایتربیم (Yb) از محلول فروشویی کانسنگ آنومالی ۵ ساغند

محمود عبداللهی^۱، سعید علمدارمیلانی^{۲*}، محمدجواد کلینی^۱، محمدرضا صمدزاده یزدی^۱

۱- گروه فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۱۴۳-۱۴۱۱۵، تهران - ایران
۲- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: در این پژوهش، استحصال و پرعیارسازی Yb(III) از محلول فروشویی کانسنگ آنومالی ۵ ساغند با استفاده از D₂EHPA به عنوان استخراج کننده‌ی آلی و کروژین به عنوان رقیق کننده، و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی نمونه‌های کانسنگ آنومالی ۵ معدن ساغند نشان داد که علاوه بر اورانیم و توریم، عناصر بسیار با ارزش نادر خاکی نیز در این کانسنگ موجود می‌باشند و با توجه به محاسبات انجام شده ارزش ریالی عناصر نادر خاکی موجود در این منطقه بیش از ۲۰ برابر ارزش اورانیم و توریم است. استخراج ایتربیم و سایر عناصر موجود در محلول فروشویی در pHهای مختلف بررسی شد و مشخص گردید که با افزایش pH، میزان استخراج این عناصر افزایش می‌یابد. میزان استخراج ایتربیم، اورانیم، لانتانیم، ایتربیم، سریم و آهن در pH=۲، به ترتیب، برابر ۹۹٫۹، ۸۳، ۱۳٫۵، ۹۹٫۸، ۸٫۵ و ۲۷٫۴ درصد به دست آمد. بررسی تأثیر افزایش نسبت حجمی دو فاز آبی به آلی (A/O) نشان داد که با افزایش این نسبت، میزان استخراج عناصر همراه ایتربیم بیش از خود ایتربیم کاهش می‌یابد. بنابراین از این امر می‌توان برای جدایش مطلوب ایتربیم بهره جست. با استفاده از نمودار مکعب-تیلی با A/O=۹ و در pH=۲ تعداد مراحل نظری استخراج برابر ۲ به دست آمد. در نهایت، استریپ فاز آلی با استفاده از غلظت‌های مختلف نیتریک اسید مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: ایتربیم، عناصر نادر خاکی، کانسنگ آنومالی ۵ ساغند، استخراج با حلال، D₂EHPA

Study of Parameters Affecting the Extraction of Ytterbium from Anomaly No.5 of Saghand Ore Leach Solution

M. Abdollahy¹, S. Alamdar Milani^{2*}, M.J. Koleini¹, M.R. Samadzadeh Yazdi¹

1- Mineral Processing Group, Department of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, P.O.Box: 14115-143, Tehran - Iran
2- Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Abstract: Extraction of ytterbium from anomaly No.5 of Saghand leach solution using D₂EHPA as extractant, kerosene as a diluent, and optimization of the effective parameters were investigated. In addition to uranium and thorium, rare earths elements also exist in Saghand ore. The effect of pH on the extraction of Yb and other existing elements shows that their extractions increase by increasing pH. The extraction of Yb, U, La, Y, Ce and Fe in pH=2 were 99.9, 83, 13.5, 99.8, 8.5 and 27.4%, respectively. The increasing of the A/O ratio decreases the extraction of other elements more than Yb where it resulted in the increasing of the Yb separation. The theoretical number of extraction stages were determined in pH=2 and A/O=9 using McCabe-Thiele diagram. Stripping of the organic phase was also carried out by different concentrations of nitric acid.

Keywords: Ytterbium, Rare Earths Elements, Saghand Ore, Solvent Extraction, D₂EHPA

*email: salamdar@aeoi.org.ir



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، جداسازی و پرعیارسازی عناصر نادر خاکی با افزایش تقاضا برای این عناصر و ترکیب‌های آن‌ها، اهمیت زیادی یافته است. عناصر نادر خاکی، به عناصر گروه لانتانیدها و دو عنصر ایتیریم و اسکاندیم اطلاق می‌شود. از این جهت به این عناصر نادر خاکی گفته می‌شود که اکسیدهای تشکیل‌دهنده آن‌ها دارای ظاهری خاکی (زمینی) هستند. اگر چه به این عناصر نادر یا کم‌یاب گفته می‌شود، اما در حقیقت کم‌یاب نیستند و در پوسته زمین فراوان‌تر از خیلی دیگر از عناصر چون طلا، نقره، پلاتین، و ... هستند. از آن جا که این عناصر دارای خواص فیزیکی، شیمیایی، و هسته‌ای منحصر به فرد هستند و هم‌چنین مصرف آن‌ها در بسیاری از موارد منحصر به فرد است، و نیز با توجه به محدود بودن ذخایر قابل استخراج آن‌ها، قیمت این عناصر بیش از هر زمان دیگر نمود پیدا کرده است [۱].

قیمت این عناصر بسیار با ارزش از ۲۳ دلار بر کیلوگرم برای سریم تا ۳۵۰۰ دلار بر کیلوگرم برای لوتسیم در نوسان می‌باشد [۲].

متالورژی آهنی و غیرآهنی، انرژی اتمی، لیزر، تولید شیشه و سرمایه‌گذاری، صنایع شیمیایی، داروسازی و کشاورزی از مهم‌ترین موارد مصرف لانتانیدها است [۳ و ۴]. کاربرد این عناصر در صنعت هسته‌ای نسبتاً متنوع است. اسکاندیم و اوروپیم به عنوان جاذب نوترون، دیسپروسیم برای اندازه‌گیری شار نوترون، گادولینیم در حفاظ نوترون، اریتم در کنترل هسته‌ای و ایتیریم و لوتسیم با کاربردهای مشابه در فن‌آوری هسته‌ای مصرف می‌شوند. اکسید ایتیریم می‌تواند به عنوان ماده‌ی اولیه در تولید رادیوداروی لوتسیم-۱۷۷ از طریق پرتودهی نوترونی در رآکتور مورد استفاده قرار گیرد. این رادیودارو برای درمان دردهای استخوانی، تومورهای کوچک و متاستازها به کار می‌رود [۵] و ایتیریم در فیبرهای تقویت‌کننده‌ی برق، فیبر نوری، آماده‌سازی لیزرهای صنعتی و ابررساناهای مغناطیسی کاربرد فراوان دارد. مقاومت الکتریکی فلز ایتیریم در مقابل تنش خیلی زیاد، افزایش می‌یابد و به خاطر این ویژگی است که از آن در تنش‌سنج‌ها برای کنترل جابه‌جایی زمین در هنگام زمین لرزه استفاده می‌شود [۷].

کانسنگ آنومالی ۵ ساغند حاوی عناصر نادر خاکی نیز می‌باشد که مهم‌ترین آن‌ها از نظر فراوانی، لانتانیم، سریم، ایتیریم، نئودیمیم، دیسپروسیم و ایتیریم هستند. این کانسنگ از نظر عناصر

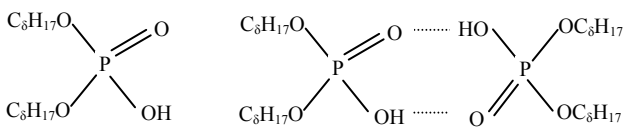
اورانیم، توریم و عناصر نادر خاکی حایز اهمیت است [۸]. روش متداول برای استخراج اورانیم، توریم و عناصر نادر خاکی، فروشویی اسیدی و سپس استخراج اورانیم با حلال‌های آلی و یا رزین‌های تبادل یونی است. عناصر نادر خاکی از محلول‌های فروشویی به عنوان محصول جنبی استخراج می‌شوند [۹].

فرآوری کانی‌های عناصر نادر خاکی شامل چهار مرحله‌ی خریدایش، تغلیظ، فروشویی و در نهایت تخلیص و رسوب‌گیری است. روش استخراج با حلال‌های آلی، یک فرایند شیمیایی است که برای تخلیص محلول‌های فروشویی به کار می‌رود. در تحقیقی که برای مقایسه‌ی استخراج ایتیریم از محلول سولفوریکی ساختگی با استفاده از استخراج‌کننده‌های مختلف انجام شد مشخص گردید که قابلیت استخراج ایتیریم با استخراج‌کننده‌های مورد بررسی، به ترتیب، $D_2EHPA < Cyanex-301 < Cyanex-272 < Cyanex-921 < TBP$ کاهش می‌یابد [۱۰].

D_2EHPA یک استخراج‌کننده‌ی معروف از گروه اسیدهای ارگانوفسفری است و از این رو براساس روش تبادل کاتیونی استخراج می‌کند. این ماده یک استخراج‌کننده‌ی اسیدی بسیار قوی است که معمولاً در محیط‌های سولفوریکی کاربرد دارد و برای استخراج بسیاری از عناصر چون اورانیم، وانادیم، روی، مس، آهن، عناصر نادر خاکی و دیگر فلزات گران‌بها به کار می‌رود. تمایل این استخراج‌کننده برای عناصر نادر خاکی با افزایش عدد اتمی (و کاهش شعاع یونی) افزایش می‌یابد. بنابراین تمایل آن برای ایتیریم بسیار زیاد می‌باشد. ساختار مولکولی D_2EHPA در شکل ۱ نشان داده شده است [۷، ۱۱ و ۱۲].

مولکول‌های D_2EHPA در کروازین معمولاً به صورت دایمر ظاهر می‌شوند. شکل ۲ چگونگی استخراج یک کاتیون سه ظرفیتی با دایمر D_2EHPA را نشان می‌دهد.

این استخراج از معادله‌ی زیر پیروی می‌کند [۱۲]



شکل ۱- ساختار مولکولی D_2EHPA (چپ: منومر، راست: دایمر) [۱۱].

استفاده از یک مرحله میز لرزان پرعیارسازی شد. نتایج تجزیه‌ی عنصری نمونه‌ی به دست آمده از پرعیارسازی با میز لرزان، با استفاده از تکنیک XRF، در جدول ۱ آورده شده است. عنصر ایتربیم به علت غلظت پایینش با این تکنیک قابل اندازه‌گیری نبود.

عملیات هضم^(۲) نمونه‌ی خاک در شرایط بهینه‌ی به دست آمده از تحقیق‌های گذشته [۱۵]، یعنی در دمای ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، با غلظت ۱۰/۸ مول در لیتر سولفوریک اسید، برای مدت زمان ۲ ساعت، با نسبت مایع به جامد ۳ و غلظت ۵/۳ مول در لیتر نیتریک اسید، در یک راکتور با گلوله‌های از جنس استیل برای به هم‌زدن در حین هضم انجام شد. محصول به دست آمده، جامدی با بنیان سولفات‌ها بود که تحت عملیات فروشویی با آب قرار گرفت. غلظت عناصر موردنظر در محلول فروشویی به دست آمده، در جدول ۲ داده شده است.

محلول فروشویی با استفاده از آمونیم هیدروکسید تغییر pH داده شد و برای آزمایش‌های استخراج مورد استفاده قرار گرفت. استخراج‌کننده‌ی D_۷EHPA با جرم مولی ۳۲۲/۴۳ گرم بر مول و چگالی ۰/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، با خلوص آزمایشگاهی و از شرکت مرک آلمان تهیه شد. تمامی آزمایش‌ها با مخلوط کردن ۲۰ میلی‌لیتر از فاز آبی با همین حجم از فاز آلی در دمای محیط و با زمان تماس ۳۰ دقیقه بین دو فاز آبی و آلی انجام شدند. از کروزمین به عنوان رقیق‌کننده استفاده شد و غلظت استخراج‌کننده در رقیق‌کننده ۰/۱ مول بر لیتر بود (زمان تماس دو فاز و غلظت استخراج‌کننده در فاز آلی بر طبق نتایج تحقیق بر روی محلول ساختگی تعیین شدند [۱۰]). مقادیر عناصر موردنظر در فاز آبی در بعد از هر آزمایش توسط پلاسما‌ی جفت‌شده‌ی القایی^(۳) اندازه‌گیری و درصد استخراج آن‌ها محاسبه گردید.

جدول ۱- نتایج تجزیه‌ی عنصری نمونه‌ی معرف تهیه شده از آنومالی ۵

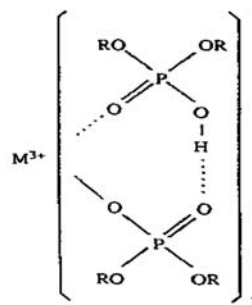
ساغند، با استفاده از تکنیک XRF

غلظت	ترکیب	غلظت	ترکیب	غلظت	ترکیب	غلظت	ترکیب
۸۰۰ppm	Nb ₂ O ₅	۶۰۰ppm	SrO	۰/۶٪	Cr ₂ O ₃	۴۶/۸٪	SiO ₂
۶۰۰ppm	BaO	۶۰۰ppm	ZnO	۰/۳٪	MnO	۱۶/۵٪	CaO
۱/۴٪	La ₂ O ₃	۹۵۰ppm	ZrO ₂	۰/۶٪	P ₂ O ₅	۱۱/۰٪	Fe ₂ O ₃
۱/۵٪	Ce ₂ O ₃	۰/۲٪	PbO	۰/۶٪	Y ₂ O ₃	۹/۱٪	TiO ₂
		۰/۱٪	ThO ₂	۰/۱٪	K ₂ O	۶/۲٪	MgO
		۰/۱٪	U ₂ O ₇	۰/۱٪	SO ₂	۳/۷٪	Al ₂ O ₃
		۶۰۰ppm					

جدول ۲- غلظت بعضی از عناصر در محلول فروشویی نمونه‌ی معرف

آنومالی ۵ ساغند

غلظت (ppm)	Fe	Yb	Y	Ce	La	U
۸۳۰	۸۰	۱۰۹۰	۱۰۸۰	۱۲۹۰	۲۴۳	

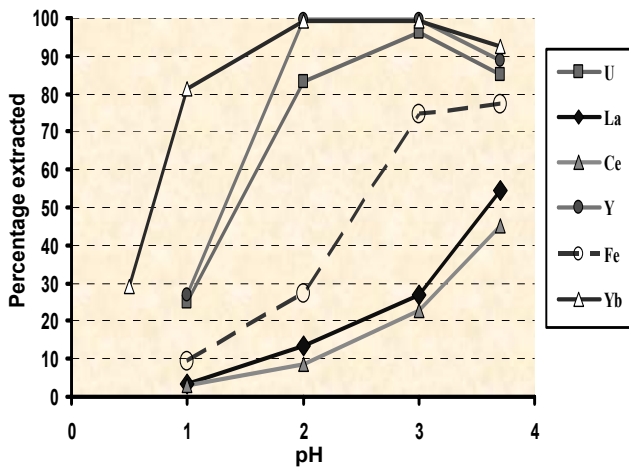


شکل ۲- استخراج کاتیون‌های سه ظرفیتی با دایمر D_۷EHPA.

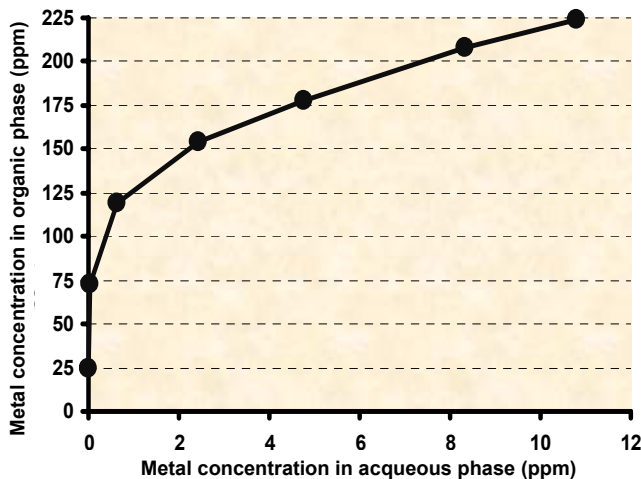
در این تحقیق استخراج ایتربیم از محلول فروشویی کانسنگ آنومالی ۵ ساغند با استفاده از استخراج‌کننده‌ی آلی D_۷EHPA در رقیق‌کننده‌ی کروزمین مورد مطالعه قرار گرفته است. استخراج بعضی از عناصر همراه (U, Fe, La, Ce, Y) موجود در این محلول نیز بررسی شده است. لازم به ذکر است که، همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در این جا عناصر نادر خاکی به عنوان محصول جنبی اورانیم و توریم موردنظر هستند. اورانیم و توریم را قبل از استخراج عناصر نادر خاکی می‌توان به روش استخراج با حلال، تبادل یونی و یا رسوب‌گیری از محلول فروشویی خارج نمود [۷ و ۹]. تحقیق انجام شده نشان داده است که ۹۳٪ اورانیم موجود در محلول فروشویی آنومالی ۵ ساغند با استفاده از استخراج‌کننده‌ی آلامین ۳۳۶ قابل استخراج است [۱۳]. از طرف دیگر محصول استخراج حلالی عناصر نادر خاکی، در مرحله‌ی بعدی باید با استفاده از کروماتوگرافی تبادل یون، مورد تصفیه و جداسازی نهایی قرار گیرد. بررسی استخراج عناصر همراه در این تحقیق با هدف مقایسه با استخراج ایتربیم انجام شده است تا شرایط مناسب جهت جداسازی بهتر به دست آید.

۲- مواد، تجهیزات و روش کار

میزان ۴۵ کیلوگرم نمونه‌ی معرف از منطقه‌ی ساغند (آنومالی ۵) تهیه شد. به منظور انجام مراحل پیش تغلیظ و جدایش فیزیکی کانی‌ها، عملیات خردایش، تجزیه‌ی سرندی، جدایش ثقلی و الکترواستاتیکی بر روی این نمونه انجام شد. برای این منظور، نمونه‌ی معرف با استفاده از سنگ‌شکن‌های فکی و بعد استوانه‌ای به ترتیب تا ۱ سانتی‌متر و ۲ میلی‌متر خرد و با استفاده از آسیای میله‌ای و بعد گلوله‌ای آسیا شد. از آن جا که کانی‌های اورانیم و عناصر نادر خاکی دارای چگالی بالایی هستند، طبق گزارش‌های موجود در پرعیارسازی ثقلی، در بخش سنگین تر قرار می‌گیرند [۱۴]. به همین علت بعد از نرمه‌گیری، نمونه‌ی به دست آمده با



شکل ۳- تأثیر pH بر میزان استخراج ایتربیم، اورانیم، آهن، لانتانیم، سریم و ایتربیم از محلول فروشویی، با ۰٫۱ مول بر لیتر D_۲EHPA در کروژین (۳٫۳ درصد حجمی)، و با زمان تماس ۳۰ دقیقه بین دو فاز آلی و آبی.



شکل ۴- ایزوترم استخراج ایتربیم از محلول فروشویی، با ۰٫۱ مول بر لیتر (یا ۳٫۳ درصد حجمی) D_۲EHPA در کروژین، در pH=۲ و با زمان تماس ۳۰ دقیقه.

۳-۳-۳ تأثیر نسبت حجمی دو فاز آبی به آلی (A/O)

افزایش نسبت A/O علاوه بر استخراج ایتربیم، بر استخراج دیگر عناصر موجود در محلول نیز تأثیر می‌گذارد. برای بررسی این تأثیر، درصد استخراج این عناصر در نسبت‌های A/O متفاوت تعیین گردید. تغییرات درصد استخراج عناصر مختلف بر حسب نسبت A/O در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت A/O استخراج ایتربیم به کندی کاهش پیدا می‌کند اما استخراج ایتربیم، اورانیم و آهن (مطابق شکل ۳، این عناصر در pH=۲، بعد از ایتربیم بیش‌ترین استخراج را دارند) با شدت بیش‌تری کاهش می‌یابد.

از بین دیگر عناصر نادر، لانتانیم، سریم و ایتربیم به علت غلظت بالای‌شان در کانسنگ ساغند مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر آن‌ها استخراج اورانیم به علت همراهی با منابع لانتانیدها (به خصوص در ساغند) و آهن به عنوان یک عنصر مزاحم در تصفیه‌ی لانتانیدها، بررسی شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

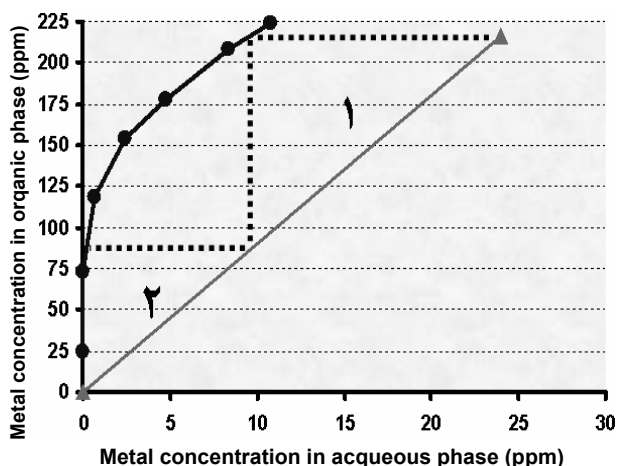
۳-۱- تأثیر pH

در شکل ۳، تأثیر pH بر میزان استخراج ایتربیم، اورانیم، لانتانیم، سریم، ایتربیم و آهن از محلول فروشویی، با ۰٫۱ مول بر لیتر D_۲EHPA در کروژین (۳٫۳ درصد حجمی)، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در شرایط مورد بررسی، میزان استخراج لانتانیم و سریم تا pH=۳ پایین است، در حالی که استخراج ایتربیم (Y) از pH=۲ تا ۳ کامل و میزان استخراج اورانیم بالای ۸۰ درصد است. میزان استخراج آهن با افزایش pH افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳ از pH=۲ تا ۳ استخراج ایتربیم بیشینه است اما چون افزایش pH باعث افزایش استخراج دیگر یون‌های همراه نیز می‌شود، برای استخراج انتخاب شد.

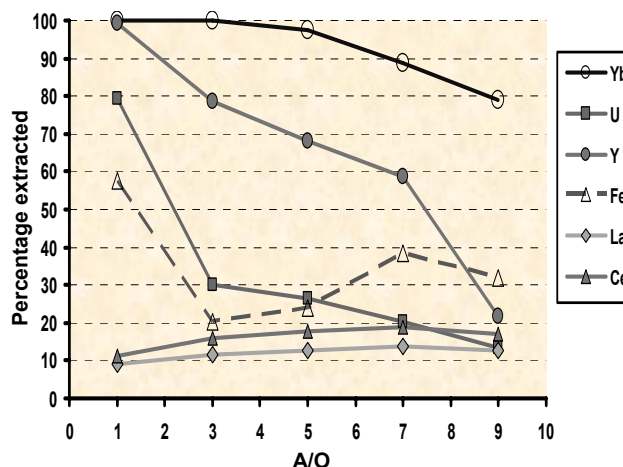
در حین آزمایش‌های استخراج در pH برابر ۳ و ۳٫۷ مشاهده شد که فاز آلی در فاز آبی به شکل کلوییدی درمی‌آید به نحوی که جدایش فازها را با مشکل مواجه می‌سازد. دلیل این امر، بارگیری زیاد D_۲EHPA، در بالای pH=۳، با عناصر موجود در محلول فروشویی می‌باشد. این حالت برای استخراج با D_۲EHPA در میزان بارگیری بیش از ۵۰ درصد ظرفیتش، در تحقیقات قبلی نیز مشاهده شده است [۱۲].

۳-۱-۲ ایزوترم استخراج ایتربیم

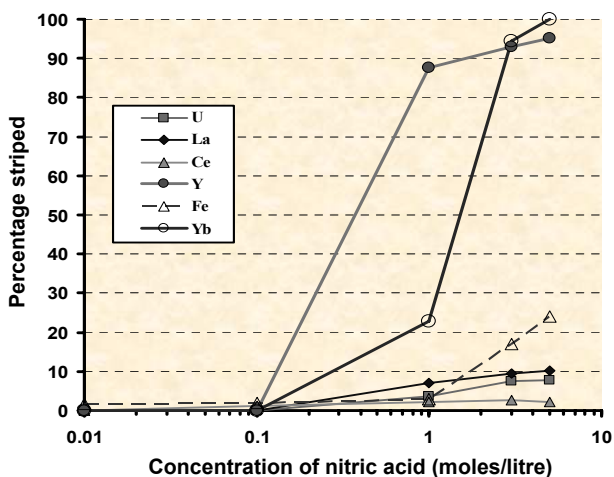
استخراج ایتربیم از محلول فروشویی، در pH=۲، طی زمان ۳۰ دقیقه و با غلظت استخراج کننده‌ی ۰٫۱ مول بر لیتر (یا ۳٫۳ درصد حجمی) در نسبت‌های حجمی دو فاز آبی به آلی (A/O) برابر با ۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۳ و ۱۷ انجام شد. ایزوترم استخراج ایتربیم با D_۲EHPA در شکل ۴ نشان داده شده است. (به علت افزایش pH محلول فروشویی با استفاده از آمونیم هیدروکسید تا pH=۲، غلظت Yb در آن به ۲۴ppm کاهش یافت).



شکل ۶- نمودار مکعب- تیلی برای استخراج ایتربیم از محلول فروشویی، با ۰٫۱ مول بر لیتر (یا ۳٫۳ درصد حجمی) D_۲EHPA در کروزین، در pH=۲ و با زمان تماس ۳۰ دقیقه بین دو فاز آلی و آبی.



شکل ۵- تأثیر نسبت A/O بر درصد استخراج بعضی از عناصر موجود در محلول فروشویی، با ۰٫۱ مول بر لیتر (یا ۳٫۳ درصد حجمی) D_۲EHPA در کروزین، در pH=۲ و با زمان تماس ۳۰ دقیقه بین دو فاز آلی و آبی.



شکل ۷- تأثیر غلظت نیتریک اسید بر میزان تهی سازی فاز آلی از اورانیم، آهن، لانتانیم، سریم، ایتربیم و ایتربیم با A/O=۱ و با زمان تماس ۳۰ دقیقه بین دو فاز آلی و آبی.

همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می شود میزان تهی سازی فاز آلی از ایتربیم، با افزایش غلظت نیتریک اسید افزایش می یابد به نحوی که فاز آلی با نیتریک اسید ۳ مولار، تا ۹۳ درصد و با اسید ۵ مولار، تقریباً به صورت کامل از ایتربیم تهی می شود. درصد تهی سازی فاز آلی از اورانیم، لانتانیم و سریم حتی با نیتریک اسید ۵ مولار زیر ۱۰ درصد است. میزان تهی سازی فاز آلی از آهن با نیتریک اسید ۵ مولار ۲۴ درصد، با اسید ۱ مولار ۳ درصد، و با اسید کم تر از ۱ مولار، ناچیز است. بنابراین جداسازی اورانیم، لانتانیم، سریم و آهن از ایتربیم در مرحله

با افزایش نسبت A/O مقدار یون های موجود در فاز آبی افزایش می یابد در حالی که مقدار مولکول های استخراج کننده ثابت باقی می ماند. این امر باعث افزایش رقابت بین یون های موجود، برای استخراج شدن می شود و چون تمایل D_۲EHPA به Yb نسبت به دیگر یون های موجود بیشتر است، استخراج آن کم تر از سایر یون ها کاهش می یابد. علاوه بر این، با افزایش نسبت A/O، غلظت ایتربیم در فاز آلی نیز افزایش می یابد. بنابراین افزایش نسبت A/O می تواند راه مناسبی برای بازداری هر چه بیش تر عناصر همراه ایتربیم از استخراج شدن باشد.

شکل ۶ نمودار مکعب- تیلی^(۴) استخراج ایتربیم با A/O=۹ را نشان می دهد. براساس اطلاعات این شکل، با دو مرحله استخراج، تقریباً تمامی ایتربیم موجود در فاز آبی استخراج می شود.

۳-۴ تهی سازی فاز آلی

فاز آلی حاصل از یک آزمایش استخراج با ۰٫۱ مول بر لیتر (یا ۳٫۳ درصد حجمی) D_۲EHPA در کروزین، در pH=۲ و با زمان تماس ۳۰ دقیقه، برای عملیات تهی سازی^(۵) مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به نتایج تحقیق گذشته، نیتریک اسید، در مقایسه با سولفوریک و کلریدریک اسید، از کارایی مناسب تری برای تهی سازی فاز آلی از ایتربیم برخوردار است [۱۰]. شکل ۷ درصد تهی سازی فاز آلی با غلظت های مختلف نیتریک اسید را نشان می دهد.



References:

1. R. Lundi, J.R. Wilson, "Rare earth metals find interesting new uses despite lack of engineering data," Imperial College Press (2002).
2. J.B. Hedrick, "Rare earths," U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 1, 60, 1-60, 16 (1999).
3. P. Jones, F. Wall, T. Williams, "Rare earth minerals," Chapman & Hall Inc (1996).
4. J. Lefond, "Industrial minerals and rocks," Vol. 2, Fifth Edition, American Society of Mining Engineers, New York (1983).
5. C.K. Gupta, N. Krishnamurthy, "Extractive metallurgy of rare earths," CRC Press, (2005).
6. K. Memar, "Mineralogy and petrochemistry of a part of saghand area," Ph.D Thesis University of Bombay, 1-43 (1991).
7. C.K. Gupta, T.K. Mukherjee, "Hydrometallurgy in extraction process," CRC Press (1990).
8. م. عبداللہی، س. علمدار میلانی، م.ج. کلینی، م.ر. صمدزاده یزدی، "استخراج ایتربیم از محیط‌های سولفوریکی با استفاده از استخراج کننده‌های آلی مختلف"، پانزدهمین کنفرانس هسته‌ای، گرگان (۱۳۸۷).
9. J. Rydberg, M. Cox, C. Musikas, G. Choppin, "Solvent extraction and practice," Second Edition, MARCEL DEKKER Inc (2004).
10. T. Sato, "Liquid-liquid extraction of rare-earth elements from aqueous acid solutions by acid organophosphorus compounds," Hydrometallurgy, Vol. 22, 121-140 (1989).
11. ا. وکیلی میرزمانی، "امکان‌سنجی فرآوری کانه‌های اورانیم و عناصر نادر خاکی به روش لیچینگ در آنومالی ۵ ساغند"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه باهنر کرمان (۱۳۸۳).
12. G.W. Mason, "Process for separation of the rare earths by solvent extraction," U.S Patent, No. 4016237 (1975).

تهی‌سازی فاز آلی با نیتریک اسید، امکان‌پذیر است. تهی‌سازی فاز آلی از ایتربیم با نیتریک اسید زیر ۳ مولار حتی از ایتربیم هم بیشتر است به نحوی که با نیتریک اسید ۱ مولار، میزان تهی‌سازی فاز آلی از ایتربیم ۲۳ و از ایتربیم ۸۸ درصد است و از این‌رو جدایش این دو در این غلظت از نیتریک اسید میسر است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که D₂EHPA استخراج‌کننده‌ی مناسبی برای استخراج ایتربیم از محلول فروشویی اسیدی است. این استخراج‌کننده، ایتربیم را نسبت به سایر یون‌های موجود در محیط ترجیح می‌دهد. رفتار استخراجی ایتربیم مشابه ایتربیم است اما میزان استخراج لانتانیم و سریم کم‌تر است. به نظر می‌رسد که مصرف مولکول‌های استخراج‌کننده برای استخراج ایتربیم و ایتربیم و تا حدودی اورانیم باعث عدم وجود استخراج‌کننده‌ی کافی برای استخراج لانتانیم، سریم و آهن می‌شود. بنابراین با زیاد کردن غلظت استخراج‌کننده می‌توان استخراج این عناصر را افزایش داد و یا با کاهش غلظت استخراج‌کننده، استخراج انتخابی ایتربیم را داشت. این موضوع با کاهش شدید میزان استخراج عناصر Y، Ce، La، U و Fe در مقایسه با استخراج ایتربیم هنگامی که نسبت A/O افزایش می‌یابد، قابل توجیه است. بررسی تهی‌سازی فاز آلی با نیتریک اسید نشان داد که برای انتقال مجدد ایتربیم به فاز آبی به غلظتی برابر ۵ مول بر لیتر از اسید احتیاج است. از بین دیگر عناصر مورد بررسی تنها ایتربیم در این شرایط به صورت کامل با Yb وارد فاز آبی می‌شود.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای بهزاد شهبازی مسئول آزمایشگاه فرآوری مواد معدنی دانشگاه تربیت مدرس و هم‌چنین از آقای عباس کیان‌پیشه و دیگر کارکنان پژوهشکده چرخه‌ی سوخت پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تشکر می‌شود.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Di-(2-Ethylhexyl) Phosphoric Acid
- ۲- Digestion
- ۳- Induced Coupled Plasma (ICP)
- ۴- McCabe-Thiele
- ۵- Stripping