

بهینه‌سازی جذب مولیبدن بر روی بستر آلومینا برای اجرای تخلیص نهایی آن حاصل از شکافت اورانیوم-۲۳۵ به روش تصعید غیرمستقیم

منیژه داینی، سیمیندخت شیروانی*، علی بهرامی سامانی، ایمان دهقان

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

*Email: smshirvani@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲۰ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۹/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰

چکیده

محصول فرایند خالص‌سازی مولیبدن-۹۹ حاصل از انحلال اسیدی محصولات حاصل از شکافت اورانیوم-۲۳۵، اغلب از درجه خلوص ۹۵٪-۹۰٪ برخوردار است که ناخالصی‌های اکتیو و غیراکتیو موجود در آن سبب تخریب و کاهش راندمان در ژنراتورهای $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ می‌شوند. استفاده از روش تصعید غیرمستقیم به عنوان یک مرحله اضافه برای افزایش خلوص و کاهش اتلاف مولیبدن به جای تصعید مستقیم می‌تواند تا حدی مؤثر باشد. در این روش مولیبدن محصول با عبور از ستون حاوی آلومینا جذب آن شده و پس از خشک شدن جاذب، تصعید خواهد شد. در پژوهش حاضر، عوامل مؤثر در جذب مولیبدن بر روی بستر آلومینا شامل مقدار جاذب، حجم و سرعت جریان محلول ورودی و غلظت مولیبدن آن، بهینه‌سازی شده و در نهایت راندمان جذب به ۹۹-۹۷٪ رسیده است. این مقادیر برای تولید ۲۰mg مولیبدن-۹۹ در مقیاس صنعتی در نظر گرفته شده است.

کلیدواژه‌ها: مولیبدن-۹۹، استخراج فاز جامد، تصعید، تکنسیم ۹۹m

Optimization of Molybdenum adsorption on alumina substrate for its final purification from Uranium-235 fission by indirect sublimation method

M. Dayeni, S. Shirvani*, A. Bahrami Samani, I. Dehghan

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

Research Article

Received 12.10.2022, Revised: 5.12.2022, Accepted 31.12.2022

Abstract

The product of the Molybdenum-99 purification process, obtained from Uranium-235 fission products, has a degree of purity of 90%-95%, which its present active and inactive impurities are destructive reducing the efficiency of $^{99\text{m}}\text{Tc}/^{99}\text{Mo}$ generators. As an alternative to the common sublimation method, indirect sublimation could increase purity and reduce molybdenum loss. In this method, the molybdenum in the product will be absorbed by passing through the alumina column and then the dried absorbent will be sublimated. In the present study, the effective factors in molybdenum absorption such as the amount of adsorbent, and the volume and flow rate of the input solution and molybdenum were optimized. The final absorption efficiency reached 97-99%. This investigation is expected to be applied to molybdenum-99 production.

Keywords: Mo-99, Solid phase extraction, Sublimation, Tc-99m



۱. مقدمه

تبدیل می‌شود و محصولی با خلوص بالاتر به دست می‌آید. این روش به طور گسترده‌ای در جداسازی ترکیبات فرار از غیرفرار به کار می‌رود. برای پیش‌برد تصعید باید سیستم کاملاً تحت کنترل باشد یعنی فشار محیط (معمولاً با ایجاد خلأ) کم شود و یا این‌که از فشار جزئی (غالباً با ورود گازی با فشار بالا) کاسته شود [۱۷].

تصعید مستقیم محصول ستون داوکس، با توجه به مقدار بسیار کم ولی با اکتیویته بالای محصول حاصل از فرایند تخلیص، راندمان اندکی خواهد داشت. به همین دلیل در روشی جایگزین، تصعید به طور غیرمستقیم انجام شده که در آن محصول خروجی ستون داوکس پس از تغلیظ و تنظیم اسیدیته از یک جاذب معدنی مانند آلومینا عبور داده شده تا مولیبدن جذب آن شود. در این مرحله بعضی ناخالصی‌ها با خروج از جاذب حذف خواهند شد. سپس جاذب حاوی مولیبدن-۹۹ پس از خشک شدن در محفظه تصعید قرار می‌گیرد که با افزایش دما و عبور گازهای کمکی بی‌اثر، مولیبدن به شکل اکسید مولیبدن خارج شده که پس از سرد شدن و انحلال در محلول سود، به‌عنوان خوراک ژنراتورهای تولید تکنسیوم-۹۹م استفاده می‌شود. مطالعات قبلی نشان داده که مولیبدن-۹۹ به دست آمده از این روش از خلوص بالاتری برخوردار است [۱۸].

آلومینا (Al_2O_3) و ترکیبات بر پایه آلومینا به دلیل فراوانی، وزن کم و مقاومت بالا به خوردگی، از جاذب‌های مهم صنعتی به شمار می‌روند. ترکیب شیمیایی مناسب، ساختار متخلخل، مساحت سطحی زیاد آن که موجب ظرفیت جذب بالا می‌شود و نیز مقاومت مکانیکی و حرارتی تا دمای $1500^\circ C$ ، خنثی بودن در محیطی سخت شامل مواد شیمیایی و یا تابش مواد رادیواکتیو باعث کاربرد گسترده آلومینا در جذب مواد معدنی و یون‌های فلزی از محیط‌های آبی شده است. رفتار جذب یونی آلومینا تا حد زیادی ناشی از گروه‌های هیدروکسیل اسیدی-بازی موجود بر روی سطح آن است که با پروتونه و دپروتونه شدن این گروه‌های هیدروکسیلی سطحی و بار الکتریکی ایجاد شده روی سطح آن، می‌تواند عمل جذب را به راحتی انجام دهد. گروه‌های هیدروکسیلی اسیدی و بازی موجود در سطح آلومینا به تعداد مساوی وجود داشته و به عنوان گونه‌های مستقل عمل می‌کنند و واکنش‌های تبادل آنیونی و کاتیونی می‌تواند بسته به تنظیم اسیدیته نمونه و یا خود آلومینا، در مکان‌های هیدروکسیلی سطح اسیدی و یا بازی آن روی دهد و از این خاصیت برای جذب آنیون‌ها از جمله مولیبدات بر روی آلومینا استفاده می‌شود [۱۹، ۲۰].

تکنسیوم-۹۹م از رادیوایزوتوپ‌های مهم در پزشکی هسته‌ای است که به دلیل نیمه‌عمر کوتاه ۶ ساعته، رایج‌ترین عنصر مورد استفاده با ماهیت درمانی به شمار می‌رود و بیش از ۸۰٪ تشخیص‌های درمانی داخل بدن توسط آن انجام می‌شود [۴-۱]. تولید این رادیوایزوتوپ از طریق مولیبدن-۹۹ بوده و در حال حاضر عمدتاً به روش شکافت اورانیوم (اورانیوم-۲۳۵) انجام می‌شود [۵]. در این روش تهیه و تخلیص مولیبدن-۹۹ در طی چند مرحله انجام می‌شود که به ترتیب شامل پرتودهی هدف اورانیومی سرد شدن هدف، انحلال اسیدی محصولات حاصل از شکافت، هدایت گازهای تولید شده به مخزن دیگر برای پالایش، صاف کردن محلول انحلال و درنهایت فرایند جداسازی و تخلیص مولیبدن-۹۹ به روش کروماتوگرافی ستونی است که به ترتیب با آلومینا و رزین تبادل آنیونی داوکس انجام می‌شود [۶-۸]. در ایران هدف مورد استفاده به شکل غلافی از آلومینیوم با هسته‌ای از اورانیوم-۲۳۵ ($U_2O_8Al_x$) می‌شود، که منحصر به فرد در سراسر دنیا می‌باشد [۹]. محصول نهایی ستون داوکس محلولی از آمونیوم مولیبدات است که بیش‌تر ناخالصی‌های آن جدا شده است و می‌توان باقی‌مانده آن را پس از تبخیر کامل، در سود حل کرده و به‌عنوان محلول سدیم مولیبدات برای تولید تکنسیوم-۹۹م در ژنراتورهای $^{99}Mo/^{99m}Tc$ به کار برد [۱۰، ۱۱]. درجه خلوص مولیبدن-۹۹ موجود در محصول اغلب ۹۰-۹۵٪ بوده و حاوی ناخالصی‌های اکتیو و غیراکتیو است. برخی از ناخالصی‌های اکتیو طول‌عمر کمی داشته و در همان مراحل اول واپاشی می‌شوند ولی بقیه نیمه‌عمر بالاتری داشته و خطری جدی برای سلامتی انسان محسوب می‌شوند. آلودگی‌های غیراکتیو ناشی از شویش اتصالات، مخازن و تخریب رزین می‌باشند که می‌توانند در روند تهیه تکنسیوم-۹۹م در ژنراتورهای مربوطه اختلال ایجاد کنند و باعث کاهش راندمان تولید شوند. به همین دلیل خالص‌سازی کامل مولیبدن-۹۹، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در فرایند تولید این رادیوایزوتوپ بالارزش است. در این راستا، برای اطمینان از خلوص بالای مولیبدن-۹۹ تولید شده پس از طی مراحل متعدد کروماتوگرافی، یک مرحله اضافی برای خالص‌سازی بیش‌تر محصول خروجی از ستون داوکس در نظر گرفته شده که بر اساس تصعید است [۱۲-۱۶].

تصعید^۱ یک روش جداسازی است که در آن فاز جامد مستقیماً به گاز یا بخار تبدیل می‌شود و در مرحله بعدی، با تراکم محصول و یا چگالش^۲، بخار به طور مستقیم به جامد

1. Sublimation
2. Desublimation



نیتریک غلیظ (۴M) و افزودن مقدار کمی از مولیبدن-۹۹ به عنوان ردیاب با سرعت جریان مشخصی به داخل ستون فرستاده می‌شود.

۴.۲ مراحل کار برای ستون کروماتوگرافی

مقدار مشخصی از پودر آلومینای اسیدی اصلاح شده به شکل دوغاب داخل ستون پلی‌اتیلنی به ابعاد $1/1 \times 10$ cm قرار داده شده و سپس با اتصال به پمپ پریستالتیک، سرعت جریان ورودی کالیبره و تنظیم شده است. جهت جریان محلول در ستون از بالا به سمت پایین می‌باشد. برای افزایش دقت، کلیه آزمایش‌های مربوط به بهینه‌سازی هر پارامتر در یک روز انجام شده است.

۵.۲ اندازه‌گیری مقدار مولیبدن-۹۹

برای آنالیز و ردیابی نمونه‌ها از روش افزایش مولیبدن-۹۹ به عنوان ردیاب استفاده شده است اما به دلیل طولانی بودن مدت زمان تهیه نمونه، مخصوصاً در مرحله تغلیظ، افزایش ردیاب قبل از ورود محلول به داخل ستون آلومینا و نه در ابتدا تهیه آن انجام شده است. آزمایشات قبلی نیز نشان داده که مراحل تغلیظ و تنظیم pH تأثیری بر مقدار مولیبدن نخواهند داشت. از نمونه ورودی و خروجی ستون آلومینا ۲ml برداشته و برای خوانش اشعه گاما از دستگاه گاما اسپکترومتر (مدل Iso Med ۲۱۰۰) استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ اثر pH محلول خوراک رزین بر روی میزان جذب مولیبدن در ستون آلومینا

چهار محلول هر یک با حجم ۴۵ml که هرکدام از تبخیر در خلأ ۲۰۰ml محصول شبیه‌سازی شده ستون داوکس حاوی ۲۰mg مولیبدن تهیه شدند پس از تنظیم pH به کمک اسید نیتریک غلیظ بر روی مقادیر ۶، ۴، ۱/۷، ۰/۳ هر یک به‌طور جداگانه با سرعت جریان ۲ml/min داخل ستون پلی‌اتیلنی حاوی ۳g پودر آلومینا فرستاده شدند. pH بهینه بر مبنای بیش‌ترین درصد مولیبدن جذب شده در ستون به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، محلول با اسیدیته ۱/۷ بیش‌ترین جذب را داشته است. لازم به ذکر است که در شرایط اسیدی جذب مولیبدات روی آلومینا بهتر انجام می‌شود زیرا در محیط قلیایی، امکان رقابت آنیون‌های دیگر مثل هیدروکسید با مولیبدات وجود خواهد داشت.

بهینه‌سازی مقدار جذب مولیبدن روی آلومینا فرایند حائز اهمیت و حساسی است که خود تکنیکی زمان‌بر بوده و نیاز به دقت بالا دارد تا به دلیل محدودیت مقدار مجاز جذب در مرحله تصعید، بتوان با استفاده از کم‌ترین مقدار آلومینا (جاذب مورد استفاده)، بیش‌ترین جذب مولیبدن انجام شود. در این پژوهش عوامل مؤثر در مرحله جذب مولیبدن بر روی جاذب آلومینا شامل pH، حجم و سرعت جریان محلول ورودی به ستون و نیز مقدار مولیبدن موجود در آن و مقدار آلومینا مورد استفاده برای فرایند تخلیص نهایی مولیبدن-۹۹ به روش تصعید بهینه‌سازی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ واکنش‌گرها و مواد شیمیایی

پمپ پریستالتیک Standard Peristaltic Pump L100-1S-2 Longer (Langer Instruments Corp)، ستون پلی‌اتیلنی به ابعاد $1/1 \times 10$ cm، دستگاه گاما اسپکترومتر (مدل Iso Med ۲۱۰۰)، سدیم مولیبدات ۲ آبه $(Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O)$ ، آمونیوم کربنات، آمونیاک ۲۵٪، اسید نیتریک ۶۵٪، سدیم هیدروکسید (تمامی مواد شیمیایی با خلوص تجزیه‌ای و از شرکت مرک خریداری شدند)، پودر آلومینای اسیدی.

۲.۲ دستگاه‌ها

دستگاه گاما اسپکترومتر (مدل Iso Med ۲۱۰۰)، ستون پلی‌اتیلنی به ابعاد $1/1 \times 14$ cm، پمپ پریستالتیک Standard Peristaltic Pump L100-1S-2 Longer (Langer Instruments Corp).

۳.۲ آماده‌سازی نمونه

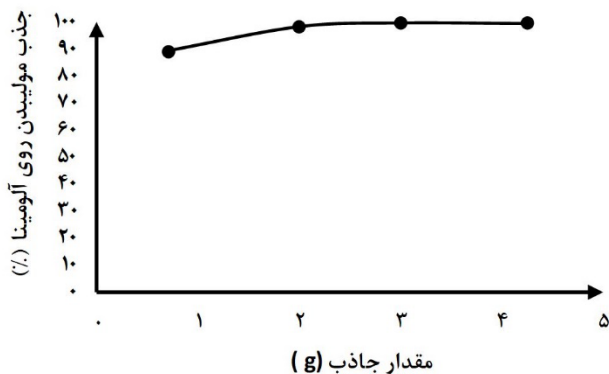
در آزمایشات تصعید، بهینه‌سازی جذب مولیبدن موجود در محصول ستون داوکس حاصل از خالص‌سازی قبلی در یک ستون کوچک پلی‌اتیلنی روی جاذب آلومینا انجام می‌شود. این محصول که از شویس ستون حاوی رزین داوکس با ۲۰۰ml آمونیوم کربنات ۱ مولار به دست می‌آید حداکثر دارای ۲۰mg مولیبدن در مقیاس صنعتی است. به منظور حذف مراحل جداسازی و خالص‌سازی مولیبدن و صرفه‌جویی در زمان و مصرف رزین، محصول ستون داوکس شبیه‌سازی می‌شود. محلول شبیه‌سازی شده از انحلال نمک مولیبدات سدیم دوآبه در آمونیوم کربنات ۱ مولار به حجم ۲۵۰ml و مقدار ۲۰mg مولیبدن تهیه شده است که ابتدا در شرایط تقطیر در خلأ تا حجم مشخصی تغلیظ شده و پس از تنظیم pH با محلول اسید



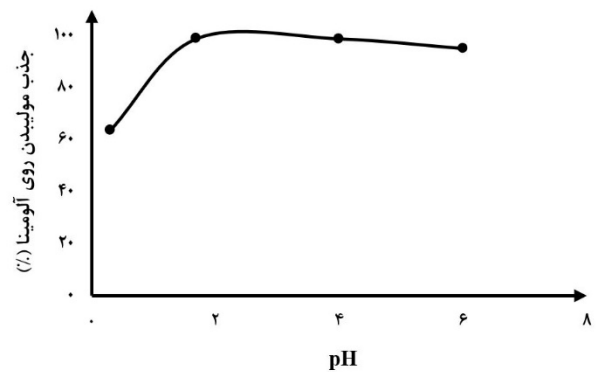
۳.۳ اثر سرعت جریان ورودی به ستون آلومینا بر روی میزان جذب

مولیبیدن در ستون آلومینا

در این آزمایش، در ۴ ستون به طور جداگانه مقدار ۴٫۲۵g جذب آلومینا قرار داده شده و چهار محلول تغلیظ شده با pH معادل ۱٫۷ و مقدار مولیبیدن ۲۰mg تهیه شده که هر یک با سرعت جریان متفاوتی شامل ۵ml/min، ۴، ۳ و ۲ از ستون عبور می‌کند. مقادیر سرعت در هر ستون با عبور آب مقطر از ستون حاوی آلومینا بر روی پمپ موجود در آزمایشگاه کالیبره شده تا میزان دور پمپ مشخص باشد. نمودار شکل ۳ و جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان، میزان جذب آلومینا افزایش یافته است. گرچه این تغییر سرعت در جذب مولیبیدن بر روی این مقدار کم جذب چندان تأثیرگذار نبود، افزایش سرعت سبب کاهش مدت زمان تخلیص مولیبیدن-۹۹ می‌شود که با توجه به نیمه‌عمر ۶۶ ساعته مولیبیدن-۹۹، بازده کلی تولید مولیبیدن را بالا می‌برد. لذا سرعت ۵ml/min مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲. بهینه‌سازی مقدار جاذب در جذب مولیبیدن روی جاذب آلومینا.



شکل ۱. بهینه‌سازی pH در جذب مولیبیدن روی جاذب آلومینا.

۳.۳ اثر مقدار جاذب محلول خوراک رزین بر روی میزان جذب

مولیبیدن در ستون آلومینا

چهار محلول تغلیظ شده که هر یک حاوی ۲۰mg مولیبیدن و کمی ردیاب می‌باشند پس از تنظیم pH روی ۱٫۷ با سرعت جریان ۲ml/min به طور جداگانه وارد ۴ ستون با مقدار جاذب ۴٫۲۵g، ۳، ۲، ۰٫۷g شدند. نتایج آزمایش در شکل ۲ و جدول ۱ آورده که با توجه به خطایی که در خوانش اکتیویته در دستگاه گاما اسپکتروسکوپی وجود دارد، نشان می‌دهد که تفاوت چندان بین مقدار جذب مولیبیدن روی ۳g و یا ۴٫۲۵g جذب وجود ندارد. بنابراین برای اطمینان از عدم خروج مولیبیدن از ستون در نمونه واقعی، مقدار جاذب بیش‌تر یعنی ۴٫۲۵g انتخاب شده است.

جدول ۱. جمع‌بندی آزمایشات بهینه‌سازی جذب مولیبیدن (۲۰mg) بر روی جاذب آلومینا

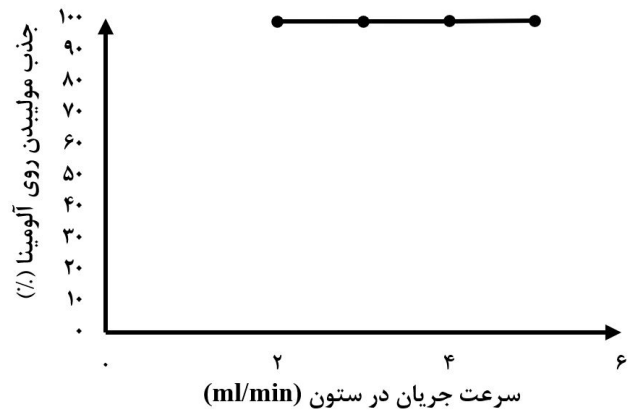
پارامتر مؤثر	آزمایش بهینه‌سازی	آزمایش اول	آزمایش دوم	آزمایش سوم	آزمایش چهارم	آزمایش پنجم
pH	pH	۰٫۳	۱٫۷	۴	۶	-
مقدار جاذب	درصد جذب*	۶۳٫۵۴	۹۸٫۸۰	۹۸٫۶۷	۹۴٫۹۶	-
مقدار جاذب	مقدار جاذب (g)	۰٫۷	۲	۳	۴٫۲۵	-
سرعت جریان	درصد جذب	۸۸٫۸۹	۹۸٫۱۷	۹۹٫۶۱	۹۹٫۳۷	-
سرعت جریان	سرعت جریان (ml/min)	۲	۳	۴	۵	-
سرعت جریان	درصد جذب	۹۹٫۰۸	۹۹٫۰۴	۹۹٫۲۰	۹۹٫۳۶	-
مقدار مولیبیدن	مقدار مولیبیدن (mg)	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	-
مقدار مولیبیدن	درصد جذب	۹۹٫۶۰	۹۹٫۶۱	۹۹٫۷۷	۹۹٫۶۷	-
حجم خوراک	حجم محلول (ml)**	۲۵۰ (۲۹۹)	۲۰۰ (۲۵۹)	۱۵۰ (۲۱۱)	۱۰۰ (۱۱۷)	۵۰ (۵۷)
حجم خوراک	درصد جذب	۷۹٫۰	۸۳٫۴	۸۴٫۹	۸۸٫۲	۹۷٫۱

*درصد جذب مولیبیدن بر روی جاذب آلومینا

** حجم محلول تغلیظ شده (حجم محلول تغلیظ شده پس از تنظیم اسیدیته (خوراک ستون آلومینا))



از افزودن مولیبدن سرد (۲۰ mg) و سپس تنظیم اسیدیته آن با اسید نیتریک غلیظ (۶۵٪) استفاده شده است. مقایسه نتایج در شکل ۵ و جدول ۱ آورده شده که در جدول مقادیر داخل پرانتز حجم پس از اسیدی کردن نمونه تغلیظ شده را نشان می‌دهد. زمانی که حجم خوراک ستون حاوی جاذب حدود ۶۰ ml-۵۷ ml باشد، بیش‌ترین میزان جذب مولیبدن بر روی ستون آلومینا اتفاق دیده شد. این حداکثر حجمی است که باید پس از تغلیظ ۲۵۰ ml محصول حاصل از ستون داوکس به دست آید و در این حالت حدود ۹۷٪ از مولیبدن جذب ستون حاوی آلومینا شده است. برای تنظیم اسیدیته محلول‌های تغلیظ شده از اسید نیتریک غلیظ ۶۵٪ و سود ۴ مولار استفاده شده تا کم‌ترین افزایش حجم نمونه ایجاد شود.



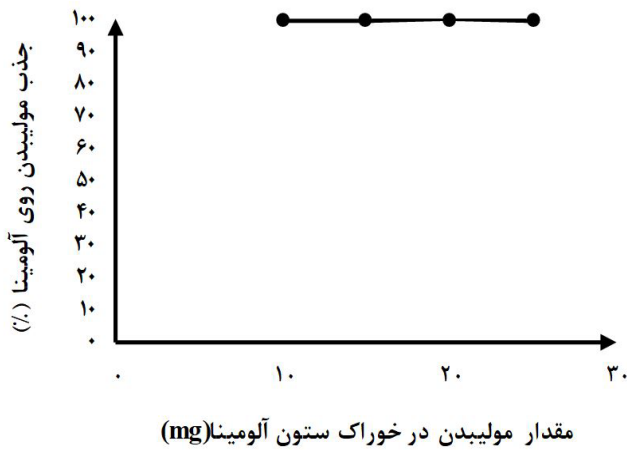
شکل ۳. اثر تغییرات سرعت جریان در مقدار جذب مولیبدن بر روی جاذب آلومینا.

۴.۳ اثر تغییر مقدار مولیبدن بر روی جذب آن بر روی آلومینا

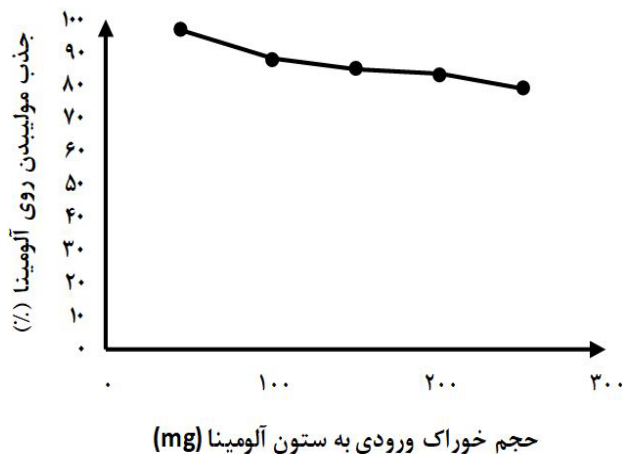
در این آزمایش، بر اساس مقادیر بهینه حاصل از آزمایش‌های قبلی، مقدار جاذب آلومینا ۴/۲۵g، pH ۱/۷ و سرعت جریان عبور محلول از ستون ۵ ml/min در نظر گرفته شد. مقادیر مختلفی از مولیبدن، در گستره چشم‌انداز آینده تولید این رادیوایزوتوپ شامل ۱۰ mg، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ انتخاب شد. مقایسه نتایج این آزمایشات در شکل ۴ و جدول ۱ آورده شده است. بررسی مقادیر جذب مولیبدن نشان می‌دهد که خوشبختانه مقدار جاذب بهینه در آزمایشات قبل، تقریباً ظرفیت جذب کاملی را برای محدوده غلظتی انتخاب شده از خود نشان می‌دهد و نوسانات کم مقدار اکتیویته محلول خروجی که برای ۱۰ mg تا ۲۰ mg مولیبدن دیده شده احتمالاً به دلیل خطای دستگاه اسپکترومتر اشعه گاما اتفاق افتاد. برای محلول حاوی ۲۵ mg مولیبدن، حدود ۱۰ درصد کاهش جذب در عبور از ستون آلومینا دیده شد. هم‌چنین بیش‌ترین میزان جذب (۹۹/۷۷٪) در محلول دارای ۲۰ mg مولیبدن به دست آمد.

۴.۴ اثر مقدار حجم ورودی به ستون بر میزان جذب مولیبدن بر روی آلومینا

تعیین مقدار بهینه حجم ورودی به داخل ستون آلومینا عامل بسیار مهمی است که میزان تغلیظ محصول ستون داوکس در مرحله خالص‌سازی قبلی را مشخص می‌کند و بنابراین بهینه‌سازی آن موجب افزایش راندمان کلی تولید مولیبدن-۹۹ و نیز تسهیل تبخیر می‌شود. در این آزمایش، مقدار جاذب ۴/۲۵g، مقدار pH ۱/۷، سرعت جریان عبور نمونه از ستون حاوی آلومینا ۵ ml/min انتخاب شده است. مقادیر ۲۵۰ ml (بدون تغلیظ) و ۲۰۰ ml، ۱۵۰ ml، ۱۰۰ ml، ۵۰ ml هر یک حاصل از تغلیظ ۲۵۰ ml محلول آمونیوم کربنات یک مولار پس



شکل ۴. بهینه‌سازی مقدار مولیبدن موجود در محلول ورودی به ستون حاوی جاذب آلومینا.



شکل ۵. بهینه‌سازی حجم محلول ورودی به ستون حاوی جاذب آلومینا.



۵. نتیجه گیری

مراجع

1. European Commission Health and Consumers Directorate-General, Preliminary Report on Supply of Radioisotopes for Medical use and Current Development in Nuclear Medicine. *SANCO/C/3/HWD, Rev. 8, Luxembourg*. 2009.
2. IAEA, Technetium-99m radiopharmaceuticals manufacture of kits. *Technical Report Series No. 466*. (IAEA, Vienna, 2008).
3. Saha G.B. *Fundamentals of Nuclear Pharmacy*. 6th ed. (Springer Science, Business Media, New York). 2010.
4. Pillai M.R, Dash A, Knapp Jr F.F. Sustained availability of 99mTc: possible paths forward. *J. Nucl. Med.* 2013;54:313.
5. Lee S.K, Beyer G.J, Lee J.S. Development of industrial-scale fission ⁹⁹Mo production process using low enriched uranium target. *Nucl Eng Technol.* 2016;48:613.
6. Kotschkov Y, Pozdeyev V.V, Krascheninnikov A.I. Production of fission 99Mo with closed uranium cycle at the nuclear reactor WWR-Ts. *Radio Khimiya.* 2012;54:173.
7. Stang L.G. *Manual of isotope production processes in use at Brookhaven National Laboratory, Brookhaven National Laboratory*. (Brookhaven National Laboratory, Upton, New York. 1964).
8. International Atomic Energy Agency (IAEA). Non-HEU production technologies for molybdenum-99 and technetium-99m. *IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-5.4, IAEA. Vienna (Austria)*. 2013.
9. Tabasi M, Bahrami Samani A, Shirvani Arani S, Ghannadi Maragheh M, Mohammadi A. Assessment of Mo-99 radioisotope supply chain using LEU in Iran. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2021;42(3):104.
10. Muenze R, Beyer G.J, Ross R, Wagner G, Novotny D, Franke E, Jehangir M, Pervez S, Mushtaq A. The Fission-Based 99Mo Production Process ROMOL-99 and Its Application to PINSTECH Islamabad. *Sci. Technol. Nucl.* 932546 (2013).
11. Sameh A. Production cycle for large scale fission Mo-99 Separation by the processing of irradiated LEU uranium silicide fuel element targets. *Sci. Technol. Nucl.* 704846 (2013).
12. Pretorius C.J, Pienaar A.D, Crouse P.L, Niemand H.F. Sublimation kinetics of zirconium tetrafluoride. *Adv. Mat. Res.* 2014;1019:398.
13. Sameth A.H, Etlingen A, Buerck J, U.S. Patent No. 4981658. 1991 (1 Jan).
14. Landini L, Araújo S.G, Forbicini C.A.L.G.O. International Nuclear Atlantic Conference. (Santos, SP, Brazil) 2019;2352-2357.
15. Damasceno M.O, Da Silva F.M.A, Dos Santos J.L, Dias R.R, Forbicini C.A. Study of new routes for purification of fission ⁹⁹Mo. *Braz. J. Radiat. Sci.* 2021;221:1.

محصول به دست آمده در فرایند خالص سازی نهایی مولیبدن-۹۹ تولید شده از شکافت اورانیوم-۲۳۵، دارای ناخالصی های اکتیو و غیراکتیوی است که مضر بوده و یا با ورود به ژنراتور ⁹⁹Mo / ^{99m}Tc منجر به کاهش راندمان تولید می شوند. لذا از فرایند تصعید به عنوان یک مرحله اضافی برای تخلیص بهتر محصول استفاده شده است. در این فرایند به جای تصعید مستقیم محلول تغلیظ شده حاصل از ستون داوکس که به دلیل غلظت کم مولیبدن و حجم بالای تغلیظ از بازده کمی برخوردار است، محصول ستون داوکس از میان یک بستر جامد معدنی مانند آلومینا عبور داده شده که طی آن مولیبدن موجود در آن جذب جاذب شده و سپس تصعید غیرمستقیم مولیبدن با گرم کردن آلومینا انجام می شود. مولیبدن-۹۹ به دست آمده از خلوص و بازده بهتری برخوردار است. آزمایشات مختلف برای بهینه سازی عوامل مؤثر در جذب مولیبدن روی جاذب آلومینا در داخل یک ستون پلی اتیلنی، نشان داده که بیشترین جذب مولیبدن روی بستر جاذب با بازده ۹۹٪-۹۷٪ در شرایطی است که محلول حاصل از ستون داوکس (مرحله خالص سازی قبلی) که حاوی ۲۰mg مولیبدن است، تا حجم حداکثر ۴۵ml- ۵۰ml تغلیظ شده و پس از تنظیم pH آن روی ۱٫۷، از میان یک ستون پلی اتیلنی با ابعاد ۱۰cm×۱٫۱cm دارای ۴٫۲۵g پودر آلومینای اسیدی با سرعت جریان حدود ۵ml/min عبور داده شود.

تشکر و قدردانی

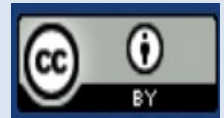
بدین وسیله بر خود لازم می دانیم از همکاری صمیمانه شرکت پارس ایزوتوپ که نمونه مولیبدن ۹۹ و پودر آلومینا را در اختیار ما قرار دادند، تشکر کنیم.



16. Dittrich S. Review Article History and Actual State of Non-HEU Fission-Based Mo-99 Production with Low-Performance Research Reactors. *Sci. Technol. Nucl.* 514894 (2013).
17. Dias Filho N.L. In: Adsorption at Silica, Alumina, and Related Surfaces. P. Somasundaran Encyclopedia of Surface and Colloid Science. 2nd ed. (Taylor & Francis, New York). 2006;229-241.
18. Tamura H, Katayama N, Furuichi R. Modeling of Ion-Exchange Reactions on Metal Oxides with the Frumkin Isotherm. 1. Acid-Base and Charge Characteristics of MnO₂, TiO₂, Fe₃O₄, and Al₂O₃ Surfaces and Adsorption Affinity of Alkali Metal Ions, *Environ. Sci. Technol.* 1996;30(4):1198.
19. Rabia1 A.R, Ibrahim A.H, Zulkepli N.N. Activated alumina preparation and characterization: The review on recent advancement. *E3S Web of Conferences.* 2018;34:02049. doi: 10.1051/e3sconf/20183402049.
20. Fujita Y, Niizeki T, Fukumitsu N, Ariga K, Yamauchi Y, Malgras V, Kaneti Y.V, Liu C.H. Mechanisms Responsible for Adsorption of Molybdate ions on Alumina for the Production of Medical Radioisotopes. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 2022;95:129.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

دایمی، منیژه، شیروانی، سیمیندخت، بهرامی سامانی، علی، دهقان، ایمان. (۱۴۰۳). بهینه‌سازی جذب مولیبدن بر روی بستر آلومینا برای اجرای تخلیص نهایی آن حاصل از شکافت اورانیوم-۲۳۵ به روش تصعید غیرمستقیم. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۱۰۹(۳)، ۲۲-۲۸. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1531>
 Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1531.html

