

بررسی الکترواکسیداسیون کنسانتره مولیبدنیت و بهینه سازی مصرف انرژی فرایند

مرضیه محمودی، سید نظام‌الدین اشرفی زاده*⁺

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه فرایندهای پیشرفته جداسازی

چکیده: در این پژوهش، میزان انحلال مولیبدنیت و انرژی مصرفی به وسیله فرایند الکترواکسیداسیون کنسانتره مولیبدنیت در الکترولیت قلیایی بررسی شده و اثر پارامترهای گوناگون شامل پتانسیل الکتریکی، نسبت مایع به جامد، غلظت نمک سدیم کلرید، و فاصله بین الکترودها بر میزان انحلال مولیبدنیت و انرژی مصرفی در سل الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که میزان انحلال مولیبدنیت با افزایش پتانسیل الکتریکی، نسبت مایع به جامد و غلظت نمک سدیم کلرید افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله بین الکترودها تا ۱۰ mm، میزان انحلال مولیبدنیت افزایش و برای مقادیرهای بیش از آن کاهش می‌یابد. میزان مصرف انرژی با افزایش پتانسیل الکتریکی، نسبت مایع به جامد و فاصله بین الکترودها افزایش می‌یابد و با افزایش غلظت نمک سدیم کلرید تا ۱۰۰ g/L کاهش یافته و برای مقادیرهای بیش از آن افزایش می‌یابد. در شرایط بهینه (پتانسیل الکتریکی برابر با ۳۷V، فاصله بین الکترودها ۱۰ mm، نسبت مایع به جامد ۲۰۰ mL/g و غلظت نمک سدیم کلرید برابر با ۱۰۰ g/L و مدت زمان ۴ ساعت) میزان انحلال مولیبدنیت و میزان انرژی مصرفی به ازای هر کیلوگرم مولیبدن انحلال یافته، به ترتیب معادل ۷۰/۴۱٪ و ۵۵۶ kWh تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: مولیبدن؛ کنسانتره مولیبدنیت؛ الکترواکسیداسیون؛ انرژی مصرفی؛ الکترولیز.

KEY WORDS: Molybdenum; Molybdenite concentrate; Electrooxidation; Consumed energy; Electrolysis.

مقدمه

از سوی دیگر، توسعه صنعت و الزامات زیست‌محیطی، لزوم توسعه فناوری‌های جدید مانند فرایند هیدرومتالورژی را سبب شده است [۴]. فرایند هیدرومتالورژی دارای برتری‌هایی مانند مصرف انرژی کمتر، هماهنگی با استانداردهای زیست محیطی و بازیابی بالای مولیبدن حتی از کنسانتره‌های با درجه خلوص پایین می‌باشد [۵]. از سال ۱۹۷۰ میلادی به بعد فرایندهای استخراج تر^(۱) [۳]، فرایند تحت فشار اکسیژن^(۲) [۶]، تجزیه نیتریک اسید^(۳) [۷]،

کنسانتره مولیبدنیت، منبع اصلی فلز مولیبدن و فراورده‌ی جانبی سنگ معدن مس می‌باشد. فرایند تشویه و انحلال روشی متداول برای به‌دست آوردن مولیبدن تری اکسید از کنسانتره مولیبدنیت می‌باشد [۱]. این فرایند سنتی و تجاری دارای عیب‌های زیادی مانند فرایندهای پرهزینه چند مرحله‌ای فلوتاسیون [۲]، از بین رفتن مقداری مولیبدن طی فرایند فلوتاسیون، بازدهی پایین و تولید گوگرد دی اکسید (منبع آلودگی محیط زیست) می‌باشد [۳].

*عهده دار مکاتبات

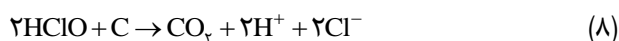
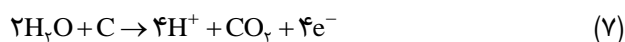
+E-mail: ashrafi@iust.ac.ir

(۱) Wet leaching

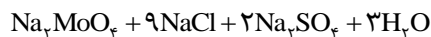
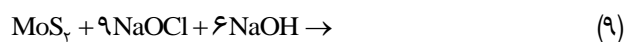
(۳) Nitric Acid Decomposition

(۲) Oxygen pressure process

میزان تولید هیپوکلرو نیز تغییر می‌نماید. متغیر pH الکترولیت یک پارامتر مهم عملیاتی است و پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سرعت تجزیه هیپوکلرو به کلرات و اکسیژن به pH محلول بستگی دارد [۱۱]. کلرات در محیط قلیایی نمی‌تواند به عنوان اکسیدکننده عمل نماید. در نتیجه برای کاهش تولید کلرات می‌بایست گستره pH در بازه ۴-۵ باشد. اما در چنین شرایطی مولیدات تولید شده به صورت مولیدات مس رسوب می‌نماید چرا که مس مولیدات در گستره pH ۲/۵-۶/۵ حلالیت ناچیزی دارد [۱۲، ۱۵]. در محیط قلیایی یون هیپوکلرو به عنوان اکسیدکننده اصلی عمل می‌کند در حالی که در محیط اسیدی سهم کلر و اسید هیپوکلرو بیش‌تر می‌باشد [۱۳]. دمای اولیه بر بازدهی فرایند اثر ناچیزی دارد و گرمای واکنشی که در فرایند اکسیداسیون تولید می‌شود، می‌تواند دمای سامانه را تا ۴۲ °C بالا ببرد. از سویی با افزایش دما، پایداری هیپوکلرو کاهش و سرعت تولید کلرات افزایش می‌یابد [۱۲]. در فرایند الکترولیز چنانچه از الکترودهای گرافیتی استفاده شود واکنش‌های ناخواسته زیر اتفاق می‌افتد که باعث خورده شدن الکترود و افزایش فاصله بین الکترودها شده و میزان تولید هیپوکلرو را کاهش می‌دهد.



امروزه با استفاده از آندهای موسوم به "آندهای اندازه‌های ثابت" (۳) این مشکل‌ها بر طرف شده و این نوع آند دارای ولتاژ اضافی کمتری نسبت به الکترودهای گرافیتی است. با تولید هیپوکلرو، چنانچه کنسانتره مولیدیت در محیط موجود باشد، هیپوکلرو با سولفید مولیدن واکنش داده و مولیدات تولید می‌نماید. این واکنش را می‌توان به صورت زیر توصیف نمود [۱۲]:



بر مبنای نظریه سینتیک واکنش‌ها، وقتی که گام‌های استخراج توسط نفوذ در لایه فیلم سیال کنترل می‌شود. شدت هم‌زدن اثر زیادی بر روی سرعت انحلال دارد. اما زمانی که گام‌های استخراج توسط نفوذ در لایه فیلم جامد کنترل می‌شود، هم‌زدن اثر ناچیزی بر بازدهی استخراج دارد [۱۴]. در فرایند الکتروداکسیداسیون

الکترواکسیداسیون به وسیله سدیم هیپوکلریت (۱) [۸] و فرایند فروشویی زیستی (۲) [۹] توسعه یافته‌اند. فرایند الکتروداکسیداسیون اولین بار در سال ۱۹۷۳ میلادی برای بازیابی مولیدن از کنسانتره مولیدیت به کار رفته است [۱۰]. در این فرایند، طی الکترولیز محلول نمک سدیم کلرید، اکسیدکننده قوی هیپوکلرو (ClO^-) تولید شده که باعث اکسید شدن کنسانتره مولیدیت می‌شود. از برتری‌های فرایند الکتروداکسیداسیون، هزینه به نسبت کم و سادگی کنترل فرایند می‌باشد [۵].

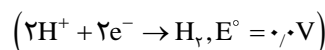
در این مقاله، فرایند الکتروداکسیداسیون کنسانتره مولیدیت در محلول قلیایی بررسی شده و اثر پارامترهای گوناگون عملیاتی شامل پتانسیل الکتریکی، نسبت مایع به جامد، فاصله بین الکترودها و غلظت نمک سدیم کلرید بر میزان انحلال مولیدیت و انرژی مصرفی در سل الکتروشیمیایی مطالعه شده است. قابل بیان است که این مطالعه با هدف افزایش میزان انحلال مولیدیت و صرف کم‌ترین میزان مصرف انرژی انجام شده است.

بخش نظری

واکنش‌های الکتروشیمیایی را که در سل برای تولید هیپوکلرو انجام می‌شود می‌توان توسط واکنش‌های زیر توصیف نمود [۵]: واکنش آندی:



واکنش کاتدی:



واکنش‌های تولید هیپوکلرو:



پارامترهای گوناگونی همچون، پتانسیل الکتریکی، نسبت مایع به جامد، غلظت نمک سدیم کلرید، pH الکترولیت، دمای عملیاتی، مدت زمان الکترولیز و طراحی ساختار سل الکتروشیمیایی مانند فاصله بین الکترودها و جنس الکترودها بر میزان تولید هیپوکلرو و بازدهی جریان موثر می‌باشند. با تغییر هر یک از این پارامترها

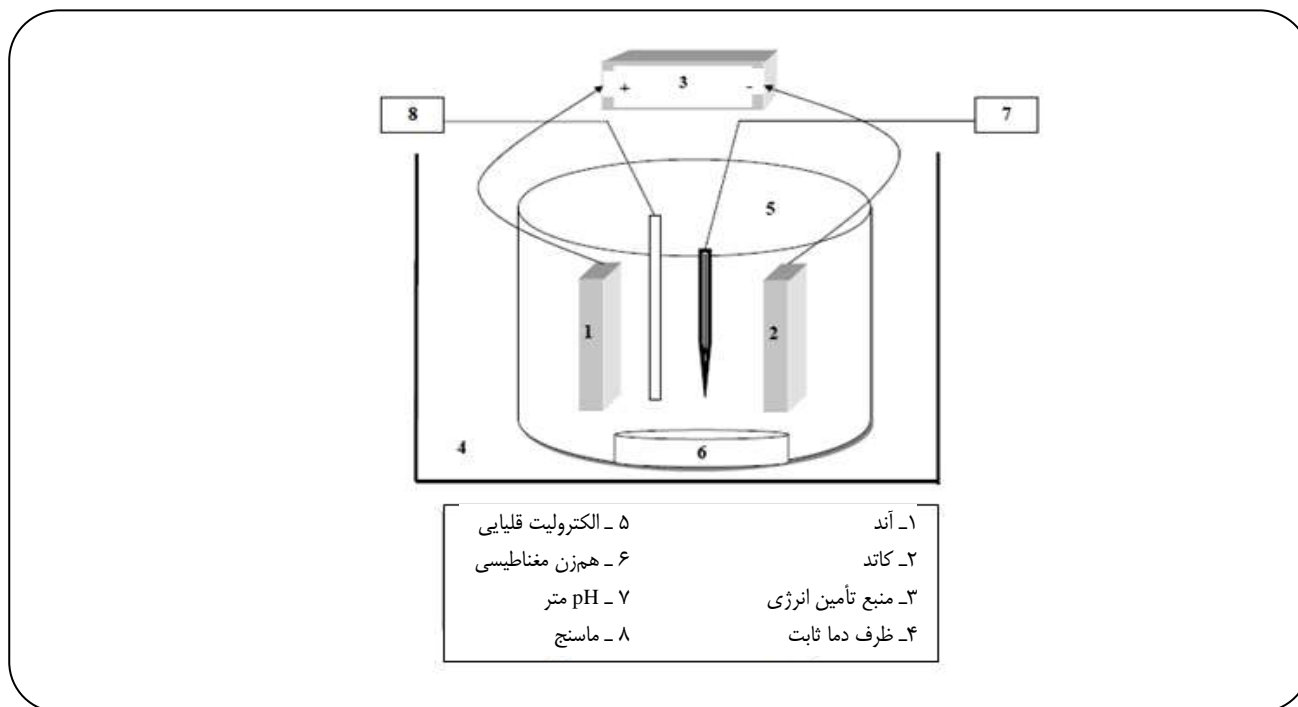
(1) Sodium Hypochlorite Electro-oxidation

(2) Bio-Leaching

(3) Dimensionally Stable Anode (DSA)

جدول ۱- ترکیب شیمیایی کنتسانتره مولیبدنیت استفاده شده.

عنصر	مولیبدن (Mo)	رنيوم (Re)	مس (Cu)	آهن (Fe)	سرب (Pb)	گوگرد (S)	ترکیب‌های آلی
درصد وزنی	۵۹٫۴۲	۰٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۳۵	۰٫۰۱	۳۸٫۱۵	۴٫۵۵



شکل ۱- نمایی از دستگاه استفاده شده در انجام آزمایش.

مورد استفاده شامل سدیم کلرید (NaCl) و سدیم هیدروکسید (NaOH) از شرکت Merck خریداری شده‌اند.

آزمایش الکترواکسیداسیون

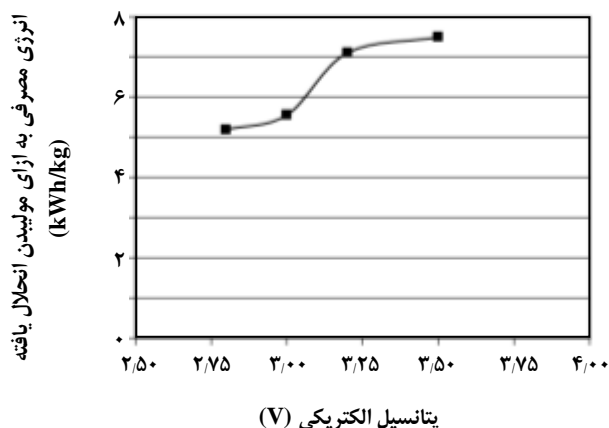
آزمایش‌ها در یک سامانه ناپیوسته با شمای کلی نشان داده شده در شکل ۱، انجام شده‌اند. فرایند الکترواکسیداسیون به وسیله الکترولیز محلول نمک سدیم کلرید در سل الکترولیز انجام می‌شود. برای همزدن محلول از یک همزن مغناطیسی استفاده شده است. آند از نوع DSA (با ابعاد ۴×۹ cm) و کاتد از جنس استیل با کربن کم (با ابعاد ۴×۹ cm) انتخاب شدند. آند "ابعاد ثابت" از جنس فلز تیتانیوم، به‌عنوان پایه، با پوششی از یک لایه مخلوط ایریدیوم اکسید و روتینیوم اکسید تشکیل شده است. در طول آزمایش‌ها دمای سل و pH محلول کنترل شده و به تقریب ثابت بودند. مقدار pH محلول با افزودن تدریجی محلول ۱ مولار سدیم هیدروکسید تثبیت شده و در مقدار ۹ کنترل شد.

مولیبدنیت تأیید شده است که گام‌های استخراج توسط نفوذ در لایه فیلم جامد کنترل می‌شود. بنابراین مدل هسته کاهنده برای این فرایند مناسب می‌باشد و افزایش سرعت همزدن اثر چندانی بر میزان انحلال مولیبدنیت ندارد [۱۲]. از سویی همزدن مخلوط فازهای جامد و مایع دو اثر مهم بر سرعت انحلال دارد: اول این که باعث معلق ماندن ذره‌ها در فاز مایع می‌شود، سطح تماس حلال با فاز جامد و سرعت انحلال افزایش می‌یابد، و دوم اینکه باعث کاهش ضخامت فیلم تشکیل شده بر سطح فاز جامد می‌شود. موضوع اخیر موجب افزایش نفوذ حلال (هیپوکلرو) شده و سرعت انحلال را افزایش می‌دهد [۱۴].

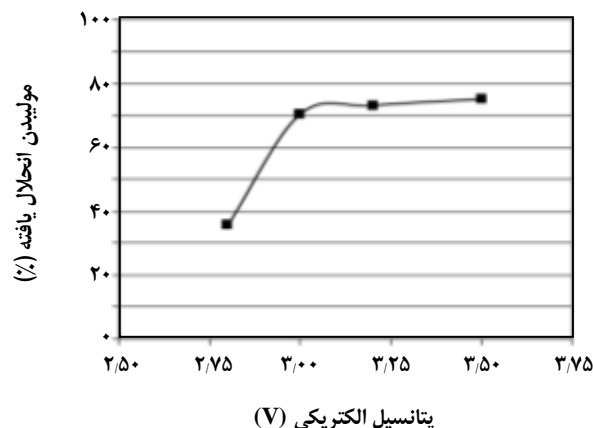
بخش تجربی

مواد مورد استفاده

کنتسانتره مولیبدنیت از معدن مس سرچشمه کرمان تهیه شده و ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارایه شده است. مواد شیمیایی



شکل ۳- تأثیر پتانسیل الکتریکی بر میزان انرژی مصرفی.



شکل ۲- تأثیر پتانسیل الکتریکی بر انحلال مولیدنیت.

سامانه می‌شود. از سویی، دانسیته جریان بالا میزان تولید کلرات را در سل‌های الکترولیتیک افزایش می‌دهد که این فرایند، ناخواسته است و موجب کاهش میزان هیپوکلرو در سامانه شده و میزان انحلال مولیدنیت را کاهش می‌دهد. بنابراین، ولتاژ ۳ ولت به عنوان ولتاژ بهینه انتخاب شده‌است.

اثر نسبت مایع به جامد

اثر نسبت مایع به جامد بر میزان انحلال مولیدنیت و میزان انرژی مصرفی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. این آزمایش‌ها با شرایط فاصله بین الکترودها، غلظت نمک سدیم کلرید و پتانسیل الکتریکی به ترتیب برابر با، ۱۰ mm، ۱۰۰ g/L و ۳ V انجام شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، در این شرایط، میزان انحلال مولیدنیت با افزایش نسبت مایع به جامد افزایش می‌یابد. از آنجایی که با کاهش آن میزان کنسانتره موجود در پالپ افزایش می‌یابد، بنابراین مقاومت الکترولیت بین الکترودها برای عبور جریان افزایش یافته و میزان هدایت‌پذیری یون‌های هیپوکلرو کم می‌شود. این پدیده را می‌توان این‌گونه توصیف کرد که محلول‌هایی با غلظت کم محیط مناسبی را برای نفوذ فراهم کرده و به همین دلیل واکنش انجام شده بین هیپوکلرو و مولیدنیت موثرتر می‌باشد. همچنین با کاهش نسبت مایع به جامد، به دلیل افزایش در اکسایش فلزهای آهن و مس موجود در کنسانتره، میزان اکسایده کاهش یافته و موجب کاهش بازدهی می‌شود.

برای انجام آزمایش‌ها مقدار مشخصی از پالپ (کنسانتره مولیدنیت با غلظت معین، نمک سدیم کلرید و آب) تهیه شده و در طول فرایند توسط همزن با دور ۴۰۰ rpm هم‌زده می‌شود. پس از مدت زمان ۲۴۰ دقیقه نمونه‌گیری انجام شده و مقدار مولیدن موجود در محلول توسط آنالیز ICP-AES^(۱) تعیین شد.

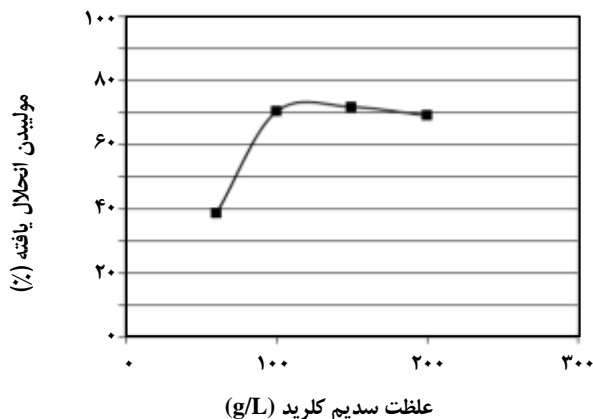
نتیجه‌ها و بحث

اثر پتانسیل الکتریکی

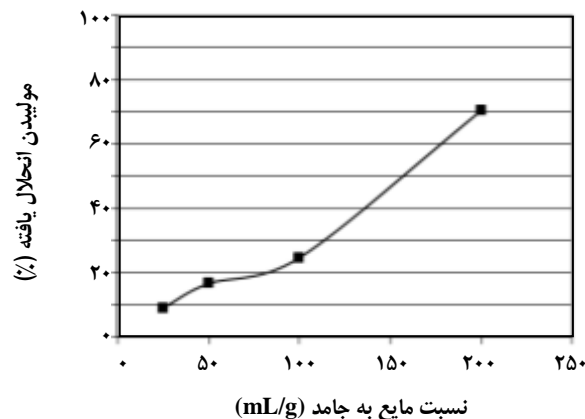
اثر پتانسیل الکتریکی بر انحلال مولیدنیت و میزان انرژی مصرفی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. این آزمایش‌ها با شرایط، فاصله بین الکترودها، غلظت نمک سدیم کلرید و نسبت مایع به جامد به ترتیب برابر با ۱۰ mm، ۱۰۰ g/L و ۲۰۰ mL/g انجام شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، در این شرایط، میزان انحلال مولیدنیت با افزایش ولتاژ عملیاتی از ۲٫۸ V تا ۳٫۵ V از مقدار ۳۵٫۶٪ تا ۷۴٫۵۱٪ افزایش می‌یابد. افزایش ولتاژ از ۳ تا ۳٫۵ ولت اثر ناچیزی بر بازیابی مولیدن دارد. از سویی با توجه به شکل ۳ میزان انرژی مصرفی با افزایش پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد و هر چند که در ولتاژ ۲٫۸ V در کمترین مقدار خود است اما در این ولتاژ میزان انحلال مولیدنیت بسیار ناچیز است.

با افزایش پتانسیل الکتریکی میزان دانسیته جریان نیز افزایش می‌یابد. با افزایش دانسیته جریان، میزان تولید هیپوکلرو افزایش یافته و بنابراین میزان انحلال مولیدنیت افزایش می‌یابد. اما دانسیته جریان بالا سبب مصرف انرژی بیش از اندازه و افزایش دمای

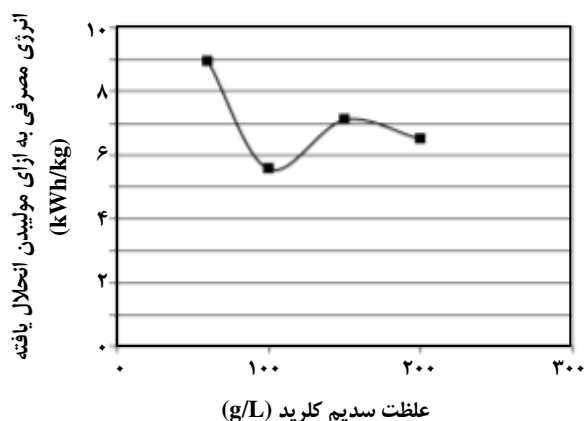
(۱) Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectroscopy



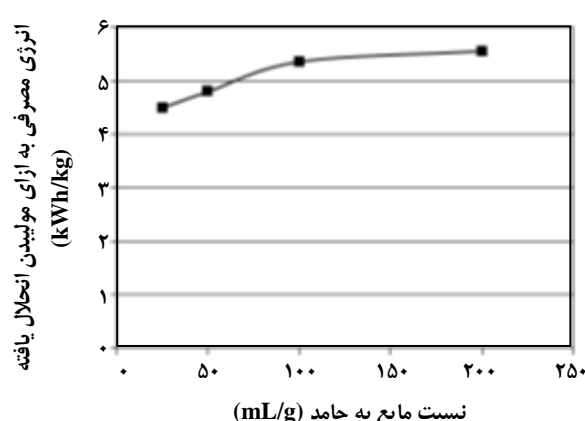
شکل ۶- تأثیر غلظت نمک سدیم کلرید بر انحلال مویبدنیت.



شکل ۴- تأثیر نسبت مایع به جامد بر انحلال مویبدنیت.



شکل ۷- تأثیر غلظت نمک سدیم کلرید بر میزان انرژی مصرفی.



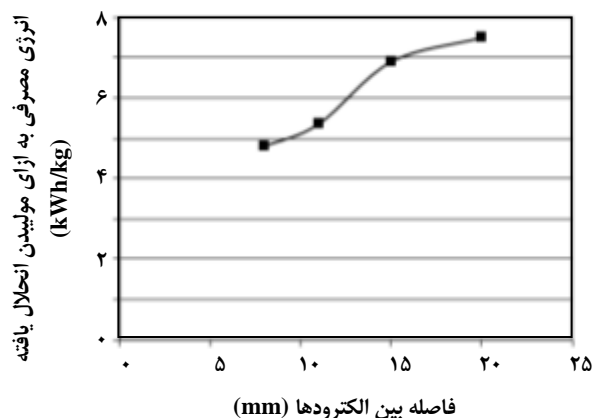
شکل ۵- تأثیر نسبت مایع به جامد بر میزان انرژی مصرفی.

در نسبت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ mL/g به تقریب با هم برابر شده‌اند، اما در نسبت ۱۰۰ mL/g میزان بازیابی به مراتب کمتر می‌باشد. بنابراین، میزان بهینه نسبت مایع به جامد در این پژوهش برابر با ۲۰۰ mL/g انتخاب شده است.

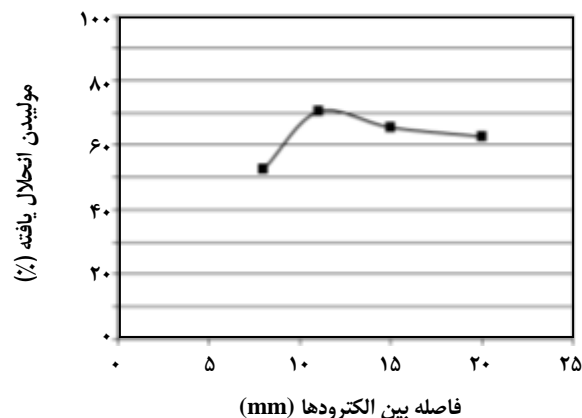
اثر غلظت نمک سدیم کلرید

تأثیر غلظت نمک سدیم کلرید بر میزان انحلال مویبدنیت و انرژی مصرفی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارایه شده است. آزمایش‌ها در شرایط، فاصله بین الکترودها، پتانسیل الکتریکی و نسبت مایع به جامد به ترتیب برابر با ۱۰ mm، ۳ V و ۲۰۰ mL/g انجام شده‌اند. مطابق نتیجه‌های شکل ۶، میزان بازیابی مویبدن با افزایش غلظت نمک از ۶۰ g/L تا ۲۰۰ g/L افزایش می‌یابد. اما افزایش غلظت نمک از ۱۰۰ تا ۲۰۰ g/L

از سویی، مطابق نتیجه‌ها در شکل ۵، میزان مصرف انرژی با افزایش نسبت مایع به جامد افزایش یافته است. این پدیده را چنین می‌توان توصیف نمود که با افزایش نسبت مایع به جامد، با ثابت در نظر گرفتن مقدار محلول سدیم کلرید، میزان کنتسانتره مورد استفاده کمتر بوده و به همان نسبت مقدار مویبدن اکسید شده نیز کمتر خواهد بود. بنابراین طی یک آزمایش با مدت زمانی معین، مقدار مویبدن اکسید شده با افزایش نسبت مایع به جامد کاهش می‌یابد. هرچند که با افزایش نسبت مایع به جامد به دلیل کاهش مقاومت الکترولیت بین الکترودها میزان شدت جریان افزایش می‌یابد، اما این افزایش چندان زیاد نیست. بنابراین چنانچه میزان انرژی مصرفی به ازای مقدار مویبدن اکسید شده محاسبه شود، این مقدار با افزایش نسبت مایع به جامد افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۵، میزان انرژی مصرفی به ازای هر کیلوگرم مویبدن اکسید شده



شکل ۹- تأثیر فاصله بین الکترودها بر میزان انرژی مصرفی.



شکل ۸- تأثیر فاصله بین الکترودها بر انحلال مولیبدنیت.

از ۸ تا ۱۰ mm میزان انحلال مولیبدنیت افزایش و برای مقادیرهای بیش از آن کاهش می‌یابد. همچنین مطابق شکل ۸، میزان مصرف انرژی در سل با افزایش فاصله بین الکترودها افزایش می‌یابد. افزایش فاصله بین الکترودها از ۸ تا ۱۰ mm دو اثر متقابل بر عملکرد سل بر جای می‌گذارد: ۱- با افزایش فاصله، پالپ راحت‌تر می‌تواند در فضای بین الکترودها حرکت کند و با ایجاد اصطکاک بین سطح الکترود و پالپ، مقدار رسوب ایجاد شده بر روی الکترود کاهش می‌یابد. ۲- با افزایش فاصله بین الکترودها میزان مقاومت ناشی از الکترولیت افزایش یافته و در نتیجه میزان تولید هیپوکلرو و در نتیجه میزان انحلال مولیبدنیت کاهش می‌یابد. بنابراین در این گستره، با افزایش فاصله الکترودها، با وجود آن که میزان تولید هیپوکلرو و انحلال مولیبدنیت افزایش می‌یابد اما نرخ افزایش انرژی مصرفی بسیار کند است. با افزایش فاصله بین الکترودها بیش از ۱۰ mm، مقاومت ناشی از الکترولیت بین الکترودها نسبت به بازه اول به‌طور چشمگیری بیشتر شده است. بنابراین میزان تولید هیپوکلرو کاهش یافته و میزان انحلال مولیبدنیت و انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. در نتیجه در این پژوهش فاصله ۱۰ mm به‌عنوان فاصله بهینه انتخاب شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان انحلال مولیبدنیت و میزان انرژی مصرفی در فرایند الکتروداکسیداسیون مولیبدنیت در محیط قلیایی مورد بررسی قرار گرفته و اثر پارامترهای فرایندی شامل پتانسیل الکتریکی، نسبت مایع به جامد، غلظت نمک سدیم کلرید

اثر ناچیزی بر میزان انحلال مولیبدنیت دارد. از طرفی مطابق نتیجه‌های ارایه شده در شکل ۷، میزان مصرف انرژی در غلظت ۱۰۰ g/L سدیم کلرید در کمترین مقدار می‌باشد. غلظت نمک بر هدایت‌پذیری پالپ و در نتیجه بازدهی تولید هیپوکلرو اثر می‌گذارد. با افزایش غلظت نمک، میزان تولید هیپوکلرو نیز افزایش می‌یابد. در غلظت‌های بالای یون کلرید، اکسایش یون هیدروکسیل در آند و تشکیل گاز اکسیژن به کمترین مقدار می‌رسد، بنابراین با کاهش واکنش‌های جانبی میزان تولید هیپوکلرو افزایش یافته و در نتیجه میزان انحلال مولیبدنیت افزایش می‌یابد. از آنجایی که با افزایش غلظت نمک، شدت جریان به دلیل افزایش در میزان هدایت‌پذیری پالپ، زیاد می‌شود و از سویی به ازای مقادیرهای غلظت نمک بیش از ۱۰۰ g/L میزان بازیابی به تقریب ثابت مانده است بنابراین با افزایش غلظت نمک بیش از ۱۰۰ g/L مصرف انرژی سل به ازای هر کیلوگرم مولیبدن اکسید شده افزایش می‌یابد. بنابراین غلظت نمک سدیم کلرید معادل با ۱۰۰ g/L به عنوان غلظت بهینه انتخاب شده است.

اثر فاصله بین الکترودها

اثر فاصله بین الکترودها بر میزان انحلال مولیبدنیت و میزان انرژی مصرفی به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. این آزمایش‌ها در شرایط، غلظت نمک سدیم کلرید، پتانسیل الکتریکی و نسبت مایع به جامد به ترتیب برابر با ۱۰۰ g/L، ۳ V و ۲۰۰ mL/g انجام شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش فاصله بین الکترودها،

فاصله بین الکترودها ۱۰ mm، نسبت مایع به جامد ۲۰۰ mL/g و غلظت نمک سدیم کلرید برابر با ۱۰۰ g/L) میزان انحلال مولیبدنیت و میزان انرژی مصرفی به ازای هر کیلوگرم مولیبدنیت انحلال یافته در مدت زمان ۴ h به ترتیب معادل با ۷۰/۴۱٪ و ۵/۵۶ kWh می‌باشد. این نتیجه‌ها نشان دهنده قابلیت بالای فرایند پیشنهادی در مقایسه با سایر فرایندهای جاری و سنتی می‌باشد. همچنین، سادگی اجرای فرایند و بروز نکردن مشکل‌های زیست محیطی از دیگر برتری‌های فرایند پیشنهادی قلمداد می‌شوند.

و فاصله بین الکترودها بر راندمان انحلال مولیبدنیت مطالعه شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که میزان انحلال مولیبدنیت با افزایش پتانسیل الکتریکی، نسبت مایع به جامد و غلظت نمک سدیم کلرید افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله بین الکترودها، میزان انحلال مولیبدنیت تا فاصله ۱۰ mm افزایش و برای مقدارهای بیش از آن کاهش می‌یابد. همچنین میزان مصرف انرژی با افزایش پتانسیل الکتریکی، نسبت مایع به جامد و فاصله بین الکترودها افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت نمک سدیم کلرید تا ۱۰۰ g/L میزان مصرف انرژی کاهش و برای مقدارهای بیش‌تر افزایش می‌یابد. در شرایط بهینه (پتانسیل الکتریکی برابر با ۳ V، سرعت همزن ۴۰۰ rpm، pH محلول برابر با ۹، دمای اتاق،

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۹

مراجع

- [1] Mounsey D.M., "Factors Influencing the Recovery of Molybdenum During the Hypochlorite Leaching of Low Grade Molybdenite-Copper Concentrates", PhD Diss., University of British Columbia, 1979.
- [2] Henrie T., Lindstrom R., Scheiner B., "Electro-oxidative Method for the Recovery of Molybdenum from Sulfide Ores", *U.S. Patent 3,849,265*, Issued November 19, (1974).
- [3] Cao Z.F., Zhong h., Liu G-Y, Fu J.G., Wen Z.Q., Wang Sh., *Electric-Oxidation Extraction of Molybdenite Concentrate in Alkaline NaCl Electrolyte*, *Journal of Central South University of Technology*, **17**, 480-484 (2010).
- [4] Cao Z.F., Zhong H., Qiu Z.H., Liu G.Y., Zhang W.X., *A Novel Technology for Molybdenum Extraction from Molybdenite Concentrate*, *Hydrometallurgy*, **99**(1): 2-6 (2009).
- [5] Darjaa T., Okabe T., Waseda Y., Umetsu Y., *Electro-Oxidation of Molybdenum Concentrate in Sodium Chloride Solution*, *Shigen-to-Sozai*, **115**(10): 755-761 (1999).
- [6] Ketcham, J., Enzo L. Coltrinari, Wayne W. Hazen. *Pressure Oxidation Process for the Production of Molybdenum Trioxide from Molybdenite*, *U.S. Patent 6149883*, Issued May 2, (1996).
- [7] Ashraf M., *Hydrometallurgical Recovery of Molybdenum from Egyptian Qattar Molybdenite Concentrate*, *Physicochem. Probl. Miner. Process*, **47**: 105-112 (2011).
- [8] Youcai, Liu, Zhong Hong, Cao Zhanfang, *Molybdenum Removal from Copper Ore Concentrate by Sodium Hypochlorite Leaching*, *Mining Science and Technology (China)*, **21**(1): 61-64 (2011).
- [9] Zamani Askari M.A., Hiroyoshi N., Tsunekawa M., Vaghar R., Olliazadeh M., *Bioleaching of Sarcheshmeh Molybdenite Concentrate for Extraction of Rhenium*, *Hydrometallurgy*, **80**(1): 23-31 (2005).

- [10] CAO, Zhan-fang, Hong Zhong, Zhen-qian WEN, Jian-gang FU, and Na Chen. [Ultrasonic Electro-oxidation Process of Molybdenite Concentrate](#), *The Chinese Journal of Process Engineering*, **8**(5): 926-931 (2008).
- [11] Gupta C.K., "[Extractive Metallurgy of Molybdenum](#)", CRC Press, (1992).
- [12] Cao, Zhan-fang, Hong Zhong, Guang-yi Liu, Yun-ren Qiu, Shuai Wang., [Molybdenum Extraction from Molybdenite Concentrate in NaCl Electrolyte](#), *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **41**(3): 338-343 (2010).
- [13] Zhan-fang, Cao, Zhong Hong, Liu Guang-yi, Fu Jian-gang, Wang Shuai, and Qiu Yun-ren. [Electric-Oxidation Kinetics of Molybdenite Concentrate in Acidic NaCl Solution](#), *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **87**(6): 939-944 (2009).
- [۱۴] وقار، رامز، "هیدرومتالورژی"، شرکت ملی صنایع مس ایران، دانشگاه تهران، تهران، (۱۳۷۸).