

بررسی فروشویی کانسنگ اکسیدی مس با استفاده از روش‌های زیست‌سازگار

محمدامین شعبانی^۱، مهدی ایران‌نژاد^۲ و امیررضا آزادمه‌ر^۳

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۲۳

چکیده

روش معمول برای فروشویی کانسنگ اکسیدی مس، فروشویی با استفاده از اسید سولفوریک است. با توجه به اثرات نامطلوب اسید سولفوریک بر محیط زیست، استفاده از روش‌های جایگزین و سازگار با محیط زیست ضروری است. دو روش فروشویی زیستی و فروشویی با اسید سیتریک به عنوان روش‌های سازگار با محیط زیست در این پژوهش مطالعه شده است. کانسنگ مورد استفاده، کانسنگ اکسیده مس منطقه طارم سفلی بود و مقدار مس موجود در نمونه با استفاده از روش تجزیه تر ۳/۴ درصد تعیین شد. به دلیل عدم وجود گوگرد و منابع سولفیدی در کانسنگ مورد آزمایش، استفاده از باکتری‌های متداول در عملیات فروشویی زیستی مقدور نبود. بنابراین، از یک گونه هتروتروف به نام سودوموناس آئروجینوزا (*Pseudomonas aeruginosa*) استفاده شد که این باکتری در شرایط مناسب قادر به تولید اسیدهای آلی مانند سیتریک، اگزالیک و گلوکونیک است. این اسیدها به عنوان عامل فروشویی عمل می‌کنند و سبب انحلال مس می‌شوند. در ادامه پژوهش، عملیات فروشویی با استفاده از اسید سیتریک به عنوان یکی از اسیدهای آلی تولیدی توسط این باکتری بررسی شد. شرایط بهینه فروشویی زیستی عبارت است از: درصد گلوکز محیط کشت ۶ درصد، مدت زمان ۸ روز و مقدار ماده معدنی افزوده شده به ۸۰ cc محیط کشت یک گرم و شرایط بهینه فروشویی عبارت است از: غلظت ۰/۲ مولار اسید، نسبت جامد به مایع ۱:۲ (g/mL)، مدت زمان فروشویی نیم ساعت و دما ۴۰ °C، تحت شرایط بهینه ۵۳ درصد مس در عملیات فروشویی زیستی و ۹۲ درصد مس در عملیات فروشویی بازایی شد.

کلیدواژه‌ها: کانسنگ اکسیدی مس، فروشویی زیستی، فروشویی، اسید سیتریک، باکتری هتروتروف، سودوموناس آئروجینوزا.

*نویسنده مسئول: مهدی ایران‌نژاد

Email: iranajad@aut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

استفاده از روش فروشویی زیستی برای استحصال فلزات از دهه ۱۹۵۰ میلادی آغاز شده است و نخستین کاربرد تجاری این روش، در معدن مس کنکات (Kennecott) گزارش شده است (Brierley, 2008). این روش گزینه‌ای مناسب برای کانسنگ‌های کم‌عیار، ذخایر کوچک و با کانی‌شناسی پیچیده و کانسنگ‌هایی که بازایی آنها با استفاده از روش‌های سنتی مشکل است، می‌باشد (Sheng-hua et al., 2008). مطالعاتی نیز در زمینه کاربرد این روش برای کانسنگ‌های پرعیار صورت گرفته است (Pradhan et al., 2008). برخی از مزیت‌های این روش عبارت است از: سازگاری با محیط زیست، هزینه سرمایه‌گذاری کمتر نسبت به روش‌های سنتی، مصرف انرژی کمتر، آلودگی کمتر و در مجموع روشی اقتصادی‌تر نسبت به دیگر روش‌ها به شمار می‌آید (Brierley, 2008; Sheng-hua et al., 2008; Pradhan et al., 2008; Jain & Sharma, 2004; Watling, 2006). این روش در مواردی مانند: استحصال مس، پیش‌عمل‌آوری طلای مقاوم و استحصال کبالت کاربرد صنعتی یافته است (Brierley, 2008; Brierley & Brierley, 2001). برخی از کاربردهای صنعتی این روش در مورد استحصال مس در جدول ۱ نشان داده شده است.

پس از کشف ریزجانداران اکسیده آهن و گوگرد (مانند باکتری‌های تیوباسیلوس فرواکسیدان و تیوباسیلوس تیواکسیدان)، کاربرد آنها در فروشویی زیستی و اکسیداسیون زیستی منابع سولفیدی بررسی و سپس در صنعت استفاده شد. پژوهش‌های زیادی در مورد فروشویی زیستی (بیولچینگ) کانی‌های سولفیدی اولیه و ثانویه مس (به‌ویژه کالکوپیریت و کالکوسیت) و همچنین ذخایر سولفیدی دیگر عناصر انجام شده است (Brierley & Brierley, 2001). عملکرد ریزجانداران معتدل‌دوست (مزوفیل) و گرمادوست (ترموفیل) در فروشویی زیستی کانسنگ سولفیدی مس شامل کانی‌های آنارژیت، کولیت و کالکوسیت با توجه به ترکیب کانی‌شناختی و استفاده از روش فروشویی ستونی مورد بررسی قرار گرفته است (Lee et al., 2011). بر طبق این گزارش، عملکرد باکتری‌های معتدل‌دوست بر سولفیدهای اولیه مس (آنارژیت و کولیت) ضعیف

آزمایش‌های فروشویی در یک ظرف ۵۰۰ میلی‌لیتری مجهز به مبرد و درپوش انجام و دمای پالپ توسط دماسنج کنترل شد. بر اساس مطالعات پیشین (Shabani et al., 2012)، مقدار مشخصی از ماده معدنی با محدوده ابعادی ۱۵۰-۱۰۵ میکرون به ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سیتریک در دمای موردنظر افزوده شد. مخلوط توسط همزن مغناطیسی با نرخ ۴۰۰ دور در دقیقه هم‌زده شد. پس از گذشت مدت زمان مورد نظر و فیلتراسیون، محلول شفاف به دست آمد.

مقدار مس موجود در محلول‌های شفاف حاصل با استفاده از طیف سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری و با در نظر گرفتن مقدار مس اولیه، درصد استخراج محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

در آزمایش‌های فروشویی زیستی تأثیر عوامل درصد گلوکز محیط کشت، مدت زمان فروشویی زیستی و مقدار ماده معدنی افزوده شده به محیط کشت و در آزمایش‌های فروشویی تأثیر عواملی مانند: غلظت اسید، مدت زمان، نسبت جامد به مایع و دما بررسی و این عوامل بهینه شد.

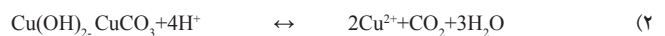
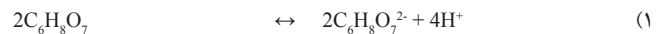
۳-۱. فروشویی زیستی

تأثیر درصد گلوکز محیط کشت: یکی از اجزای تشکیل دهنده محیط کشت انتخابی گلوکز است. با توجه به این که اسیدهای آلی تولیدی از تخمیر گلوکز توسط باکتری حاصل می‌شود؛ بنابراین، حجم اسید تولید شده توسط باکتری با مقدار گلوکز در دسترس آن متناسب است (Vyas & Gulati, 2009). همچنین، با توجه به دلایل اقتصادی باید کمترین مقدار گلوکز به‌عنوان بهینه انتخاب شود. آزمایش‌های بهینه‌سازی درصد گلوکز محیط کشت، با مقادیر ۲ درصد، ۴ درصد، ۶ درصد و ۸ درصد انجام شد و در نهایت مقدار ۶ درصد به عنوان درصد گلوکز بهینه انتخاب شد (شکل ۲).

تغییرات pH در آزمایش‌های بهینه‌سازی درصد گلوکز محیط کشت در طول این آزمایش‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق این شکل، زمانی که درصد گلوکز ۲ درصد است، به دلیل کم بودن تولید اسید توسط باکتری و افزودن کانستگ که کربناتی است، پس از مدت زمان ۵ روز مقدار pH افزایش می‌یابد. افزایش درصد گلوکز، سبب افزایش تولید اسید توسط باکتری و در نتیجه کاهش pH محیط می‌شود و این مقادیر در درصد‌های گلوکز ۶ و ۸ درصد تفاوت چندانی ندارد.

تأثیر مدت زمان فروشویی زیستی: به طور کلی تا زمانی که رشد باکتری ادامه دارد و قادر به تولید اسید است، طبیعتاً باید درصد استخراج افزایش یابد. ولی پس از گذشت مدت زمان مشخص، به مرور فعالیت باکتری‌ها کم می‌شود و جمعیت باکتری‌های زنده کاهش یافته و در نتیجه درصد استخراج کاهش می‌یابد. با توجه به این موارد، زمان فروشویی زیستی باید به نحوی انتخاب شود که تعداد باکتری‌های زنده مناسبی را شامل شود. آزمایش‌های بهینه‌سازی زمان به صورت غیر پیوسته و با مدت زمان‌های مشخص انجام شد که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. بنا بر این نتایج، مدت زمان ۸ روز به عنوان زمان بهینه انتخاب شد.

تأثیر نسبت جامد به مایع (S/L): در آزمایش‌های فروشویی زیستی، افزایش نسبت جامد به مایع افزون بر کاهش مقدار حلال در دسترس ماده معدنی و اکسیژن در دسترس باکتری، سبب افزایش حضور یون‌های مختلف در محیط کشت باکتری می‌شود (Qiu et al., 2006). برخی از این یون‌ها برای رشد باکتری مضر است و برخی نیز ممکن است به رشد باکتری کمک کند. معمولاً نمک یون‌هایی که برای رشد باکتری مفید هستند، در ترکیب محیط کشت موجود هستند. هرگونه باکتری، قادر به تحمل غلظت معینی از یون‌های مختلف در محیط خود است. با افزایش غلظت یون مضر در محیط، به تدریج از فعالیت باکتری کاسته شده و اگر غلظت یون از حداکثر مقدار قابل تحمل توسط باکتری بیشتر باشد، سبب مرگ باکتری و در نتیجه کاهش درصد استخراج خواهد شد.



در برخی از پژوهش‌های گزارش شده در زمینه فروشویی با استفاده از اسیدهای آلی، اسید اگزالیک برای آهن‌زدایی از رس‌ها و کانی‌های سیلیکاتی استفاده شده است (Mandal & Banerjee, 2004; Lee et al., 2006 & 2007; Martínez-Luévanos et al., 2011). برخی از پژوهشگران، اسیدهایی مانند: سیتریک، گلوکونیک، استیک و لاکتیک را برای فروشویی منیزیت به کار برده و تأثیر عوامل اصلی مؤثر در فروشویی منیزیت را بررسی کرده‌اند (Lacin et al., 2005; Bayrak et al., 2006; Bakan et al., 2006; Demir, & Donmez, 2008; Donmez et al., 2009). همچنین، در یک پژوهش فروشویی مس اکسیدی با استفاده از اسید آلی گزارش شده است (Habbache et al., 2009) که در آن، نرخ انحلال اکسید مس در کاتالیز دارای اکسید مس با استفاده از اسید سولفوریک، نیتریک، هیدروکلریک و سیتریک بررسی شده و عوامل مؤثر در آن بهینه شده است.

در مطالعه حاضر، پس از انتخاب محیط کشت مناسب و تهیه اسید سیتریک، تأثیر عوامل مختلف بر درصد استخراج مس بررسی و شرایط بهینه فروشویی زیستی و فروشویی تعیین شده است.

۲- مواد و روش پژوهش

۲-۱. مواد

ماده معدنی: کانستگ مورد استفاده در این پژوهش، کانستگ اکسیدی مس منطقه طارم سفلی بود. برای آماده‌سازی کانستگ برای آزمایش، پس از سنگ‌شکنی توسط سنگ‌شکن‌های فکی، مخروطی و استوانه‌ای، نمونه توسط آسیای گلوله‌ای آسیا شده و نمونه نهایی به دست آمد. پس از تهیه نمونه معرف، مطالعات XRD و XRF برای آن انجام شد. بر پایه نتایج مطالعات پراش اشعه ایکس (XRD)، کانی‌های مالاکیت، کوارتز، الیگوکلاز، لامونتیت، کلریت و ایلیت فازهای کانی‌شناسی عمده موجود در کانستگ تشخیص داده شد (شکل ۱). نتایج مطالعات XRF نیز در جدول ۲ ارائه شده است. به‌منظور دست‌یابی به دقت بیشتر در محاسبه درصد استخراج، عیار مس موجود در نمونه به روش طیف سنجی جذب اتمی نیز اندازه‌گیری شد. این روش، مقدار مس موجود در نمونه را ۳/۴ درصد نشان داد.

باکتری، شرایط محیط کشت و مواد مصرفی: باکتری مورد استفاده، باکتری سودوموناس آئروجینوزا (PTCC 1074) بود که از بانک ریزجانداران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران تهیه شد. ترکیبات محیط کشت شامل: پپتون (peptone)، یست‌اکستراکت (Yeast extract)، گلوکز، پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و سولفات منیزیم متبلور بود و در بخش فروشویی نیز اسید سیتریک به‌عنوان عامل انحلالیت استفاده شد. دو ترکیب اول محصول شرکت لیوفیلکم (Liofilchem) و دیگر ترکیبات محصول شرکت مرک (Merck) بود که بدون خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲. روش پژوهش

در تمامی آزمایش‌های فروشویی زیستی تعداد تقریبی ۳۰۰ میلیون باکتری در میلی‌لیتر با نسبت تلقیح ۲۰ درصد به ارلن‌مایرهای ۵۰۰ میلی‌لیتری دارای ۸۰ میلی‌لیتر محیط کشت استریل افزوده شد و سپس برای کشت درون گرمخانه (انکوباتور) با سرعت چرخش ۸۰ دور در دقیقه و دمای ۳۷ °C قرار گرفت. پس از یک روز، ماده معدنی استریل شده با محدوده ابعادی کوچک‌تر از ۱۰۵ میکرون (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Shabani et al., 2012 & 2013) به ارلن‌ها اضافه شد و دوباره درون گرمخانه قرار گرفت. پس از مدت زمان مشخص، نمونه مورد نظر فیلتر شد و سپس برای جداسازی باکتری‌ها، سانتریفوژ شده و محلول شفاف به دست آمد.

– **تأثیر دما:** بر مبنای نتایج ارائه شده توسط دیگر پژوهشگران، دمای یکی از مهم ترین عوامل مؤثر در فروشویی است و سبب افزایش سرعت واکنش ها می شود. به طوری که در دماهای پایین، انحلال و مقدار درصد استخراج کم است و به تدریج با افزایش دما، درصد استخراج افزایش می یابد و در دماهای بالا، در مدت زمان کوتاهی درصد استخراج بیشتری حاصل می شود. ولی در مورد اسیدهای آلی، دمای بالا ممکن است سبب تجزیه اسید و کاهش درصد استخراج شود (Bingol & Canbazoglu, 2004; Habbache et al., 2009).

مطابق شکل ۹، افزایش دما تا 40°C ، درصد استخراج مس را کمی افزایش می دهد ولی پس از دمای 40°C ، افزایش دما تا 80°C نیز تأثیر محسوسی در استخراج مس ندارد و مقدار مس استخراج شده تقریباً ثابت است. در نتیجه، دمای 40°C به عنوان دمای بهینه انتخاب شد. پس از 40°C افزایش دما تأثیر قابل توجهی در استخراج مس ندارد که می تواند ناشی از تجزیه اسید سیتریک و یا تشکیل رسوب در سطح نمونه باشد که مانع انحلال بیشتر می شود.

۳-۳. انجام آزمایش بهینه

آزمایش بهینه با شرایط بهینه به دست آمده از آزمایش های فروشویی (غلظت $0/2$ مولار اسید، نسبت جامد به مایع $1:20$ (g/mL)، مدت زمان نیم ساعت و دمای 40°C) و آزمایش های فروشویی زیستی (۶ درصد گلوکز، مدت زمان ۸ روز و نسبت جامد به مایع $1:80$) انجام شد که تحت این شرایط ۹۲ درصد مس در عملیات فروشویی و ۵۳ درصد مس در فروشویی زیستی استخراج شد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، دو روش فروشویی زیستی و فروشویی با اسید سیتریک به عنوان روش های زیست سازگار برای انحلال کانسنگ اکسیدی مس بررسی شده است. عملکرد باکتری هتروتروف سودوموناس آئروجینوزا در عملیات فروشویی زیستی بررسی شده است. بنا بر نتایج به دست آمده، فروشویی زیستی این کانسنگ با استفاده از این ریزجاندار امکان پذیر است. این باکتری در شرایط مناسب اسیدهای آلی متنوعی تولید می کند که این اسیدها سبب انحلال مس می شود. عملیات فروشویی با استفاده از اسید سیتریک به عنوان یکی از اسیدهای آلی تولیدی توسط این باکتری بررسی و عوامل مؤثر بر فروشویی بهینه سازی شده است. تحت شرایط بهینه فروشویی زیستی ۵۳ درصد مس و در شرایط بهینه فروشویی ۹۲ درصد مس بازیابی شد. استخراج بیشتر مس در عملیات فروشویی با اسید سیتریک در مقایسه با فروشویی زیستی ناشی از غلظت بیشتر اسید مصرفی نسبت به اسید تولیدی توسط باکتری است.

با توجه به شکل ۵ در شرایطی که مقدار ماده معدنی افزوده شده به محیط کشت دارای باکتری یک گرم است، مقدار درصد استخراج مس بیشینه است. لذا نسبت $1:80$ به عنوان نسبت جامد به مایع بهینه انتخاب شده است.

۳-۲. فروشویی با اسید سیتریک

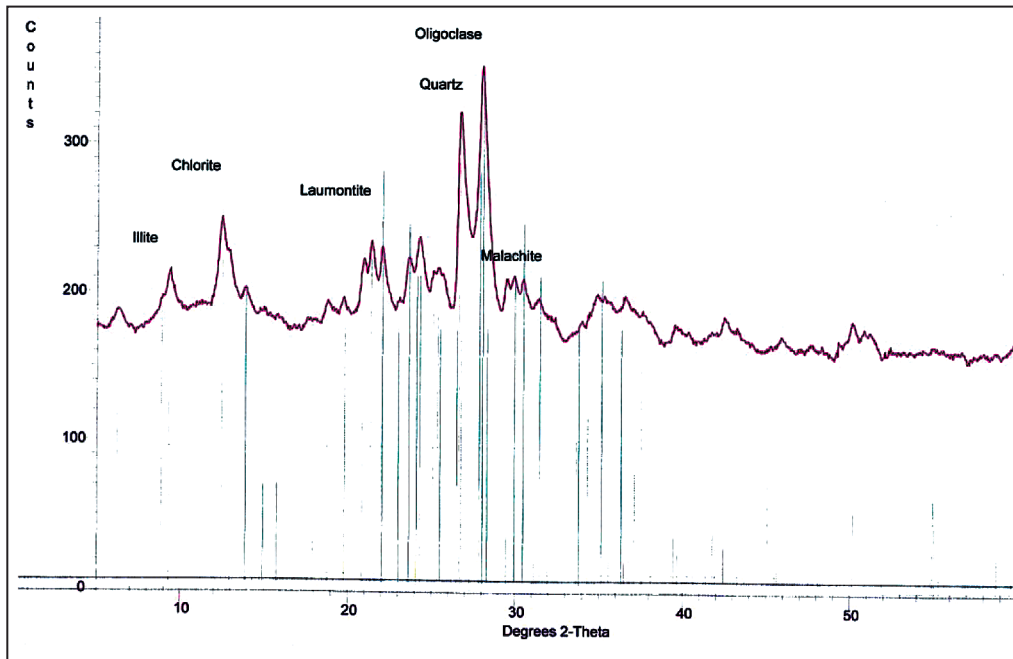
– **تأثیر غلظت اسید:** بنا بر نتایج گزارش شده در زمینه فروشویی (Bingol & Canbazoglu, 2004; Habbache et al., 2009)، غلظت اسید مورد استفاده یکی از عوامل مهم و مؤثر در فروشویی است و افزایش غلظت اسید سبب افزایش انحلال و در نتیجه افزایش درصد استخراج می شود.

با توجه به شکل ۶، با افزایش غلظت اسید از مقدار $0/05$ مولار به $0/2$ مولار، درصد استخراج از ۳۹ درصد به $88/4$ درصد افزایش می یابد که مقدار قابل توجهی است ولی افزایش غلظت اسید به مقادیر بالاتر از $0/2$ مولار، تأثیر محسوسی در درصد استخراج ندارد و بعد از این غلظت، درصد استخراج تقریباً ثابت است. بنا بر این، غلظت $0/2$ مولار، غلظت بهینه است.

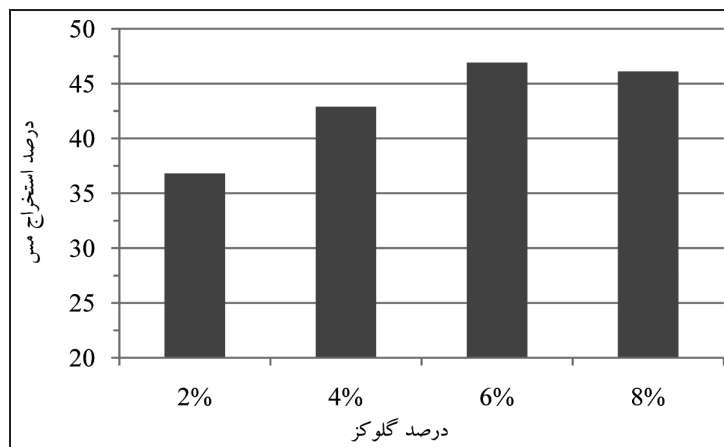
– **تأثیر مدت زمان فروشویی:** افزایش مدت زمان فروشویی، سبب افزایش زمان تماس ماده معدنی و اسید و در نتیجه افزایش درصد استخراج می شود. ولی پس از گذشت مدت زمان مشخص، افزایش زمان تأثیر قابل توجهی در افزایش درصد استخراج ندارد (Bingol & Canbazoglu, 2004; Habbache et al., 2009).

همان گونه که در شکل ۷ مشخص است، با افزایش زمان تا ۳۰ دقیقه درصد استخراج مس به شدت افزایش می یابد و شیب نمودار تا رسیدن به این نقطه بسیار زیاد است ولی پس از ۳۰ دقیقه، شیب نمودار کاهش می یابد و درصد استخراج مس در زمان های نیم ساعت و یک ساعت تقریباً برابر است و پس از گذشت زمان های بیشتر، درصد استخراج تغییرات چندانی ندارد. با توجه به ملاحظات اقتصادی، هر چه مدت زمان فروشویی کمتر باشد، مطلوب تر است بنابراین زمان فروشویی به مدت نیم ساعت انتخاب شد.

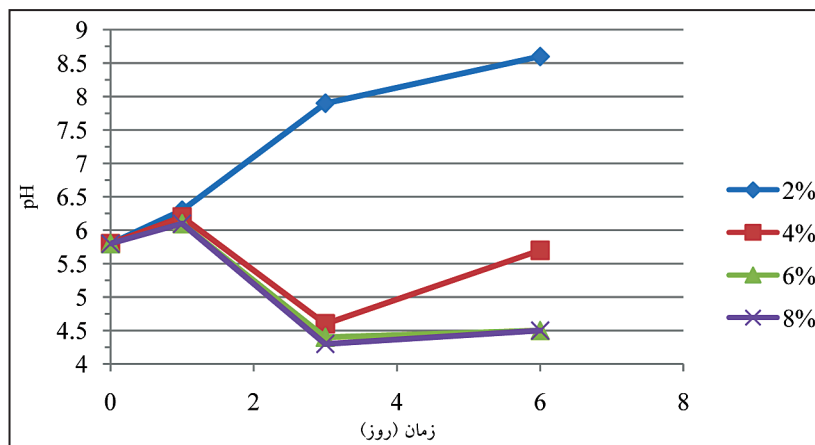
– **تأثیر نسبت جامد به مایع (S/L):** به طور کلی، کاهش نسبت جامد به مایع به دلیل افزایش حجم اسید در دسترس برای هر ذره ماده معدنی، سبب افزایش سرعت فروشویی و افزایش درصد استخراج می شود. بنا بر نتایج به دست آمده، با کاهش نسبت جامد به مایع تا مقدار $1:20$ (g/mL) درصد استخراج مس افزایش می یابد ولی پس از آن، با کاهش این نسبت، تغییرات درصد استخراج قابل توجه نمی باشد و در یک روند کلی با افزایش نسبت جامد به مایع، درصد استخراج کاهش می یابد. این نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، بیشترین نسبت جامد به مایع به کار می رود. در این مورد، نسبت $1:20$ (g/mL) به عنوان نسبت جامد به مایع بهینه انتخاب شد.



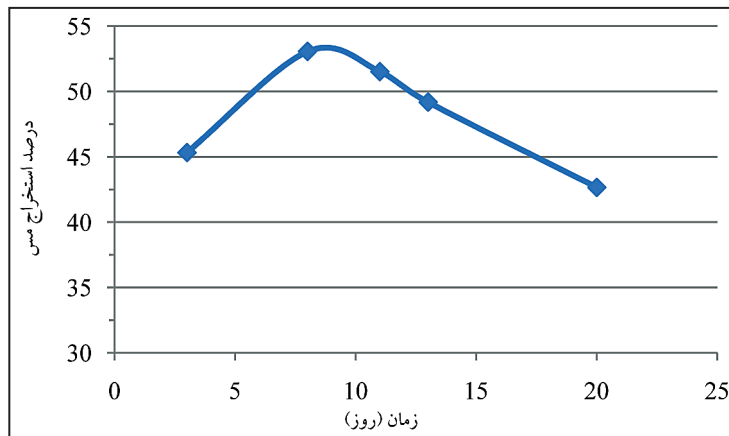
شکل ۱- تجزیه XRD نمونه معرف.



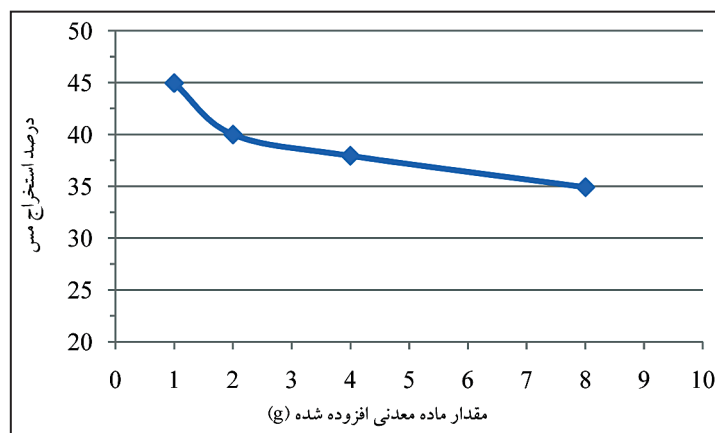
شکل ۲- تأثیر درصد گلوکز محیط کشت در فروشویی زیستی کانسنگ اکسیدی مس. (محدوده ابعدی: کوچک‌تر از ۱۰۵ میکرون، حجم محیط کشت: ۸۰ میلی لیتر، مقدار ماده معدنی افزوده شده: ۱ گرم، زمان: ۵ روز).



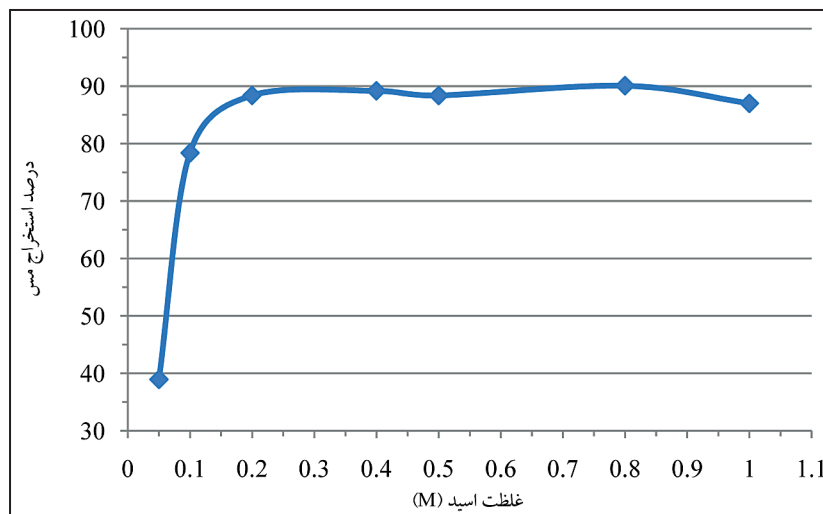
شکل ۳- تغییرات pH در آزمایش‌های بهینه‌سازی درصد گلوکز محیط کشت.



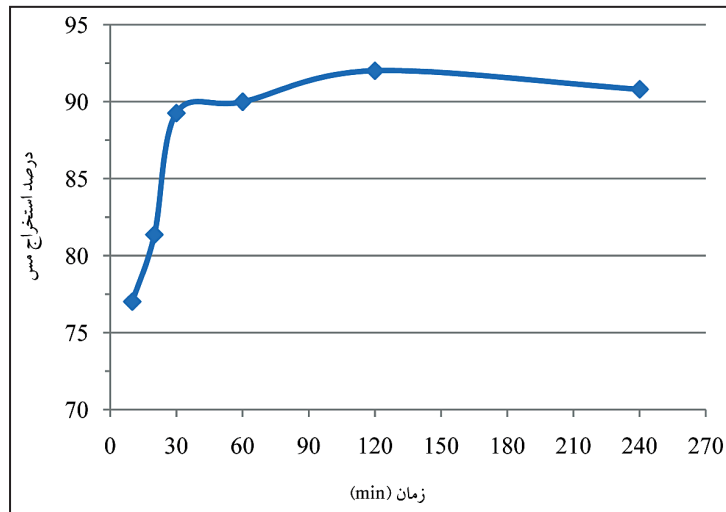
شکل ۴- تأثیر مدت زمان در فروشویی زیستی کانسنگ اکسیدی مس. (محدوده ابعادی: کوچکتر از ۱۰۵ میکرون، حجم محیط کشت: ۸۰ میلی لیتر، مقدار ماده معدنی افزوده شده: ۱ گرم، درصد گلوکز: ۰.۶٪).



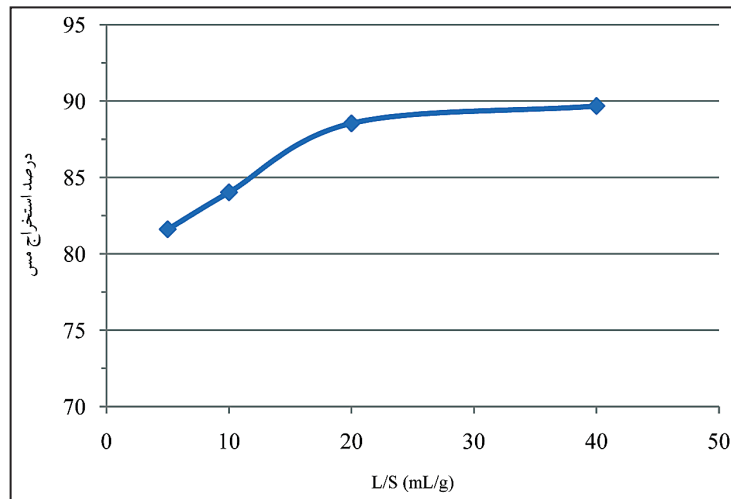
شکل ۵- تأثیر نسبت جامد به مایع در فروشویی زیستی کانسنگ اکسیدی مس. (محدوده ابعادی: کوچکتر از ۱۰۵ میکرون، حجم محیط کشت: ۸۰ میلی لیتر، زمان: ۵ روز، درصد گلوکز: ۰.۶٪).



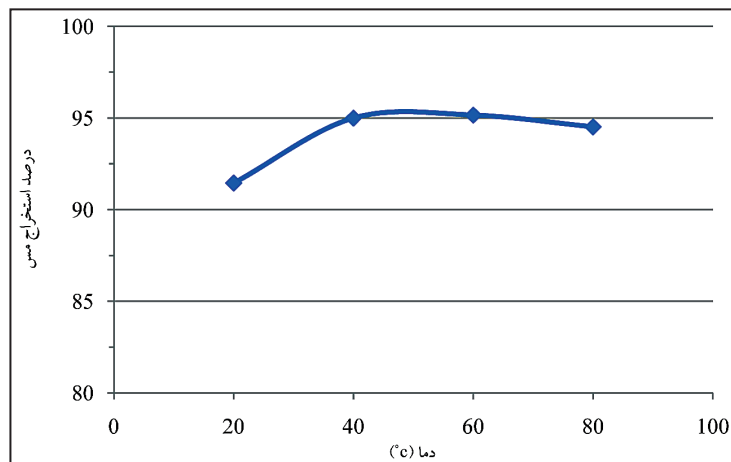
شکل ۶- تأثیر غلظت اسید در فروشویی مس با اسید سیتریک. (S/L=1:10(g/mL)، دمای محیط، زمان: ۱ ساعت، نرخ هم‌زدن: ۴۰۰ rpm).



شکل ۷- تأثیر مدت زمان فروشویی در فروشویی مس با اسید سیتریک. (S/L=1:10(g/mL)، دمای محیط، غلظت اسید: ۰/۵ مولار، نرخ هم‌زدن: ۴۰۰ rpm).



شکل ۸- تأثیر نسبت جامد به مایع در فروشویی مس با اسید سیتریک. (زمان: ۰/۵ ساعت، دمای محیط، غلظت اسید: ۰/۵ مولار، نرخ هم‌زدن: ۴۰۰ rpm).



شکل ۹- تأثیر دما در فروشویی مس با اسید سیتریک. (S/L=1:20(g/mL)، زمان: ۰/۵ ساعت، غلظت اسید: ۰/۵ مولار، نرخ هم‌زدن: ۴۰۰ rpm).

جدول ۱- آمار برخی از کاربردهای صنعتی فروش.

نام کارخانه / معدن	کشور	تولید سالانه مس (تن)	نام کارخانه / معدن	کشور	تولید سالانه مس (تن)
Lo Aguirre	شیلی	$15-14 \times 10^3$	Toquepala	پرو	40×10^3
Cerro Colorado	شیلی	100×10^3	Morenci	آمریکا (آریزونا)	380×10^3
Ivan Zar	شیلی	12×10^3	Equatorial Tonopah	آمریکا (نوادا)	25×10^3
Quebrada Blanca	شیلی	75×10^3	Gunpowder Mammoth Mine	استرالیا	33×10^3
Punta del Cobre	شیلی	$8-7 \times 10^3$	Girilambone	استرالیا	14×10^3
Andacollo	شیلی	21×10^3	Nifty Copper	استرالیا	16×10^3
Dos Amigos	شیلی	---	Whim Creek and Mons Cupri	استرالیا	17×10^3
Zaldivar	شیلی	150×10^3	Mt Leyshon	استرالیا	750
Lomas Bayas	شیلی	60×10^3	S & K Copper	میانمار	40×10^3
Cerro Verde	پرو	$2/54 \times 10^3$	Phoenix deposit	قبرس	8×10^3
Escondida	شیلی	200×10^3	Jinchuan Copper	چین	10×10^3
Lince II	شیلی	27×10^3			

جدول ۲- تجزیه شیمیایی نمونه معرف.

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CuO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
درصد	۹/۵۵	۷/۱۴	۷/۶	۸/۴	۳۳/۳	۶۵/۱	۴۶/۲	۲۴/۳	۶۱/۵

کتابنگاری

شعبانی، م. ا.، ایران نژاد، م. و آزاد مهر، ا. ر. ۱۳۹۱- بررسی عوامل مؤثر در استحصال مس از کانسنگ اکسید با روش بیوفروشی. اولین کنفرانس ملی فناوری‌های معدنکاری، ایران، یزد، ۱۵ تا ۱۷ ص.

References

- Bakan, F., Lacin, O., Bayrak, B. & Sarac, H., 2006- Dissolution kinetics of natural magnesite in lactic acid solutions. *International Journal of Mineral Processing* 80: 27-34.
- Bayrak, B., Lacin, O., Bakan, F. & Sarac, H., 2006- Investigation of dissolution kinetics of natural magnesite in gluconic acid solutions. *Chemical Engineering Journal* 117: 109-115.
- Bingol, D. & Canbazoglu, M., 2004- Dissolution kinetics of malachite in sulphuric acid. *Hydrometallurgy* 72: 159-165.
- Bosshard, P. B., Bachofen, R. & Brandl, H., 1996- Metal leaching of fly ash from municipal waste incineration by *Aspergillus niger*. *Environmental Science & Technology* 30: 3066-3070.
- Brierley, J. A. & Brierley, C. L., 2001- Present and future commercial applications of biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy* 59: 233-239.
- Brierley, J. A., 2008- A perspective on developments in biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy* 94: 2-7.
- Burgstaller, W., Strasser, H., Woebking, H. & Schinner, F., 1992- Solubilization of zinc oxide from filter dust with *Penicillium simplicissimum*: Bioreactor leaching and stoichiometry. *Environmental Science & Technology* 26: 340-346.
- Demir, F. & Donmez, B., 2008- Optimization of the dissolution of magnesite in citric acid solutions. *International Journal of Mineral Processing* 87: 60-64.
- Donmez, B., Demir, F. & Lacin, O., 2009- Leaching kinetics of calcined magnesite in acetic acid solutions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 15: 865-869.
- Gadd, G. M., Gharieb, M. M., Ramsay, L. M., Sayer, J. A., Whatley, A. R. & White, C., 1998- Fungal process for bioremediation of toxic metal and radionuclide pollution. *Chemical Technology & biotechnology* 71: 364-366.
- Habbache, N., Alane, N., Djerad, S. & Tifouti, L., 2009- Leaching of copper oxide with different acid solutions. *Chemical Engineering Journal* 152: 503-508.

- Jain, N. & Sharma, D. K., 2004- Biohydrometallurgy for nonsulfidic minerals—A review. *Geomicrobiology Journal*:21 135-144.
- Lacin, O., Donmez, B. & Demir, F., 2005- Dissolution kinetics of natural magnesite in acetic acid solutions. *International Journal of Mineral Processing* 75: 91-99.
- Lee, J., Acar, S., Doerr, D. L. & Brierley, J. A., 2011- Comparative bioleaching and mineralogy of composited sulfide ores containing Enargite, Covellite and Chalcocite by mesophilic and thermophilic microorganisms. *Hydrometallurgy* 105: 213-221.
- Lee, S. O., Tran, T., Park, Y. Y., Kim, S. J. & Kim, M. J., 2006- Study on the kinetics of iron oxide leaching by oxalic acid. *International Journal of Mineral Processing* 80: 144-152.
- Lee, S. O., Tran, T., Park, Y. Y., Kim, S. J. & Kim, M. J., 2007- Dissolution of iron oxide using oxalic acid. *Hydrometallurgy* 87: 91-99.
- Mandal, S. K. & Banerjee, P. C., 2004- Iron leaching from china clay with oxalic acid: Effect of different physico-chemical parameters. *International Journal of Mineral Processing* 74: 263-270.
- Martínez-Luévanos, A., Rodríguez-Delgado, M. G., Uribe-Salas, A., Carrillo-Pedroza, F. R. & Osuna-Alarcón, J. G., 2011- Leaching kinetics of iron from low grade kaolin by oxalic acid solutions. *Applied Clay Science* 51: 473-477.
- Mulligan, C. N. & Kamali, M., 2003- Bioleaching of copper and other metals from low-grade oxidized mining ores by *Aspergillus niger*. *Chemical Technology & biotechnology* 78: 497-503.
- Pradhan, N., Nathsarma, K. C., SrinivasaRao, K., Sukla, L. B. & Mishra, B. K., 2008- Heap bioleaching of chalcopyrite: A review. *Minerals Engineering* 21: 355–365.
- Qiu, M., Wang, G., Zhang, W. & Xiong, S., 2006- Optimizing conditions for bacterial leaching of copper from discarded mines. *Journal of University of Science and Technology Beijing* 13: 108-111.
- Shabani, M. A., Irannajad, M. & Azadmehr, A. R., 2012a- Heterotrophic bioleaching of copper oxide ore, XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC2012), New Delhi, India, pp. 4877-4882.
- Shabani, M. A., Irannajad, M. & Azadmehr, A. R., 2012b- Investigation on leaching of malachite by citric acid. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 19: 782-786.
- Shabani, M. A., Irannajad, M., Azadmehr, A. R. & Meshkini, M., 2013- Bioleaching of copper oxide ore by *Pseudomonas aeruginosa*. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 20: 1130-1134.
- Sheng-hua, YIN, Ai-xiang, WU & Guan-zhou, QIU, 2008- Bioleaching of low-grade copper sulfides. *J. Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 18: 707-713.
- Tzeferis, P. G., Agatzini, S. & Nerantzis, E. T., 1994- Mineral leaching of non-sulphide nickel ores using heterotrophic microorganisms. *Letters in Applied Microbiology* 18: 209–213.
- Vyas, P. & Gulati, A., 2009- Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. *BMC Microbiology*.
- Watling, H. W., 2006- The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides — A review. *Hydrometallurgy* 84: 81-108.

Investigation on Leaching of Copper Oxide Ore by Environmentally Friendly Methods

M. A. Shabani ¹, M. Irannajad ^{2*} & A. R. Azadmehr ³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Mining & Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

² Associate Professor, Faculty of Mining & Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Mining & Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 2012 April 30

Accepted: 2013 February 11

Abstract

Copper oxide ores are usually leached in sulphuric acid solution. However, it has severe adverse impact on the environment. In this study, bioleaching and leaching by citric acid, as environmentally friendly methods, are investigated. The experiments were carried out on a copper oxide ore sample containing copper content of 3.4%. This sample does not contain any energy source to grow the conventional bioleaching microorganisms (like *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans*). This sample was leached by a heterotrophic bacterium, *Pseudomonas aeruginosa*. This bacterium produces organic acids in selected culture medium that operate as leaching agents. Leaching is investigated by citric acid, as an organic acid produced by this microorganism. The optimum bioleaching conditions were found as: glucose percentage of 6, bioleaching time 8 days and solid/liquid ratio 1:80 and optimum leaching conditions as: particle size range 105-150 μ m, acid concentration of 0.2 M, 30 min dissolution time, solid/liquid ratio of 1:20 g/mL and temperature of 40°C. Under optimum bioleaching conditions 53 percent of copper was extracted and copper extraction under optimum leaching conditions was 92 percent.

Keywords: Copper oxide ore, Bioleaching, Leaching, Citric acid, Heterotrophic bacteria, *Pseudomonas aeruginosa*.

For Persian Version see pages 253 to 260

*Corresponding author: M. Irannajad; E-mail: Iranajad@aut.ac.ir