فروشویی زیستی ناپیوسته شبکه معدنی پایریت کانسنگ مقاوم حاوی طلا معادن موته اصفهان با استفاده از مخلوط باکتری‌های لیتوتروف شیمیایی مزوفیل

فرزانه وهاب زاده
دانشیار
دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

اعظم نیک نژادی
کارشناسی ارشد
دانشگاه آزاد اسلامی تهران - واحد شمال

بابک بنکدارپور
استادیار
دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حسین غفوریان
محقق
مرکز تحقیقات هسته ای سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

در استخراج فلزات با ارزش نظیر طلا از کانسنگ ها، وجود طبیعتی ویژه از شبکه های معدنی سولفیدی استفاده از روش های معمول و متداول از قبیل سیانیداسیون را با مسائل و مشکلات متعددی روبرو ساخته است. با توجه به گستره کاربرد فن آوری های زیستی و شناخت گروه های خاصی از باکتری ها در استفاده از مواد معدنی (کسب انرژی لازم برای زیست و حیات) فروشویی زیستی به عنوان بخش پیش عملیاتی در بهبود روند سیانیداسیون مورد ملاحظه قرار گرفته است. در این تحقیق از مخلوط باکتری های لیتوتروف شیمیایی مزوفیل: تایوباسیلوس - فرواکسیدانز، تایوباسیلوس - تایواکسیدانز، و لیپتوسپیرلیوم - فرواکسیدانز در فروشویی زیستی ناپیوسته شبکه معدنی سولفیدی پایریت معادن طلا موته اصفهان استفاده شده است. با توجه به عملکرد باکتری های نامبرده بر جزء سولفور و نیز آهن این شبکه معدنی تغییرات غلظت آهن کل محلول و نیز غلظت های آهن (II) و (III) به صورت تابعی از زمان اندازه گیری شده و ضمن مشخص نمودن مقدار آهن استخراجی به ازاء میزان آهن موجود در نمونه پایریت مورد استفاده و با توجه به دانسیته مواد جامد در محلول، شدت و سرعت این تغییرات محاسبه و میزان حل شدن آهن در محلول فروشویی تعیین گردیده است. نقش این باکتری ها در رابطه با مکانیزم اکسیداسیون باکتریایی - شیمیایی پیشنهادی موجود درمتون علمی مورد بحث قرار گرفته و نتایج موجود به عملکرد و نقش مثبت و مؤثر مخلوط باکتری ها در فروشویی زیستی ناپیوسته دلالت دارد.

کلمات کلیدی

اکسیداسیون باکتریایی، کانسنگهای مقاوم، فروشویی زیستی پایریت سولفیدی، تایوباسیلای، لپتوسپریلای

Batch Bioleaching of a Gold - Bearing Pyrite of Motah Mine - Isphahan by the mixed Chemolithotrophic Bacterial Cultures

F. Vahabzadeh
Associate Professor
Chemical Engineering Department,
Amirk University of Technology

A. Niknezhadi
M. Sc Student
Azad University

B. Bonakdarpoor
Assistant Professor
Chemical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

H. Ghafourian
Research Assistant
Nuclear Energy Center of Tran

Abstract

In the extraction of number of metal with high unit price such as gold of certain types of sulfidic minerals in the ore makes some difficulties in the way of using common processes such as cyanidation. With reference to the diversity of biotechnology area, many researche have been conducted using microorganisms for treating the refractory ores. Certain groups of bacteria have capacity to use inorganic materials such as minerals to obtain energy for their metabolic activites and living. Considering oxidation and/or solubilization of the sulfidic minerals these reactions could cause the loss of integration of the sulfidic network and result is the liberation of gold from its encapsulating materix. Microbial solubilization and/or oxidation are the basis for using bioleaching process as a pretreatment of refractory gold - bearing sulfide ores prior to the cyanidation. In this research a mixed cultures of mesophilic chemolitoautotrophic bacteria (Thiobacillus ferrooxidans, Thiobacillus thiooxidans and Leptospirillum ferrooxidans) have been used to conduct batch bioleaching of sulfidic pyrite of Motah mine, - Isphahan. With reference to biological function (s) of each of these three individual bacterial species on iron and sulfur fractions of the pyrite sample the amount of iron extracted was measured and by obtaining the time coures of iron dissolution by the mixed cultures - rate of the bioleaching was determined. Comparing these results with that from using only T. ferrooxidans, one could see some improvements. The roles of each of these bacteria in reference to the suggested mechanism and with regards to the results obtained in this resarch have been discussed. All of these show the positive functions of mixed - bacterial cultures relative to mono - bacterial culture in bioleaching of sulfidic pyrite. Similar findings have been reported by a number of reseachers, the results of this work thus cold be emphesized in this way.

Keywords

Bacterial Oxidation, refractory ores, bioleahing of Sulfidic pyrite, Thiobaclli, Leptospirilli.

مقدمه

کانسنگ های مقاوم طلا عبارت اطلاق شده به کانسنگ های طلا است که استخراج این فلز از آن با استفاده از روش معمول و متعارف سیانیداسیون[1] در حد کمتری از هشتاد درصد باشد ـ به منظور بازیافت اقتصادی طلا ، به سطح استخراجی بیش از این حد نیاز است (۲ و ۱). شبکه معدنی کانسنگ مقاوم به تفصیل بررسی شده و عوامل متعددی در ایجاد این شبکه ویژه مورد شناسایی قرار گرفته اند (۴ و ۳). در اغلب موارد در این زمینه شبکه سولفیدی آهن (پایریت و یا ارسنوپایریت[2]) شبکه دربرگیر نده فلز با ارزش است (۶ و ۵). از این رو با به کار گرفتن پیش عملیات اکسیداتیو و شکست شبکه سولفیدی نهایتاً روند سیانیداسیون بر فلز طلا با کارآیی بهتر و بیشتری همراه خواهد بود (۷ و ۲). پایرومتالوژی و هایدرومتالوژی[3] دو گروه اصلی پیش عملیات های اکسیداتیو هستند که در گروه اخیر به اهمیت فروشویی زیستی اشاره می شود ونکاتی از قبیل به کار گرفتن شرایط اعتدالی و صرفه انرژی و پایین بودن مسائل زیست محیطی از جمله نکات مثبت در استفاده از فن آوری های زیستی در این زمینه بشمار می آیند (۱).

استفاده از گروه های خاصی از باکتری های اسیددوست و اکسید کننده سولفور ونیز آهن در این ارتباط از استقبال علمی و عملی خوبی برخوردار شده است. از بین رفتن انسجام و یکپارچگی شبکه معدنی کانسنگ مقاوم خود به عنوان شاخصی در آزادسازی فلز با ارزش (طلا برای مثال) در طی فرایند بعدی استخراج (سیانیداسیون) شناسایی شده است (۸). باکتری های تایوباسیلوس ـ فرواکسیدانز، تایوباسیلوس ـ تایواکسیدانز و لیپتوسپیرلیوم ـ فرواکسیدانز[4] در این ارتباط از گستره تحقیقات و کاربرد بیشتری برخوردار هستند (۹ و ۸). شبکه معدنی کانسنگ طی مکانیزمی تحت عنوان مستقیم (تماس مستقیم باکتری ها بر سطح ماده معدنی) ویا به واسطه آهن (III) موجود درمحلول فروشویی و لذا مکانیزم غیر مستقیم (آهن (III) خود حاصل کاتالیز اکسیداتیو باکتریایی بر ماده معدنی است) تحت واکنش های اکسیداتیو قرار می گیرند (۱۰). چند سیستم انزیمی در رابطه با واکنش های کاتالیتیکی اکسیداسیون سولفور و نیز آهن در باکتری های نامبرده شده در فوق شناسایی شده اند (۱۴ و ۱۳ و ۱۲ و ۱۱). در مقالات علمی اخیر به استفاده از

مخلوط باکتری های ت. فرواکسیدانز، ت. تایواکسیدانز در فروشویی زیستی شبکه معدنی سولفیدی کانسنگ های مقاوم حاوی طلا اشاره شده است (۱۸ و ۱۷ و ۶). با توجه به نقش(ها) تکمیلی باکتری های فوق الذکر انتظار بر اینست که استفاده از مخلوط این باکتری ها به بهبود و افزایش کارآیی فروشویی زیستی کانسنگ مقاوم بیانجامد. هدف از اجرای این تحقیق بررسی عملکرد مخلوط باکتری های ت. فرواکسیدانز، ت. تایواکسیدانز، ول. فرواکسیدانز در فروشویی زیستی ناپیوسته شبکه سولفیدی پایریت حاوی طلا موته اصفهان است.

مواد و روش ها

میکروارگانیسم ها

کشت های خالص باکتری ها تهیه شده از مجموعه میکروبی DSM[5] عبارت بودند از: تایو باسیلوس - فرواکسیدانز ۵۸۳، تایوباسیلوس - تایواکسیدانز ۵۰۴ و لپتوسپیرلیوم - فرواکسیدانز ۲۷۰۵. آماده نمودن محیط کشت و نحوه انتقال باکتری ها به آن، گرمخانه گذاری[6] و بررسی رشد هر یک از باکتری ها مطابق با دستور کار ارسالی از DSM انجام گرفت (۱۹)*. شمارش تعداد باکتری ها (باکتری های آزاد در محلول) با به کار گرفتن لام توما[7] مخصوص شمارش تعداد سلول های باکتری و با استفاده از میکروسکوپ نوری (بزرگنمایی ۴۰۰×) انجام گرفت (۲۰ و ۱۹ و ۳). در متون علمی به این نکته اشاره شده است که سطح باکتری در ابتدا ودر تلقیح در حدی بیش از تعداد ۱×۱۰^{۶} سلول به ازاء هر میلیلیتر محلول، بر شدت و سرعت فروشویی زیستی بدون تأثیر می باشد (۲۱). با توجه به شمارش سلولی برای هر یک از سه باکتری مورد استفاده در این تحقیق حجم مورد نیاز جهت تهیه مخلوط باکتری ها از کشت باکتری (ها) برداشت و نسبت های باکتریایی مورد نظر به صورت زیر برای انجام فروشویی ناپیوسته آماده گردید. در تهیه، حجم مخلوط باکتریایی در محدوده ۱۲ml - ۸/۷۵ به ازاء ۱۰۰ml محلول فروشویی زیستی بوده است. هر یک از حجم های به کار گرفته شده تعداد مناسبی از سلول باکتری را جهت فروشویی زیستی تأمین نمود. نسبت مخلوط باکتری ها ت. فرواکسیدانز: ت. تایواکسیدانز: ل. فرواکسیدانز به ترتیب عبارتند از:

۱:۳/۲:۱/۲(tr.۶) ؛ ۱:۱/۲:۱/۲(tr.۳) ۱:۱:۱/۲(tr[8].۱)
۱:۳/۲:۱/۴(tr.۲) ؛ ۱:۱/۴(tr.۴) ۱:۱:۱ (tr.۵)

نمونه کانسنگ

نمونه کانسنگ مورد آزمون در این تحقیق از معادن طلا موته اصفهان تهیه شده است. شبکه معدنی سولفیدی طی عملیات شناور سازی به شکل تغلیظ یافته درآمده است، میزان پایریت آن ٪۳/۶۶ گزارش شده است. به منظور تعیین دانه بندی این اجزاء تغلیظ یافته مقدار ۲۰۰g از این مواد را از الک با اندازه منافذ ۵۳μm عبور داده شده است، حدود ٪۲۲/۵ بر سطح الک باقی مانده که با توجه به وزن اولیه ماده تغلیظ یافته (۲۰۰g) حدود ٪۱۱/۲۵ از این مواد بر سطح الک حفظ می شود ودر نتیجه حدود ٪۸۸/۷۵ از الک مزبور عبور یافته است - به عبارت دیگر دانه بندی نمونه (تغلیظ یافته) پایریت به نحوی است که ٪۸۸/۷۵ این مواد اندازه ای در حد زیر ۵۳μm داشته اند (۱۹).

روش فروشویی ناپیوسته

تهیه محلول فروشویی، تهیه مخلوط باکتریایی با داشتن نسبت های ویژه از باکتری ها و گرمخانه گذاری: محلول فروشویی برای کشت مخلوط باکتری های ت. فرواکسیدانز، ت. تایواکسیدانز، ول. فرواکسیدانز متشکل از مواد زیر بوده است (۲۲و۱۹) (با توجه به دستور کار ارسالی DSM برای کشت و رشد هر یک از باکتری ها، برخی از عناصر ضروری برای زیست ورشد این میکروارگانیسم ها در بیش از یک شکل شیمیایی به محلول فروشویی اضافه گردیده اند): $(NH_4)_2SO_4$ °/۴g ؛ $MgSO_4.7H_2O$ °/۴g ؛ KH_2PO_4 °/۴g ؛ NH_4Cl °/۱g ؛ $CaCl_2.2H_2O$ °/۱۴g ؛ $MgCl_2.6H_2O$ °/۱g و ۱ میلیلیتر از محلول عناصر اندک مقدار[9]. مواد ذکر شده را در یک لیتر آب مقطر حل کرده و pH این محلول با استفاده از محلول °/۱N اسیدسولفوریک بر pH ۱/۸ تنظیم شد. سپس به هر یک از هشت ارلن مایر ۲۵۰ میلی لیتری حاوی ۳g پایریت، حجمی از محلول فوق مساوی ۹۰ml را منتقل نموده و محلول حاصل سپس سترون شد (ده دقیقه در دما ۱۱۰ °C). با توجه به درصد پایریت موجود در نمونه مورد آزمون، مقدار یک گرم نمونه ظاهراً حدود ۰/۳۱g آهن در یکصد میلیلتر محلول را تأمین می نماید (۱۹). با در نظر گرفتن محدودیت های موجود در رابطه با گرمخانه همزن دار در دست و ضرورت به کار گرفتن ارلن مایرهایی با حجم نسبی پایین و نیز نتایج بدست آمده از آزمایش مقدماتی بر باکتری ت. فرواکسیدانز، نهایتاً سطح غلظتی کانسنگ در تحقیق در دست در حد ٪۳ انتخاب گردید. سپس محلول باکتری ها را با توجه به نسبت های باکتریایی در نظر گرفته شده به شرح مورد اشاره درفوق، به محلول فروشویی اضافه نموده و ارلن مایرهای حاوی این مجموعه توضیح داده شده را به گرمخانه همزن دار منتقل نموده و با تنظیم دما و دور چرخش

همزن به ترتیب ۳۰ °C و ۱۰۰ rpm، بررسی روند فروشویی زیستی ناپیوسته آغاز گردید. آنگاه در فواصل زمانی معین و با استفاده از ارتوفنونترولین و با به کارگرفتن روش طیف سنجی نوری (λ= ۵۱۵mn) مقادیر جذب نور ترکیبات مجتمع رنگی قرائت و مقدار آهن (II) و آهن کل محلول (برحسب آهن (II)) اندازه گیری و تعیین شد. تغییرات غلظت آهن (II) در منحنی معیار استاندارد در محدوده ۱۰ppm-۲ قرار دارد (۲۳و۱۹).

نتایج و تفسیر

در طی انجام یک آزمایش مقدماتی نقش کاتالیتیک اکسیداتیو باکتری ت. فروآکسیدانز بر نمونه پایریت در سه سطح غلظتی کانسنگ (۱،۳،۵٪) مورد بررسی قرار گرفت. در سطح غلظتی ۳٪ که نهایتاً در ادامه کار و برای دیگر آزمایش های فروشویی زیستی نیز این سطح در نظر گرفته شد، مقدار آهن کل محلول و نیز مقدار آهن (II) (mg/L) به عنوان تابعی از زمان (روز) محاسبه و نتیجه (مقدار آهن کل محلول) در شکل (۱) ارائه شده است. تغییرات زمانی غلظت آهن کل در محلول به واقع نشانگر شدت و سرعت حل شدن آهن موجود در شبکه پایریت بوده که با در نظر گرفتن وضعیت آهن کل محلول، شدت و سرعت فروشویی زیستی نمونه پایریت قابل اندازه گیری بوده، محاسبه می شود. با توجه به تغییرات زمانی مقدار آهن کل محلول به ازاء سه سطح غلظتی (کانسنگ[10]) مورد استفاده در این آزمایش، سطح غلظتی ۳٪ ازسیر تغییراتی بهتری برخوردار بوده و در فاصله ۱۴ تا ۱۸ روز فروشویی زیستی سیر صعودی خوبی را دارد (شکل ۱). سطوح غلظتی کانسنگ در حد ۵٪ و ۱ هر یک، نوسانات تغییراتی نسبتاً قابل ملاحظه ای داشته و مقدار آهن کل محلول در ۱۸ روز نیز در حد نسبتاً کمتری از مقدار آهن کل از برای فروشویی زیستی در سطح غلظتی ۳٪ می باشد (به شکل ۱ توجه شود). نقش کاتالیتیک باکتری ها بر کانسنگ های سولفیدی آهن درگیر هر دو نوع مکانیزم مستقیم و غیر مستقیم است (۳). در سطح غلظتی پایین کانسنگ نظیر ۱٪ می توان به مقدار و کمیت کمتر اتصال یافتگی باکتری ها به کانسنگ اشاره نمود. ضمن آنکه با افزایش سطح غلظتی کانسنگ از شدت و سرعت اکسیداسیون زیستی کانسنگ ها نیز کاسته می شود (۹). برای مثال با استفاده از راکتور همزن دار (ظرفیت دولیتری) بهترین سطح غلظتی کانسنگ پایریت در اکسیداسیون توسط ت. فروآکسیدانز در حد ۵٪ تعیین شد (۹). با توجه به محدودیت های ذاتی موجود در فروشویی زیستی درفلاسک های ارلن مایر، در این تحقیق دردست سطح غلظتی کانسنگ در حد ۳٪ انتخاب شد.

در بسیاری از تحقیقات انجام شده بر فروشویی زیستی پایریت با استفاده از ت. فروآکسیدانز کاهش تدریجی آهن (II) منتسب به اکسیداسیون آهن توسط باکتری بوده و ضمن افزایش مقدار آهن (III) تغییری در مقدار آهن کل حاصل نمی گردد (۲۵). درواقع اظهار بر اینست که تغییرات مقدار آهن کل شاخص مناسبی جهت پیگیری روند فروشویی زیستی (ت. فروآکسیدانز) نمی باشد (۲۵ و ۲۴). در حالیکه درمواردی دیگر به ویژه در استفاده از کشت های باکتریایی مخلوط تغییرات زمانی مقدار آهن کل در فروشویی زیستی جهت پیگیری کار مورد ملاحظه قرار گرفته است (۵). در تحقیق در دست از روند تغییرات آهن حل شده در محلول استفاده شد و با بکار گرفتن ت. فروآکسیدانز حتی در سطح غلظتی کانسنگ ۳٪ زمان مکث و توقف نسبتاً قابل ملاحظه ای در به محلول درآمدن آهن پایریت مشاهده می شود (به شکل ۱ توجه شود). با استفاده از کشت مخلوط باکتری ها زمان توقف و ایستایی در روند فروشویی به حداقل رسیده و در مواردی نیز حذف شده است. نتایج حاصل از تغییرات شدت و سرعت به محلول در آمدن آهن برای شش تیمار فروشویی زیستی مورد بررسی در این تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. حد متوسط این شدت و سرعت فروشویی زیستی درسطح ۰/۲۲۲ wt% به ازاء ۲۴ ساعت می باشد. در تحقیقی دیگر میانگین شدت و سرعت فروشویی زیستی پایریت با استفاده از مخلوط ویژه ای از ت. فروآکسیدانز جداسازی شده از شبکه معدنی سولفیدی طبیعی در حد ۰/۰۸۷wt% به ازاء ساعت گزارش شده است که با تطبیق و سازگاری این مخلوط ویژه باکتریایی به کانسنگ سولفیدی به مدت زمان چهار - دوازده هفته شدت و سرعت فروشویی زیستی به حد تقریبی نه برابر افزایش یافته است (۸). سیر زمانی تغییرات مقدار آهن کل در محلول برای شش تیمار فروشویی زیستی در شکل ۳ نشان داده شده است. روند تغییرات برای دو تیمار درمقایسه با سایر تیمارها از موقعیت بهتری برخوردار است. درصد آهن استخراجی (آهن به محلول در آمده به آهن موجود در ۳ گرم نمونه پایریت ×۱۰۰) برای دو تیمار مزبور در محدوده ۵/۵-۳/۵٪ (جدول ۱). درتیمار ۶ در مقایسه با تیمار ۲ کاستن از بار اولیه میکروبی ت. تایواکسیدانز و رساندن آن به سطح پایه ای جمعیت باکتریایی ت. فروآکسیدانز و در همراهی با سطح پایینتر ل. فروآکسیدانز به عملکرد بهتر مخلوط باکتریایی در اکسیداسیون زیستی شبکه سولفیدی انجامیده است و مرحله تأخیر و مکث زمانی (تطبیق و سازگاری یافتن زیستی) دراین تیمار حذف شده است (شکل های ۴ و ۳). سیر زمانی

تغییرات غلظتی آهن (III) در تیمار ۶ درمقایسه با این تغییرات در تیمار ۲ در حد کمتری بوده و نسبت $\frac{Fe(II)}{Fe(III)}$ در این تیمار بیش از این نسبت درتیمار ۲ می باشد (۱۹). محتمل است که درتیمار ۶ جمعیت مخلوط باکتری ها به نقشی مشابه با نقش ت. تایواکسیدانز نزدیکتر عمل نموده در حالیکه در تیمار ۲ جمعیت مخلوط میکروبی در وضعیتی اکسیداتیو در شباهت با نقش ت. فرواکسیدانز عمل می نماید. در فروشویی زیستی شبکه معدنی کانسنگ سولفیدی توسط مخلوط باکتری های ت. فرواکسیدانز و ت. تایواکسیدانز، نقش این مخلوط میکروبی در محیطی با فسفات کمتر به نقش ت. تایواکسیدانز شباهت بیشتری داشته و در استخراج مس وروی نیز این مخلوط در شرایط تعریف شده آزمایشگاهی مؤثرتر عمل نموده است (۱۷ و ۱۶). در حالیکه درمحیطی با مقدار بالا فسفات نقش مخلوط باکتریایی به ت. فرواکسیدانز شباهت داده شده است که با حد کمتر استخراج فلزات مزبور نیز همراه بوده است (۱۷). لیپتوسپیرلیوم ـ فرواکسیدانز درسطح سلولی بکار گرفته شده در تیمار ۲ از نقشی بهبوده دهنده بر عملکرد مخلوط باکتریایی کمتربهره برده است و سازگاری یافتن زیستی این مخلوط در فاصله زمانی ۱۳ـ۷ روز و در مقایسه با این روند از برای تیمار ۶ با مکث بیشتری همراه است (به شکل های ۴و۳ توجه شود). البته اضافه نمودن بار سلولی اولیه ل. فرواکسیدانز در رساندن آن به سطحی برابر با جمعیت سلولی دو باکتری دیگر (تیمار ۶) به ایفای نقش مؤثرتری برای ل. فرواکسیدانز در همراه با دو باکتری دیگر منجر شده است. حداکثر ظرفیت کاتالیتیک اکسیدکنندگی آهن (II) توسط ل. فرواکسیدانز در حدود ٪۴۰ این ظرفیت اکسیداتیو در ت. فرواکسیدانز می باشد (۲۷ و ۲۶). از این رو افزایش سطح سلولی اولیه امکاناً در کمیّت ابراز فعالیت ل. فرواکسیدانز مؤثر می باشد.

ابراز نقش تکمیلی زیستی میکروارگانیسم ها نسبت به یکدیگر دارای ویژگی مهمی است. در جهت کسب انرژی از مواد معدنی مکانیزم ابراز نقش و عمل ت. تایواکسیدانز و ت. فرواکسیدانز به کانسنگ سولفیدی اساساً با یکدیگر متفاوت است (۱۷). ت. تایواکسیدانز در تماس مستقیم با شبکه پایریت انجام اکسیداسیون انزیمی (سولفور دی اکسیژنیز[11]) جزء سولفیدی را بدون داشتن ترجیحی نسبت به فلز به دام افتاده در این شبکه به عهده دارد (۱۷ و ۱۳). با تولید اسیدسولفوریک ونیز با از بین رفتن انسجام و یکپارچگی شبکه سولفیدی، آهن ((II) شبکه به محلول فروشویی رها می شود. آهن (II) حاصله در شرایط اسیدی از پایداری قابل ملاحظه ای در محلول برخوردار است (۲۸و ۱۰و ۳). اهمیت نقش کاتالیتیک ت. فرواکسیدانز و نیز ل. فرواکسیدانز در اکسیداسیون انزیمی آهن (II) است (۱۰و۴). آهن (III) حاصله در شرایط اسیدی موجود، درمحلول باقی مانده و در نقشی کاتالیتیک فروشویی (شیمیایی) غیر مستقیم پایریت را بعهده می گیرد (۱۰). با تولید آهن (II) و سولفور عنصری در این مرحله و اکسیداسیون این دو جزء در مرحله بعدی توسط ت. فرواکسیدانز و نیز ت. تایواکسیدانز چرخه کاتالیتیک انزیمی باکتریایی تکمیل می شود. در حضور آهن (II) و نیز سولفور عنصری ترجیح ت. فرواکسیدانز بر اکسیدسیون جزء آهن است ضمن آنکه کاتالیز اکسیداسیون سولفور در ت. فرواکسیدانز به عهده انزیم سولفور ـ یون فریک اکسیدوریداکتیز[12] بوده و جهت انجام این واکنش کاتالیتیک تماس این انزیم با سولفور ضروری نمی باشد (۱۱).

باکتری های مورد استفاده در این تحقیق در دست از مجوعه کشت میکروبی خالص (DSM) تهیه شده و هیچگونه سازگاری زیستی نیز بر آن صورت نگرفت. از این رو میزان آهن استخراجی و نیز میانگین شدت و سرعت فروشویی برای تیمارهای مختلف که در آنها از مخلوط باکتری ها به نسبت های متفاوت استفاده شده است را می توان نتایجی نزدیک به واقعیت موجود دانست. مسأله تطبیق یافتگی زیستی و نیز شناسایی و جداسازی گونه های بومی باکتری های مورد اشاره مسلماً بهبود عملکرد میکروارگانیسم ها را در فروشویی به دنبال خواهد داشت.

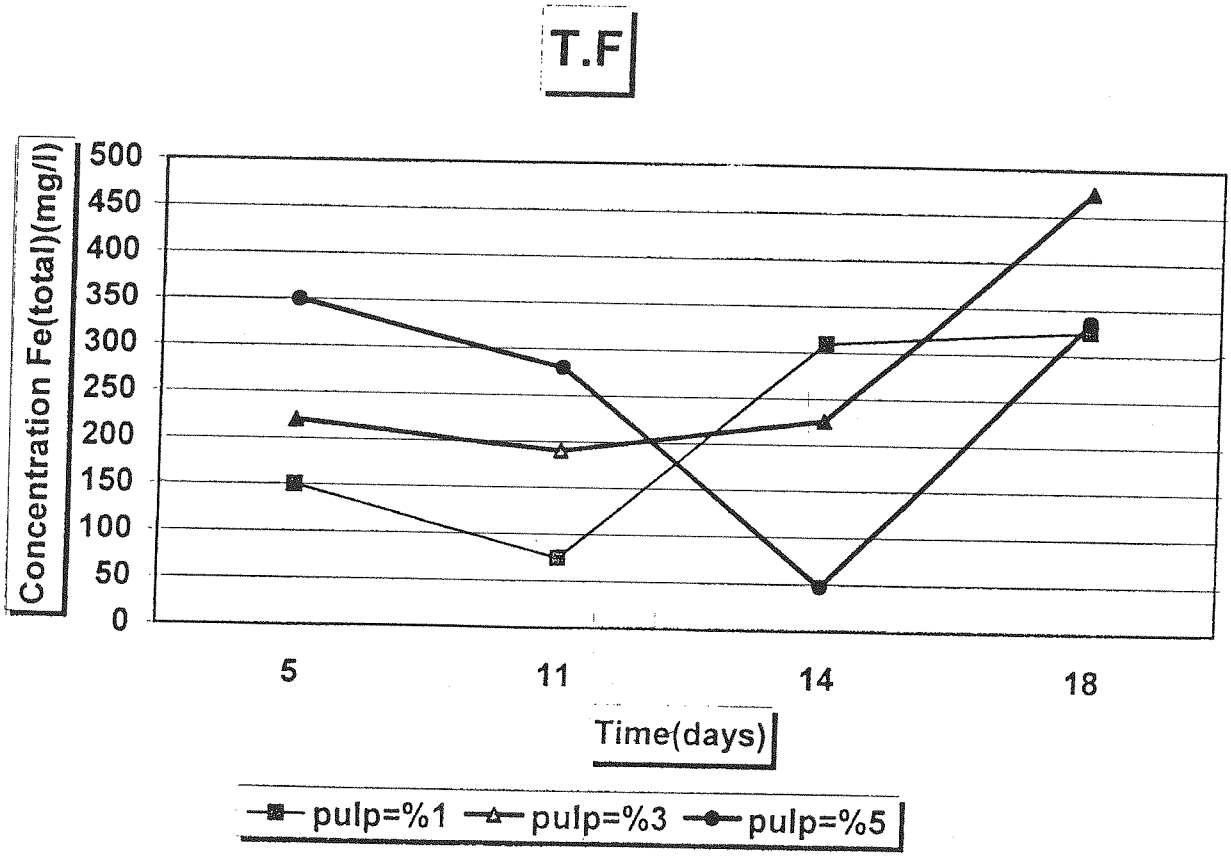
نتیجه گیری

فروشویی زیستی شبکه معدنی پایریت با روش ناپیوسته و با استفاده از کشت باکتریایی خالص، تهیه شده از مجموعه میکروبی DSM انجام گردید. باکتری های ت. فرواکسیدانز، ت. تایواکسیدانز، ول. فرواکسیدانز را با توجه به تعداد و جمعیت سلولی با نسبت های ویژه ای با یکدیگر مخلوط نموده و با توجه به نقشی اصلی که به صورتی عام در فروشویی های زیستی به باکتری ت. فرواکسیدانز نسبت داده می شود در مخلوط باکتری ها حد پایه ای برای این باکتری درنظر گرفته شد. تایوباسیلوس ـ تایواکسیدانز درنسبت های برابر با و یا بیشتر از حد ت. فرواکسیدانز و باکتری ل. فرواکسیدانز در نسبت های کمتر از بخش پایه ای ت. فرواکسیدانز اجزاء تشکیل دهنده مخلوط باکتری ها بوده اند. با توجه به میزان آهن در محلول و نیز شدت و سرعت محاسبه شده برای فروشویی، همراهی باکتری ها با یکدیگر در نسبت ل. فرواکسیدانز ۴/۱ : ت. تایواکسیدانز ۲/۳ : ت. فرواکسیدانز ۱ در مقایسه با مقادیر مربوطه از برای سایر نسبت های باکتری پایی به صورت مؤثرتری در فروشویی

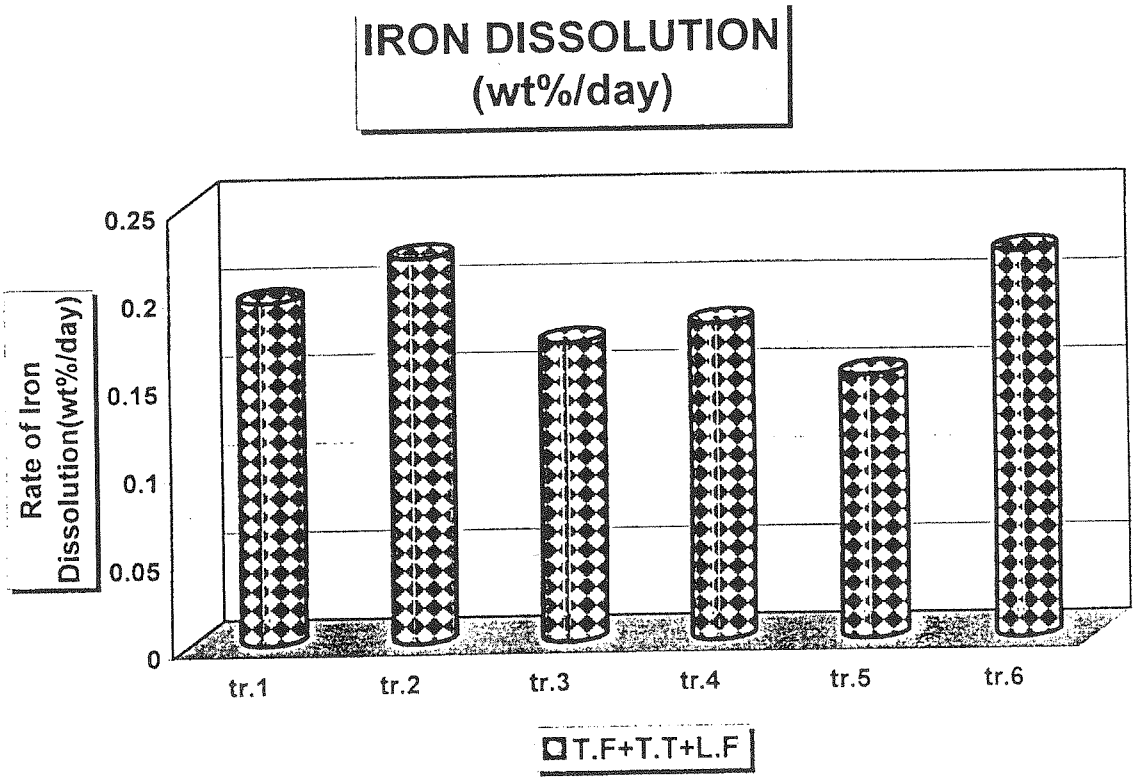
زیستی نقش داشته است. نقش بهبود دهنده محلول باکتری ها بر فروشویی زیستی شبکه معدنی سولفیدی در مقالات علمی مورد تأیید قرار گرفته است. مکانیزم اکسیداسیون باکتریایی می تواند مجموعه ای پیچیده از واکنش های کاتالیتیکی انزیمی و شیمیایی باشد که هر یک از باکتری ها به ترتیبی تکمیلی نسبت به دیگری و از طریقی مستقیم و با در تماس قرار گرفتن با شبکه معدنی و یا به صورتی غیر مستقیم وبا حضور داشتن در محلول، می توانند در همجواری زیستی با یکدیگر این مهم را به انجام رسانند. با توجه به نقش تعیین کننده متغیر زمان در کارایی فروشویی زیستی نبود تأخیر ومکث زمانی درسیر تغییرات به محلول درآمدن آهن توسط محلولی خاص از باکتری ها به بهبود کارایی فروشویی زیستی کانسنگ سولفیدی آهن کمکی مؤثر بشمار می آید. ضمن آنکه پیگیری روند کار با ثبت سیر زمانی تغییرات پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء محلول فروشویی و نیز در مواردی شناسایی گونه باکتری های مورد استفاده در فواصل زمانی و انجام شمارش سلولی (امکاناً به تفکیک گونه) دراین زمان ها همگی در تحلیل نتایج کسب شده و ارائه ترسیمی به واقعیت نزدیک از مکانیزم کاتالیتیک (آنزیمی و شیمیایی) عواملی مهم و تعیین کننده بوده و در داشتن نگرشی از کل به جزء در روند فروشویی زیستی بسیار مؤثر خواهند بود.

تشکر و قدردانی

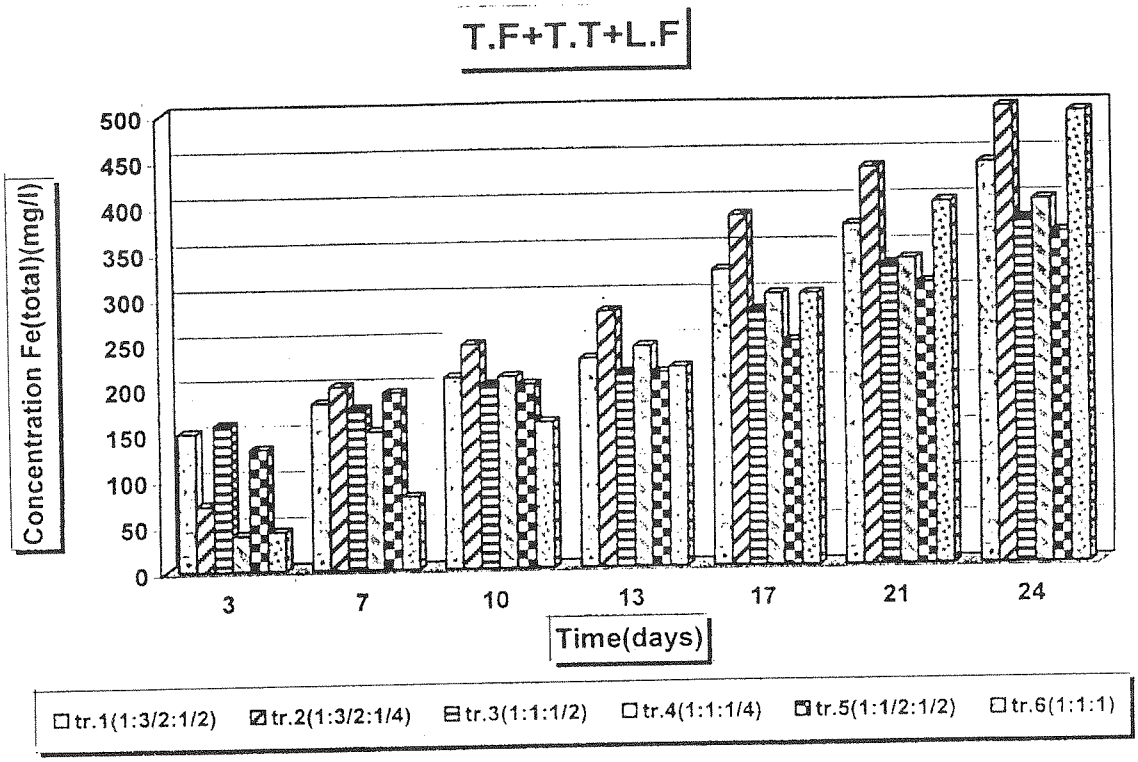
از نظرات و مشاوره علمی بسیار گرانقدر جناب آقای دکتر علی عظیمی همکارگرامی و ارجمندمان در شرکت مس ایران که در مسیر فروشویی زیستی فلزات با ارزش تحقیقات گسترده و خوبی را به انجام رسانده اند صمیمانه تشکر و قدرانی می نماییم.



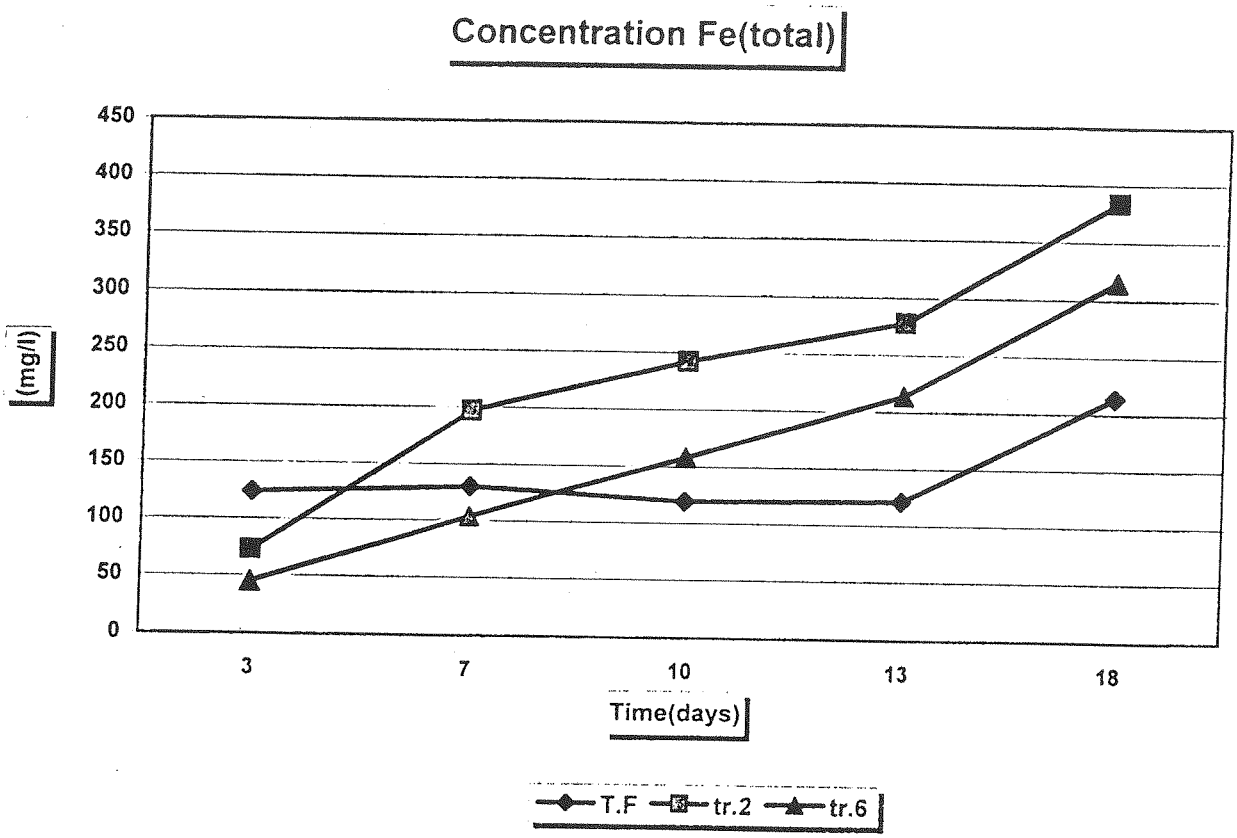
شکل (۱) سیر تغییرات زمانی آهن کل محلول در طی فروشویی زیستی ناپیوسته پایریت با استفاده ازمحلول باکتریایی ت. فرواکسیدانز ـ دانسیته موادر جامد در محلول در سه سطح ۵ و۳ و ۱ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل (۲) شدت و سرعت به محلول در آمدن آهن در طی فروشویی زیستی ناپیوسته پایریت با استفاده از مخلوط های باکتریایی مختلف (درصد وزنی به ازاء روز) (برای توضیحات به متن مراجعه شود).



شکل(۳) غلظت آهن کل محلول در طی فروشویی زیستی ناپیوسته پایریت به عنوان تابعی از زمان: مقایسه مخلوط های باکتریایی مختلف در طی شش تیمار.



شکل (۴) فروشویی زیستی ناپیوسته پایریت: مقایسه دو مخلوط باکتریایی
(tr.۲) (L.F) ۱/۴ (T.T.) ۳/۲ :(T.F.) ۱ و (tr.۶) (L.F.) ۱ : (T.T.) ۱ : (T.F.) ۱ با تیمار حاوی تک باکتری ت. فرواکسیدانز.

جدول (۱) فروشویی زیستی ناپیوسته پایریت توسط مخلوط باکتری های ت.
فرواکسیدانز: ت. تایواکسیدانز:ل. فرواکسیدانز با نسبت های مختلف.

درصد آهن استخراجی (میلیگرم / ۳g نمونه پایریت)							
نسبت (سلولی) باکتریها در مخلوط*	۳	۷	۱۰	۱۳	۱۷	۲۱	۲۴ روز
۱:۳/۲:۱/۲	۱/۶۲	۱/۹۱	۲/۱۸	۲/۴۱	۳/۴۳	۳/۹۵	۴/۶۸
۱:۳/۲:۱/۴	۰/۷۶	۲/۱	۲/۶	۲/۹۷	۳/۹۷	۴/۶	۵/۳۳
۱:۱:۱/۲	۱/۶	۱/۸۷	۲/۱۱	۲/۲۵	۲/۹۸	۳/۴۷	۳/۹۸
۱:۱:۱/۴	۱/۴۵	۱/۶۲	۲/۱۸	۲/۵۲	۳/۱۵	۳/۵۶	۴/۲۷
۱:۱/۲:۱/۲	۱/۳۸	۲/۰۴	۲/۱۵	۲/۲۵	۲/۷۷	۳/۲۹	۳/۸۳
۱:۱:۱	۰/۴۱	۰/۸۲	۱/۶	۲/۲۹	۳/۱۸	۴/۲۲	۵/۳۰

* ت. فرواکسیدانز: ت. تایواکسیدانز: ل. فرواکسیدانز

زیرنویس‌ها

۹ـ محلول عناصر اندك مقدار متشکل از مواد زیر می باشد (به ازاء حجم ۱ لیتر):

H_3BO_3 ۳۱mg;$Na_2MoO_4.2H_2O$ ۱۲mg; $CuCl_2.H_2O$ ۸۵mg. $ZnCl_2$ ۷۰mg;$MnCl_2.4H_2O$ ۱۰۰mg; $CoCl_2.6H_2O$ ۱۲۰mg;

10- pulp density

11- sulfur dioxygenase

12- sulfur - ferric ion oxidoreductase

* ـ نشانه ها و علائم ظاهری رشد: ت. تایواکسیدانز: ایجاد کدورت، ته نشین گردیدن گوگرد ـ اندازه گیری pH اسیدی تر شدن محیط کشت را نشانگر بوده است. ت. فرواکسیدانز: ایجاد کدورت، پدیدار شدن رنگ قرمز آجری و افزایش میزان رنگ. ل. فرواکسیدانز: در برقراری رشد به زمان بیشتری نیاز بود، ایجاد کدورت، پدیدار گشتن رنگ قرمز آجری و افزایش رنگ.

1- cyanidation

2-pyrite, arsenopyrite

3-pyrometallurgical and hydrometallurgical treatments

4-Thiobacillus ferooxidans (T.F) Thiobacillus thiooxidans (T.T) Leptospirillum ferrooxidans (L.F.)

5- Deutsche Sammlung von Microorganismen und Zellkulturen (DSM)

6- intubator

7- Thoma counting chamber (counting chamber - haemocylometer)

8- tr (or treatment)

مراجع

[1] Iglesias, N. and Carranza, F. 1994. Refractory gold - bearing ores: a review of treatment mtehods and recent advances in biotechnological techniques, Hydrometallurgy, 34:383.

[2] Porro, S.; Ramirez, S,; Reche, C; Curutchet, G.; Romanwsk; S.; and Donati, E. 1997. Bacterial attachment: its role in bioleaching processes, Process Biochemistry, 32 (7): 573.

[3] Barrett, J. Hughes, M., Karavaiko, G. and Spercer, P. 1993. Metal Extraction by Bacterial Oxidation of Minerals, Ellis Horwood limited.

[4] Battalia, F.; Hugues, P.; Cabral, T.; Cezac, P.; Garcia, J., and Morin, D. 1998. The mutual effect of mixed thiobacillii Thiobaulli, and leptospirilli populations on pyrite bioleaching, Minerals Engineering, 11 (2): 195.

[5] Currelis L.; Loi, G.; Peretti, R.; Rossi, G.; Trois, P., and Zucca, A. 1997. Gold recovery enhancement from complex sulfide ores through combined bioleahing and cyaindation, Minerals Eng. 10 (6): 567.

[6] Hansford, G. and Chapman, J. 1992. Batch and continuous biooxidation kinetics of a refractory gold-bearing pyrite concentrate, Minerals Engineering, 5 (6): 597.

[7] Hansford, G. and Miller, D. 1993. Biooxidation of a gold - bearing pyrite-arsenopyrite concentrate, FEMS Microbiology Reviews, 11:175.

[8] Attia, Y. and Elzeky, M. 1991. Effect of bacterial adaptation and solution replacement on bioleaching of sulfidic gold ores, Minerals and Metallurgical Processing, August Issue: 122.

[9] Kominitsas, C. and Pooly, F. 1990. Bacterial oxication of an arsenical gold sulfide concentrate from Olympias, Greece, Minerals Engineering, 3 (3/4): 295.

[10] Jorgensen, B. 1983. The microbial suldur cycle. In Microbial Geochemistry (ed). W. Krumbein, Blackwell Scientific Publications.

[11] Sugio, T.; Mizumashi, W.; Inagaki, K., and Tano, T. 1987. Purification and some properties of sulfur: ferric ion oxidoreductase from Thiobacillus ferrooxidans, J. Bacteriol. 169: 4616.

[12] Sugio, T.; Katagiri, T.; Inagaki, K., and Tano, T. 1989. Actual substrate for elementa sulfur oxidation by sulfur: ferric ion oxidoreductase purified from Thiobacillus ferrooxidans, Biochimica et Biophysica Acta, 973:250.

[13] Suzuki, I. 1965. Oxidation of elemental sulfur by an enzyme system of Thiobacillus thiooxidans, Biochemica et Biophysica Acta, 104:359.

[14] Suzuki, I. 1990. Ferrous iron and sulfur oxidation and ferric iron reduction activities of Thiobacillus ferrooxidans are affected by growth on ferrous iron, sulfur, or a sulfide ore, Appl. Environ. Microbiol. 56:1620.

[15] Suzuki, I.; Lizama, H., and Tackaberry, P. 1989. Competitive inhibition of ferrous iron oxidation by Thiobacillus ferrooxidans by increasing concentrations of cells. Appl. Environ. Microbiol. 55:1117.

[16] Lizama, H. and Suzuki, 1. 1989. Rate equation and kinetic parameters of the reactions involved in pyrite oxidation by Thiobacillus ferrooxidans,

Appl. Environ microbiol. 55;2918.

[17] Lizama, H. and Suzuki, I. 1988. Bacterial leahing of sulfide ore by Thiobacillus ferrooxidans and Thiobacillus thiooxidans: I. shake flask studies, Biotechnol. and Bioeng. 32:110.

[18] Sand. W.; Rohde, K.; Sobotke, B., and Zeneck, C. 1992. Evaluation of leptospirillum ferrooxidans for leaching Appl. Environ Microbiol. 58:85.

[۱۹] نیک نژادی ـ منیراعظم، ۱۳۷۸، اکسیداسیون زیستی شبکه سولفیدی پایریت معان طلا موته توسط کشت مخلوط باکتری ها ـ پایان نامه کارشناسی ارشد ـ دانشگاه آزاد اسلامی ـ تهران.

[20] Singleton, P. and D. Sainsburg, 1994. Dictionary of Microbiology and Molecular Biology, P. 231-233. John Wiley and Sons.

[21] Olson, G. 1991. Rate of pyrite bioleaching by Thiobacillus ferrooxidans: results of inter-laboratory comparison, Appl. Environ. Microbiol. 57:642.

[22] Silverman, M. and lundgern, D. 1959. Studies on the chemoautrophic iron bacterium Ferrobacillus ferrooxidans. I. an improved medium and harvesting procedure for securing high cell Y, J. Bacteriol. 77:642.

[23] Skoog, D.A. and D. West, 1976. Fundametals of Analytical Chamistry. 3rd ed., P. 330-332, Holt Rinehart and Winston Publuisher.

[24] Norris, P. and Owen, J. 1993. Mineral sulfide oxzidation by enrichmant cultures of novel thermoacidophilic bacteria. FEMS Microbiology Reviews, 11:51.

[25] Modka, J.; Natarajan, K., and Mukhopadhyay, S. 1996. Development of temperature tolerant strains of Thiobacillus ferrooxidans to improve bioleaching kinetics, Hydrometallurgy 42:51.

[26] Espejo, R.; Escobar, B.; Jedlicki, E.; Uribe, P., and Ohlbaum, R. 1988. Oxidation of ferrous iron and elemental sulfur by Thioacillus ferrooxidans, Appl Environ Microbiol. 54:1694.

[27] Scherpenzeel, D.; Boon, M.; Ras, C.; Hansford, G., and Heijnen, J. 1998. Kinetics of ferrous iron oxidation by leptospirillum bacteria in continuous cultures, Biotechnol. Prog. 14:425.