



بررسی تأثیر سرعت هوادهی بر فروشویی میکروبی اورانیم در زیست رآکتور هواگرد داخلی

محمد رضا ذوالعلی*^۲، سید جابر صفدری^۱، علی حقیقی اصل^۲، عباس رشیدی^۱
۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران
۲. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان، صندوق پستی: ۳۵۱۳۱۱۹۱۱۱، سمنان - ایران

چکیده: فروشویی میکروبی اورانیم از سنگ معدن اورانیم آنومالی ۲ ساغند به وسیله‌ی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در زیست رآکتور هواگرد داخلی با هدف بررسی تأثیر سرعت هوادهی بر آن و یافتن مقدار بهینه‌ی آن صورت گرفت. آزمایش‌ها در چهار سرعت هوادهی مختلف برای به دست آوردن بهترین نتیجه‌ی بازیابی در کم‌ترین زمان ممکن انجام گرفته است. نتایج نشان داد که بالاترین درصد بازیابی اورانیم در سرعت ظاهری ۰/۰۱۰ m/s بود که در مدت ۱۱ روز به بالای ۹۵٪ رسید. هم‌چنین بهترین بازه برای مطالعه‌ی هوادهی در زیست‌رآکتور هواگرد داخلی تعیین گردید. پایین‌ترین مقدار این بازه، ۰/۰۰۶۵ m/s بود که همان سرعت بحرانی تعلیق ذرات اورانیم و بالاترین مقدار آن ۰/۰۱۵ m/s بود. در سرعت‌های بالاتر از ۰/۰۱۵ m/s تنش وارد بر باکتری زمان فرایند استخراج را افزایش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: فروشویی زیستی، سنگ‌های معدن اورانیم، تیوباسیلوس فرواکسیدان، رآکتورهای زیستی، سرعت هوادهی، ساغند

Investigation of Aeration Rate on Uranium Bioleaching in Internal Airlift Bioreactor

M.R. Zolala*², S.J. Safdari¹, A. Haghghi Asl², A. Rashidi¹
1. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran – Iran
2. Department of Chemical Engineering, Semnan University, P.O.Box: 3513119111, Semnan – Iran

Abstract: Uranium is leached from the uranium ore of the second anomaly of Saghand by the *Acidithiobacillus ferrooxidans* bacteria in an internal airlift bio-reactor. This study has been made to find the effect of aeration rate as well as its optimal value. The experiments have been carried out at 4 aeration rates to find the best recovery results in the least possible time duration. The results showed that the most percentage of the uranium recovery is in the superficial gas velocity of 0.010 m/s. The recovery at this aeration rate has an efficiency of more than 95% in 11 days. Also, the best range for aeration study in the airlift bio-reactor is calculated with a minimum value of 0.0065 m/s which is the critical value of the uranium particle suspension as well as the maximum value of 0.015 m/s. The stress on the bacteria increases the recovery time process in velocities of more than 0.015 m/s.

Keywords: *Bioleaching, Uranium Ores, Thiobacillus Ferrooxidans, Bioreactors, Aeration Rate, Saghand*

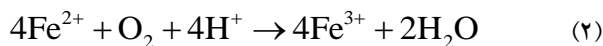
*email: reza.zolala@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۳/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۱۰/۸



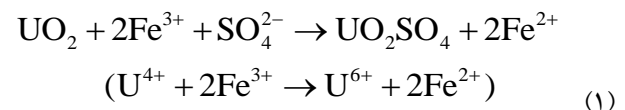
۱. مقدمه

فرواکسیدان رشد مطلوب باکتری‌ها در pH کم‌تر از ۳ و هم‌چنین دمای زیر ۴۰ درجه گزارش شده است [۸ و ۹]. در فرایند فروشویی میکروبی سولفیدهای فلزی اگرچه پذیرنده‌ی نهایی الکترون ترکیب اکسیژن مولکولی است ولی یون‌های آهن فرو عامل اکسایش سولفیدهای فلزی هستند. اکسایش سولفید فلزی به خودی خود فرایندی شیمیایی است که در آن یون‌های آهن فریک به یون‌های آهن فرو کاهیده می‌شوند و بخش گوگردی سولفید فلزی به سولفات و ترکیبات گوگردی حد واسط مختلفی مانند گوگرد عنصری، پلی سولفید، تیو سولفات و پلی تیونات اکسید می‌شود. باکتری‌ها و آرکی‌های هوازی و اسیددوست اکسنده‌ی آهن فرو طی واکنش زیر آهن فریک مورد نیاز برای فروشویی میکروبی را تأمین می‌کنند



باکتری‌ها یا آرکی‌های هوازی و اسیددوست اکسنده‌ی ترکیبات گوگردی، ترکیبات گوگردی حد واسط را به سولفات و پروتون‌ها (سولفوریک اسید) اکسید می‌کنند [۱۰ و ۱۱]. مطالعات زیادی در زمینه‌ی فروشویی میکروبی برای بازیابی فلزاتی نظیر مس، طلا و غیره به وسیله‌ی میکرو ارگانسیم‌های از قبیل اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان، اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدان^(۳)، لیتوسپیریلیم فرواکسیدان^(۳) و هم‌چنین باکتری‌های گرمادوست شامل سولفوآسیلوس ترموسولفید اکسیدان^(۴)، اسیدی تیوباسیلوس کالدئوس^(۵)، سولفوآسیلوس اسیدوفیلوس^(۶) و اسید یانوس بریولی^(۷) انجام شده است [۱۲ و ۱۳]. رآکتور ستونی مورد استفاده برای بازیابی اورانیم از سنگ معدن کم عیار در کشور اسپانیا، در pH=۱٫۷ به ۶۰٪ بازیابی رسیده است [۱۴]. بیش‌تر مطالعات فروشویی میکروبی در فلاسک‌های لرزان یا تانک‌های هم‌زن‌دار انجام شده است. این رآکتورها معایبی هم‌چون مصرف بالای انرژی، اشغال فضای زیاد و اختلاط کمی دارند [۱۵]. رآکتورهای هواگرد در مقایسه با تانک‌های هم‌زن‌دار دارای ساختاری ساده، ظرفیت انتقال بالای گرما، نرخ انتقال مناسب جرم، شرایط اختلاط خوب با انرژی کم، عملکرد دوگانه‌ی فاز گاز به عنوان هواده‌ی و اختلاط می‌باشند [۱۶]. بنابر گزارش‌های ارایه شده، تنش ناچیز، اختلاط مناسب، ایجاد شرایط آسان برای فرایندهای پایین دستی به خصوص جداسازی فازها و انتقال مؤثر اکسیژن با صرف هزینه‌ی ثابت و جاری پایین از جمله

تلاش‌های زیادی برای بازیابی عملی فلزات از سنگ‌های معدن انجام شده است. به نظر می‌رسد که بیوهیدرومتالورژی یکی از روش‌های عملی برای بازیابی فلزات از این نوع سنگ‌ها باشد [۱]. این روش از زیست توده برای بازیابی فلزات استفاده می‌کند و با موفقیت‌هایی هم همراه بوده است. در فرایند فروشویی زیستی هم واکنش‌های شیمیایی و هم واکنش‌های زیستی دخالت دارند [۲]. در روش‌های متعارف، اورانیم با استفاده از اسیدهای قوی بازیابی می‌شود. این روش‌ها اغلب با مشکلات زیست محیطی همراه بوده و هم‌چنین مقدار زیادی انرژی مصرف می‌کنند [۳]. در مقایسه با فروشویی شیمیایی، فروشویی میکروبی که در آن میکروارگانسیم‌ها به عنوان کاتالیزگر عمل می‌کنند مقرون به صرفه می‌باشد. فروشویی میکروبی مبتنی است بر تبدیل یک ترکیب فلزی نامحلول به یک شکل محلول در آب. بر این اساس، فروشویی میکروبی سولفیدهای فلزی را می‌توان به صورت اکسایش این سولفیدها به یون‌های فلزی و سولفات به وسیله‌ی باکتری‌های اکسنده‌ی آهن فرو و یا ترکیبات گوگردی تعریف کرد [۴]. یکی از میکرو ارگانسیم‌هایی که به طور گسترده در فرایند فروشویی میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان^(۱) می‌باشد [۵ و ۶] و بیش‌تر مطالعات فروشویی سنگ معدن اورانیم به وسیله‌ی این باکتری انجام شده است [۷]. اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان یک باکتری اسید دوست می‌باشد و تمام میکرو ارگانسیم‌های اسید دوست اکسنده‌ی سولفید فلزی، می‌توانند آهن فرو و ترکیبات گوگردی را اکسید کنند. سازوکار استخراج اورانیم با بهره‌گیری از اکسایش غیرمستقیم میکروبی چنین است [۴]



اورانیم به صورت U^{4+} در محیط‌های آبی حل نمی‌شود. در یک محیط اسیدی یون Fe^{3+} ، اورانیم U^{4+} را به U^{6+} اکسید می‌کند تا به راحتی حل شود. اکسایش U^{4+} و کاهش Fe^{3+} به Fe^{2+} در مرحله‌ی اول صورت می‌گیرد و اکسایش متعاقب Fe^{2+} به Fe^{3+} به وسیله‌ی باکتری سبب می‌شود U^{4+} به طور پیوسته به U^{6+} اکسید شود [۴]. در فرایندهای فروشویی میکروبی با باکتری‌های اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان و لیتوسپیریلیم



جدول ۱. تجزیه‌ی عنصری سنگ معدن اورانیم ساغند

| ترکیب/ عنصر | مقدار (درصد) |
|--------------------------------|--------------|
| SiO ₂ | ۲۴٫۸۳ |
| Al ₂ O ₃ | ۱٫۴۹ |
| Fe ₂ O ₃ | ۴۹٫۶۷ |
| CaO | ۱٫۰۳ |
| Na ₂ O | ۰٫۱۸ |
| MgO | ۱۹٫۰۳ |
| K ₂ O | ۰٫۳۴ |
| TiO ₂ | ۰٫۰۸ |
| MnO | ۰٫۰۲ |
| P ₂ O ₅ | ۰٫۲۳ |
| Cl | ۰٫۰۶۰۱ |
| S | ۰٫۷۵۲۷ |
| Co | ۰٫۰۱۵۸ |
| Ni | ۰٫۰۳۵۷ |
| V | ۰٫۳۵۴۷ |
| U | ۰٫۰۶۵ |

۳.۲ آزمایش‌های فروشویی میکروبی

آزمایش‌های فروشویی میکروبی در رآکتور هواگرد داخلی انجام شده است. این رآکتور از جنس شیشه به ارتفاع کلی ۶۰cm، شامل جداکننده‌ی گاز-مایع به قطر داخلی ۲۰cm و ارتفاع ۱۰cm، ستون رآکتور به قطر داخلی ۱۵cm و ارتفاع ۴۰cm، بالابر به ارتفاع ۴۲cm و قطر داخلی ۷cm می‌باشد (شکل ۱). عمل هوادهی از پایین رآکتور از طریق پخش‌کننده‌ی هوا شامل ۱۶ سوراخ به قطر ۱mm به داخل بالابر انجام گرفت. حجم کاری رآکتور هشت لیتر، چگالی پالپ در همه‌ی آزمایش‌ها ۵٪(w/v)، دما ۲۵±۲°C بود. تغییرات pH به طور روزانه کنترل می‌شد به طوری که pH در مقادیر بالای ۲ با استفاده از محلول ۱۰ نرمال NaOH و در مقادیر پایین ۲ با محلول ۱۰ نرمال H₂SO₄ در مقدار ۲ ثابت نگه داشته شد. غلظت باکتری، مقدار pH، مقدار پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh)، غلظت آهن کل و میزان بازیابی اورانیم هر روز مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. به ازای آب از دست رفته‌ی روزانه از رآکتور، همان مقدار آب مقطر، و به ازای هر نمونه‌گیری روزانه، همان مقدار محیط کشت به رآکتور اضافه می‌شد.

مزایای استفاده از زیست‌رآکتورهای هواگرد در مقایسه با زیست-رآکتورهای متعارف مانند زیست-رآکتورهای هم‌زن‌دار می‌باشد. عمل هوادهی در عملیات فروشویی میکروبی به سه منظور صورت می‌گیرد: ۱) اختلاط برای به کمینه‌سازی زمان تطبیق میکروارگانیسم با شرایط جدید اعمال شده بر فرایند (مانند افزودن محیط کشت و یا تغییر و تنظیم غلظت ماده‌ی اصلی محدودکننده، دما و pH محیط)؛ ۲) فراهم نمودن اکسیژن مورد نیاز باکتری (باکتری علاوه بر جذب اکسیژن از محیط، بیش‌تر اکسیژن مورد نیاز خود را از هوای ورودی به رآکتور تأمین می‌کند) ۳) فراهم نمودن کربن دی‌اکسید کربن [۱۷ و ۱۸]. در کار حاضر تأثیر نرخ هوادهی بر بازیابی اورانیم در فرایند فروشویی میکروبی با استفاده از باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان، در زیست‌رآکتور هواگرد بررسی شد. آزمایش‌ها همراه با باکتری و بدون آن انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ سنگ معدن

سنگ معدن اورانیم مورد استفاده از آنومالی ۲ ساغند در ناحیه‌ی ایران مرکزی تهیه شد. نتایج تجزیه‌ی عنصری سنگ معدن مورد استفاده با استفاده از فلوتورسانی پرتو ایکس (XRF) در جدول ۱ نشان داده شده است. اندازه‌ی ذرات سنگ معدن اورانیم در آزمایش‌ها حدود ۱۰۶ μm بوده است (d_{۸۰} = ۱۰۶ μm).

۲.۲ میکروارگانیسم

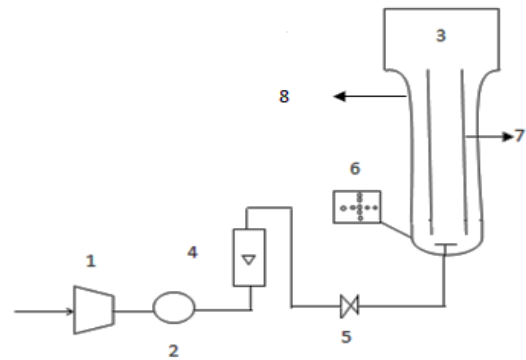
باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان استفاده شده بومی معدن گچین بندرعباس واقع در جنوب ایران می‌باشد [۱۹]. محیط کشت برای رشد و فعالیت این باکتری شامل ۲ گرم بر لیتر (NH₄)₂SO₄، ۰٫۵ گرم بر لیتر Na₂HPO₄·۲H₂O، ۰٫۵ گرم بر لیتر MgSO₄·۷H₂O، ۰٫۱ گرم بر لیتر KCl، ۰٫۰۱ گرم بر لیتر FeSO₄·۷H₂O، ۲۰ گرم بر لیتر Ca(NO₃)₂·۴H₂O می‌باشد. هم‌چنین آزمایش‌ها با تلقیح حجمی - حجمی ۱۰٪ انجام شدند [۲۰].

اندکی بیش‌تر باشد. سرعت بحرانی در رآکتور هواگرد با اندازه‌ی ذرات ۱۵۰ تا $250\ \mu\text{m}$ ، قطر ستون ۱۵cm، ارتفاع ستون ۴۵cm در درصد‌های وزنی مختلف محاسبه و اندازه‌گیری شد. با توجه به نزدیکی مشخصات هندسی و اندازه‌ی تقریبی ذرات جامد رآکتور استفاده شده و پژوهش انجام شده به وسیله‌ی اس.پی. مهرتورا و آر. شخار [۲۲] می‌توان با تقریب خوبی سرعت بحرانی تعلیق ذرات برای آزمایش‌ها را از آن به دست آورد، که حدود $0.060\ \text{m/s}$ بود. برای اطمینان از تعلیق کامل ذرات، سرعت باید اندکی بیش‌تر از سرعت بحرانی باشد، لذا حداقل سرعت در آزمایش‌ها $0.065\ \text{m/s}$ در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج گزارش شده برای آزمایش‌های فروشویی میکروبی، در سرعت هواده‌ی $0.060\ \text{m/s}$ حداقل مقدار اکسیژن و دی اکسید کربن برای رشد و تکثیر باکتری وجود دارد [۲۳]. از این رو با توجه به دو پارامتر تعلیق ذرات و مقدار اکسیژن مورد نیاز باکتری‌ها، حداقل سرعت هواده‌ی در آزمایش‌ها $0.065\ \text{m/s}$ تعیین شد. تبدیل سرعت ظاهری گاز (U_{gr}) برحسب m/s به نرخ هواده‌ی (Q) برحسب L/hr و برعکس با استفاده از معادله‌ی $Q = A_r \cdot U_{gr}$ ، انجام می‌شود که در آن A_r مساحت سطح بالابر می‌باشد.

۳. یافته‌ها و بحث

۱.۳. بازیابی اورانیم

در شکل ۲ تأثیر سرعت هواده‌ی بر بازیابی اورانیم با و بدون باکتری، (آزمایش‌های به ترتیب فروشویی زیستی و کنترل) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر بازیابی اورانیم با سرعت هواده‌ی در آزمایش‌های کنترل چندان محسوس نمی‌باشد. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان بازیابی برای اورانیم به ترتیب در سرعت‌های هواده‌ی 0.015 و $0.065\ \text{m/s}$ می‌باشد. در حضور باکتری میزان بازیابی اورانیم بسیار بالاتر است و باکتری نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بازیابی اورانیم ایفا می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد، که در مدت ۱۱ روز بالاترین بازیابی در سرعت ظاهری $0.010\ \text{m/s}$ حاصل می‌شود. در جدول ۲ میزان بازیابی اورانیم با و بدون باکتری داده شده است. براساس اطلاعات این جدول، حضور باکتری باعث افزایش بازیابی اورانیم در عملیات فروشویی میکروبی می‌شود و این افزایش، برای سرعت هواده‌ی $0.010\ \text{m/s}$ بیش‌ترین است. در رآکتور هواگرد، هواده‌ی علاوه بر عمل اختلاط، اکسیژن



شکل ۱. طرح‌واره‌ی سیستم به کار رفته در آزمایش‌های فروشویی میکروبی؛ (۱) کمپرسور، (۲) صافی هوا، (۳) جداکننده‌ی گاز-مایع، (۴) جریان‌سنج، (۵) شیر کنترل، (۶) پخش‌کننده‌ی هوا، (۷) بالابر، (۸) زیست رآکتور.

۴. تجزیه

تعداد باکتری در محلول با شمارش مستقیم تعیین شد. در این روش از یک لام توما به ضخامت $0.1\ \text{mm}$ و مساحت سطح $0.025\ \text{mm}^2$ همراه با یک میکروسکوپ با بزرگ‌نمایی (۱۰۰۰) استفاده شد [۲۱]. غلظت اورانیم و غلظت کل آهن در محلول، پس از عبور از صافی استات سلولز^(۸) با اندازه‌ی حفرات $0.2\ \mu\text{m}$ به ترتیب به وسیله‌ی دستگاه پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP) مدل Perkin-Elmer 2000 و طیف‌سنج جذب اتمی (AAS) مدل Perkin-Elmer 5500 اندازه‌گیری شد. مقادیر pH و Eh در دمای اتاق به ترتیب به وسیله‌ی pH متر مدل Metrohm 827 و پتانسیل‌سنج مدل WTW Inolab v 20 اندازه‌گیری شد.

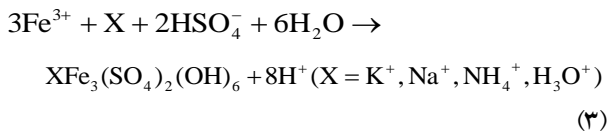
۵. تعیین حد پایین سرعت هواده‌ی

حداقل سرعت هواده‌ی برای فروشویی میکروبی باید یکی از دو مقدار لازم برای (۱) جلوگیری از ته‌نشینی ذرات جامد و (۲) رساندن اکسیژن و کربن دی اکسید باشد. به دلیل الزام هر دو، هر کدام که بیش‌تر باشد به عنوان حداقل نرخ هواده‌ی انتخاب می‌شود. برای هر زیست‌رآکتور هواگرد داخلی با عملکرد سه فازی چهار سرعت بحرانی تعریف می‌شود [۲۲]: ۱. سرعت بحرانی^(۹) برای شروع ته‌نشینی ذرات جامد. ۲. سرعت بحرانی برای ته‌نشینی کامل. ۳. سرعت بحرانی برای شروع تعلیق ذرات. ۴. سرعت بحرانی برای تعلیق کامل ذرات. سرعت بحرانی برای تعلیق کامل ذرات به عواملی چون درصد وزنی ذرات جامد، نسبت قطر بالابر به قطر ستون رآکتور و شکل هندسی رآکتور بستگی دارد [۲۲]. برای تعلیق ذرات اورانیم در زیست‌رآکتور، سرعت هواده‌ی در شروع آزمایش‌ها باید از سرعت بحرانی تعلیق

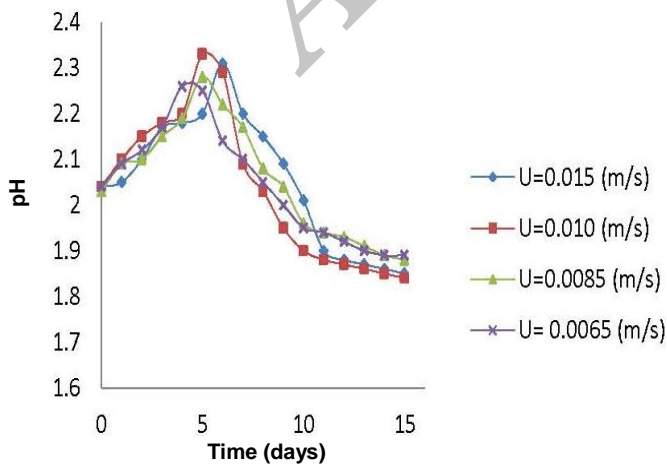


۲.۳ تغییرات pH

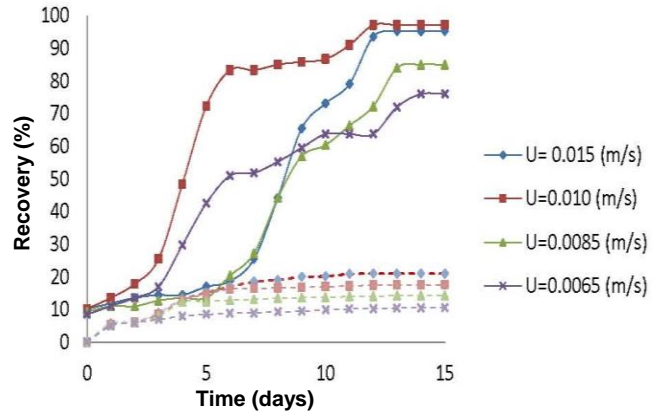
به طور کلی این پژوهش در pH ثابت انجام شده است و شکل ۳ تنها نوسانات آن را در دوره‌های زمانی تنظیم pH (۲۴ ساعت) نشان می‌دهد. شکل ۳ تغییرات pH با زمان را نشان می‌دهد که در آغاز به علت مصرف اسید توسط اجزای مصرف کننده‌ی اسید در سنگ و انحلال نمک‌های همراه کانسنگ افزایش یافته و پس از چند روز pH به علت تشکیل رسوب جاروسیت طبق واکنش زیر کاهش یافته است:



یکی از عوامل اصلی تولید رسوب آهن به خصوص جاروسیت، pH است. میزان انحلال اورانیم را می‌توان با آهنگ اکسایش یون فرو مرتبط دانست به طوری که اکسایش یون فرو به یون فریک مطابق واکنش (۲) باعث ایجاد فریک سولفات در محلول و در نتیجه باعث انحلال اورانیم می‌شود. مطابق واکنش (۲) در تبدیل یون فرو به فریک، H^+ مصرف می‌شود و به همین دلیل در روزهای آغازین فرایند مقدار pH افزایش می‌یابد (یکی از دلایل افزایش pH). یکی از عوامل اصلی کاهش pH رشد باکتری و تولید H^+ حاصل از واکنش مولد رسوب جاروسیت می‌باشد. نبود یون فروی اولیه باعث کاهش تولید رسوب جاروسیت و هم‌چنین باعث کاهش رشد باکتری‌ها می‌شود. این، از جمله عوامل تعیین کننده‌ی تأخیر کاهش pH می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات زمانی pH در سرعت‌های مختلف هوادهی.



شکل ۲. تأثیر سرعت هوادهی بر بازیابی اورانیم از سنگ معدن. (—) آزمایش‌ها در حضور باکتری، ... آزمایش‌های بدون باکتری.

جدول ۲. تأثیر سرعت ظاهری گاز بر بازیابی اورانیم با و بدون باکتری

| | $U_{\text{eff}}=0.015 \text{ m/s}$ | $U=0.01 \text{ m/s}$ | $U=0.0085 \text{ m/s}$ | $U=0.0065 \text{ m/s}$ |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| بازیابی در حضور باکتری (%) | ۹۵.۲ | ۹۷.۲ | ۸۵ | ۷۶ |
| بازیابی در نبود باکتری (%) | ۲۱ | ۱۷.۶ | ۱۴.۳ | ۱۰.۶ |
| تفاوت بین بود و نبود باکتری | ۷۴.۲ | ۷۹.۶ | ۷۰.۷ | ۶۵.۴ |

مورد نیاز باکتری را نیز تأمین می‌کند. دو پارامتر در تعیین سرعت هوادهی مناسب نقش اساسی دارند. پارامتر اول فعالیت باکتری است به طوری که در سرعت‌های بالای هوادهی باکتری دچار تنش شده و نمی‌تواند به نحو مطلوب به فعالیت خود ادامه دهد و در نتیجه بازیابی کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۲ در سرعت ظاهری 0.015 m/s برای گاز، بازیابی اورانیم نسبت به سرعت ظاهری 0.010 m/s کاهش یافته است. پارامتر دوم تعلیق ذرات در زیست‌راکتور می‌باشد. در سرعت‌های هوادهی پایین‌تر علاوه بر کاهش اختلاط، و اختلال در تأمین اکسیژن مورد نیاز باکتری‌ها، تعلیق ذرات نیز کم‌تر می‌شود، و این عمل بر بازیابی اورانیم تأثیر منفی می‌گذارد. مطابق این شکل پایین‌ترین بازیابی مربوط به سرعت ظاهری 0.0065 m/s می‌باشد. در روزهای پایانی فرایند مقدار U^{6+} در محلول افزایش یافته و اکسایش یون فرو به فریک کم‌تر انجام می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، میزان بازیابی اورانیم در چند روز اول کم است و این به دلیل فعالیت کم باکتری در چند روز اول می‌باشد و به همین دلیل در چند روز اول رشد، Eh بسیار کم است.

۳.۳ تغییرات پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh)

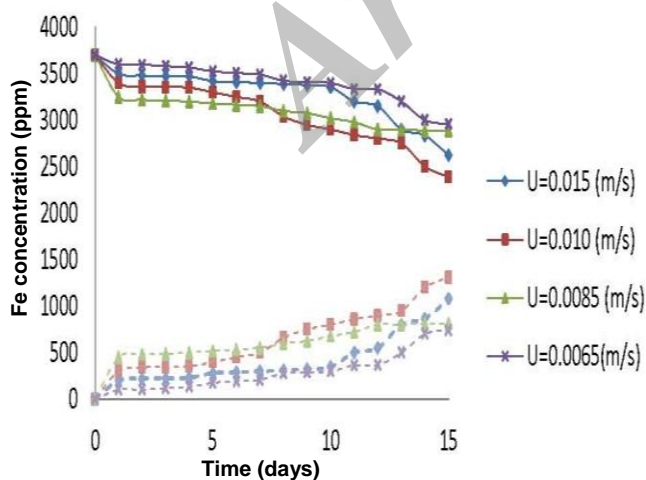
در شکل ۴ تغییرات پتانسیل اکسایش-کاهش با زمان نشان داده شده است، به طوری که مشاهده می‌شود پتانسیل اکسایش-کاهش به علت تبدیل یون فرو به فریک با زمان افزایش یافته است. افزایش Eh دلیلی بر تأیید اکسایش یون فرو می‌باشد. تا زمانی که اکسایش یون فرو در محیط وجود دارد سیر صعودی در مقادیر Eh دیده می‌شود و بعد از آن به علت اکسایش کامل یون فرو به فریک در محلول مقدار Eh ثابت می‌شود. هر چه میزان اکسایش یون فرو بیشتر باشد، میزان بازیابی اورانیم به علت تولید یون فریک سولفات بیشتر می‌شود. در واقع در طی فرایند، یون فرو به وسیله‌ی فعالیت باکتری به یون فریک تبدیل می‌شود به همین دلیل در روزهایی که باکتری رشد چشمگیر داشته (شکل ۶)، در همان روزها مقدار Eh نیز از افزایش محسوس برخوردار بوده است (شکل ۴).

۴.۳ تغییرات غلظت آهن کل و آهن رسوب

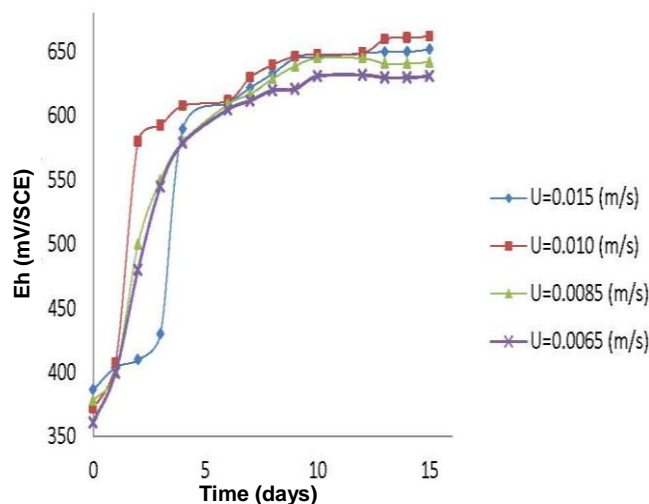
در شکل ۵ غلظت آهن کل و رسوب نشان داده شده است. غلظت آهن کل اولیه ۳۷۰۰ ppm بوده است. منظور از غلظت اولیه غلظتی است که پس از افزودن سنگ و مایع تلقیح پس از چند دقیقه (۲ الی ۴ دقیقه) هوادهی، در محلول اندازه‌گیری شده است. با فرض این که آهن ناشی از انحلال کانی‌های آهن‌دار موجود در سنگ معدن ناچیز باشد،

مقدار لحظه‌ای آهن در محلول = مقدار آهن اولیه‌ی محلول = مقدار آهن رسوب

شکل ۵ نشان می‌دهد که غلظت آهن کل در طی زمان کاهش یافته و این می‌تواند به دلیل تشکیل رسوب جاروسیت مطابق واکنش (۳) باشد. غلظت آهن کل در سرعت هوادهی 0.010 m/s نسبت به سرعت‌های هوادهی دیگر به شدت کاهش یافته و دلیل آن می‌تواند این باشد که میزان استخراج اورانیم در روزهای میانی در این سرعت هوادهی بالاتر از سایر سرعت‌های هوادهی است و در نتیجه با زیاد شدن میزان U^{6+} در محلول، فرایند تبدیل یون فریک به فرو و بالعکس کم‌تر شده در نتیجه یون فریک که خود تابعی از آهن کل بوده به صورت رسوب جاروسیت رسوب می‌کند. به همین دلیل در سرعت هوادهی 0.010 m/s نسبت به سرعت‌های دیگر کاهش آهن کل چشمگیر است. در سرعت هوادهی 0.015 m/s به علت عدم فعالیت مناسب باکتری در روزهای ابتدایی نرخ کاهش آهن کل کم‌تر است. دلیل این امر آن است که یون فرو کم‌تر به یون فریک تبدیل می‌شود و در نتیجه رسوب کم‌تری به وجود می‌آید. مطابق شکل ۵ با گذشت زمان میزان آهن رسوب کرده افزایش می‌یابد. در سرعت 0.010 m/s ، مقدار رسوب از دیگر سرعت‌ها بیشتر است. دلیل این امر، اکسایش بیشتر یون فرو به یون فریک (بازیابی بیشتر) می‌باشد. در سرعت هوادهی 0.0065 m/s مقدار رسوب آهن کل کم‌تر بوده و نشان می‌دهد که اکسایش یون فرو به یون فریک کم‌تر صورت گرفته و به همین دلیل میزان بازیابی در این سرعت هوادهی کم‌ترین است.



شکل ۵. تغییرات زمانی غلظت آهن در سرعت‌های مختلف هوادهی (— آهن کل، ... آهن رسوب).

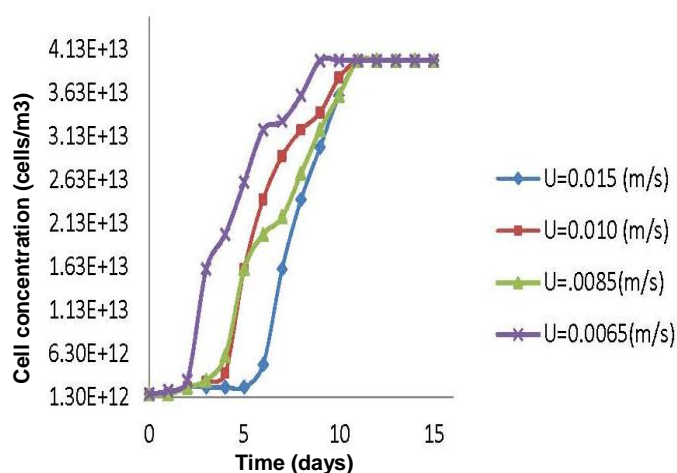


شکل ۴. تغییرات زمانی Eh در سرعت‌های مختلف هوادهی.



۵.۳ تغییرات غلظت باکتری

شکل ۶ تغییرات غلظت باکتری با زمان را نشان می‌دهد. غلظت اولیهی باکتری از مرتبهی $1.6 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ است. در روزهای دهم تا چهاردهم که بازیابی اورانیم مطابق شکل ۲ بیشینه است. غلظت باکتری از مرتبهی 3 تا $4 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ می‌باشد. در ابتدای نمودار شکل ۶ فاز تأخیر کوتاهی مشاهده می‌شود. با افزایش تعداد باکتری‌ها و نیاز آن‌ها به کسب انرژی از طریق اکسایش آهن فرو و ترکیبات گوگردی، در روزهای بعد مقدار پتانسیل اکسایش - کاهش افزایش یافته و نمودار بازیابی روند صعودی پیدا می‌کند (شکل ۴). در روزهای انتهایی باکتری در فاز سکون قرار می‌گیرد. به طور کلی در روزهای ابتدایی میزان رشد و تکثیر باکتری‌ها به علت سازگار نبودن با محیط و عدم فعالیت کامل، کم است. به همین دلیل مطابق شکل ۲ میزان بازیابی اورانیم پایین است. با گذشت زمان میزان تولید مثل و تکثیر آن‌ها افزایش می‌یابد (آهن‌گ تولید از آهن‌گ مرگ و میر بیش تر می‌شود)، زیرا مواد غذایی و انرژی لازم برای تکثیر و فعالیت را دارا هستند و در همین زمان میزان بازیابی نیز به شدت افزایش می‌یابد. با گذشت زمان و کم تر شدن مواد غذایی مورد نیاز باکتری‌ها، آهن‌گ مرگ و میر آن‌ها با آهن‌گ تولیدشان برابر شده و به فاز سکون می‌رسند.



شکل ۶. تغییرات زمانی غلظت باکتری در سرعت‌های مختلف هوادهی.

۴. نتیجه‌گیری

تأثیر سرعت هوادهی بر بازیابی سنگ معدن اورانیم در زیست- رآکتور هواگرد داخلی بررسی شد. تمامی آزمایش‌ها با ذرات سنگ به اندازهی $1.06 \mu\text{m}$ ، در دمای $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ، $\text{pH}=2$ ، چگالی پالپ (w/v) ۵٪، و حجم کاری هشت لیتر، با و بدون باکتری انجام شد. نتایج نشان داد که حضور باکتری تأثیر زیادی بر بازیابی اورانیم در آزمایش‌های فروشویی میکروبی دارد. نتایج نشان داد که در آزمایش‌های بدون باکتری (آزمایش‌های کنترل) میزان بازیابی در سرعت‌های مختلف هوادهی تفاوت چندانی از خود نشان نمی‌دهد. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان بازیابی به ترتیب در سرعت گاز 0.015 m/s و 0.0065 m/s حاصل شد. در آزمایش‌های فروشویی میکروبی نتایج (شکل ۲) نشان داد که بالاترین بازیابی برای سرعت ظاهری گاز 0.010 m/s حاصل می‌شود، که در مدت ۱۱ روز به بالای ۹۵٪ می‌رسد. در سرعت‌های بالاتر از 0.010 m/s و به خصوص 0.015 m/s به علت شرایط نامناسب تحمیل شده به باکتری و در نتیجه عدم سازگاری باکتری، زمان بازیابی افزایش می‌یابد. در سرعت‌های پایین‌تر از 0.010 m/s و به خصوص 0.0065 m/s به علت اختلاط کم‌تر میزان بازیابی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج این بررسی، بازه‌ی سرعت هوادهی در فروشویی میکروبی اورانیم در زیست-رآکتور هواگرد داخلی مورد استفاده از 0.0065 m/s تا 0.015 m/s تعیین شد. باکتری‌ها در روزهای اول رشد چندانی ندارد و در حال سازگاری با محیط می‌باشند، پس از چند روز فعالیت خود را شروع و کسب انرژی آن‌ها از طریق اکسایش یون فرو به یون فریک باعث انحلال اورانیم می‌شود. در روزهای انتهایی، رشد باکتری متوقف می‌شود. آهن کل با گذشت زمان کاهش یافته و کاهش آهن کل در سرعت هوادهی 0.010 m/s بیش‌ترین است.



۱. Acidithiobacillus Ferrooxidans
۲. Acidithiobacillus Thiooxidans
۳. Leptospirillum Ferrooxidans
۴. Sulfobacillus Thermosulfidoxidans
۵. Acidithiobacillus caldus
۶. Sulfobacillus Acidophilus

- V. Acidianus brierleyi
۸. Cellulose Acetate Filter
۹. Critical Velocity

References:

1. A. Rubio, F.G. Garcia, "Bioleaching capacity of an extremely thermophile culture for chalcopyritic materials," *Minerals Engineering* 15, 689-694 (2002).
2. M.A. Jordan, S.M.C. Guinness, C.V. Philips, "Acidophilic bacteria their potential mining and environmental applications," *Minerals Engineering* 9 (2), 169-181 (1996).
3. A.D. Agate, "Recent advances in microbial mining," *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 12, 487-495 (1996).
4. J.A. Munoz, F. Gonzalez, M.L. Blazquez, A. Ballester, "Study of the bioleaching of a Spanish uranium ore, Part I: a review of the bacterial leaching in the treatment of uranium ores," *Hydrometallurgy* 38, 39-57 (1995).
5. W. Krebs, C. Brombacher, P.P. Bosshard, R. Bachofen, H. Brandl, "Microbial recovery of metals from solids," *FEMS Microbiology Reviews* 20, 605-617 (1997).
6. D.E. Rawlings, "Industrial practice and the biology of leaching of metals from ores," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 20, 268-274 (1998).
7. Abhilash, S. Singh, K.D. Mehta, V. Kumar, B.D. Pandey, V.M. Pandey, "Dissolution of uranium from silicate-apatite ore by Acidithiobacillus ferrooxidans," *Hydrometallurgy* 95, 70-75 (2009).
8. P.R. Norris, D.W. Barr, D. Hinson, "Iron and mineral oxidation by acidophilic bacteria: affinities for iron and attachment to pyrite. In: P.R. Norris, D.P. Kelly, (Eds.), *Biohydrometallurgy: Proc. Intl. Symposium (Warwick, UK)*," *Science and Technology Letters, Kew*, 43-59 (1988).
9. G.S. Hansford, "Recent developments in modeling the kinetics of bioleaching. In: D.E. Rawlings, (Ed.), *Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes*," Springer Verlag, Berlin, 153-175 (1997).
10. K.L. Temple, A.R. Colmer, "The autotrophic oxidation of iron by a new bacterium, *Thiobacillus ferrooxidans*," *J. Bacteriol* 62, 605-611 (1951).
11. A.E. Torma, G.G. Gabra, "Oxidation of stibnite by *Thiobacillus ferrooxidans*," *Ant Leeuwenh* 43, 1-6 (1997).
12. A. Akcil, H. Deveci, "Mineral Biotechnology of sulphides, In: Jain, S. Khan, A. Rai, M.K. (Eds.), *Geomicrobiology*," Science Publishers, Enfield, New Hampshire, USA, 101-137 Chapter 4 (2010).
13. A.W. Breed, C.J.N. Dempers, G.S. Hansford, "Studies on the bioleaching of refractory concentrates," *J.S. AFR. Inst. Min. Metall.* 100, 389-397 (2000).
14. J.A. Munoz, F. Gonzalez, M.L. Blasquez, A. Ballester, "A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore, part I: a review of the bacterial leaching in the treatment of uranium ores," *Hydrometallurgy* 38, 39-57 (1995).
15. Y. Chisti, U.J. Jauregui-Haza, "Oxygen transfer and mixing in mechanically agitated airlift bioreactors," *Biochem. Eng. J.* 10, 143-153 (2002).
16. C. Vial, S. Poncin, G. Wild, N. Midoux, "Experimental and theoretical analysis of the hydrodynamics in the riser of an external loop airlift reactor," *Chem. Eng. Sci.* 57, 4745-4762 (2002).



17. J.C. Merchuk, M. Gluz, Bioreactors, Airlift Reactors. In the Encyclopedia of Bioprocess Technology (M.C. Flickinger, S.W. Drew, editors). 1, 320-353, John Wiley & Sons Inc., USA (1999).
18. Y. Chisti, "Airlift Bioreactors," Elsevier Applied Science, London (1989).
19. ع. رشیدی، س.ج. صفدری، ر. روستاآزاد، م.ف. فروغیان، ب. رفیع‌زاده، ح. زارع توکلی، "جداسازی سویه‌های بومی اسیدیتوباسیلیوس از معدن اورانیم و بررسی اثر آن‌ها در بیولیچینگ اورانیم،" دومین همایش ملی میکروبیولوژی کاربردی ایران، دانشگاه تهران (۱۳۸۹).
20. R.M. Atlas, "Handbook of media for environmental microbiology," Second Edition, Taylor and Francis (2005).
21. ASTM, D4454 Standard test method for simultaneous enumeration of total and respiring in aquatic systems by microscopy, annual book of ASTM standards, American society for testing and materials, 11 (02) (2009).
22. S.P. Mehrotra and R. Shekhar, Particle Suspension in (Air-Agitated) Pachuca tanks: Investigation of Hysteresis and a novel split air injection technique, Metallurgical and Materials Transactions, 32B, 223-231 (2001).
23. A. Giaveno, L. Lavallo, P. Chiacchiarini, E. Donati, "Bioleaching of zinc from low-grade complex sulfide ores in an airlift by isolated *Leptospirillum ferrooxidans*," Hydrometallurgy 89, 117-126 (2007).

Archive of SID