نشریه علوم و مهندسی جداسازی
دوره نهم، شماره اول، سال ۱۳۹۶، صفحه ۵۷-۶۷

Journal of Separation Science and Engineering
Vol. 9, No. 1, (2017), pp. 57-67

امکان سنجی استفاده از روش آگلومراسیون در لیچینگ توده‌ای کانسنگ اکسیدی مس با استفاده از ترکیبات پلیمری

فرج‌الله کیانی [۱]، محمد حسن گلپایگانی [۱*]، معبود عسگری مهرآبادی [۱]، بهار صلاحی [۱]

۱. شرکت صنعتی و معدنی کیان‌معدن پارس، تهران، ایران

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۲۲ آذر ۹۵
دریافت پس از اصلاح: ۱۴ فروردین ۹۶
پذیرش نهایی: ۲۷ اردیبهشت ۹۶

کلمات کلیدی:
نفوذپذیری
آگلومراسیون
ترکیبات پلیمری
آزمایش سوک
پیوند هیدروژنی

چکیده

مهمترین عامل کاهش نفوذپذیری در لیچینگ توده‌ای، حضور نرمه‌ها است که به دلیل حرکت با عامل لیچینگ در مناطقی تجمع می‌کنند و سبب ایجاد زون‌های مرده و جریان‌های کانالی در توده می‌شوند. به همین دلیل در معدن مس چاه‌موسی کانسنگ در ابعاد ۰-۲ میلی‌متر با عیار مس ۱/۳۴ درصد قبل از بارگذاری توده بدون استفاده جدا می‌شود. در این تحقیق به‌منظور استفاده از بخش ۰-۲ میلی‌متر از روش آگلومراسیون با استفاده از ترکیب‌های معدنی (سیلیکات‌سدیم و سولفات‌کلسیم) و ترکیب‌های پلیمری خنثی، کاتیونی و آنیونی استفاده شد. قدرت پیوندهای اتصالی بین ذرات از طریق پارامتر درصد عبور ذرات ریز در آزمایش سوک بررسی شد. بر اساس نتایج، بیشترین قدرت پیوندهای اتصالی در آگلومره‌های تولیدی با استفاده از ترکیبات خنثی با کمترین مقدار عبور ذرات ریز (۳/۸۹ ٪) به دست آمد. دلیل افزایش قدرت پیوندهای اتصالی با استفاده از ترکیبات خنثی، بیشتر بودن تاثیر نیروی پیوند هیدروژنی در کنار نیروهای واندروالسی شناخته شد.

* عهده دار مکاتبات
m.golpayegani@kmp-co.com

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

روش لیچینگ توده‌ای به عنوان فرآیندی اقتصادی برای کانه‌های کم‌عیار مس مطرح است. در این روش، مشکلاتی از جمله نفوذپذیری نامناسب کانسنگ بارگذاری شده در توده، کانالیزه شدن و بسته شدن راه‌های عبور محلول لیچینگ به دلیل انتقال و فشرده‌شدن نرمه‌ها (کوچکتر از ۷۵ میکرون) و در نتیجه ایجاد زون‌های مرده به دلیل تجمع نرمه‌ها، سبب کاهش بازیابی نهایی و سینتیک می‌شوند [۱-۳]. ناهمگن بودن و توزیع نامناسب دانه‌بندی خوراک توده که خروجی سنگ‌شکنی است از مهمترین عوامل انتقال و تجمع نرمه در مناطق خاص (در ارتفاع پایین‌تر توده) و در نتیجه کاهش نفوذپذیری در توده با گذشت زمان می‌باشد[۴, ۵].

به منظور حل مشکل نفوذناپذیری، جلوگیری از کانالیزه شدن، افزایش بازیابی و سینتیک لیچینگ، روش آگلومراسیون قبل از بارگذاری توده مطرح شده است. با استفاده از این روش، آگلومره‌هایی با ابعاد تقریباً یکسان خوراک لیچینگ توده‌ای را تامین می‌کنند [۳]. در این روش ذرات ریز با توزیع ابعادی مختلف به وسیله‌ی پیوندهای ایجاد شده توسط برخی مواد افزودنی به ذرات درشت‌تر می‌چسبند تا آگلومره‌هایی با ابعاد تقریباً یکسان تولید شود [۶-۹].

آگلومره‌های تولید شده برای لیچینگ مس، باید از مقاومت کافی در برابر گسیختگی در شرایط اسیدی توده برخوردار باشند. بنابراین پل‌های ارتباطی ایجاد شده توسط مواد افزودنی باید مقاوم و نوع افزودنی برای هر کانسنگ بر اساس خصوصیات سنگ تعیین شود [۸]. در صنعت، در صورت ایجاد پل ارتباطی موثر توسط مایع، از ترکیب محلول رافینیت[1] و اسید سولفوریک برای ایجاد چسبندگی بین ذرات استفاده می‌شود. نیروی اتصال بین ذرات در این حالت از طریق نیروهای تنش سطحی و نیروهای مویینگی بوجود می‌آید که در شرایط اسیدی پایدار نیست [۱۰, ۱۱]. برای پایداری بیشتر آگلومره‌ها در شرایط اسیدی می‌توان از مواد افزودنی دیگری در سه گروه کلی آلی، معدنی و افزودنی‌های پلیمری استفاده کرد. در این میان از افزودنی‌های آلی و معدنی به دلیل مقاومت کم در شرایط اسیدی لیچینگ مس (pH=۱/۵) استفاده نمی‌شود [۱۰]. با توجه به مقاومت بیشتر ترکیبات پلیمری در شرایط اسیدی، تحقیقاتی پایه‌ای برای شناخت فرآیند آگلومراسیون با این ترکیبات آغاز شده است [۱۱]. گراس[2] و همکاران، از ترکیب پلی‌اکریل‌آمیدها، کربوکسیلات‌ها و سولفونات‌ها برای آگلومراسیون کانسنگ سولفیدی مس استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش غلظت پلی‌اکریل‌آمید مقاومت آگلومره‌ها و نفوذپذیری محلول افزایش می‌یابد [۱۲]. گرین[3] و همکاران نشان دادند که با افزایش وزن مولکولی پلی‌اکریل‌آمیدها، قدرت پیوندهای بین ذرات در آگلومره‌ها افزایش می‌یابد [۱۳]. لواندوفسکی و کاواترا[4] در تحقیقاتی گسترده قابلیت آگلومراسیون را برای کانسنگ سولفیدی مس بررسی کرده و نشان داده‌اند که ترکیب‌های پلی‌اکریل آمید از توانایی بالایی برای تولید آگلومره‌های مقاوم در برابر اسید برخوردار هستند. آنها نشان دادند که بار الکتریکی ذرات در pH=۲ منفی می‌شود و سبب ایجاد پیوندهای الکتروستاتیک با ترکیبات کاتیونی می‌شود. همچنین نقش پیوندهای واندروالسی و هیدروژنی را در برقراری پیوند بین ذرات بررسی کردند [۷-۹]. در این تحقیقات، آگلومراسیون کانسنگ‌های اکسیدی مس با توجه به اهمیت آنها در لیچینگ توده‌ای بررسی نشده است. همچنین ملاحضات اقتصادی در مقدار مصرف ترکیب پلیمری در نظر گرفته نشده است.

در معدن مس اکسیدی چاه‌موسی، خوراک لیچینگ توده‌ای از خروجی بخش سنگ‌شکنی در ابعاد ۲-۲۰ میلی‌متر تامین می‌شود. در این معدن پیش از بارگذاری هیپ مواد با دانه‌بندی کوچکتر از ۲ میلیمتر (۲۰ درصد وزنی خوراک سنگ‌شکنی) با سرند جدا و در تل‌های خارج از هیپ نگه‌داری می‌شوند. در این تحقیق با توجه به عیار بالای مس (۱/۳۴ ٪) در بخش ابعادصفر تا دو میلی‌متر و توان پوشش هزینه‌های آگلومراسیون، امکان استفاده از این روش برای تولید آگلومره‌هایی مقاوم در شرایط اسیدی بررسی شد. از ترکیب محلول رافینیت با اسید سولفوریک، ترکیب‌های معدنی و همچنین از ترکیب‌های پلیمری به عنوان عامل برقراری اتصال بین ذرات استفاده شد. بهترین ماده‌ی افزودنی که مقاوم‌ترین آگلومره را در شرایط اسیدی تولید می‌کند، از طریق مقدار شاخص درصد عبور ذرات ریز[5] در آزمایش سوک[6] انتخاب شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط لواندوفسکی و کاواترا و اهمیت شناخت بیشتر قدرت پیوندهای اتصالی نسبت به تحقیقات قبلی، نوع پل‌های ارتباطی بین ذرات از نظر امکان برقراری پیوندهای واندروالسی، الکتروستاتیکی و هیدروژنی به طور تفصیلی بررسی شد.

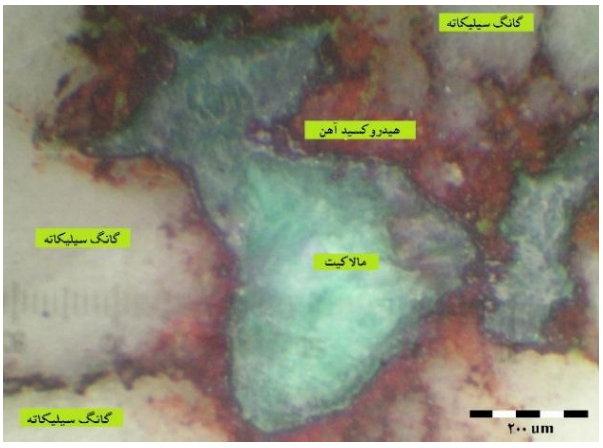
[1] Raffinate
[2] Gross
[3] Green
[4] Lewandowski & Kawatra
[5] Fine migration
[6] Soak test

۲- مواد و روش تحقیق

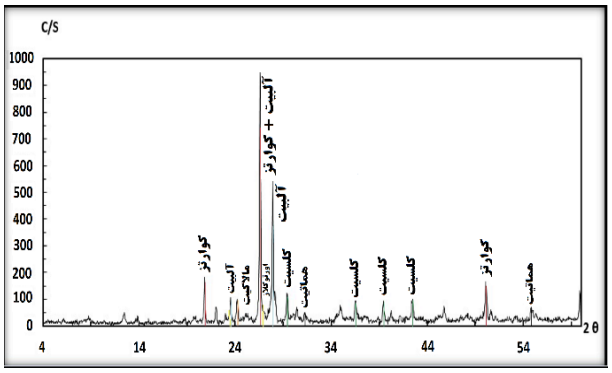
۲-۱- شناخت نمونه

نمونه‌ی مورد بررسی در این تحقیق، از کانسنگ مس اکسیدی معدن چاه‌موسی واقع در استان سمنان به دست آمد. نتایج آنالیز میکروسکوپی، XRD و XRF به ترتیب در شکل (۱)، شکل (۲) و جدول (۱) ارائه شده است. آنالیز XRF برای دو بخش ۰-۲ و ۲-۲۰ میلیمتر خروجی سنگ‌شکنی بطور جداگانه بررسی شد. نتیجه‌ی آنالیز XRF نشان می‌دهد که نمونه‌ی مورد مطالعه به ترتیب در بخش ۰-۲ و ۲-۲۰ میلی‌متر حاوی ۱/۳۴ و ۰/۸۶ درصد مس و ۵۹/۸۶ و ۶۵/۹۱ درصد سیلیس می‌باشد. عیار بالای مس در بخش ۰-۲ میلی‌متر اهمیت بکارگیری آن در فرآیند تولید مس را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز میکروسکوپی و XRD نشان می‌دهند که کانی اصلی مس مالاکیت و بخش اعظمی از باطله شامل آلبیت ($NaAlSi_3O_8$) و کوارتز (SiO_2) می‌باشد.

پس از نمونه‌گیری از بخش محصولات سنگ‌شکنی معدن چاه-موسی و ترکیب بخش ۰-۲ و ۲-۲۰ میلی‌متر با نسبت وزنی ۲۰ به ۸۰ درصد (مشابه سنگ‌شکنی کارخانه)، یک نمونه‌ی واحد به دست آمد. نمونه‌ی معرفی از محصول سنگ‌شکنی در ابعاد ۰-۲۰ میلی‌متر تهیه شد و تحت آنالیز دانه‌بندی (جدول (۲)) قرار گرفت. تحقیقات نشان داده‌اند که برای بارگذاری توده، ابعاد ۲-۱۰ میلی‌متر به دلیل افزایش سینتیک فرآیند و بازیابی مس بهتر از ۲-۲۰ میلی‌متر است [۳]. بنابراین نمونه‌ی معرفی از ابعاد ۰-۲۰ میلی‌متر با سنگ‌شکن غلتکی بصورت میلی‌متر خرد شد. در صورت زیاد بودن نرمه ناشی از خردایش مجدد توده بسته می‌شود. برای بررسی، محصول ۰-۱۰ میلی-متر دانه‌بندی شد. نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل (۱) نتیجه‌ی آنالیز میکروسکوپی کانسنگ مس چاه‌موسی



شکل ۲- آنالیز XRD کانسنگ مس اکسیدی چاه‌موسی

جدول (۱) نتیجه‌ی آنالیز XRF

ترکیب	مقدار در بخش ۰-۲	مقدار در بخش ۲-۲۰
SiO_2	۵۹/۸۶	۶۵/۹۱
Al_2O_3	۱۶/۷۴	۱۵/۱۱
Fe_2O_3	۳/۷۷	۲/۹۲
CaO	۳/۴۲	۲/۳۲
Na_2O	۲/۲۱	۳/۲۶
K_2O	۲/۹۹	۲/۵۹
MgO	۱/۲۱	۰/۹۸
Cu	۱/۳۴	۰/۸۶
L.O.I	۷/۱۳	۵/۴۳

همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، درصد مواد ریزتر از ۱۰۰ میکرون در نمونه‌ی ۰-۲۰ میلی‌متر، ۲/۷ ٪ کل نمونه بوده است. از طرفی نتیجه‌ی جدول (۳) نشان می‌دهد که ۳ ٪ کل نمونه پس از خردایش کنترل شده در فراکسیون ۱۰۰-میکرون قرار می‌گیرد. این عدد در مقایسه با درصد مواد کوچکتر درنمونه‌ی ۰-۲۰ میلی‌متر اولیه به مقدار ۰/۳ ٪ رشد کرده است که قابل توجه نیست و نظر به تولید کم نرمه مشکلی از نظر بسته شدن توده در صورت از هم‌گسیختگی جزئی آگلومره‌ها در شرایط اسیدی بوجود نخواهد آمد.

جدول (۲) دانه‌بندی نمونه در ابعاد ۰-۲۰ میلی‌متر قبل از خردایش کنترل شده با سنگ‌شکن غلتکی

ابعاد (میلیمتر)	وزن (درصد)	تجمعی مانده (٪)	تجمعی عبوری (٪)
-۲۰+۱۰	۲۵/۵	۲۵/۵	۷۴/۵
-۱۰+۲	۴۲/۴	۶۷/۹	۳۲/۱
-۲+۰/۱	۲۹/۴	۹۷/۳	۲/۷
-۰/۱	۲/۷	۱۰۰	-
مجموع	۱۰۰/۰	-	-

جدول (۳) دانه‌بندی نمونه بعد از خردایش کنترل شده

فراکسیون (میلیمتر)	وزن (٪)	تجمعی مانده (٪)	تجمعی عبوری (٪)
-۱۰+۶/۳۵	۲۸/۴	۲۸/۴	۷۱/۶
-۶/۳۵+۴/۷۵	۱۴/۱	۴۲/۵	۵۷/۵
-۴/۷۵+۳/۳۵	۱۲/۲	۵۴/۷	۴۵/۳
-۳/۳۵+۲/۳۸	۸/۰	۶۲/۷	۳۷/۳
-۲/۳۸+۲	۲/۱	۶۴/۸	۳۵/۲
-۲+۱	۱۲/۲	۷۷/۰	۲۳
-۱+۰/۶	۵/۷	۸۲/۷	۱۷/۳
-۰/۶+۰/۴۲۵	۴/۳	۸۷/۰	۱۳
-۰/۴۲۵+۰/۳	۳/۷	۹۰/۷	۹/۳
-۰/۳+۰/۱۵۰	۵/۲	۹۵/۹	۴/۱
۰/۱۵۰+۰/۱	۱/۱	۹۷/۰	۳
-۰/۱+۰/۰۷۵	۰/۷	۹۷/۷	۲/۳
-۰/۰۷۵	۲/۳	۱۰۰	-
مجموع	۱۰۰	-	-

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

برای آماده‌سازی محلول آب، اسید و ترکیب پلیمری از یک همزن مکانیکی استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های آگلومراسیون از یک دستگاه آگلومراسیون دیسکی پیوسته با خوراک‌دهی مکانیکی موجود در آزمایشگاه دانشگاه تهران استفاده شد. برای پاشش اسید و ترکیب پلیمری از یک اسپری فشاری و در نهایت برای اسید مصرفی از اسید سولفوریک در غلظت‌های مختلف استفاده شد. برای انجام آزمایش سوک که برای بررسی مقاومت پیوندهای اتصالی آگلومره‌ها انجام می‌شود، از یک سرند ۸ مش و برای کنترل pH در این آزمایش از یک pHمتر دیجیتالی استفاده شد. شکل (۳) نمایی از دستگاه آگلومراسیون که برای انجام آزمایش‌های آگلومراسیون استفاده شده است را نشان می‌دهد. از سیلیکات سدیم و سولفات کلسیم به عنوان ترکیبات معدنی به منظور عامل اتصال بین ذرات استفاده شد. همچنین از ترکیبات پلیمری از هر سه گروه آنیونی، کاتیونی و خنثی برای آگلومراسیون کانسنگ استفاده شد. ترکیبات پلیمری استفاده شده به همراه برخی خصوصیات آنها در جدول (۴) ارائه شده است.

۲-۳- آزمایش آگلومراسیون

قبل از شروع آزمایش آگلومراسیون، محلولی از ترکیب آب، اسید و ترکیب پلیمری در نسبت‌های تعیین شده برای هر آزمایش، تهیه شد. پس از تهیه‌ی محلول مذکور، نمونه‌های ۱ کیلوگرمی بطور دقیق وزن و داخل خوراک‌دهنده‌ی آزمایشگاهی ریخته و با نرخ ۵۰ گرم بر دقیقه به دستگاه آگلومراسیون خوراک‌دهی شد. سرعت چرخش دستگاه آگلومراسیون بر اساس نوع حرکت مواد از نظر نوع غلتیدن و درتماس قرار داشتن صحیح ذرات با هم تنظیم و سیستم راه‌اندازی شد (حدود ۲۰ دور بر دقیقه). پس از اطمینان از پایدار شدن سیستم چرخش مواد در دستگاه آگلومراسیون، محلول (ترکیب آب، اسید و پلیمر) بوسیله‌ی یک اسپری فشاری بر روی نمونه‌های در حال چرخش پاشش شد. پس از گذشت زمان ماند تعریف شده برای هر آزمایش (۲۵ دقیقه)، نمونه‌های آگلومره شده از دستگاه آگلومراسیون خارج و خشک شد. پس از اتمام زمان خشک شدن[7] آگلومره‌ها که برای کامل شدن پیوندهای اتصال بین ذرات (۴۸ ساعت) لازم است، از آگلومره‌ها نمونه‌گیری و آزمایش سوک با هدف بررسی کیفیت و مقاومت آگلومره‌ها در شرایط اسیدی انجام شد.

۲-۴- آزمایش سوک

سنجش رفتار و میزان مقاومت نیروهای اتصالی بین ذرات در آگلومره‌های تولید شده در شرایطی شبیه به هیپ (pH=۱/۵)، با استفاده از آزمون سوک انجام می‌شود [۸, ۱۰] . جهت انجام این آزمایش، آگلومره‌های تولید شده پس از خشک شدن در هوای آزاد (۴۸ ساعت)، بر روی یک سرند ۸ مش (۲/۳۸ میلیمتر) ریخته می‌شوند و به مدت ۳۰ دقیقه در ظرفی حاوی اسید با pH=۱/۵ قرار می‌گیرند. پس از طی مدت زمان مذکور، آگلومره‌ها از ظرف خارج، خشک و توزین می‌شوند و طبق رابطه‌ی ۱، درصد مواد دانه‌ریز عبوری به کل مواد دانه‌ریز در خوراک آگلومراسیون محاسبه می‌شود [۸]. پاسخ رابطه‌ی (۱) که با عنوان فاکتور مقدار عبور ذرات ریز شناخته می‌شود، معیار مقاومت آگلومره‌ها در شرایط اسیدی مشابه هیپ است [۸, ۱۱]. هرچه مقدار مواد عبوری از سرند ۸ مش کمتر باشد، مقاومت و کیفیت آگلومره‌ها در شرایط اسیدی بیشتر خواهد بود. شکل(۴) روند کلی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

$$\text{مقدارمواد دانه ریز عبوری} = \frac{\text{وزن‌مواد دانه ریز عبوری از سرند ۸ مش}}{\text{وزن کل مواد کوچکتر از ۸ مش در خوراک آگلومراسیون}} \quad (۱)$$

[7] Curing time

شکل (۳) نمایی از تجهیزات آگلومراسیون پیوسته (خوراک‌دهنده و دستگاه آگلومراسیون)

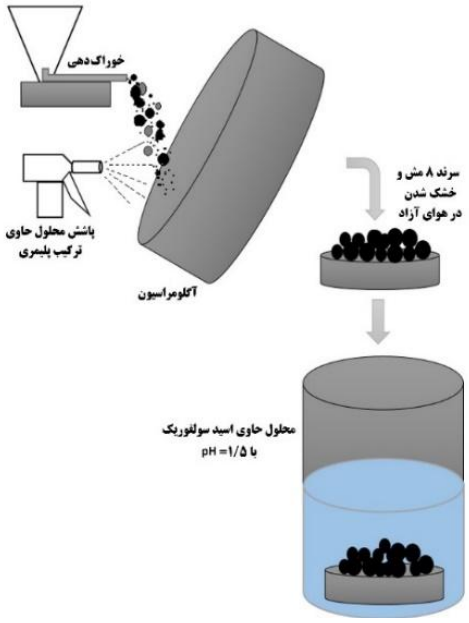
۳- نتایج و بحث

۳-۱- آگلومراسیون با محلول رافینیت لیچینگ

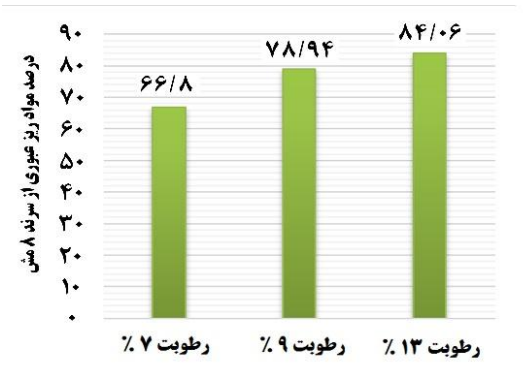
به منظور بررسی امکان استفاده از ترکیب محلول رافینیت و اسید سولفوریک (با غلظت ۲۰ ٪ وزنی) به عنوان عامل اتصال ذرات در آگلومراسیون، تعداد ۳ آزمایش در درصد رطوبت‌های ۷، ۹ و ۱۳ درصد انجام شد. مشخصات محلول رافینیت در جدول (۵) و نتایج آزمون سوک پس از آگلومراسیون، در شکل (۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج در هر سه آزمایش مقدار ذرات ریز عبوری از سرند ۸ مش نامطوب بوده است. همچنین مقدار ذرات ریز عبوری، با افزایش درصد رطوبت، افزایش و مقاومت آگلومره‌ها در برابر گسیختگی در شرایط اسیدی کاهش یافته است. در حالت استفاده از ترکیب محلول رافینیت لیچینگ و اسید سولفوریک، نیروی اتصال بین ذرات از طریق نیروهای تنش سطحی و نیروهای مویینگی مایع بوجود می‌آید. این نیروها برای اتصال ذرات بسیار ریز (کوچکتر از ۷۵ میکرون) موثر هستند و توزیع ابعادی خوراک آگلومراسیون در استحکام پیوندهای بین ذرات بسیار مهم است [۱۱]. با توجه به درصد کم این ذرات در خوراک آگلومراسیون (جدول ۳)، تاثیر نیروهای تنش سطحی و مویینگی بسیار کم است. در این حالت، درصد رطوبت نقش مهمی ایفا می‌کند، چرا که با افزایش درصد رطوبت، مقدار نیروهای مویینگی و در نتیجه قدرت پیوند بین ذرات کاهش می‌یابد [۱۰, ۱۱]. شکل (۶) آگلومره‌های تولیدی را در درصد رطوبت ۷، قبل و بعد از آگلومراسیون نشان می‌دهد. همانطور که مشهود است، آگلومره‌های تولیدی پس از آزمون سوک دچار گسیختگی شده و ذرات ریز از سطح دانه-های درشت جدا شده‌اند.

جدول (۴) مشخصات ترکیب‌های پلیمری استفاده شده

اسم ترکیب	نوع ترکیب	وزن مولکولی	شرکت سازنده	قیمت (هزار ریال برکیلوگرم)
Copolymer C2	کاتیونی	بسیار زیاد	کوپلیمر اصفهان	۳۴
Actafloc C85	کاتیونی	متوسط	اختر شیمی یزد	۱۵۵
Superfloc C581	کاتیونی	زیاد	سایتک	۹۷/۵
Aktafloc A-26	آنیونی	بسیار زیاد	اختر شیمی یزد	۱۲۰
Copolymer A-28	آنیونی	متوسط	کوپلیمر اصفهان	۱۱۲
Superfloc A1820	آنیونی	زیاد	سایتک	۲۴۴/۳
Superfloc N300	خنثی	بسار زیاد	سایتک	۴۳۰
Superfloc N100	خنثی	زیاد	سایتک	۲۲۲/۳
Superfloc N300LMW	خنثی	متوسط	سایتک	۴۴۸/۵
Actafloc N12	خنثی	زیاد	اختر شیمی یزد	۱۲۵



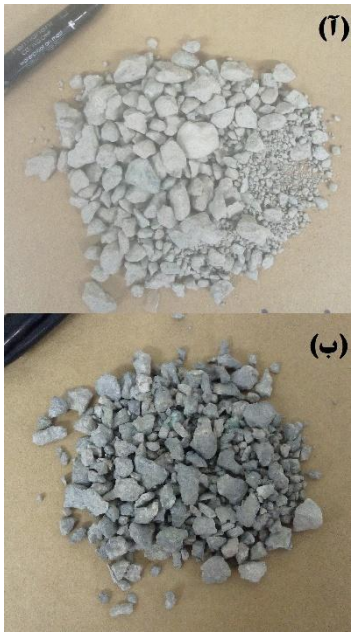
شکل (۴) فرآیند آگلومراسیون و آزمایش سوک



شکل (۵) نتایج آزمون سوک (آگلومراسیون با ترکیب رافینیت اسید)

جدول ۵- مشخصات محلول رافینیت کارخانه مس چاه‌موسی

عیار مس (g/L)	عیار آهن (g/L)	عیار منگنز (g/L)	pH
۰/۰۸	۰/۵۲	۲/۴۵	۳/۱۷

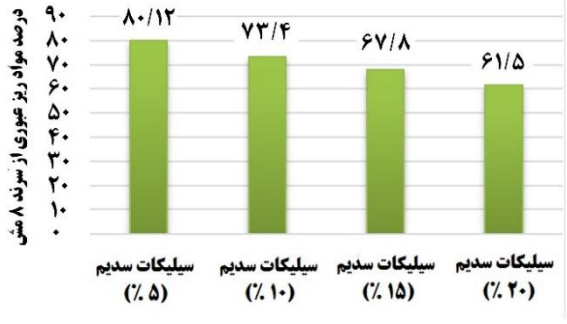


شکل (۶) آگلومره‌های تولیدی با استفاده از ترکیب رافینیت و اسید. آ) قبل از آزمایش سوک، ب)بعد از آزمایش سوک.

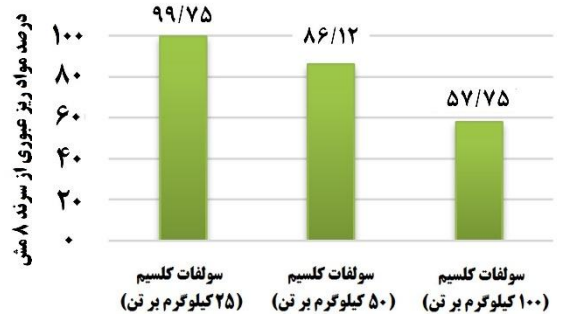
۳-۲- آگلومراسیون با ترکیبات معدنی

به منظور بررسی اثر ترکیبات معدنی، از سیلیکات سدیم و سولفات کلسیم به عنوان عامل اتصال ذرات استفاده شد. به منظور بررسی نقش سیلیکات سدیم، تعداد ۴ آزمایش آگلومراسیون با محلول‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سیلیکات سدیم انجام شد. در این آزمایش‌ها درصد رطوبت معادل ۹ ٪ تنظیم شد و محلول نهایی از انحلال سیلیکات سدیم در محلول اسید سولفوریک (۱۰ درصد وزنی) به دست آمد. نتایج آزمایش‌ها در شکل (۷) ارائه شده است. با توجه به نتایج، مقدار ذرات ریز عبوری در همه‌ی آزمایش‌ها نامطلوب بوده است. دلیل مقاومت کم آگلومره‌ها، تبدیل ماهیت سیلیکات سدیم به اسید سیلیسیک در حضور اسید سولفوریک می‌باشد [۱۰]. همچنین با افزایش غلظت سیلیکات سدیم، مقدار ذرات ریز عبوری افزایش یافته است. زیرا با ثابت بودن مقدار اسید و در نتیجه ثابت بودن اسید سیلیسیک تولیدی، مقدار بیشتری سیلیکات سدیم آزاد در محیط باقی می‌ماند که پیوند بین ذرات را تقویت می‌کند.

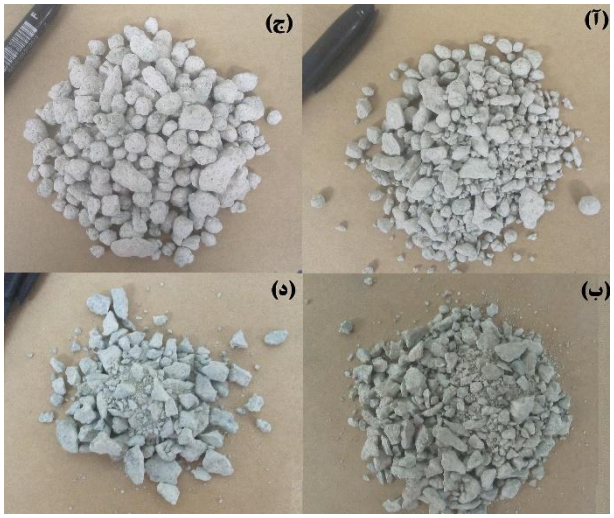
برای بررسی نقش سولفات کلسیم، تعداد ۳ آزمایش در حضور ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم بر تن از این ترکیب انجام شد. در این آزمایش‌ها سولفات کلسیم با خوراک آگلومراسیون ترکیب شد.



شکل (۷) نتایج آزمون سوک (آگلومراسیون با سلیکات سدیم)



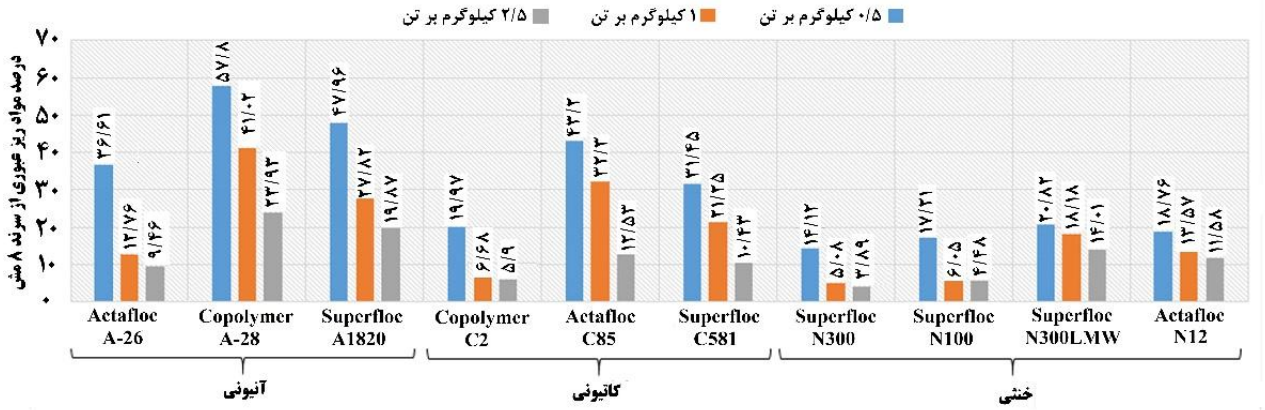
شکل (۸) نتایج آزمون سوک (آگلومراسیون با سولفات کلسیم)



شکل(۹) آزمایش آگلومراسیون در حضور ترکیبات معدنی. آ) با سیلیکات سدیم قبل از آزمایش سوک، ب) با سیلیکات سدیم بعد از آزمایش سوک، ج) با سولفات کلسیم قبل از آزمایش سوک، د) با سولفات کلسیم بعد از آزمایش سوک

سپس محلول اسید سولفوریک ۲۰ درصد وزنی در حین آزمایش پاشش شد. این آزمایش‌ها در درصد رطوبت ۱۰٪ انجام شد. نتایج آزمایش‌ها در شکل (۸) ارائه شده است. با توجه به نتایج، درصد عبور ذرات ریز در این آزمایش‌ها نیز نامطلوب بوده

است. هرچند سولفات کلسیم در اسید ترکیب پایداری است اما قدرت پیوندهای ایجاد شده توسط آن در برابر اسید بسیار ضعیف است [۱۰]. شکل (۹) آگلومره‌های تولیدی با استفاده از ترکیبات معدنی را قبل و بعد از آزمون سوک نشان می‌دهد.



شکل(۱۰) نتایج آزمایش سوک (آگلومراسیون با استفاده از ترکیبات پلیمری)

همانطور که مشهود است پس از آزمون سوک، آگلومره‌های تولیدی با این ترکیبات نیز دچار گسیختگی شده‌اند.

۳-۳- آگلومراسیون با ترکیبات پلیمری

به منظور امکان بهبود کیفیت آگلومره‌ها از ترکیب‌های پلیمری در هر سه نوع کاتیونی، آنیونی و خنثی استفاده شد (جدول ۴). در این آزمایش‌ها که در درصد رطوبت ۹ ٪ انجام شد، از ترکیب اسید سولفوریک (۶ کیلوگرم بر تن)، آب و ترکیب پلیمری (۰/۵، ۱ و ۲/۵ کیلوگرم برتن) به عنوان عامل اتصال بین ذرات استفاده شد. نتایج آزمایش سوک برای حالت‌های مختلف به تفکیک نوع و مقدار مصرف ترکیب‌های پلیمری در شکل (۱۰) ارائه شده است. با توجه به نتایج، مقدار ذرات ریز عبوری با استفاده از ترکیب‌های پلیمری در هر سه نوع (کاتیونی، آنیونی و خنثی) نسبت به استفاده از ترکیبات معدنی، به طور چشمگیری کاهش یافته و مقاومت آگلومره‌ها افزایش یافته است. با افزایش غلظت پلیمر، استحکام آگلومره‌ها افزایش یافته است. وزن مولکولی بالای این ترکیب‌ها یکی از دلایل استحکام آگلومره‌های تولیدی در شرایط اسیدی می‌باشد. وزن مولکولی بالا، قدرت پیوندهای اتصالی بین ذرات را تقویت می‌کند [۱۴]. به طور کلی در آگلومراسیون با استفاده از ترکیب‌های پلیمری، نیروی اتصال بین ذرات از اندرکنش نیروهای واندروالس که به وزن مولکولی وابستگی زیادی دارد، جذب الکتروستاتیکی و پیوند هیدروژنی بوجود می‌آید [۸]. پیوندهای واندروالسی نیروهای فیزیکی هستند که معمولا توسط هر سه نوع ترکیب کاتیونی، آنیونی و خنثی ایجاد می‌شود [۸]. پیوندهای الکتروستاتیکی در نتیجه‌ی جذب فیزیکی بین ذرات کانسنگ که در محیط لیچینگ باردار می‌شوند (تشکیل دو لایه‌ای الکتریکی) و ترکیبات پلیمری باردار ایجاد می‌شود [۸, ۱۵]. در شرایط اسیدی لیچینگ مس ترکیبات پلیمری آنیونی بار الکتریکی خود را از دست می‌دهند، اما ترکیبات کاتیونی در این شرایط پایدار می‌باشند و در صورت منفی بودن پتانسیل زتای سطح ذرات با آنها پیوند برقرار می‌کنند [۱۴]. پیوند مولکولی از نوع هیدروژنی نیز در نتیجه‌ی جاذبه‌ی بین یک اتم الکترونگاتیو (پذیرنده‌ی پیوند هیدروژنی) و یک اتم هیدروژن (دهنده‌ی پیوند هیدروژن) که خود با یک اتم الکترونگاتیو (فلوراید، اکسیژن ونیتروژن) پیوند دارد، به وجود می‌آید [۸]. در این میان، پیوند هیدروژنی از پیوند واندروالسی و الکتروستاتیکی قوی‌تر است. بهترین نتایج آزمون سوک از نمودارهای شکل (۱۰) انتخاب و برای هر سه گروه کاتیونی، آنیونی و خنثی در شکل (۱۱) به طور خلاصه ارائه شده است. پاسخ‌های مطلوب در هر سه گروه مربوط به ترکیبی است که وزن مولکولی زیادی داشته است. با توجه به نتایج شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب آگلومره‌های تولیدی در حضور ترکیب‌های Superfloc N300 (با درصد ذرات ریز عبوری ۳/۸۹ ٪)، Superfloc N100 (با درصد ذرات ریز عبوری ۵/۴۸ ٪) و Copolymer C2 (با درصد ذرات ریز عبوری ۵/۹ ٪) با مصرف ۲/۵ کیلوگرم بر تن ترکیب پلیمری بهترین نتایج را داشته‌اند. به این ترتیب، آگلومره‌های تولیدی با ترکیب‌های خنثی و کاتیونی نتایج بهتری نسبت به ترکیب‌های آنیونی داشته‌اند. یکی از دلایل این پدیده، بار الکتریکی و پتانسیل زتای ذرات در شرایط آگلومراسیون (pH=۲) می‌باشد. با توجه به نتایج آنالیزهای XRD و XRF بخش زیادی از کانسنگ مورد مطالعه را سیلیکات‌ها (کوارتز و آلبیت) تشکیل می‌دهند. ذرات سیلیس در محیط آبی به دلیل تمایل زیاد به

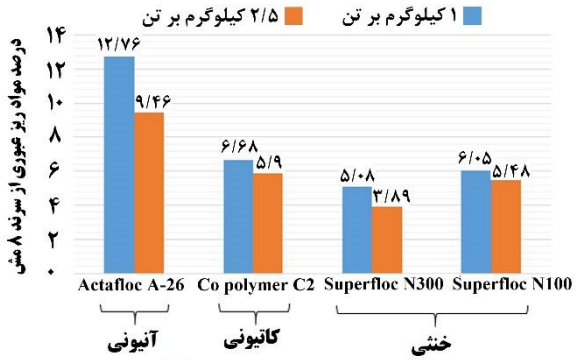
هیدراتاسیون و سپس هیدرولیز سطح ذرات و تشکیل گروه (SiO^-) در نتیجه‌ی از دست دادن H^+ دارای بار الکتریکی منفی می‌شوند [۱۵].

با افزایش خردایش و بیشتر شدن نسبت لبه به سطح، بار الکتریکی افزایش می‌یابد. در آلومینوسیلیکاتها نیز پدیده‌ی جانشینی کاتیون‌های با ظرفیت کمتر از Al^{3+} سطح را باردار می‌کند [۱۵]. با توجه به جاذبه‌ی الکتروستاتیکی بین سطح ذرات کانسنگ با بار منفی و ترکیب‌های کاتیونی، این ترکیب-ها (Copolymer C2) نتیجه‌ی بهتری نسبت به ترکیب‌های آنیونی داشته‌اند. به نظر می‌رسد اثر منفی بار الکتریکی در ترکیبات آنیونی فقط به دلیل عدم جاذبه با سطح ذرات کانسنگ باشد. اثر منفی دافعه با سطح ذرات به دلیل از بین رفتن بار الکتریکی ترکیبات آنیونی در شرایط اسیدی مطرح نیست [۱۴].

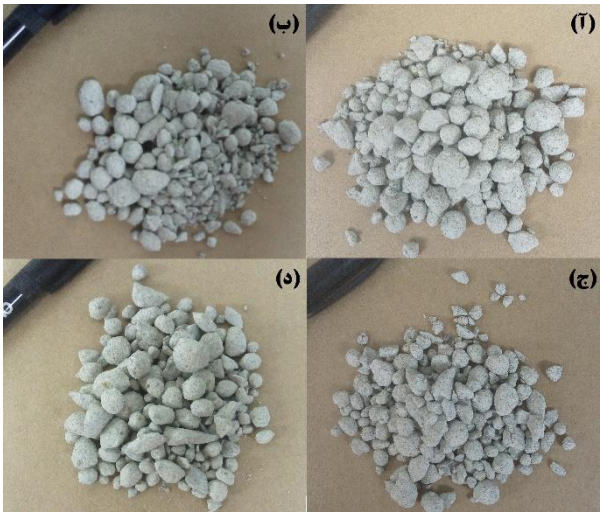
هرچند اثر نیروهای واندروالسی (نیروی موثر در هر سه گروه خنثی، کاتیونی و آنیونی) و الکتروستاتیکی در برقراری اتصال پایدار بین ذرات موثر است اما پیوند هیدروژنی ایجاد شده بین ذرات کانسنگ و ترکیب پلیمری بیشترین تاثیر را دارد. نیروی پیوند هیدروژنی در پل‌های ارتباطی ایجاد شده توسط هر سه گروه کاتیونی، آنیونی و خنثی دخالت دارد.

ذرات حاصل از خردایش کانسنگ چاه‌موسی با درصد زیادی از سیلیس، وقتی در محیط آبی قرار می‌گیرد، به دلیل هیدراتاسیون و هیدرولیز دارای گروه‌های سیلانول (Si-OH) در بخش متصل به آب می شوند [۸،۱۵]. اتم‌های الکترونگاتیو اکسیژن موجود در گروه‌های سیلانول می‌توانند به عنوان پذیرنده‌ی پیوند هیدروژنی عمل کنند.

شکل (۱۲) آگلومره‌های تولید شده در حضور ترکیب کاتیونی Copolymer C2 و ترکیب خنثی Superfloc N300 را قبل و بعد از آزمایش سوک نشان می‌دهد. همانطور که مشهود است آگلومره‌های تولیدی در هر دو حالت، پس از آزمون سوک کیفیت خود را حفظ کرده و دچار گسیختگی در شرایط اسیدی نشده‌اند. علاوه بر تولید آگلومره‌هایی با مقاومت بالا سه فاکتور اساسی در دسترس بودن، هزینه‌ی کم و قابلیت افزایش نرخ بازیابی بدون افزایش در مصرف اسید، برای انتخاب ماده‌ی افزودنی باید مد نظر قرار گیرد [۱۰].با توجه به جدول (۴)، ترکیب کاتیونی Copolymer C2 به دلیل در دسترس بودن (تولید در داخل) و هزینه‌ی خرید کمتر نسبت به Superfloc N300 برای آگلومراسیون کانسنگ چاه‌موسی پیشنهاد شد.



شکل ۱۱ بهترین نتایج آزمایش سوک برای ترکیبات پلیمری



شکل ۱۲- آگلومرهای تولیدی با کیفیت مطلوب. آ) با استفاده از Superfloc N300 قبل از آزمایش سوک، ب) با Superfloc N300 بعد از آمایش سوک، ج) با استفاده از Copolymer C2 قبل از آزمایش سوک، د) با استفاده از Copolymer C2 بعد از آمایش سوک.

در معدن مس چاه‌موسی، با استفاده از روش آگلومراسیون و افزودن مواد با دانه‌بندی ۰-۲ میلی‌متر (۲۰ درصد وزنی خروجی سنگ‌شکنی) با عیار مس ۱/۳۴ ٪ به خوراک توده با عیار مس ۰/۸۶ ٪، خوراک جدید با عیار ۰/۹۵۶ ٪ به دست می‌آید. با توجه به عیار خوراک جدید، مقدار ماده‌ی معدنی مورد نیاز برای تولید یک تن کاتد حدود ۱۵۳ تن می‌باشد. در حالت عدم استفاده از روش آگلومراسیون، حدود ۱۷۰ تن ماده‌ی معدنی با عیار مس ۰/۸۶ درصد مورد نیاز است. با افزایش عیار و کاهش حجم ماده‌ی معدنی مورد نیاز، هزینه-های خردایش، توده‌سازی، مصرف اسید، تعمیر و نگهداری، پرسنلی، برق، آب، گازوئیل و ... به ازای تولید هر تن کاتد کاهش می‌یابد. هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی آگلومراسیون با ترکیب پلیمری Copolymer C2 در مقابل کاهش هزینه‌های مذکور ناچیز است.

۴- ملاحضات زیست محیطی

ترکیبات پلیمری استفاده شده در این تحقیق، از گروه پلی اکریل آمیدها می‌باشند. ترکیب‌های پلی اکریل آمید، حاصل پلیمریزاسیون مونومرهای اکریل آمید با اسید اکریلیک می‌باشند [۱۶]. از نظر سمی بودن و مضرات زیست محیطی، فقط واحدهای مونومر اکریل آمیدها سبب ایجاد مشکل می‌شوند [۱۶, ۱۷]. این ترکیبات در حالت مونومر می‌توانند سبب بروز مشکل برای گیاهان و ایجاد غدد سرطانی در حیوانات و انسان‌ها شوند [۱۷]. با توجه به استفاده از ترکیب‌های پلیمری در آگلومراسیون، باقی ماندن این ترکیب‌ها در آگلومره‌ها پس از اتمام لیچینگ، خطری برای محیط زیست ایجاد نخواهد کرد. همچنین ترکیبات پلیمری پلی اکریل آمید در محلول‌های آبی پایدار بوده و به سختی به واحدهای مونومریک تبدیل می‌شوند [۱۶, ۱۷]. به این ترتیب احتمال کمی برای انتقال واحدهای مونومر اکریل آمید به منابع آبهای زیر زمینی از طریق محلول حاصل از لیچینگ وجود خواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور استفاده از کانسنگ بخش ۰-۲ میلی‌متر خروجی سنگ‌شکنی معدن مس چاه‌موسی در فرآیند تولید مس، از روش آگلومراسیون استفاده شد. نتایج آنالیز XRF نشان داد که نمونه‌ی مورد مطالعه به ترتیب در بخش ۰-۲ و ۲-۲۰ میلی‌متر حاوی ۱/۳۴ و ۰/۸۶ درصد مس و ۵۹/۸۶ و ۶۵/۹۱ درصد سیلیس می‌باشد. نتایج آنالیزهای میکروسکوپی و XRD نیز نشان داد که کانی اصلی مس مالاکیت و بخش اعظمی از باطله شامل آلبیت ($NaAlSi_3O_8$) و کوارتز (SiO_2) است که در باردار بودن سطح در محیط آبی نقشی اساسی دارند. قدرت پیوندهای اتصالی بین ذرات در آگلومره‌های تولیدی از طریق پارامتر درصد عبور ذرات ریز در آزمایش سوک تعیین شد. نتایج نشان داد که فاکتور عبور ذرات ریز برای آگلومره‌های تولیدی با استفاده از ترکیب محلول رافینیت و اسید سولفوریک در بهترین حالت معادل ۶۶/۸ درصد می‌باشد که به دلیل ضعیف بودن پیوند اتصالی بین ذرات (نیروهای موییننگی) نتیجه‌ی مطلوبی نیست. همچنین درصد عبور ذرات ریز با استفاده از سیلیکات سدیم و سولفات کلسیم در بهترین حالت به ترتیب معادل ۶۱/۵ و ۵۷/۷۴ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی مقاومت پایین آگلومره‌های تولیدی در این شرایط می‌باشد. بر اساس نتایج مشخص شد که مقاومت آگلومره‌های تولیدی با استفاده از ترکیبات پلیمری با وزن مولکولی زیاد در هر سه گروه خنثی، کاتیونی و آنیونی مناسب است. با توجه به نتایج به ترتیب آگلومره‌های تولیدی در حضور ترکیب‌های Superfloc N300 (با درصد ذرات ریز عبوری ۳/۸۹ ٪)، Superfloc N100 (با درصد ذرات ریز عبوری ۵/۴۸ ٪) و Copolymer C2 (با درصد ذرات ریز عبوری ۵/۹ ٪) با مصرف ۲/۵ کیلوگرم بر تن ترکیب پلیمری بهترین نتایج را داشته‌اند. نتایج نشان داد که آگلومره‌های تولیدی با استفاده از ترکیبات پلیمری کاتیونی و خنثی از ترکیب آنیونی مقاوم‌تر بوده‌اند. دلیل برتری قدرت پیوندهای اتصالی با این ترکیب‌ها نسبت به ترکیب آنیونی، حضور نیروهای جاذبه‌ی الکتروستاتیکی با سطح ذرات سیلیس با بار منفی در ترکیبات کاتیونی و موثرتر بودن پیوندهای هیدروژنی با گروه‌های سیلانول در سطح سیلیکات‌ها در ترکیبات خنثی شناخته شد. به طور کلی نتایج نشان داد که آگلومراسیون با استفاده از ترکیبات خنثی با وزن مولکولی زیاد به دلیل بیشتر بودن تاثیر نیروی پیوند هیدروژنی در کنار نیروهای واندروالسی با کمترین مقدار عبور ذرات ریز (۳/۸۹٪)، مقاوم‌ترین آگلومره‌ها را در شرایط اسیدی (pH=۱/۵) برای کانسنگی با درصد قابل توجهی سیلیس تشکیل خواهد داد. ترکیب کاتیونی Copolymer C2 به دلیل در دسترس بودن (تولید در داخل) و هزینه‌ی خرید کمتر نسبت به Superfloc N300 برای آگلومراسیون کانسنگ چاه‌موسی پیشنهاد شد.

مراجع

[1] D. W. Kappes (2005) *Advances in Gold Ore Processing*, Elsevier.

[2] W. J. Schlitt (1992) *Solution mining: surface techniques, SME Mining Engineering Handbook*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration.

[3] N. Dhawan, M. S. Safarzadeh, J. D. Miller , M. S. Moats, and R. K. Rajamani (2013) "Crushed ore agglomeration and its control for heap leach operations", *Journal of Minerals Engineering*, 41, 53-70.

[4] P. D. Chamberlin (1986) "Agglomeration: cheap insurance for good recovery when heap leaching gold and silver ores", *Journal of Mining Engineering*, 38, 1105–1109.

[5] A. J. Garcia, and M. K. Jorgenson (1997) "*Agglomeration and heap leaching testing requirements for high clay ores*", Colorado, USA.

[6] N. Dhawan, M. S. Safarzadeh, J.D. Miller, R.K. Rajamani, and M. Moats (2012) "*Insights into heap leaching*" Seattle, Washington, USA.

[7] K. A. Lewandowski, and S. K. Kawatra (2008) "Development of experimental procedures to analyze copper agglomerate stability", *Minerals and Metallurgical Processing*, 25, 110–16.

[8] K. A. Lewandowski, and S. K. Kawatra (2009) "Polyacrylamide as an agglomeration additive for copper heap leaching", *International Journal of Mineral Processing*, 91, 88–93.

[9] K. A. Lewandowski, and S. K. Kawatra (2009) "Binders for heap leaching agglomeration", *Minerals and Metallurgical Processing*, 26, 1–24.

[10] S. K. Kawatra, T. C. Eisele, K. A. Lewandowski, and A. Gurtler (2006*) Novel Binders and Methods for agglomeration of Ore*, Michigan Technological University, Michigan, USA.
[11] W. Pietsch (2002) *Agglomeration Processes*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
[12] J. B. Pautler, A. E. Gross, and , M. G. Strominger (1990) ‘‘New polymeric agglomeration aid improves heap leach efficiency at Brewer Gold.’’, *Advances in Gold and Silver Processing*, 2, 15–21.
[13] V. S. Green, and D. E. Stott (2001) ‘‘Polyacrylamide: a review of the use, effectiveness, and cost of a soil erosion control amendment.’’ *10th International Soil Conservation Organization meeting*, Indiana, USA.
[14] M. S. Nasser, and A. E. James (2006) “The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behavior of kaolinite suspensions”, *Separation and Purification Technology*, 52, 241-252.
[15] L. T. Zhuravlev (2000) “The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model”, *journal of Colloids and Surfaces*, 173, 1-38.
[16] F. A. Andersen (2005) “Amended final report on the safety assessment of polyacrylamide and acrylamide residues in cosmetics.”, *International journal of toxicology*, 24, 21-50.
[17] A. Shipp, G. Lawrence, R. Gentry, T. McDonald, H. Bartow, and C. Van Landingham (2006) “Acrylamide: review of toxicity data and dose-response analyses for cancer and noncancer effects.”, CRC *Critical Reviews in Toxicology*, 36, 481-608.

Feasibility study of using agglomeration method in heap leaching stage of copper oxidized ore by polymeric binder

Farajollah Kiani[1], Mohammd Hassan Golpayegani[*1], Maboud Asgari Mehrabadi[1], Bahar Salahi[1]

1. Kian Madan Pars Co., Tehran, Iran

ABSTRACT

The most important factor in reducing the permeability of heap leaching, is the presence of fine particles which result in impermeable zones and channel streaming in the heap due to their movements along with the leaching agent in the aggregation areas. That's why in Chahmousa copper mine, ore with 0-2 mm dimensions and with the copper grade of 1.34 %, could be separated before heap loading. In this research, in order to use the 0-2 mm fraction, the agglomeration method using inorganic compounds (sodium silicate, calcium sulfate) and non-ionic polymer compounds and cationic and anionic, is applied. The strength of bonding among particles is measured using soak test with fine migration parameter. Showing the least fine migration of 3.89%, based on the results, the most powerful bonding ties are agglomerates produced using non-ionic compounds. The reason for this increase in strength using non-ionic compounds is hydrogen bonding forces in which they are more effective aside with Van der Waals forces.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: December 12, 2016
Revised in: April 02, 2017
Accepted: May 16, 2017

Key words:
Permeability
Agglomeration
Polymeric binder
Soak test
Hydrogen bonding

* Corresponding author
M.Golpayegani@KMP-Co.com