

اثرات حضور ناخالصی‌ها در محلول الکترولیت روی و روش‌های تصفیه محلول

امیرحسین اسدی رجانی^۱، حمیدرضا حکیمی رحمانی^۲، ابراهیم عظیمی^۳، سید محمدرفوف حسینی^۴، یوسف عظیمی^۵

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان a.asadi@mi.iut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان h.hakimi@mi.iut.ac.ir

^۳ دانشیار گروه فرآوری مواد معدنی، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان ezimi@iut.ac.ir

^۴ دانشیار گروه فرآوری مواد معدنی، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان r.hosseini@iut.ac.ir

^۵ گروه پژوهشی مهندسی محیط زیست و پایش آلاینده‌ها، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران azimiy@rcesd.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا برای فلز روی منجر به رشد چشمگیر تولید آن شده است. فرآوری هیدرومتالورژیکی سنگ معدن روی به دلیل مزایای اقتصادی آن نسبت به روش‌های پیرومتالورژیکی، سهم عمده‌ای از تولید جهانی روی را به خود اختصاص داده است، به طوری که امروزه حدود ۸۰ درصد این فلز از طریق این مسیر تولید می‌شود. مرحله کلیدی در این فرآیند، لیچینگ کنسانتره کربناته، اکسیدی یا کلسین حاصل از تشویه است. با این حال، از آنجا که لیچینگ یک فرآیند غیرانتخابی است، علاوه بر روی، فلزاتی مانند آهن، کبالت، نیکل، آرسنیک، آنتیموان و مس نیز وارد محلول می‌شوند که می‌تواند خلوص محلول و در نتیجه کیفیت نهایی محصول را تحت تأثیر قرار دهد. نوع و مقدار این ناخالصی‌ها به ترکیب کانی‌شناسی کانسنگ اولیه بستگی دارد. حضور این عناصر، به‌ویژه آهن، نیکل، کبالت و مس، می‌تواند باعث کاهش راندمان جریان و افزایش هزینه‌های الکترولیز شود. این مطالعه به بررسی تأثیر ناخالصی‌ها بر فرآیند هیدرومتالورژیکی تولید روی و روش‌های مؤثر حذف آن‌ها در محلول‌های حاصل از لیچینگ اسیدی منابع مختلف، شامل ذخایر اکسیدی، سولفیدی و منابع ثانویه، می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: روی، لیچینگ، تخلیص محلول، سم‌ناشیون، الکترووینینگ

Effects of Impurities in Zinc Electrolyte Solution and Purification Methods

Amirhossein Asadi Rajani¹, Hamidreza Hakimi Rahmani², Ebrahim Azimi³, Seyed Mohammad Raouf Hosseini⁴, Yousef Azimi⁵

¹Master's student in Mineral Processing, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology a.asadi@mi.iut.ac.ir

²Master's student in Mineral Processing, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology h.hakimi@mi.iut.ac.ir

³Associate Professor, Department of Mineral Processing, Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology eazimi@iut.ac.ir

⁴Associate Professor, Department of Mineral Processing, Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology r.hosseini@iut.ac.ir

⁵ Research Group of Environmental engineering and Pollution Monitoring, Research center for Environment and Sustainable Development, Department of Environment, Tehran, Iran azimiy@rcesd.ac.ir

ABSTRACT

In recent years, the increasing demand for zinc has led to a significant rise in its production. Due to its economic advantages over pyrometallurgical methods, hydrometallurgical processing of zinc ores has gained a major share in global zinc production, accounting for approximately 80% of total output. A key stage in this process is the leaching of carbonate and oxide concentrates or calcine obtained from roasting. However, since leaching is a non-selective process, various metals such as iron, cobalt, nickel, arsenic, antimony, and copper may also dissolve into the solution, affecting its purity and ultimately the quality of the final product. The type and concentration of these impurities depend on the mineralogical composition of the primary ore. The presence of these elements, particularly iron, nickel, cobalt, and copper, can significantly reduce current efficiency and increase the costs of the electrolysis process. This study investigates the impact of impurities on the hydrometallurgical production of zinc and explores effective methods for their removal from acidic leach solutions derived from different zinc sources, including oxide, sulfide, and secondary resources.

Keywords: Zinc, Leaching, Solution Purification, Cementation, Electrowinning



۱- مقدمه

روی، چهارمین فلز پرمصرف بعد از آهن، آلومینیوم و مس است و صنعت روی یکی از مهم‌ترین صنایع غیر آهنی در جهان است که در مرحله افزایش تقاضا قرار دارد و تاثیر آن روی اقتصاد بسیار مشهود است و سبب شده این صنعت همواره در حال توسعه سریع باشد. بیش از ۸۰ درصد تولید روی در جهان به روش هیدرومتالورژیکی به دست می‌آید. فرآیند هیدرومتالورژی روی به طور کلی شامل سه مرحله اصلی است: لیچینگ، تصفیه محلول و الکترووینینگ [۱].

لیچینگ کنسانتره اکسیدی به دو روش اسیدی و قلیایی قابل انجام است. در لیچینگ قلیایی انحلال کمتر آهن و عدم تشکیل سیلیکاژل را داریم اما مشکل این روش این است که توانایی انحلال کانی همی‌مورفیت را ندارد بنابراین فرآیند لیچینگ برای کانسنگ‌های اکسیدی عموماً به روش اسیدی و در فشار اتمسفری انجام می‌شود [۲]. اما جهت لیچینگ کنسانتره سولفیدی از روش لیچینگ تحت فشار با اسید سولفوریک استفاده می‌شود که یکی از ویژگی‌های کلیدی این فرآیند این است که محتوی سولفید کنسانتره خوراک به جای دی‌اکسید گوگرد به گوگرد عنصری تبدیل می‌شود و انتشار گاز را حذف می‌کند. از سوی دیگر آهن ممکن است به صورت محصول جانبی (هماتیت) رسوب کند که می‌تواند حاوی ۶۰ درصد وزنی آهن باشد و قابل فروش باشد [۳]. روش دیگر جهت لیچینگ کنسانتره سولفیدی ابتدا تشویه کنسانتره در دمای بالا و سپس لیچینگ معمولی کلسین دانه ریز به دست آمده است. از الزامات اساسی هر فرآیند تشویه این است که بازبایی و استفاده از گازهای خروجی (SO_2) امکان پذیر باشد.

تصفیه محلول یک مرحله حیاتی در تولید هیدرومتالورژیکی روی است زیرا سنگ معدن روی دارای ناخالصی‌هایی است و فرآیند لیچینگ نیز ماهیت غیر انتخابی دارد و در نتیجه انواع مختلفی از فلزات وارد محلول لیچینگ باردار می‌شوند. وجود این ناخالصی‌ها باعث افت بازدهی جریان در طی فرآیند الکترووینینگ می‌شود و در نهایت باعث اتلاف شدید انرژی و کاهش کیفیت محصول می‌شود. فرآیند تصفیه محلول که به عنوان رابط بین لیچینگ و الکترووینینگ عمل می‌کند، برای کاهش غلظت ناخالصی‌ها به محدوده قابل قبول، انجام می‌شود [۱].

محلول به دست آمده پس از خالص سازی یک فرآیند الکترولیتی را طی می‌کند. در این فرآیند محلول بین آندهایی از جنس آلایز سرب و کاتدهایی از جنش آلومینیوم الکترولیز می‌شود. یک جریان الکتریکی از طریق الکترولیت با اعمال اختلاف پتانسیل ۳۳ - ۳۵ ولت بین آند و کاتد به گردش در می‌آید و باعث می‌شود روی با خلوص بالا روی کاتدهای آلومینیوم رسوب کند. روی رسوب کرده جدا می‌شود و پس از خشک شدن ذوب می‌شود. شمش روی به دست آمده ممکن است درجات مختلفی از خلوص داشته باشد [۴]. بنابراین فرآیند الکترولیتی تولید روی شامل مراحل تشویه (در صورت نیاز) لیچینگ، خالص سازی محلول، الکترولیز و در نهایت ذوب و ریخته گری می‌باشد.

۲- اثرات نامطلوب ناخالصی‌ها

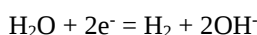
ناخالصی‌های موجود در محلول‌های خنثی می‌تواند منجر به راندمان کمتر جریان، وجود ناخالصی در فلز روی به دست آمده و اثرات نامطلوب بر روی آند و کاتد شود [۵].

عموماً اعتقاد بر این است که فلزات قلیایی و قلیایی خاکی در استخراج الکتریکی روی مضر نیستند. در واقع راندمان جریان در حضور سدیم و پتاسیم در محلول اندکی افزایش می‌یابد. چنین یون‌هایی با مکانیزم جذبی عمل می‌کنند و از عمل هیدروژن روی ورق روی جلوگیری می‌کنند. به طور کلی می‌توان گفت یون‌هایی با پتانسیل الکتروشیمیایی منفی‌تر از روی تاثیر کمی بر بازدهی جریان دارند [۶].

فلزات $Ag, Te, Se, Sb, Ge, As, Ni$ و Co با غلظت‌های متفاوتی در محلول وجود دارند. این فلزات می‌توانند بر اساس این واقعیت که پتانسیل الکتروشیمیایی بالاتری از روی دارند، اثرات منفی داشته باشند. تصفیه محلول با روش‌های مختلف، برای ادامه فرآیند الکترولیز لازم است و به دلیل بهره‌مندی از فلزات غیرآهنی و کمیاب، با اثرات اقتصادی نیز



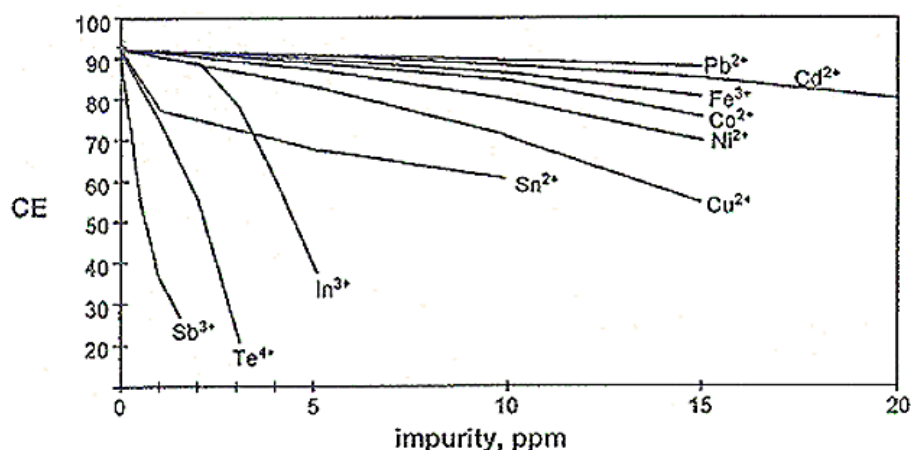
همراه است. حتی مقادیر کمی از این ناخالصی‌ها در محلول ممکن است از رسوب روی طی فرآیند الکترولیز جلوگیری کند. هدف اولیه از فرآیند تصفیه محلول سولفات روی، به دست آوردن محلول الکترولیت مناسب برای الکترولیز روی است. تاثیر منفی ناخالصی‌ها می‌تواند هم در کاهش راندمان جریان منعکس شود که نتیجه آن افزایش مصرف برق است و هم منجر به کاهش کیفیت کاتد از طریق رسوب ناخالصی‌ها می‌شود [۷]. برخی از ناخالصی‌ها مانند نیکل، کبالت و مس انحلال معکوس روی را با تشکیل میکروسلول‌های گالوانیکی تسهیل می‌کنند. اثرات نامطلوب ناخالصی‌ها در دمای بالا، اسیدیتته بالای محلول و حضور همزمان قلع، ژرمانیوم، کبالت و مس افزایش می‌یابد. این عناصر به عنوان کاتالیزور برای واکنش تجزیه آب عمل می‌کنند که منجر به افت شدید راندمان جریان می‌شود [۵]. واکنش تجزیه آب در معادله ۱ نشان داده شده است.



معادله ۱

کبالت در مقادیر بسیار کم هم در محلول می‌تواند روی کاتد بنشیند و به عنوان کاتالیزور برای واکنش تجزیه آب عمل کند؛ فرآیند تجزیه آب دارای اضافه ولتاژ بالایی است، زمانی که کبالت به مخلوط اضافه می‌شود، تولید هیدروژن را به واکنش اصلی در کاتد تبدیل می‌کند. با این حال، تولید سریع هیدروژن راندمان جریان را کاهش می‌دهد و منجر به مصرف انرژی بیشتر می‌شود [۸].

در شکل ۱ اثر ناخالصی‌های محلول بر بازدهی جریان در طی فرآیند الکترووینینگ نشان داده شده است و نشان می‌دهد که عناصر آنتیموان، تلوریوم، ایندیوم، قلع، مس، نیکل، کبالت، آهن و کادمیوم بیشترین اثر منفی را روی فرآیند دارند.



شکل ۱: اثر ناخالصی‌ها روی بازدهی جریان الکترووینینگ روی [۶].

۳- حد مجاز عناصر در محلول

محدودیت غلظت ناخالصی‌های مضر را نمی‌توان به طور دقیق مشخص کرد. اما می‌توان از دست‌والعمل‌های جدول ۱ استفاده کرد؛ در این جدول منابع مختلف حد بالایی برای عناصر موجود در محلول اعلام کرده‌اند.

جدول ۱: حد مجاز عناصر در محلول ورودی به واحد الکترووینینگ [۹].

Impurity(mg/L)	CEZinc (Nelson et al. 2000)	Cominco (Tozawa et al. 1992)	Hoboken-Overpelt (Tozawa et al. 1992)	Port Pirie (Tozawa et al. 1992)
Cu	0.1	-	0.2	0.15
Cd	1.0	0.3	1.0	0.35
Co	0.2	0.3	1.0	<0.05
Ni	-	-	0.050	<0.05
Fe	-	<5	20	8
As	0.02	-	0.020	0.01
Sb	-	0.03	0.020	0.025

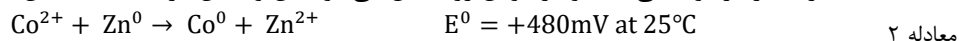
۴- حذف آهن

فرآیند های حذف آهن معمولا بر پایه ترسیب هستند و شامل رسوب دهی به شکل هیدروکسید آهن، جاروسیت، گوتیت، و همتایت می باشند [۵]، [۱۰]، [۲].

در فرآیند رسوب دهی هیدروکسید آهن، بیشتر آرسنیک، آنتیموان و ژرمانیوم همراه با آهن حذف می شود، با این حال هنگامی که بقایای لیچینگ خنثی در معرض اسید داغ قرار می گیرند، محلول خنثی شامل سطوح بالاتری از ناخالصی ها هستند. بنابراین پس از حذف آهن به روش های بالا همچنان نیاز به تصفیه محلول وجود دارد.

۵- حذف سایر ناخالصی ها به روش سمنتاسیون

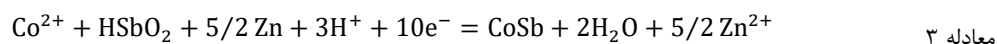
فرآیند سمنتاسیون می تواند روشی برای از بین بردن ناخالصی ها باشد. این یک واکنش بین دو فلز است که در آن فلز کمتر نجیب یون فلز نجیب تر را از محلول خارج می کند [۶]. بنابراین برای مثال یون های کبالت، بر روی سطح پودر روی که نجابت کمتری دارد رسوب می کنند و در عوض روی حل می شود این واکنش در معادله ۲ نشان داده شده است.



پودر روی معمولا برای حذف ناخالصی های فلزی از طریق سمنتاسیون استفاده می شود. مقدار پودر روی که به طور معمول در مرحله تخلیص محلول استفاده می شود از ۴ تا ۶ گرم در لیتر الکترولیت متغیر است [۱۱].

در محلول اسیدی سولفات روی، سمنتاسیون مس و کادمیوم و نیکل با سرعت قابل قبولی انجام می شود در حالی که سمنتاسیون کبالت آهسته است و در حضور یون روی به شدت مهار می شود [۱۲، ۱۳]. ترمودینامیک پیش بینی میکند که حذف کبالت نباید مشکل باشد زیرا روی الکترونگاتیو تر از کبالت است و از طریق سمنتاسیون با پودر روی قابل حذف است. ثابت تعادل این واکنش $10^{16} \times 2$ محاسبه شده است. این ثابت تعادل بزرگ نشان می دهد که یون های کبالت باید به طور کامل از محلول حذف شوند و واکنش برگشتی نیز در انتظار نیست. با این حال در عمل واکنش سمنتاسیون کبالت از نظر سینتیک بسیار کند پیش می رود؛ از این رو فعال کننده هایی مانند آنتیموان تری اکسید، ترکیبات آرسنیک،

قلع و تلوریم جهت افزایش سرعت واکنش استفاده می‌شود [۶]. مکانیسم فعال سازی توسط آنتیموان در معادله ۳ نشان داده شده.

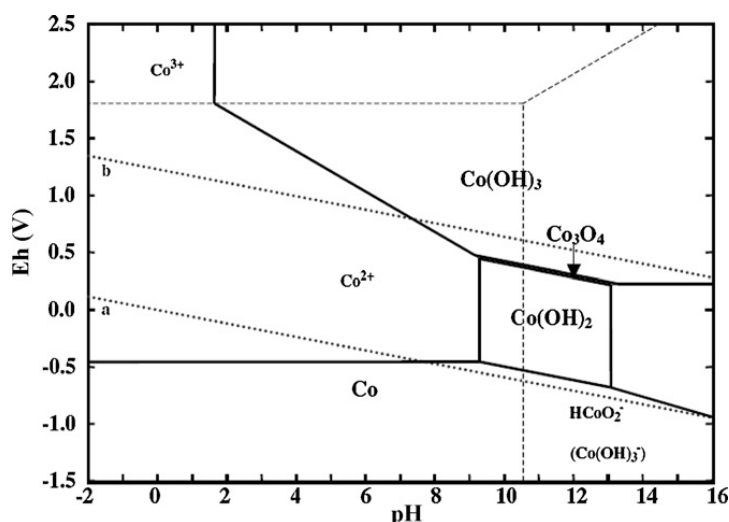


فاکتور دیگری که به افزایش سرعت واکنش سمنتاسیون کبالت کمک می‌کند دما است که در منابع مختلف بین ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شده است [۹].

یک واکنش رقابتی در رسوب فلز به روش سمنتاسیون، واکنش احیای یون های H^+ به گاز هیدروژن است. برای به حداقل رساندن این واکنش رقابتی، فرآیند سمنتاسیون در غلظت اسید پایین (pH=5) انجام می‌شود [۱۴]. بحث زمان ماند برای کبالت مهم تر از نیکل و کادمیوم است. نتایج تست ها نشان میدهد که برای رسیدن به غلظت مجاز کبالت، زمان ماند در داخل راکتور باید حداقل ۹۰ دقیقه باشد. در مطالعه ای توسط بویانوف و همکاران برای خوراکی با غلظت اولیه کبالت بین ۲/۶ تا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، آنها بهترین درصد حذف کبالت را با زمان ماند ۷۵ تا ۹۰ دقیقه گزارش کردند [۱۵].

۱-۵- فرآیند اکسیداسیون-ترسیب

کبالت دارای دو حالت ظرفیتی Co^{2+} و Co^{3+} است و خواص فیزیکی و شیمیایی آنها در محلول به طور قابل توجهی متفاوت است. هنگامی که Co^{2+} به Co^{3+} اکسید می‌شود منطقه پایدار آن در محلول ب شدت کاهش می‌یابد، این موضوع در شکل ۲ قابل مشاهده است. در این شرایط کبالت به صورت $\text{Co}(\text{OH})_3$ رسوب می‌کند [۱۶].



شکل ۲: نمودار فازی کبالت [۱۶].

مقادیر pH مورد نیاز برای واکنش هیدرولیز Co^{3+} و Zn^{2+} به ترتیب ۱/۰۸ و ۵/۹۵ است که تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. حلالیت $\text{Co}(\text{OH})_3$ به طور قابل توجهی پایین است بنابراین با این روش می‌توان غلظت کبالت را تا حد زیادی کاهش داد و کبالت را از روی جدا کرد. اکسیدان‌های رایج در این فرآیند عبارت اند از NaClO_3 ، NaClO ، H_2O_2 ، KMnO_4 و $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ [۱۶].

۲-۵- سمنتاسیون در دما و فشار بالا

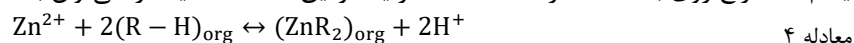
سمنتاسیون کبالت در دمای بالا/فشار بالا (HT/HP) یک فرآیند جدید است که آن، کبالت روی پودر روی در یک ظرف

پر فشار در دمای بالاتر از نقطه جوش معمولی محلول رسوب می‌کند. سرعت حذف کبالت را در محدوده دمایی ۹۸-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و در فشار بخار محلول بررسی شد. یافته‌ها حاکی از آن است که ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد بهترین دما برای دستیابی به حذف کبالت مورد نظر (کاهش غلظت کبالت به ۰/۲ ppm) در ۴۰ دقیقه است. این نشان دهنده یک پیشرفت قابل توجه در مقایسه با بیش از ۱۲۰ دقیقه مورد نیاز برای رسیدن به همان غلظت کبالت در دمای ۹۸ درجه سانتی‌گراد است. با این حال، این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش دما بیش از ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد منجر به افزایش قابل توجه غلظت کبالت باقی مانده پس از ۶۰ دقیقه می‌شود [۹].

۳-۵- روشهای بر پایه استخراج حلالی

استخراج حلالی (SX) توجیح داده شده ترین روش برای جداسازی فلزات از محلول‌های پیچیده است. از مزایای این روش زمان مورد نیاز کمتر و هزینه عملیاتی کمتر است. همچنین دارای انتخاب پذیری بهتر برای فلزات است که در نتیجه منجر به تولید محصولات با خلوص بالا می‌شود و به راحتی می‌توان این روش را از مقیاس آزمایشگاهی در مقیاس پایلوت و صنعتی شبیه سازی کرد. استخراج حلالی به طور گسترده‌ای در فرآیندهای هیدرومتالورژی به ویژه در جداسازی یون‌ها فلزی و خالص سازی و حذف ناخالصی محلول‌های لیچینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. D2EHPA یک حلال آلی موثر برای جداسازی روی و کبالت است. کبالت و روی به طور همزمان با استخراج کننده دپا در pH ۳/۵ استخراج می‌شود. زمان بهینه فرآیند ۱۲ دقیقه اعلام شده و در دمان ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. جداسازی کبالت و روی در مرحله استریپینگ رخ می‌دهد و در دو مرحله کبالت و روی به ترتیب در pH های ۲/۵ و ۱/۵ شست و شو می‌شوند. بیش از ۹۰ درصد کبالت و روی بازیابی قابلیت بازیابی به این روش را دارند [۱۶].

مکانیسم استخراج روی با استفاده از D2EHPA در یک رقیق کننده آلفاتیک را می‌توان به صورت معادله ۴ نوشت:



از سیانکس ۱۹۲۵ نیز می‌توان به عنوان به عنوان حلال برای جداسازی و بازیابی روی و کبالت از محلول‌های سولفات مخلوط استفاده کرد.

۶- جمع بندی و پیشنهاد

فرآیند هیدرومتالورژیکی روی شامل سه مرحله اصلی لیچینگ، تخلیص و الکترولیز است. از آنجایی که فرآیند لیچینگ اسیدی یک فرآیند کاملاً انتخابی نیست، ممکن است به غیر از فلز روی فلزات دیگری وارد محلول شود که این فلزات در فرآیند پایین دست (الکترووینینگ) مشکل ایجاد می‌کنند. یکی از مهم‌ترین مشکل عناصر مزاحم کاهش راندمان جریان است که منجر به افزایش هزینه‌ها می‌شود. مشکل دیگر آن کاهش کیفیت ورق رسوب داده شده است. بنابراین تخلیص محلول یک مرحله ضروری در طی فرآیند تولید روی است. روش‌های حذف عناصر از محلول‌های سولفات معمولاً در دو دسته کلی ترسیب و استخراج حلالی قرار می‌گیرند. روش‌های بر پایه ترسیب که از سال ۱۹۶۰ استفاده می‌شود و قادر به حذف آهن، کادمیوم، نیکل، کبالت، آرسنیک، منگنز و مس است. یکی از مهم‌ترین مراحل تخلیص محلول، حذف آهن است که به روش ترسیب و با کنترل pH و دما صورت می‌گیرد. پس از ترسیب آهن حذف عناصر مزاحم دیگر در طی سمنتاسیون با پودر روی انجام می‌گیرد و فلزاتی مثل کادمیوم و مس و نیکل رسوب می‌کنند، با این حال ترسیب کبالت با پودر روی یک چالش است زیرا واکنش از نظر سینتیکی بسیار آهسته انجام می‌شود. راه حل استفاده از فعال کننده‌ها (ترکیبات آرسنیک و آنتیموان) همراه با دمای بالا است. در سال‌های اخیر روش‌های دیگری مثل سمنتاسیون

¹ Cyanex 925

کبالت در دما و فشار بالا و یا اکسیداسیون کبالت و سپس ترسیب آن در مطالعات زیادی بررسی شد. از آنجا که در روش سمنتاسیون، مصرف پودر روی ممکن است بسیار بالا باشد، امروزه روش‌های جدید و کم‌هزینه‌تری مانند استخراج حلالی در حال صنعتی شدن است. استخراج با حلال یک فرآیند شیمیایی است که در آن محلول حاصل از لیچینگ که دارای روی و سایر ناخالصی‌ها مانند کبالت، نیکل و کادمیوم است با یک حلال آلی معمولاً اسیدی مانند دی-۲ اتیل هگزیک فسفریک اسید (با نام تجاری دپا)، ترکیب می‌شود و سپس جداسازی روی از سایر فلزات انجام می‌شود.

۷- مراجع

- [1] B. Sun, C. Yang, H. Zhu, Y. Li, and W. Gui, "Modeling, optimization, and control of solution purification process in zinc hydrometallurgy," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5, no. 2, pp. 564-576, 2018.
- [2] F. Soltani, H. Darabi, R. Aram, and M. Ghadiri, "Leaching and solvent extraction purification of zinc from Mehdiabad complex oxide ore," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 1566, 2021.
- [3] R. Berezowsky, M. Collins, D. Kerfoot, and N. Torres, "The commercial status of pressure leaching technology," *JOM*, vol. 43, no. 2, pp. 9-15, 1991.
- [4] N. Antuñano, J. Cambra, and P. Arias, "Hydrometallurgical processes for Waelz oxide valorisation—An overview," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 129, pp. 308-320, 2019.
- [5] F. Habashi, "Handbook of extractive metallurgy," (No Title), 1997.
- [6] P. B. Kayin, "Removal of cobalt from zinc sulfate solution by cementation prior to zinc electrowinning," *Sc. Thesis, Middle East Technical University*, 2003.
- [7] D. Nurten and M. Rizaj, "Purification Phases of Zinc Sulphate Solution Obtained From Neutral Leaching Process of Zinc Calcine," *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 22-29, 2019.
- [8] J. Musadaidzwa and E. Tshiningayamwe, "Skorpion zinc solvent extraction: The upset conditions," *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 109, no. 11, pp. 691-695, 2009.
- [9] S. Zaheri, "High temperature and high pressure cobalt cementation onto zinc dust," University of British Columbia, 2015.
- [10] Z. Deng *et al.*, "Behaviour and characterization of hematite process for iron removal in hydrometallurgical production," *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 58, no. 2, pp. 223-231, 2019.
- [11] J. Lu, D. Dreisinger, and K. Rees, "Simultaneous removal of Co, Cu, Cd and Ni from zinc sulfate solution by zinc dust cementation," *Hydrometallurgy*, vol. 197, p. 105479, 2020.
- [12] A. Nelson, W. Wang, G. Demopoulos, and G. Houlachi, "The removal of cobalt from zinc electrolyte by cementation: a critical review," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 20, no. 1, pp. 325-356, 2000.
- [13] B. S. Boyanov, V. V. Konareva, and N. K. Kolev, "Purification of zinc sulfate solutions from cobalt and nickel through activated cementation," *Hydrometallurgy*, vol. 73, no. 1-2, pp. 163-168, 2004.
- [14] R. Raghavan, P. Mohanan, and S. Verma, "Modified zinc sulphate solution purification technique to obtain low levels of cobalt for the zinc electrowinning process," *Hydrometallurgy*, vol. 51, no. 2, pp. 187-206, 1999.
- [15] V. Vahidfarid, K. Shayesteh, P. Abbasi, and S. Salimi, "The Study of Simultaneous Removal of Cobalt, Nickel and Cadmium from Zinc Sulfate Solution."
- [16] Y. Huang *et al.*, "Overview of cobalt resources and comprehensive analysis of cobalt recovery from zinc plant purification residue-a review," *Hydrometallurgy*, vol. 193, p. 105327, 2020.