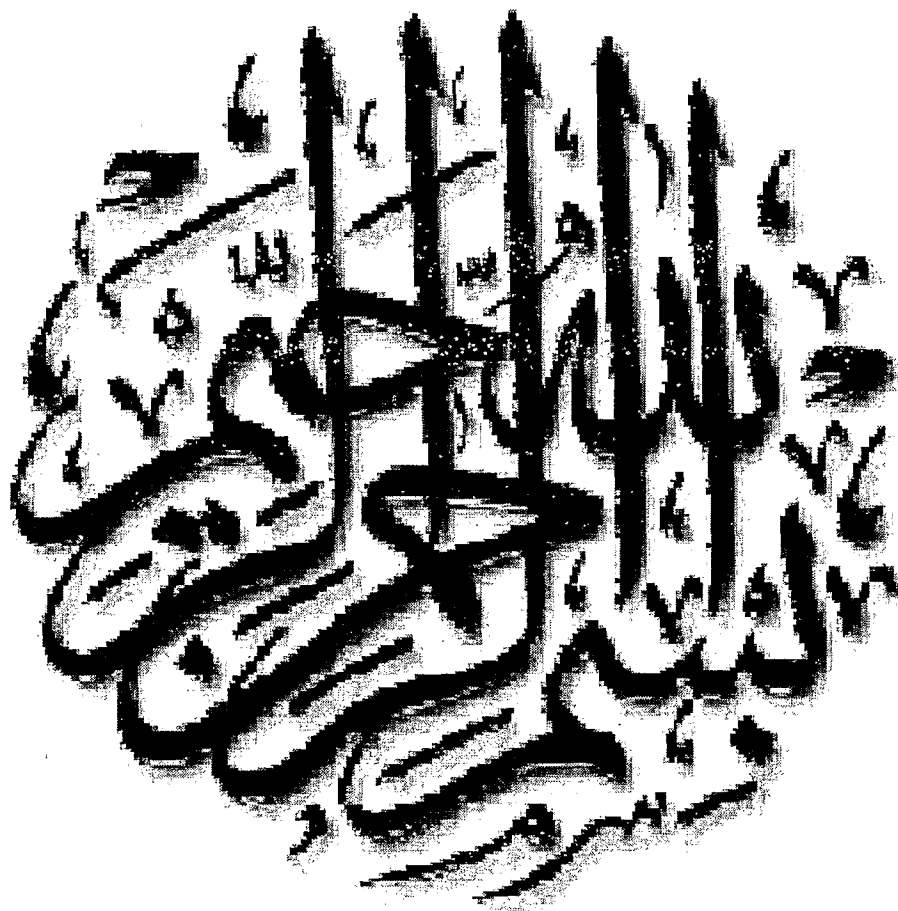
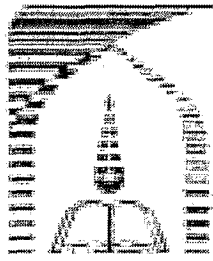


AV/1/10724V
AV/12/E



101299

۸۷,۱,۱۰۶۲۴۷
۸۷-۱۲۴۴



دانشگاه تربیت مدرس

دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی معدن - گروه فرآوری مواد معدنی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی معدن - فرآوری مواد معدنی

عنوان:

استحصال فلز ایندیم از کنسانتره تشویه شده سولفید روی معدن باما به روش هیدرومتالورژی

حسین مهرپویا

اساتید راهنما:

دکتر سید محمد جواد کلینی

دکتر کمال صابریان (پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای)

استاد مشاور:

دکتر محمود عبداللهی

شهریور ۱۳۸۷

۱۳۸۷ / ۱۱ / ۱۳

دانشگاه تربیت مدرس
کتابخانه مرکزی

۱۰۸۷۹۹



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای حسین مهرپویا پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **استحصال فلز ایندیوم از**

سولفید روی سرریه سیماس با روش سیدروسیتالورژی در تاریخ

۱۳۸۷/۶/۳۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد در تاریخ ۱۳۸۷/۶/۳۰ فرآوردند. پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر سید محمد جواد کلینی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر محمود عبدالمجید	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر احمد خدادادی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر سیدضیاءالدین شفاهی	دانشیار	
گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر احمد خدادادی	استادیار	
استاد ناظر دکتر کمال صابریان	دکتر کمال صابریان	استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی
امضاء

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته _____ است که در سال _____ در دانشکده _____ دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر _____، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر _____ و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر _____ از آن

دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶: اینجانب حسن حریمی مقدم قطعاً

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: حسن حریمی مقدم
تاریخ و امضا: ۱۳۸۷، ۹، ۲۳

چکیده:

در این پایان نامه، بازیابی ایندیم از کنسانتره سولفید روی معدن سرب و روی باما اصفهان بررسی شده است. در ابتدا کنسانتره سولفید روی در دمای 950°C و زمان ۳ ساعت تشویه شد. آزمایش‌های لیچینگ مرحله اول با هدف حداکثر نمودن بازیابی روی و حداقل انحلال ایندیم به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی بهینه‌سازی گردید (آرایه متعامد L_9). مقادیر بهینه عوامل موثر pH لیچینگ، دما، زمان و چگالی پالپ به ترتیب ۳، 60°C ، ۷۵ دقیقه و 150 گرم بر لیتر تعیین شد. پسماند لیچینگ مرحله اول حاوی 145 ppm ایندیم است. آزمایش‌های لیچینگ مرحله دوم به روش تغییر یک متغیر انجام شد و مقادیر بهینه عوامل موثر غلظت اسیدسولفوریک، دما و زمان لیچینگ به ترتیب 100 گرم بر لیتر، 90°C و ۳ ساعت انتخاب شد. محلول حاصل حاوی 14 ppm ایندیم و $9/5$ گرم بر لیتر آهن بود. با توجه به اینکه این محلول مناسب استخراج حلالی نیست، ایندیم به صورت انتخابی از محلول رسوب داده شد. برای ترسیب انتخابی ایندیم، ابتدا pH محلول را با سولفیدسدیم به $1/5$ رسانده شد (احیاء آهن ۳ ظرفیتی به آهن ۲ ظرفیتی) و سپس pH محلول با آمونیاک، در دمای 90°C به ۶ رسانده شد. زمان ترسیب ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. در این شرایط کل ایندیم به همراه $7/1$ درصد آهن و ۱۲ درصد روی موجود در محلول رسوب کردند. رسوب به دست آمده حاوی 2650 ppm ایندیم است. رسوب به دست آمده در شرایط مشابه با لیچینگ مرحله دوم حل شد که غلظت ایندیم، آهن و روی آن به ترتیب 250 ppm، ۶ و 15 گرم بر لیتر حاصل شد. برای تغلیظ و تخلیص ایندیم از محلول به دست آمده، ایندیم به وسیله D2EHPA رقیق شده در کرویزین از محلول آبی استخراج شد. در مرحله استخراج حلالی با هدف بیشینه نمودن عامل جداسازی ایندیم و آهن، عوامل pH محلول آبی، زمان مخلوط کردن فاز آبی و آلی و غلظت وزنی D2EHPA در فاز آلی را به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی بهینه‌سازی شدند (آرایه متعامد L_8) که مقادیر بهینه این پارامترها به ترتیب $0/8$ ، ۵ دقیقه و ۳۰ درصد وزنی تعیین شد. سپس به روش تغییر یک متغیر تاثیر عامل نسبت حجمی فاز آبی به آلی بر استخراج ایندیم و عامل جداسازی ایندیم و آهن بررسی شد و نسبت حجمی ۳ (A/O) مناسب شناخته شد. با توجه به نمودار مک‌کیب‌تیل برای استخراج ایندیم، حداقل به دو مرحله استخراج نیاز است تا غلظت ایندیم در فاز آلی به 750 ppm برسد. برای استریپ ایندیم از فاز آلی، محلول‌های اسید هیدروکلریک و اسیدسولفوریک با غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و نهایتاً محلول ۳ مولار اسیدسولفوریک با توجه به درصد استریپ مناسب ایندیم و عدم استریپ آهن مناسب شناخته شد. همچنین زمان استریپینگ ایندیم از فاز آلی و نسبت حجمی فاز آلی به فاز آبی (O/A) به ترتیب ۵ دقیقه و ۴ تعیین شد. با توجه به نمودار مک‌کیب‌تیل برای استریپ ایندیم، حداقل به ۳ مرحله استریپ نیاز است تا غلظت ایندیم در فاز آبی به 3000 ppm برسد. برای سم‌تاسیون ایندیم از محلول آبی از ورق و پودر روی استفاده شد و با مقایسه نتایج بازیابی ایندیم معلوم شد پودر روی نسبت به ورق روی بسیار موثرتر است. مقادیر بهینه عوامل pH محلول، دما، زمان و مقدار پودر روی جهت بیشینه نمودن بازیابی ایندیم در فرآیند سم‌تاسیون با پودر روی به ترتیب 3 ، 25°C ، ۶ ساعت و ۲ برابر نسبت استکیومتری با ایندیم تعیین شد. بازیابی ایندیم در مرحله سم‌تاسیون با پودر روی $90/33$ بود. بازیابی کلی ایندیم نیز $78/62$ درصد تعیین گردید.

واژگان کلیدی: ایندیم، کنسانتره سولفید روی، لیچینگ، ترسیب، سم‌تاسیون، طراحی آزمایش تاگوچی

فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
بررسی روش‌های فرآوری ایندیم.....	۱
۱-۱- آشنایی.....	۲
۲-۱- خواص.....	۲
۳-۱- کانی شناسی.....	۴
۴-۱- ژئوشیمی.....	۴
۵-۱- زمین شناسی اقتصادی.....	۵
۱-۵-۱- ذخایر قلع نوع کرون وال.....	۶
۲-۵-۱- ذخایر سرب و روی نوع می‌سی‌سی‌پی.....	۷
۳-۵-۱- ماسه سنگ‌های میزبان فلزات پایه و یا گرانبها.....	۷
۴-۵-۱- ذخایر سرب و روی داخل رسوبات.....	۷
۵-۵-۱- مسیو سولفیدها.....	۷
۶-۵-۱- ذخایر ایندیم در مونت پلیزانت.....	۸
۶-۱- کاربردهای ایندیم.....	۸
۷-۱- تولید ایندیم.....	۹
۱-۷-۱- تولید از مدارهای روی.....	۹
۸-۱- توسعه‌های اخیر در تولید ایندیم.....	۱۲
بازیابی ایندیم از محلول‌های آبی.....	۱۳
۸-۱- ۱- مطالعات انجام شده در زمینه استخراج ایندیم به وسیله D2EHPA.....	۱۶
۸-۱- ۲- بررسی استخراج ایندیم از محلول‌های سولفات، نیترات و کلراید به وسیله D2EHPA.....	۱۸
۸-۱- ۳- جدایش و تغلیظ ایندیم از محلول لیچینگ حاوی آنتیمون و آهن به وسیله D2EHPA.....	۲۰
۸-۱- ۴- بررسی عوامل موثر در جدایش ایندیم و آهن به وسیله D2EHPA.....	۲۱
۸-۱- ۵- بررسی تاثیر رقیق کننده بر استخراج ایندیم توسط D2EHPA.....	۲۱
۸-۱- ۶- بازیابی انتخابی ایندیم از آهن.....	۲۱
۸-۱- ۷- روشی جدید برای تهیه محلولی عاری از آهن سه ظرفیتی و مس برای حل مشکل استخراج آهن همراه با ایندیم توسط D2EHPA.....	۲۲
۸-۱- ۲- دستاوردهای جدید در زمینه استخراج حلالی و تبادل یونی ایندیم.....	۲۳
۸-۱- ۱- کاربرد کنتاکتور گریز از مرکز (سانتریفیوژ) برای جدایش ایندیم و آهن.....	۲۳
۸-۱- ۲- ۲- استخراج و جدایش ایندیم، گالیم و تالیوم به وسیله Cyanex 925.....	۲۳
۸-۱- ۳- ۲- استخراج حلالی ایندیم به وسیله Cyanex 923.....	۲۳
۸-۱- ۴- ۲- استخراج و جدایش گالیم، ایندیم و تالیوم توسط Cyanex 923.....	۲۴
۸-۱- ۵- ۲- جداسازی ایندیم و کادمیوم توسط Cyanex 301.....	۲۴
۸-۱- ۶- ۲- استخراج حلالی ایندیم توسط Lix973N.....	۲۴
۸-۱- ۷- ۲- استخراج و جدایش ایندیم، گالیم و روی از محلول سولفات به وسیله رزین تبادل یونی.....	۲۵
۸-۱- ۸- ۲- جذب ایندیم روی رزین های تبادل یونی پلیمریک.....	۲۵

۲۵.....	۱-۸-۲-۱۰- استخراج ایندیم از محلول اسیدنیتریک
۲۶.....	۱-۹- جنبه‌های اقتصادی
۳۰.....	فصل دوم.....
۳۰.....	معرفی معدن و کارخانه فرآوری باما، نمونه‌برداری و آنالیز ایندیم
۳۱.....	۱-۲- کلیات
۳۱.....	۱-۱-۲- موقعیت جغرافیایی
۳۲.....	۲-۱-۲- زمین شناسی منطقه
۳۲.....	۳-۱-۲- عملیات قبل از بهره برداری
۳۳.....	۲-۲- کارخانه فرآوری ایرانکوه (باما)
۳۶.....	۴-۲- آنالیز ایندیم، روی و آهن
۳۶.....	۵-۲- نمونه برداری
۳۷.....	۶-۲- شناسایی نمونه
۳۸.....	فصل سوم.....
۳۸.....	آزمایش‌ها
۳۹.....	۱-۳- مقدمه
۳۹.....	۲-۳- تشویه
۴۰.....	۱-۲-۳- روش انجام آزمایش‌های تشویه
۴۲.....	۳-۳- آزمایش‌های لیچینگ
۴۲.....	۱-۳-۳- لیچینگ مرحله اول
۴۷.....	۲-۳-۳- لیچینگ مرحله دوم
۴۸.....	۱-۲-۳-۳- بررسی تاثیر غلظت اسید
۴۸.....	۲-۲-۳-۳- بررسی تاثیر دما
۴۹.....	۳-۲-۳-۳- بررسی تاثیر زمان
۵۰.....	۴-۳- ترسیب انتخابی ایندیم
۵۰.....	۱-۴-۳- روش آزمایش ترسیب
۵۱.....	۲-۴-۳- انتخاب عامل قلیایی و pH مناسب برای رسوب انتخابی ایندیم
۵۲.....	۳-۴-۳- بررسی تاثیر دما بر فرآیند ترسیب انتخابی ایندیم
۵۳.....	۴-۴-۳- بررسی تاثیر زمان بر فرآیند رسوب انتخابی ایندیم
۵۴.....	۵-۳- لیچینگ رسوب به دست آمده از مرحله ترسیب
۵۴.....	۶-۳- استخراج با حلال آلی
۵۹.....	۱-۶-۳- بررسی تاثیر نسبت حجمی فاز آبی به آلی بر عامل جداسازی ایندیم و آهن
۶۰.....	۲-۶-۳- رسم نمودار مک کیب تیل - تعیین تعداد مراحل استخراج
۶۲.....	۷-۳- استریپینگ ایندیم از فاز آلی
۶۲.....	۱-۷-۳- بررسی تاثیر نوع و غلظت اسید بر استریپینگ ایندیم از فاز آلی
۶۴.....	۲-۷-۳- بررسی تاثیر زمان تماس فاز آبی و آلی استریپینگ ایندیم از فاز آلی
۶۵.....	۳-۷-۳- بررسی تاثیر نسبت حجمی فاز آبی و آلی بر استریپینگ ایندیم از فاز آلی

۶۵	رسم نمودار مک‌کیب‌تیل - تعیین تعداد مراحل استریپ ایندیم
۶۶	فصل چهارم
۶۷	سمنتاسیون ایندیم
۶۸	۱-۴ - سمنتاسیون ایندیم با روی
۶۸	۲-۴ - سمنتاسیون ایندیم با ورق روی
۶۹	۱-۲-۴ - نحوه انجام آزمایش‌های سمنتاسیون با ورق روی
۶۹	۲-۲-۴ - تحلیل نتایج سمنتاسیون ایندیم با ورق روی
۷۱	۳-۴ - سمنتاسیون ایندیم با پودر روی
۷۲	۱-۳-۴ - نحوه انجام آزمایش‌های سمنتاسیون با پودر روی
۷۲	۲-۳-۴ - تحلیل نتایج سمنتاسیون ایندیم با پودر روی
۷۴	۴-۴ - مقایسه نتایج سمنتاسیون ایندیم با ورق و پودر روی
۷۷	فصل پنجم
۷۷	نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۷۸	۱-۵ - نتایج
۸۰	۲-۵ - پیشنهادها

فهرست جدول‌ها

صفحه	نام جدول
۳	جدول ۱-۱: خواص فیزیکی ایندیم
۶	جدول ۲-۱: کانی‌های حاوی ایندیم و مقادیر ایندیم در آن‌ها
۷	جدول ۳-۱: نام کانی‌ها و مقادیر ایندیم موجود در آن‌ها در ذخایر قلع نوع کروم وال
۱۳	جدول ۴-۱: برخی استخراج‌کننده‌های اسیدی مورد استفاده برای استخراج ایندیم
۱۵	جدول ۵-۱: برخی استخراج‌کننده‌های چلات اسیدی مورد استفاده برای استخراج ایندیم
۱۵	جدول ۶-۱: برخی استخراج‌کننده‌های نوع انحلالی مورد استفاده برای استخراج ایندیم
۲۶	جدول ۷-۱: نام شرکت‌های بزرگ تولید کننده ایندیم در جهان
۲۸	جدول ۸-۱: آمار تولید ایندیم به تفکیک کشور و میزان تولید آن‌ها در سال‌های ۲۰۰۳ - ۱۹۹۹ (تن)
۳۷	جدول ۱-۲: آنالیز XRF کنسانتره سولفور روی باما
۴۰	جدول ۱-۳: نتایج بازیابی روی نمونه‌های آزمایش‌های تشویه
۴۱	جدول ۲-۳: ترکیب شیمیایی کنسانتره تشویه شده سولفید روی معدن ایرانکوه در شرایط بهینه شده
۴۲	جدول ۳-۳: عوامل و سطوح مختلف هر یک
۴۲	جدول ۴-۳: آرایه L _a و نتایج آزمایش‌ها
۴۴	جدول ۵-۳: نتایج تحلیل واریانس برای داده‌های روی
۴۴	جدول ۶-۳: نتایج ادغام‌سازی و تحلیل واریانس برای داده‌های روی
۴۵	جدول ۷-۳: نتایج تحلیل واریانس برای داده‌های ایندیم
۴۵	جدول ۸-۳: در صد تاثیر هر پارامتر در بازیابی روی و ایندیم و مقادیر بهینه پارامترها
۴۶	جدول ۹-۳: مقادیر بهینه پارامترهای موثر در لیجینگ مرحله اول
۴۶	جدول ۱۰-۳: شرایط انجام آزمایش و بازیابی روی و ایندیم در pHهای مختلف در شرایط بهینه سایر پارامترها
۴۷	جدول ۱۱-۳: ترکیب شیمیایی پسماند لیجینگ مرحله اول
۵۱	جدول ۱۲-۳: نتایج آزمایش‌های انتخاب عامل قلیایی و pH مناسب برای رسوب انتخابی ایندیم
۵۲	جدول ۱۳-۳: نتایج آزمایش‌های بررسی تاثیر دما بر میزان رسوب ایندیم، آهن و روی
۵۳	جدول ۱۴-۳: نتایج آزمایش‌های بررسی تاثیر زمان بر میزان رسوب ایندیم، آهن و روی
۵۴	جدول ۱۵-۳: ترکیب شیمیایی رسوب به دست آمده در شرایط بهینه ترسیب
۵۶	جدول ۱۶-۳: عوامل و سطوح مختلف هر یک
۵۶	جدول ۱۷-۳: آرایه L _a مورد استفاده و نتایج آزمایش‌ها
۵۶	جدول ۱۸-۳: نتایج تحلیل واریانس برای داده‌های آهن
۵۷	جدول ۱۹-۳: نتایج تحلیل واریانس برای داده‌های عامل جداسازی ایندیم و آهن
۵۸	جدول ۲۰-۳: مقادیر بهینه پارامترهای موثر عامل جداسازی ایندیم و آهن
۵۹	جدول ۲۱-۳: شرایط و نتایج آزمایش‌های بررسی تاثیر نسبت حجمی فاز آبی و آلی
۶۰	جدول ۲۲-۳: نتایج آزمایش‌ها برای رسم نمودار مک‌کیب‌تیل
۶۱	جدول ۲۳-۳: شرایط و نتایج آزمایش‌های بررسی تاثیر غلظت اسیدسولفوریک بر استریپینگ ایندیم و آهن
۶۲	جدول ۲۴-۳: شرایط و نتایج آزمایش‌های بررسی تاثیر غلظت اسیدسولفوریک بر استریپینگ ایندیم و آهن
۶۳	جدول ۲۵-۳: نتایج آزمایش‌های بررسی تاثیر زمان مخلوط کردن بر استریپ ایندیم
۶۴	جدول ۲۶-۳: نتایج آزمایش‌های بررسی تاثیر نسبت حجمی فاز آلی به فاز آبی بر میزان استریپ ایندیم

۶۵	جدول ۳-۲۷: نتایج آزمایش‌ها برای رسم نمودار مک‌کیب‌تیل
۶۶	جدول ۳-۲۸: نتایج آزمایش‌ها برای رسم نمودار مک‌کیب‌تیل
۶۸	جدول ۴-۱: سری‌های الکتروشیمیایی - پتانسیل استاندارد احیاء
۶۹	جدول ۴-۲: عوامل و سطوح مختلف هر یک
۶۹	جدول ۴-۳: آرایه L _۴ مورد استفاده و نتایج آزمایش‌ها
۷۰	جدول ۴-۴: نتایج تحلیل واریانس برای داده‌های سمنتاسیون ایندیم با ورق روی
۷۰	جدول ۴-۵: نتایج ادغام و تحلیل واریانس برای داده‌های سمنتاسیون ایندیم با ورق روی
۷۰	جدول ۴-۶: مقادیر بهینه پارامترهای موثر در سمنتاسیون ایندیم با ورق روی
۷۲	جدول ۴-۷: عوامل و سطوح مختلف هر یک
۷۲	جدول ۴-۸: آرایه L _{۱۶} مورد استفاده و نتایج آزمایش‌ها
۷۳	جدول ۴-۹: نتایج تحلیل واریانس برای داده‌های سمنتاسیون ایندیم
۷۳	جدول ۴-۱۰: مقادیر بهینه پارامترهای موثر در سمنتاسیون ایندیم با پودر روی
۷۵	جدول ۴-۱۱: مقایسه نتایج سمنتاسیون ایندیم با ورق و پودر روی

فهرست شکل‌ها

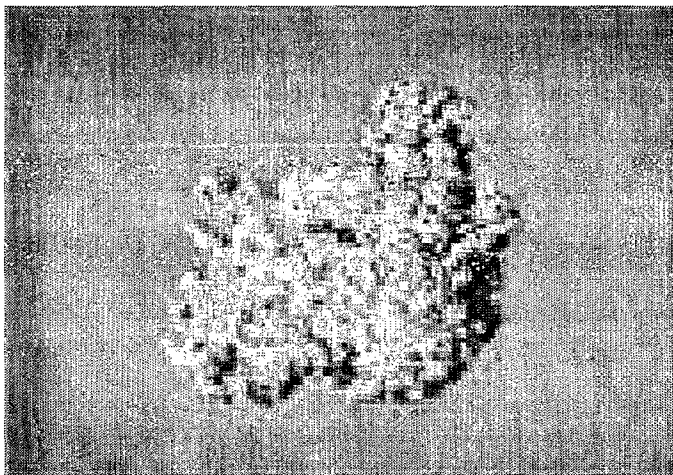
نام شکل	صفحه
شکل ۱-۱: عنصر ایندیم در طبیعت	۲
شکل ۲-۱: استخراج‌پذیری ایندیم، آهن و روی بر حسب pH محلول، توسط D2EHPA [۴].	۱۷
شکل ۳-۱: استخراج‌پذیری ایندیم، آهن و روی بر حسب pH محلول، توسط ترکیبی از TBP و D2EHPA	۱۸
شکل ۴-۱: فلوشیت ارائه شده توسط شی گینگ و همکارانش برای بازیابی ایندیم	۲۲
شکل ۵-۱: تولید جهانی ایندیم به تفکیک کشور در سال ۱۹۹۴ [۱].	۲۷
شکل ۶-۱: تولید جهانی ایندیم به تفکیک کشور و میزان تولید آن‌ها در سال‌های ۲۰۰۱ - ۱۹۹۵	۲۷
شکل ۷-۱: نوسانات قیمت ایندیم از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۰۶	۲۸
شکل ۸-۱: میزان مصرف ایندیم با توجه به نوع استفاده در سال ۲۰۰۴	۲۹
شکل ۱-۲: دفرکتوگرام کنسانتره سولفید روی باما	۳۷
شکل ۱-۳: نمودار بازیابی روی نسبت به زمان تشویه	۴۱
شکل ۲-۳: نمودار XRD کنسانتره تشویه شده سولفید روی معدن ایرانکوه در شرایط بهینه شده	۴۱
شکل ۳-۳: تغییرات بازیابی روی و ایندیم به ۱-دما -۲ pH -۳ غلظت پالپ و ۴-زمان در لیچینگ مرحله اول	۴۷
شکل ۴-۳: تغییرات بازیابی ایندیم، آهن و روی نسبت به تغییرات غلظت اسید در لیچینگ مرحله دوم	۴۸
شکل ۵-۳: تغییرات بازیابی ایندیم، آهن و روی نسبت به تغییرات دما در لیچینگ مرحله دوم	۴۹
شکل ۶-۳: تغییرات بازیابی ایندیم، آهن و روی نسبت به تغییرات زمان در لیچینگ مرحله دوم	۴۹
شکل ۷-۳: تاثیر عوامل رسوب دهنده و pH بر میزان رسوب ۱. ایندیم ۲. آهن و ۳. روی	۵۱
شکل ۸-۳: تاثیر دما بر میزان رسوب ایندیم، آهن و روی	۵۲
شکل ۹-۳: تاثیر زمان بر میزان رسوب ایندیم، آهن و روی	۵۳
شکل ۱۰-۳: استخراج‌پذیری ایندیم، آهن و روی بر حسب pH محلول، توسط D2EHPA	۵۵
شکل ۱۱-۳: نمودارهای میانگین حاشیه‌ای عوامل برای داده‌های ایندیم	۵۷
شکل ۱۲-۳: نمودارهای میانگین حاشیه‌ای عوامل برای داده‌های آهن	۵۸
شکل ۱۳-۳: نمودارهای میانگین حاشیه‌ای عوامل برای داده‌های عامل جداسازی ایندیم و آهن	۵۹
شکل ۱۴-۳: تاثیر A/O بر عامل جداسازی ایندیم و آهن	۶۰
شکل ۱۵-۳: نمودار مک‌کیب‌تیل برای تعیین مراحل استخراج ایندیم	۶۱
شکل ۱۶-۳: تاثیر غلظت اسید هیدروکلریک بر بازیابی ایندیم و آهن از فاز آلی	۶۳
شکل ۱۷-۳: تاثیر غلظت اسید سولفوریک بر بازیابی ایندیم از فاز آلی	۶۳
شکل ۱۸-۳: تاثیر زمان مخلوط کردن فاز آبی و آلی بر استریپ ایندیم	۶۴
شکل ۱۹-۳: تاثیر نسبت حجمی فاز آلی به فاز آبی بر میزان استریپ ایندیم	۶۵
شکل ۲۰-۳: نمودار مک‌کیب‌تیل برای تعیین مراحل استریپ ایندیم	۶۶
شکل ۱-۴: تغییرات بازیابی ایندیم به ۱-pH -۲ دما -۳ زمان و ۴-دور همزن در سمناسیون ایندیم با ورق روی	۷۱
شکل ۲-۴: تغییرات بازیابی ایندیم نسبت به ۱-pH -۲ دما -۳ زمان و ۴-دور همزن در سمناسیون ایندیم با پودر روی	۷۴
شکل ۳-۴: فلوشیت بازیابی ایندیم در این پایان نامه	۷۶

فصل اول

بررسی روش‌های فرآوری ایندیم

۱-۱- آشنایی

ایندیم با عدد اتمی ۴۹، یک عنصر فلزی از گروه ۱۳ جدول تناوبی و دارای دو ایزوتوپ طبیعی است. In^{113} (۴/۲۸٪) و In^{115} (۹۵/۷۲٪) فراوانی ایندیم در پوسته زمین قابل مقایسه با نقره و در حدود ۰/۱ ppm می‌باشد. این فلز در سال ۱۸۶۳ میلادی به وسیله ریچ^۱ و ریچتر^۲ در حین آنالیز اسپکترومتری کانسنگ اسفالریت در مدرسه معدنی فرایبورگ در آلمان کشف شد. ایندیم به خاطر خطوط آبی^۳ که باعث شناسایی آن گردید به این نام خوانده شد [۱].



شکل ۱-۱: عنصر ایندیم در طبیعت.

۱-۲- خواص

• خواص فیزیکی

ایندیم یک فلز به رنگ سفید نقره‌ای بلوری است که خیلی نرم (نرم‌تر از سرب) و چکش‌خوار می‌باشد و در صورتی که تحت فشار قرار گیرد، به صورت آبی تغییر شکل می‌دهد. مانند قلع در حین خم کردن از خود صدا ساطع می‌کند^۴. ایندیم عموماً مقاومت کششی و سختی آلیاژی که به آن افزوده می‌شود را افزایش می‌دهد. ایندیم مذاب، شیشه تمیز را خیس می‌کند. ایندیم در دمای $373^{\circ}K$ به سوپرسانا تبدیل می‌شود [۱]. بعضی از خواص فیزیکی ایندیم در جدول ۱-۱ آمده است.

¹ - F. Reich

² - T. H. Richter

³ - Indigo blue spectral line

⁴ - High-pitched "cry"

• خواص شیمیایی

فلز ایندیم در دمای اتاق (25°C) به وسیله هوا یا اکسیژن، اکسید نمی‌شود. اما وقتی که حرارت داده شود، به طور مستقیم با آرسنیک، آنتیموان، هالوژن‌ها، اکسیژن، فسفر، گوگرد، سلنیم و تلوریم واکنش می‌دهد.

ایندیم به آرامی در اسیدهای معدنی رقیق، اما به سرعت در اسیدهای رقیق داغ یا اسیدهای غلیظ حل می‌شود. قلیاها بر توده فلز اثر نمی‌کنند [۱].

جدول ۱-۱: خواص فیزیکی ایندیم [۲ و ۱]

خواص	مقادیر
عدد اتمی	۴۹
جرم اتمی	۱۱۴/۸۲
نقطه ذوب	۱۵۶/۶ سانتیگراد
نقطه جوش	۲۰۷۲ سانتیگراد
شعاع اتمی	۲ آنگستروم
ظرفیت	۳ و ۲ و ۱
رنگ	سفید نقره‌ای
انرژی یونیزاسیون	۵۵۸/۳ کیلو ژول بر مول
شعاع یونی	۰/۸ آنگستروم
الکترون‌گاتیوی	۱/۷۸
حالت اکسیداسیون	۳
گرمای فروپاشی	۳/۲۶۳ کیلو ژول بر مول
گرمای تبخیر	۲۳/۱۵ کیلو ژول بر مول
مقاومت الکتریکی	۰/۰۰۰۰۰۰۰۸۶۱ اهم بر متر
گرمای ویژه	۰/۲۳ ژول بر گرم کلوین
سیستم تبلور	تتراگونال
حجم اتمی	$15/73 \times 10^{-6}$ متر مکعب بر مول
چگالی در $293/15^{\circ}\text{K}$	۷/۳۱۰ گرم بر سانتیمتر مکعب
سختی در مقیاس براینل	۰/۹
مقاومت کششی	۲/۶۴۵ مگا پاسکال

۱-۳- کانی شناسی

ایندیم اغلب به صورت عنصر کمیاب و نشانه^۵ در دیگر کانی‌ها دیده می‌شود. کانی‌های ایندیم نادرند (البته نه به اندازه کانی‌های گالیم). هفت کانی ایندیم در طبیعت تا به حال شناخته شده است.

۱. ایندیم خالص.
۲. ایگزومیت^۶.
۳. روکوایست^۷ (Cu In S_۲) این کانی از گروه کالکوپیریت است.
۴. ایندیت^۸ (Fe^{۲+} In_۲ S_۴).
۵. ساکورویت^۹ ((Cu, Zn, Fe) (In, Sn) S_۳).
۶. پتروکیت^{۱۰} ((Cu, Fe, Zn, Ag) (Sn, In) S_۴).
۷. دزاهلیندیت^{۱۱} (In (OH)_۳) که حاصل آلتراسیون ایندیت است [۲].

۱-۴- ژئوشیمی

مقدار متوسط ایندیم در پوسته جامد زمین $1/4 \times 10^{-5}$ درصد و نسبت تمرکز ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ است. از نظر شیمیایی شبیه به قلع است و بیشتر همراه آهن، کادمیم، گالیم و تلوریوم است. ایندیم نیز شبیه به کادمیم کالکوفیل است. از نظر ژئوشیمیایی به مقدار زیادی به روی نزدیک است و آن را همراهی می‌کند [۲].

پتانسیل الکتروشیمیایی آن اجازه می‌دهد تا به ایندیم خالص احیا شود. در انحلال آبی، یون In^{+1} ناپایدار است.

طول پیوند بین In-S و Sn-S شبیه به هم هستند که باعث سهولت انحلال ایندیم در سولفیدهای قلع‌دار بصورت انحلال جامد دمای بالا می‌شود. در ساختارهای ناهم قطب In^{+3} اغلب جانشین Fe^{+3} می‌شود. ایندیم به مقدار قابل ملاحظه‌ای در فیلوسیلیکات‌ها و اینوسیلیکات‌ها جانشین آهن می‌شود.

ایندیم در کانی‌های قلع مثل: کاسیتريت (تا ۱٪)، هیدروکاسیتريت (۲٪)، کیلیندیریت^{۱۲} (۱٪)، تالیت^{۱۳} (۰/۳٪) و همچنین در کانی‌های دارای پیوندهای کووالانسی تتراهدرال مثل اسفالریت (۱/۰۹٪)،

5. Trace

6. Yixumite

7. Roquesite

8. Indite

9. Sakuraiite

10. Petrukite

11. Dzahindite

12. Kylindritc

13. teallite

کالکوپیریت و استانیت (% ۰/۳) یافت می‌شود. تمرکز ایندیم در سیلیکات‌ها کم و در حدود ppb است. خصوصیات کالکوفیل بودن ایندیم از ویژگی‌های سیدروفیل و لیتوفیل آن بیشتر است [۲].

۱-۵- زمین‌شناسی اقتصادی

گسترش ایندیم در سنگ‌های آذرین کم و بیش، یکسان است. تمرکز مهم عمدتاً در مرحله پایانی سیال از فرایند ماگمایی می‌باشد و بطور قابل ملاحظه‌ای به همراهی قلع تمرکز می‌یابد. ایندیم در طول تشکیل گرازن‌ها و اسکارن‌ها و کانی‌سازی سولفیدها بصورت هیدروترمال دمای بالا، تمرکز می‌یابد. به علاوه کانی‌های قلع، اسفالریت‌های تیره رنگ غنی از آهن معمول‌ترین کانی‌های میزبان ایندیم هستند. بیشتر پگماتیت‌ها و محیط‌های هیدروترمال دمای پایین مثل ذخایر سرب و روی یا ذخایر جیوه، آنتیمون و آرسنیک از نظر ایندیم خیلی فقیر هستند. بطور کلی وجود ایندیم در کانی‌های سولفیدی بستگی به وجود قلع در اطراف آن کانی خاص دارد [۲].

ذخایر موجود در سنگ‌های سیلیکاته معمولاً از ذخایر داخل سنگ‌های آهکی از ایندیم غنی‌تر هستند. چرخه شیمیایی ایندیم در محیط سوپرژن به خوبی شناخته شده است. در ذخایر غنی از ایندیم کانی‌های ثانویه ایندیم، ممکن است در منطقه اکسیداسیون بوجود آیند. به هر حال فقط هیدروکسید تا به حال گزارش شده است. اکثر محتوای ایندیم در کانی‌های منطقه اکسیداسیون پراکنده می‌شوند. هیدروکسید آهن دارای ظرفیت جذب زیادی برای کمپلکس $\text{In}(\text{OH})_4^-$ دارد که ممکن است به تمرکز ایندیم (مثل ژرمانیوم و گالیم) کمک کند. مقدار ایندیم در شیل‌ها شبیه به متوسط پوسته است و مقدار آن در رسوبات کربناتی کمترین مقدار است.

محتوای ایندیم در ذخایر سولفیدی به طور مستقیم به میزان قلع بستگی دارد و ذخایر سولفیدی کاسیتريت - سولفید - سیلیکات بیشترین مقدار ایندیم را دارند. مقدار ایندیم در ذخایر قلع نزدیک به سطح در سنگ‌های آتشفشانی اسیدی بیشترین است. کاسیتريت کلوفرم در چنین ذخایری تا ۱/۳۵ درصد ایندیم دارد و این به دلیل وجود کانی‌های تازه کشف شده ایندیم همراه آن است.

تقریباً ۷۵ درصد منابع ایندیم در ذخایر سرب و روی در سنگ‌های سیلیکاته و ۲۰ درصد در ذخایر کاسیتريت - سیلیکات - سولفید و کاسیتريت - سولفید (که البته دومی بیشتر از اولی) هستند [۲].

ایندیم بطور عمده به عنوان محصول فرعی از اسفالریت بدست می‌آید. البته این عنصر به مقادیر بیشتری در کانی‌های قلع تمرکز می‌یابد اما بازایی اقتصادی آن از این کانی‌ها مشکل‌تر است.

میزان ایندیم در کانی‌های مختلف (که بیشترین تمرکز را دارا هستند) بر طبق آنالیزهای انجام شده در جدول ۱-۲ ارائه شده است.

۱. کالکوپیریت در رگه‌های جانبی و حاشیه‌ای و احتمالاً ذخایر جانشینی در منطقه بینگهام در یوتا، آمریکا.
۲. اسفالریت در رگه‌های فلزات پایه غنی از طلا و نقره در منطقه سنترال سیتی در کلرادو در آمریکا. در کنسارهای زیر از ۱۰۰۰ - ۱۰۰ ppm، ایندیم در کانی‌های سولفیدی و اکسیدی تمرکز می‌یابد.
۳. ذخایر سرب و روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT).
۴. رسوبات میزبان سرب و روی (SX).
۵. ذخایر فلزات پایه و گرانبها که به صورت رگه‌ای، جانشینی و دگرگونی مجاورتی هستند (VRC).
۶. توده سولفیدهای آتشفشانی (VMS).

جدول ۱-۲: کانی‌های حاوی ایندیم و مقادیر ایندیم در آن‌ها [۲]

مقدار (ppm)	کانی
۱۲۵۰۰-۵	اسفالریت
۹۸۰۰-۵	کالکوپیریت
۵۰۰	گالن
۱۰۰	پیریت
۷۰۰-۲۰۰	کاسیتريت

۱-۵-۱- ذخایر قلع نوع کروم‌وال^{۱۴}

در جدول ۱-۳ نام کانی‌ها و مقادیر ایندیم موجود در آن‌ها در ذخایر قلع نوع کروم‌وال ارائه شده است.

^{۱۴} Corn wall

جدول ۱-۳: نام کانی‌ها و مقادیر ایندیم موجود در آن‌ها در ذخایر قلع نوع کروم وال [۲]

مقدار ایندیم (ppm)	نام کانی	مقدار ایندیم (ppm)	نام کانی
۳۰۰ - ۱۲۵۰۰	اسفالریت	۵۰۰	گالن
۱۶۲۰ - ۹۸۰۰	کالکوپیریت	۴۰۰	هگزاستانیث ^{۱۵}
۲۱۰۰	تتراگونال استانیث ^{۱۶}	۱۰۰	پیریت
۱۱۰۰	دیگنیت ^{۱۷}	۵۰	آرسنوپیریت
۲۰۰ - ۷۰۰	کاسیتریت	< ۱۰	مولیبدینیت

۱-۵-۲- ذخایر سرب و روی نوع می‌سی‌سی‌پی (MVT)

۱. اسفالریت ۵ تا ۱۶۶ ppm (معمولاً کمتر از ۵۰ ppm) ایندیم دارد.

۲. گالن کمتر از ۳ ppm ایندیم دارد.

۱-۵-۳- ماسه سنگ‌های میزبان فلزات پایه و یا گرانبها (SSH)

سه نمونه از کنسانتره سرب و روی همگی حاوی کمتر از ۸ ppm ایندیم بوده‌اند.

۱-۵-۴- ذخایر سرب و روی داخل رسوبات (SX)

بیشترین مقدار ایندیم داخل اسفالریت ۳۶۰ ppm بوده است ولی بطور متوسط نمونه‌ها ۱۰۰ ppm یا کمتر ایندیم داشته‌اند [۲].

البته به جز در منطقه کلرادو که به طور متوسط ۲۶۳ ppm ایندیم داشته است. اما گالن که در کنسانتره سرب بوده معمولاً زیر حد تشخیص ۸ ppm ایندیم داشته است. بالاترین تمرکز ایندیم در سولفیدهای رگه‌ای که در ارتباط و همراهی کانی‌های قلع هستند، دیده شده است. یکی از ذخایر پرعیار ایندیم هاری هاری^{۱۸} در بولیوی می‌باشد که به عنوان کانسار روی محسوب می‌شود [۲].

۱-۵-۵- توده سولفیدها (VMS)

کالکوپیریت تا ۹۰ ppm و اسفالریت و پیریت ۴۲ ppm یا کمتر ایندیم داشته‌اند.

¹⁵ . Hexastannite

¹⁶ . Tetragonal stannite

¹⁷ . Digenite

¹⁸ . Huari Huari

۱-۵-۶- ذخایر ایندیم در مونت پلیزانت^{۱۹} (کانادا)

این ذخایر به صورت رگه‌ها و به صورت جانیشینی در سنگ‌های پرشی که میزبان قلع هستند وجود دارد. این ذخایر در سنگ‌های آتشفشانی، گرانیتی و رسوبی دیده می‌شوند و کانی‌های اسفالریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت و کاسیتريت فراوان‌ترین کانی‌ها در این ذخیره هستند. تجمع ایندیم بیشتر همراه روی و مس و به علت تمرکز در اسفالریت و کمتر کالکوپیریت است [۲].

اسفالریت در این ذخایر از کمتر از ۰/۰۱ درصد تا ۰/۶۹ درصد ایندیم دارد. به نظر می‌رسد که ایندیم جانشین روی و آهن می‌شود. مقدار ایندیم در کالکوپیریت از ۰/۰۱ درصد تا ۰/۴ درصد است. اسفالریت و دیگر کانی‌های ایندیم‌دار در دمای پایین 400°C و حتی تا کمتر از 200°C تشکیل شده‌اند [۲].

ویژگی‌های یکسان بین این کانسار و ذخایر پلی‌متالیک بولیوی و ژاپن که همگی ایندیم دارند شامل:

۱. حضور کانی‌های با مقدار کم S_2 مثل کاسیتريت، ولفرامیت، آرسنوپیریت، لولینگیت و پیروتیت. همچنین اجتماع کانی‌های با S_2 متوسط تا زیاد مثل اسفالریت، کالکوپیریت و استانیت.
۲. همراهی کلریت غنی از آهن و کانی‌های دگرگونی غنی از آهن مثل توپاز، فلوریت و سرسیت.
۳. دگرگونی اسیدی مراحل پایانی شامل کائولن و کربنات‌های آهن‌دار.
۴. حضور فلزات کمیابی چون ایندیم، قلع، بیسموت و تنگستن.
۵. حداکثر دمای تشکیل در حدود 350°C .

۱-۶- کاربردهای ایندیم

۱. آلیاژهای با دمای ذوب پایین، قسمت عمده‌ای از مصرف ایندیم را شامل می‌شوند.
۲. جوش‌های ایندیم در صنعت الکترونیک برای جفت کردن تراشه‌ها با پایه آن‌ها و به هم پیوستن قطعات نیمه هادی‌ها و مدارهای تجمعی هیبریدی، استفاده می‌شوند.
۳. آلیاژهای گداخته ایندیم، معمولاً بر بیسموت در ترکیب با سرب، کادمیم، قلع و ایندیم پایه‌گذاری شده‌اند. این آلیاژها برای خم کردن لوله‌های با جداره نازک بدون چین خوردگی در جداره یا تغییر شکل سه مقطع اصلی، استفاده می‌شوند. این آلیاژها همچنین در سیستم‌های کنترل آتش، رابط‌های مهارکننده که زنگ خطر را نگه می‌دارند، سوپاپ‌های آب، و مکانیزم‌های عمل‌کننده درها، استفاده می‌شوند.
۴. اضافه کردن ایندیم به مواد حاوی سرب و قلع برای وظایف سنگین و کاربردهای سرعت بالا، مقاومت بالا در برابر خستگی و گسستگی را تأمین می‌کند. این مواد در پیستون موتور هواپیماها، موتور اتومبیل‌های فرمول ۱ و در موتور کامیون‌های توربو دیزل استفاده می‌شوند.

¹⁹ . Mount Pleasant