

معرفی فرآیندهای مختلف استخراج و تولید مس

energyenergy.ir

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۶	۱-۱. مقدمه.....
۷	۲-۱. استخراج مس از کانه‌های سولفیدی (پیرومتالورژی).....
۸	۲-۲-۱. خردایش.....
۹	۳-۲-۱. پرعیار کردن به روش فلوتاسیون.....
۱۲	۴-۲-۱. تشویه.....
۱۲	۵-۲-۱. ذوب مات.....
۱۷	۶-۲-۱. کنورتور.....
۱۸	۳-۱. تولید پیوسته و تک مرحله‌ای مس.....
۱۹	۴-۱. تولید آند مسی.....
۲۰	۵-۱. پالایش الکترولیتی.....
۲۳	۶-۱. استخراج مس از کانه‌های اکسیدی (هیدرومتالورژی (SX-EW)).....
۲۳	۱-۶-۱. لیچینگ.....
۲۴	۲-۶-۱. استخراج حلالی.....
۲۶	۳-۶-۱. پالایش الکترولیتی.....
۳۰	۷-۱. ذوب و ریخته‌گری کاتد مسی.....
۳۰	۸-۱. فرآیند تولید برق در نیروگاههای بخاری.....
۳۱	۹-۱. مقایسه مصرف انرژی در فرآیندهای مختلف تولد.....

energyenergy.ir

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۷.....	شکل ۱-۱. تغییرات متوسط گرید مس در روشهای استخراج روباز و زیرزمینی [۴].....
۹.....	شکل ۱-۲. مراحل مختلف تولید مس از استخراج تا تولید محصول نهایی [۵].....
۹.....	شکل ۱-۳. یک سیکل آسیابکاری و چگونگی کنترل اندازه ذرات در آن [۱].....
۱۱.....	شکل ۱-۴. یک فلوشیت معمول از فرآیند تغلیظ مس [۱].....
۱۲.....	شکل ۱-۵. شمایی از دو نوع سلول فلوتاسیون [۱].....
۱۳.....	شکل ۱-۶. سهم روشهای مختلف ذوب مات در تولید مس [۷].....
۱۴.....	شکل ۱-۷. شمایی از یک کوره ریورب.....
۱۵.....	شکل ۱-۸. شمایی از یک کوره فلش اتوکمپو [۱].....
۱۵.....	شکل ۱-۹. طرح کلی اینکو، کارخانه HURLEY در نیومکزیکو [۱].....
۱۷.....	شکل ۱-۱۰. شمایی از یک کوره نوراندا [۵].....
۱۸.....	شکل ۱-۱۱. شمایی کلی کنورتور پیرس اسمیت و مراحل مختلف کار کنورتور.....
۱۹.....	شکل ۱-۱۲. شمایی از فرآیند میتسویشی [۹].....
۲۰.....	شکل ۱-۱۳. شمایی از فرآیند الکترولیز در پالایشگاه الکترولیتی.....
۲۱.....	شکل ۱-۱۴. فلوشیت یک واحد پالایشگاه صنعتی [۱].....
۲۲.....	شکل ۱-۱۵. چگونگی قرار گرفتن آند و کاتد در سلول الکترولیز [۱].....

- شکل ۱-۱۶. شماتیک فرآیند استخراج مس به روش هیدرومتالورژی [۱]..... ۲۴
- شکل ۱-۱۷. شماتیک فرآیند استخراج حلالی [۱]..... ۲۶
- شکل ۱-۱۸. شمایی از یک سلول پالایش الکتrolیتی [۱]..... ۲۷
- شکل ۱-۱۹. سهم هر یک از دو فرآیند پیرومتالورژی و هیدرومتالورژی در تولید مس در دنیا (واحد ۱۰۰۰ تن)..... ۲۸
- شکل ۱-۲۰. مقایسه فلوشیت کلی روش‌های کوره‌های تشعشعی، ریورب و روش SX-EW [۱۰]..... ۲۹
- شکل ۱-۲۱. میزان انرژی مصرفی به ازاء تولید هر تن مس در ۳۰ کارخانه تولید مس دنیا [۷]..... ۳۳
- شکل ۱-۲۲. سهم هر یک از انواع منابع انرژی در تامین انرژی مورد نیاز در ۳۰ کارخانه تولید مس دنیا [۷]..... ۳۴
- شکل ۱-۲۳. میزان مصرف انرژی هر یک از کوره‌های ذوب مات بر اساس درصد مس کنسانتره [۷]..... ۳۴
- شکل ۱-۲۴. سهم کشورهای مختلف در منابع مس دنیا [۴]..... ۳۵
- شکل ۱-۲۵. سهم شیلی در تولید مس دنیا [۴]..... ۳۷
- شکل ۱-۲۶. بزرگترین کمپانی‌های تولید مس در دنیا و سهم هر یک در تولید در سال ۲۰۰۹ [۴]..... ۳۷
- شکل ۱-۲۷. پروژه‌های بالقوه تولید مس در دنیا در سالهای آتی [۴]..... ۳۸

۱-۱. مقدمه

فرآیند استخراج مس عبارت است از تبدیل مینرالهای سنگ معدن مس به کنسانتره غنی از مس که شامل مراحل زیر است:

۱. شکستن و خرد کردن سنگ تا اندازه‌ای که دانه‌های مینرالی مس از دانه‌های مینرالی غیرمس جدا گردد.

۲. جداسازی فیزیکی مینرالهای مس از مینرالهای غیر مس با انجام فلوتاسیون و تولید کنسانتره غنی از مس و باطله.

مس بیشتر به صورت مینرالهای سولفیدهای مس - آهن و سولفید مس در زمین موجود است. این مینرالها عبارتند از کالکوپیریت ($CuFeS_2$)، برونیت (Cu_5FeS_4) و کالکوسیت (Cu_2S). غلظت این مینرالها در سنگ معدن پایین است. عیار سنگ معدن مس بین ۰/۵ تا ۱ درصد مس (در معادن روباز) تا ۲٪ مس (در معادن زیرزمینی) است. فلز مس خالص با انجام فرآیندهای تغلیظ، ذوب و پالایش این سنگ‌ها تولید می‌شود [۱].

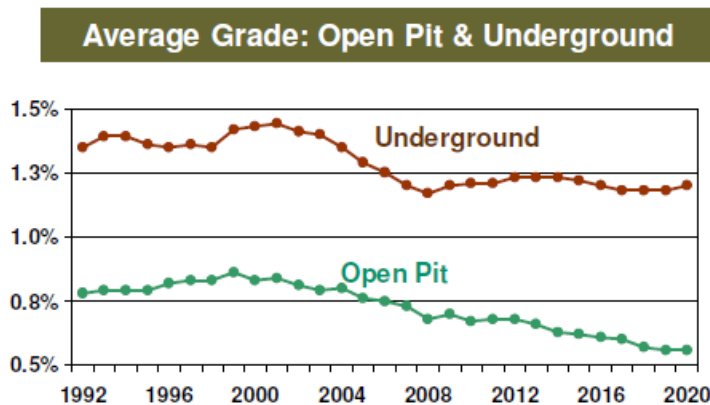
مس همچنین به صورت مینرالهای اکسیدی (کربنات‌ها، اکسیدها، هیدروکسی‌سیلیکات‌ها و سولفات‌ها) اما در حجم کمتر، وجود دارد. این سنگ‌ها معمولاً با روش هیدرومتالورژی استخراج می‌شوند. از روش هیدرومتالورژی برای استخراج مس از کالکوسیت (Cu_2S) نیز استفاده می‌شود [۱].

به طور کلی مس از دو روش مهم استخراج می‌شود که شامل روش پیرومتالورژی (خشک) و روش هیدرومتالورژی (تر) می‌باشد. در حدود ۹۰٪ مس تولید شده در دنیا از کانه‌های سولفیدی و از روش پیرومتالورژی حاصل می‌شود و روش هیدرومتالورژی برای استخراج مس از کانه‌های اکسیدی به‌خصوص کربنات‌ها، سیلیکات‌ها و سولفات‌ها و همچنین دورریز کارخانه‌ها بکار می‌رود. برای تولید مس خالص نهایی از روش‌های الکتروشیمیایی

استفاده می‌شود که شامل تصفیه‌ی الکتریکی آند در حالت استخراج از روش پیرومتالورژی^۱ و استخراج الکترولیتی از محلول^۲ در روش هیدرومتالورژی می‌باشد [۲-۳].

۲-۱. استخراج مس از کانه‌های سولفیدی (پیرومتالورژی)

معادن مس در دنیا به دو صورت رو باز و زیر زمینی وجود دارند. البته امروزه بیشترین درصد مس دنیا از معادن رو باز استخراج می‌شود، مشروط بر اینکه حداقل مس موجود در سنگ معدن حدود ۰/۴ درصد باشد. از معادن مس زیر زمینی نیز که حداقل ۰/۷ درصد مس داشته باشند، در صورت اقتصادی بودن استخراج به عمل می‌آید. شکل ۱-۱ تغییرات متوسط گرید مس در روشهای استخراج روباز و زیرزمینی از سال ۹۲ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱. تغییرات متوسط گرید مس در روشهای استخراج روباز و زیرزمینی [۴]

تقریباً ۹۰٪ کانه‌ی مس اولیه‌ی دنیا به صورت کانه‌های سولفیدی است. سولفیدها به سهولت تحت عملیات هیدرومتالورژیکی قرار نمی‌گیرند، زیرا به راحتی حل نمی‌شوند. بنابراین قسمت اعظم استخراج مس توسط روش‌های پیرومتالورژی با کانی پرعیار شده‌ی مس انجام می‌شود. عمل استخراج شامل مراحل زیر می‌باشد [۳]:

- (۱) خردایش
- (۲) پرعیار کردن به روش فلوتاسیون
- (۳) تشویه (در صورت استفاده از کوره شعله‌ای در مرحله ذوب)
- (۴) ذوب مات (در کوره‌های دمشی، شعله‌ای، الکتریکی یا تشعشی^۳ و ...)
- (۵) مرحله تبدیل به مس حفره‌دار (بلیستر^۴)

محصول نهایی این مراحل متوالی، مس ناخالص حفره‌دار است که باید قبل از ساخت و کاربرد، پالایش گرمایی

1 - Electro Refining
2 - Electro Winning
3 - Flash furnace
4- Blister

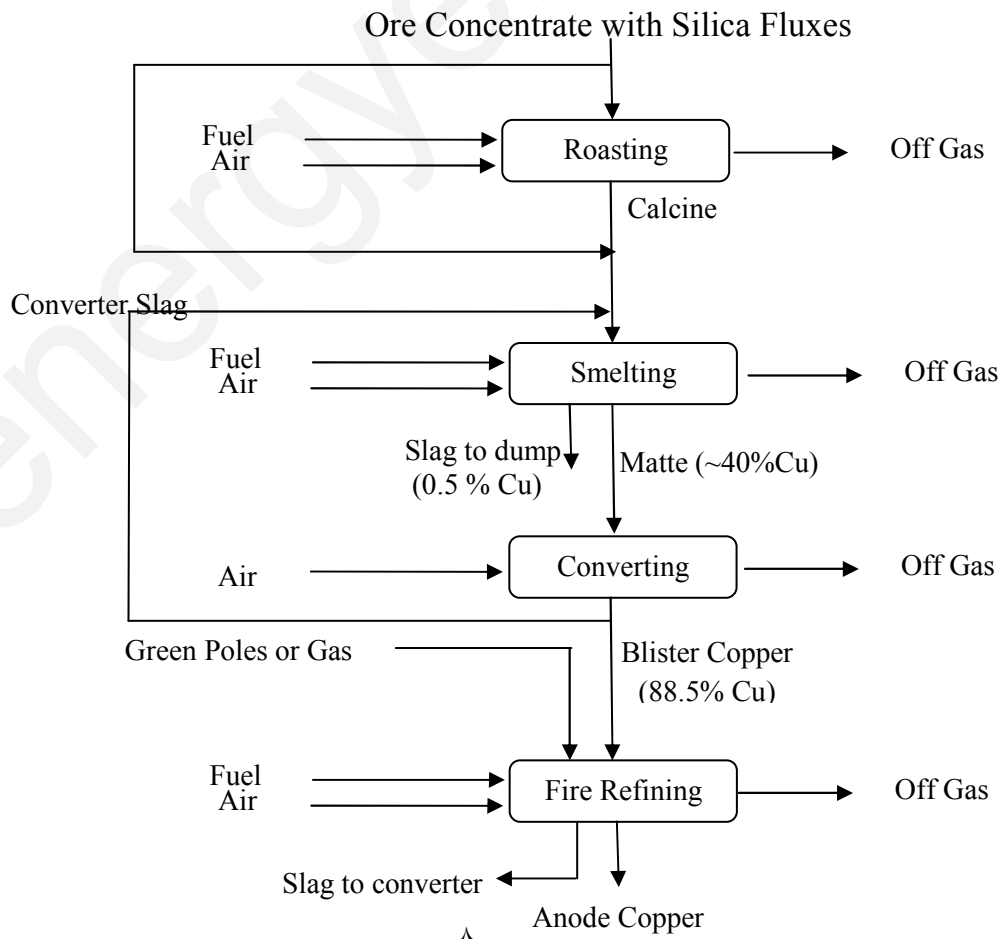
(شعله‌ای) و الکترولیتی شود. شکل ۱-۲ نیز مراحل مختلف تولید مس از استخراج تا تولید محصول نهایی را نشان می‌دهد.

۲-۲-۱. خردایش

برای جداسازی و آزادسازی ذرات مینرالی از یکدیگر بایستی این ذرات تا قطر نزدیک ۱۰۰ میکرون خرد شوند. عملیات خردایش در سه مرحله انجام می‌شود:

- شکستن سنگ با انفجار در معدن
- شکستن سنگ‌های بزرگ در سنگ‌شکن
- خردایش در آسیاب

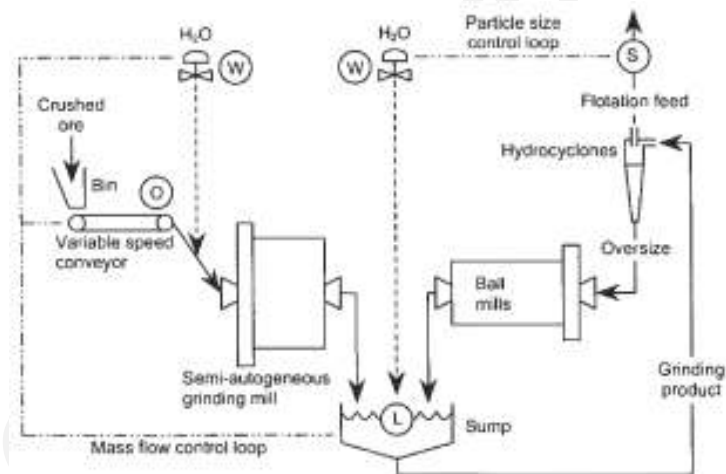
خردایش توسط سنگ‌شکن عمدتاً در معدن انجام می‌گیرد. این امر حمل و نقل سنگ با نوار نقاله را امکان‌پذیر می‌سازد. در مرحله آسیاب کاری، اندازه ذرات به اندازه کافی کاهش داده می‌شود تا بازیابی مینرال مس در فرآیند فلوتاسیون امکان‌پذیر گردد. معمول‌ترین آسیاب‌های مورد استفاده آسیاب‌های خودشکن یا نیمه خودشکن و آسیاب‌های گلوله‌ای هستند. آسیابکاری معمولاً به صورت تر (۲۰٪ آب) انجام می‌گیرد. یک چرخه



شکل ۱-۲. مراحل مختلف تولید مس از استخراج تا تولید محصول نهایی [۵]

آسیاب کاری معمولاً شامل یک آسیاب خودشکن یا نیمه خودشکن و یک یا دو آسیاب گلوله‌ای است. مرحله آسیاب کاری و فلوتاسیون به صورت پیوسته هستند. آسیاب خودشکن یا نیمه خودشکن خوراک آسیاب گلوله‌ای را تأمین می‌کند تا در آسیاب گلوله‌ای به اندازه نهایی موردنظر برسد. به منظور کنترل سایز محصول تولیدی آسیاب در یک سیکل بسته با هیدروسیکلون کار می‌کند. در واقع سیکلون ذرات با اندازه مناسب را به بخش فلوتاسیون و ذرات درشت‌تر را برای آسیاب مجدد می‌فرستد [۱].

به منظور بازیابی مس (در تغلیظ) با حداکثر راندمان و به حداقل رساندن مصرف انرژی در بخش آسیاب کاری، سیکل کاملاً تحت کنترل است. شکل ۱-۳ یک سیکل آسیاب کاری و چگونگی کنترل اندازه ذرات در آن را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱-۳. یک سیکل آسیابکاری و چگونگی کنترل اندازه ذرات در آن [۱].

۳-۲-۱. پرعیار کردن به روش فلوتاسیون

کانه‌های مس که امروزه استخراج می‌شوند، کم‌عیارتر از آنند که مستقیماً ذوب شوند (عیار کمتر از ۱٪ مس است). گرمایش و ذوب مقدار عظیمی مواد زائد، محتاج مقدار گزافی سوخت است. خوشبختانه، کانی‌های مس موجود در سنگ معدن را می‌توان توسط روش‌های فیزیکی پرعیار و به نحو اقتصادی ذوب کرد [۱].

موثرترین روش پرعیار کردن، فلوتاسیون است، که در آن کانی‌های مس به شیوه‌ی انتخابی به حباب‌های هوایی که از میان پالپ آبی حاصل از کانه‌ی نرم شده بالا می‌آیند، متصل می‌شوند. انتخابی بودن فلوتاسیون ناشی از به‌کار

بردن معرفیهایی است که کانی‌های مس را آبران می‌سازند، در حالی که کانی‌های باطله آب‌گیر باقی می‌مانند. کانی‌های شناور شده در کف پایداری در بالای محفظه فلوتاسیون جمع‌آوری می‌شوند و به صورت کانه پرعیار شده درمی‌آیند [۱].

مراحل شناوری کانی‌های سولفیدی مس عبارت است از:

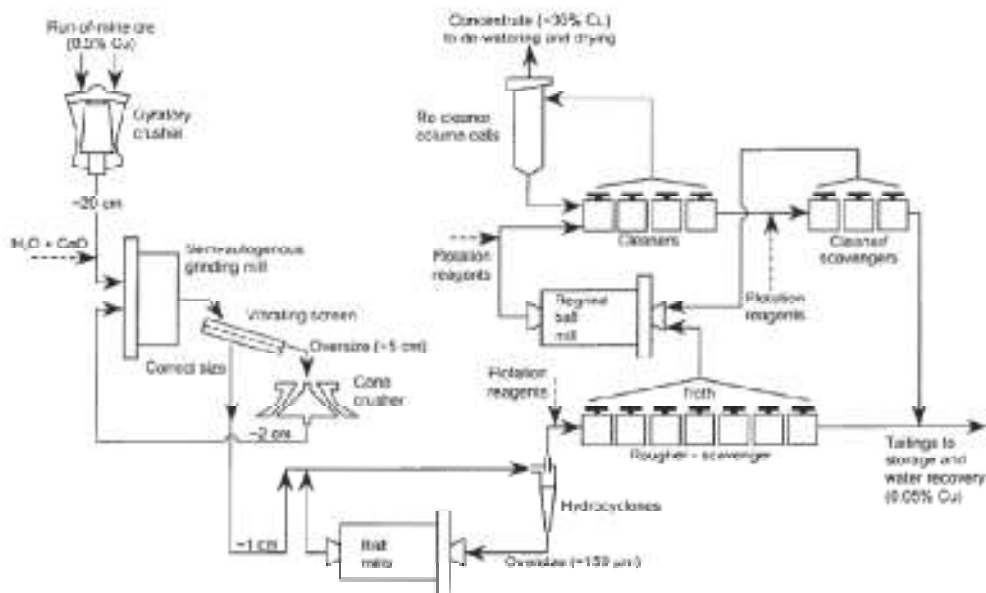
۱. مینرالهای سولفیدی معمولاً توسط آب خیس می‌شوند اما می‌توان آنها را با استفاده از کلکتورها آب‌گریز کرد.
 ۲. این آب‌گریزی این امکان را به مینرالهای مس می‌دهد که دیگر مینرالهای تر شده را رها کنند (از آنها جدا شوند).
 ۳. برخورد بین حبابهای هوای کوچکی که به سمت بالا حرکت می‌کنند با مینرالهای مسی که آب‌گریز شده‌اند منجر به اتصال این ذرات به حبابهای هوا می‌شود.
 ۴. دیگر مینرالها که توسط آب تر شده‌اند به این حبابها نمی‌چسبند.
- بدین ترتیب ذرات مینرال مس به حبابهای هوا می‌چسبند و این حبابها پس از شناور شدن روی سطح سلول فلوتاسیون ذرات مینرال را با خود حمل می‌کنند. این ذرات از سلول سرریز کرده و به تانک جمع‌آوری می‌ریزد. دیگر مینرالها در کف سلول باقی می‌مانند. این ذرات عمدتاً مینرالهای غیر سولفیدی با مقادیر کمی سولفید آهن هستند. سلولهای فلوتاسیون به صورت چندین سلول متوالی هستند تا بازیابی مس را بهینه کرده و درصد مس را در کنسانتره به حد بهینه برسانند [۱].

فلوتاسیون انتخابی مینرالهای سولفیدی مس (کالکوپیریت، کالکوسیت و برونیت) از مینرالهای آهن با استفاده از کالکتورهای زانتات و دی تیوفسفات انجام می‌شود. از آهک برای تنظیم pH استفاده می‌شود [۱]. کانی پرعیار شده مس معمولاً حاوی ۳۰-۲۰٪ مس است. خرد کردن و نرم کردن کانه به ذرات ریز، پیش از عمل فلوتاسیون الزامی است.

شکل ۱-۴ یک فلوشیت معمول تغلیظ مس را نشان می‌دهد. همانطور که در فلوشیت مشخص است ۴ گروه سلول فلوتاسیون داریم:

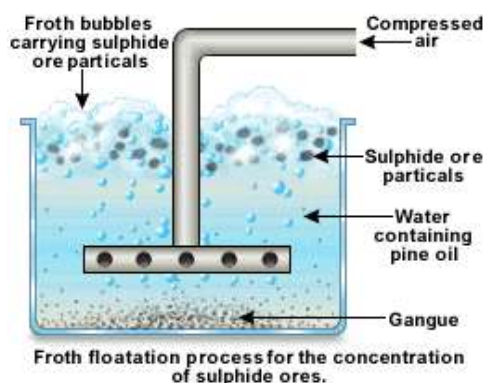
- ۱) سلولهای رافر-اسکاونجر که در آن پالپ ورودی از بخش آسیابکاری شناور می‌شود. در این بخش بازیابی مس با یک گرید معقول (۲۰-۱۵٪ Cu) انجام می‌شود.
- ۲) کلینرها: در این سلولها مینرالهای غیرمس توسط CaO جدا شده و کنسانتره با گرید بالاتر تولید می‌شود.
- ۳) ری کلینرها: در این سلولها با حذف بیشتر مینرالهای آهن، گرید کنسانتره به حداکثر می‌رسد.
- ۴) کلینر-اسکاونجرها: در این سلولها با اضافه کردن بیشتر کالکتور مقدار کم مس باقیمانده در باطله‌های کلینر از آن جدا می‌شود.

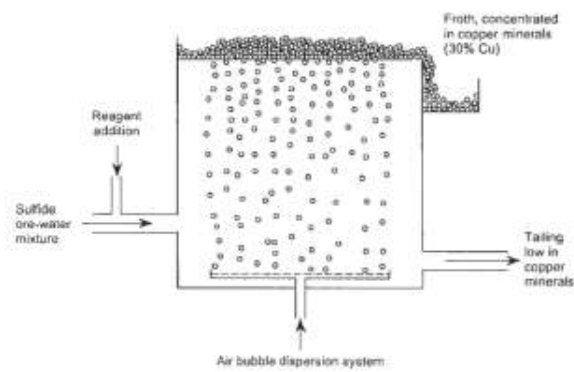
سرریز اسکاونجرهای رافر و اسکاونجرهای کلینر قبل از ارسال به کلینر مجدداً آسیابکاری می‌شوند. اسکاونجرهای رافر و کلینر برای حداکثر کردن بازیابی مس در کنسانتره هستند. سلولهای کلینر و ری کلینر به منظور حداکثر کردن گرید کنسانتره هستند [۱].



شکل ۱-۴. یک فلوشیت معمول از فرآیند تغلیظ مس [۱]

در فرآیند فلوتاسیون دو نوع سلول داریم. در سلولهای مکانیکی هوا بوسیله یک همزن چرخان وارد پالپ می‌شود و چرخش همزن علاوه بر ایجاد حبابهای ریز، آنها را در سلول پخش می‌کند [۱]. در سلولهای ستونی دمش هوا از کف صورت می‌گیرد و همزدن پالپ با همان حرکت ذرات حباب هوا انجام می‌شود. بیشتر واحدهای فلوتاسیون مس از سلولهای ستونی به عنوان ری کلینر استفاده می‌کنند. سلولهای ستونی یک ناحیه عمودی با ارتفاع زیاد برای تماس ذرات با حبابها فراهم می‌کند [۱]. در شکل ۱-۵ شمایی از دو نوع سلول فلوتاسیون نشان داده شده است [۱].





شکل ۱-۵. شمایی از دو نوع سلول فلوتاسیون [۱]

محصول سلولهای فلوتاسیون حاوی ۷۵٪ جرمی آب است که بایستی قبل از حمل و یا ذوب کنسانتره، حذف شود. حذف آب از کنسانتره در تیکنرها انجام می‌شود. در تیکنر ذرات جامد بر اثر نیروی وزن خود ته‌نشین می‌شوند. برای ته‌نشینی سریعتر ذرات جامد از فلوکولانت استفاده می‌شود. مواد ته‌نشین شده در تیکنرها هنوز ۳۰ تا ۴۰ درصد آب دارد. این میزان در فیلترها به ۱۰ تا ۱۵٪ می‌رسد و در فیلتر پرس این مقدار به ۸٪ می‌رسد [۱].

بسیاری از سنگهای معدنی مس حاوی مولیبدن نیز هستند که می‌تواند با فلوتاسیون انتخابی از مینرالهای مس جدا شود. مولیبدنیت (MoS_2) خیلی آسانتر از مینرالهای مس شناور می‌شود و همراه با مس در کنسانتره مس بازیابی می‌شود. برای شناورسازی مولیبدنیت در کنسانتره مس از کلکتورهای نفتی غیرقطبی و برای ته‌نشین کردن مس از هیدروسولفید سدیم استفاده می‌شود. در این حالت از نیتروژن برای تولید حباب استفاده می‌شود تا از اکسید شدن هیدروسولفید جلوگیری شود [۱].

۱-۲-۴. تشویه

عمل تشویه شامل اکسایش جزئی سولفیدهای پرعیار حاصل از فلوتاسیون و حذف جزئی گوگرد از آنها به شکل SO_2 است. این کار توسط واکنش کانی پرعیار شده با هوا در دماهایی بین ۷۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، در کوره‌های تشویه‌ی اجاقی یا تشویه‌کننده‌ی بستر سیال در شرایط کاملاً کنترل شده، انجام می‌گیرد. محصول کوره‌ی تشویه کلسین نامیده می‌شود که مخلوطی از اکسیدها، سولفات‌ها و سولفیدهاست و ترکیب شیمیایی آن توسط کنترل دمای فرآیند تشویه و نسبت هوا به کانی پرعیار شده، تغییر می‌کند. فرآیند تشویه معمولاً خودسوز است. از عمل تشویه اصولاً در کوره‌های ذوب شعله‌ای استفاده می‌شود که هدف اصلی از آن خشک‌کردن و گرمایش بار کوره‌ی شعله‌ای، با استفاده از حرارت واکنش‌های گرم‌زای تشویه است [۳].

۱-۲-۵. ذوب مات

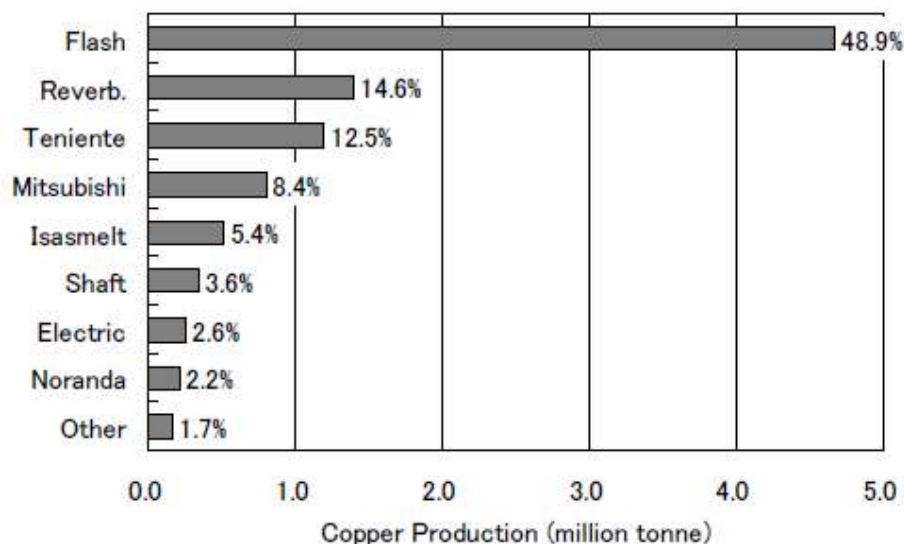
هدف از ذوب مات تهیه‌ی فاز سولفیدی مذاب، شامل تمامی مس موجود در شارژ و فاز سرباره‌ی مذاب بدون

مس است. مات متعاقباً برای تشکیل مس حفره‌دار (بلیستر) ناخالص اکسید می‌شود و سرباره‌ی مرحله‌ی ذوب مستقیماً یا بعد از مرحله‌ی بازیابی مس دور ریخته می‌شود [۳].

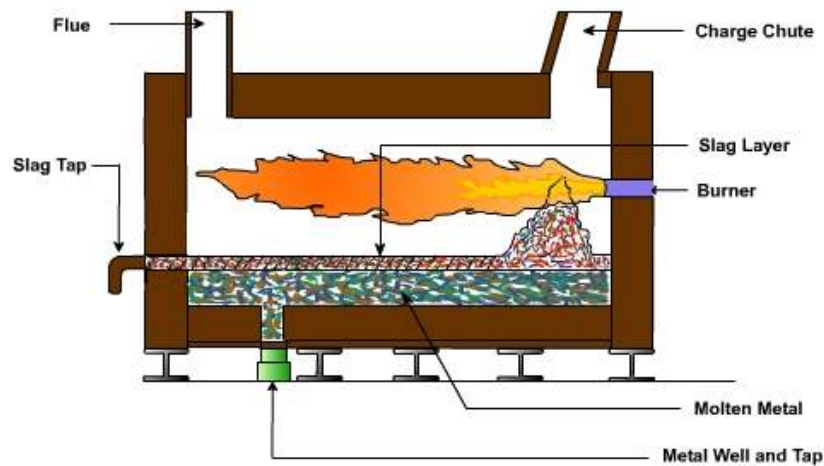
در مرحله ذوب مات تمامی بار کوره همراه با روان‌ساز سیلیسی در دمایی حدود ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ذوب می‌گردد. سیلیس، آلومین، اکسیدهای آهن، آهک و سایر اکسیدهای جزئی، سرباره‌ی مذاب را تشکیل داده و مس، گوگرد، آهن اکسید نشده و فلزات قیمتی، مات را تشکیل می‌دهند. سرباره سبک‌تر از مات و در آن تقریباً غیر قابل حل است و به سهولت از آن جدا می‌شود [۳]. مات مس تولیدی در کوره ۳۵ تا ۶۵ درصد مس دارد. درصد مس موجود در مات گرید مات را تعیین می‌کند. گرمای مورد نیاز برای مرحله ذوب مات از اکسیداسیون جزئی شارژ سولفیدی و نیز از طریق مشعل‌هایی که سوخت مصرف می‌کنند تامین می‌گردد [۵].

انواع کوره‌های مورد استفاده در ذوب مات عبارتند از: کوره دمشی، کوره ریورب (انعکاسی)، کوره الکتریکی، کوره تشعشی و روشهای تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای نظیر نوراندا و میتسوبیشی. در شکل ۱-۶ سهم روشهای مختلف ذوب مات در تولید مس نشان داده شده است [۶]. در ادامه به اختصار توضیحاتی در مورد هر یک از این روش‌ها آورده شده است.

کوره‌های ریورب: فرآیند ذوب در کوره‌های ریورب (انعکاسی) فرآیندی پیوسته است که مواد به صورت متناوب شارژ شده و تخلیه ذوب و سرباره نیز به صورت دوره‌ای انجام می‌گیرد. گرمای مورد نیاز در این کوره‌ها از طریق مشعل‌های گازی یا مازوتی تامین می‌گردد. دمای کوره ممکن است تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد. انتقال حرارت در این کوره‌ها از طریق انعکاس حرارت از مشعل، دیواره‌ها و سقف کوره به شارژ موجود در کوره انجام می‌گیرد. شکل ۱-۷ شمایی از یک کوره ریورب را نشان می‌دهد. مصرف انرژی در این کوره‌ها بسیار بالاست [۵].



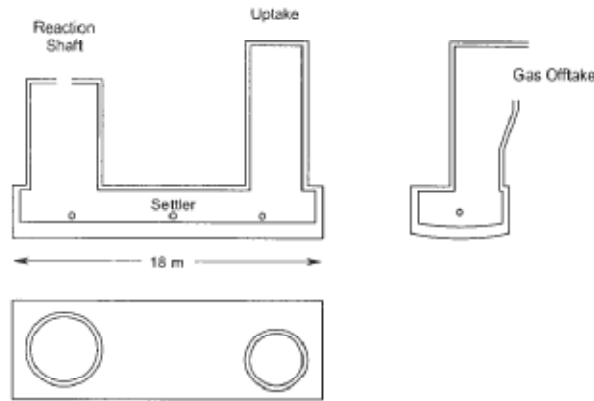
شکل ۱-۶. سهم روشهای مختلف ذوب مات در تولید مس [۷]



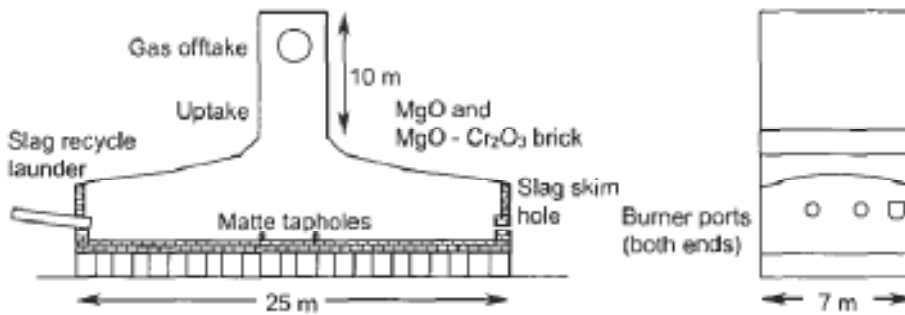
شکل ۱-۷. شمایی از یک کوره ریورب

کوره‌های الکتریکی: فرآیند ذوب در کوره‌های الکتریکی مشابه روش انعکاسی است با این تفاوت که تامین گرمای مورد نیاز از طریق عبور جریان با آمپر بالا بین الکترودهای کربنی که در سرباره فروبرده شده‌اند انجام می‌گیرد [۳ و ۵]. در کوره‌های الکتریکی راندمان استفاده از انرژی الکتریکی بالاست زیرا میزان اتلاف گرما از طریق گازهای خروجی کم است. در این کوره استفاده کمی از واکنش‌های اکسیداسیون کانی سولفیدی می‌شود و هزینه انرژی بالا به علت بالا بودن قیمت انرژی الکتریکی است [۷].

کوره‌های تشعشی: در کوره‌های تشعشی ترکیبی از فرآیند تشویه و ذوب مات انجام می‌شود. در این کوره‌ها کنسانتره خشک و فلاکس همراه با اکسیژن و هوای پیشگرم شده به کوره تزریق می‌شود. در این کوره‌ها از انرژی حاصل از سوخت ترکیبات سولفیدی حداکثر استفاده می‌شود. مهمترین انواع کوره‌های فلش نوع اتوکمپو و اینکو هستند. شکل ۱-۸ و شکل ۱-۹ شمای کلی از این کوره‌ها را نشان می‌دهد. کوره‌های اتوکمپو اولین بار پس از جنگ جهانی دوم در کشور فنلاند طراحی و اولین کوره اتوکمپو در سال ۱۹۴۹ در همان کشور راه‌اندازی شد. علت روی آوردن به این نوع کوره‌ها و احساس نیاز به این نوع طراحی، کمبود شدید انرژی پس از جنگ دوم جهانی در کشور فنلاند بود [۸].



شکل ۸-۱. شمایی از یک کوره فلش اتوکمپو [۱]



شکل ۹-۱. طرح کلی اینکو، کارخانه Hurley در نیومکزیکو [۱]

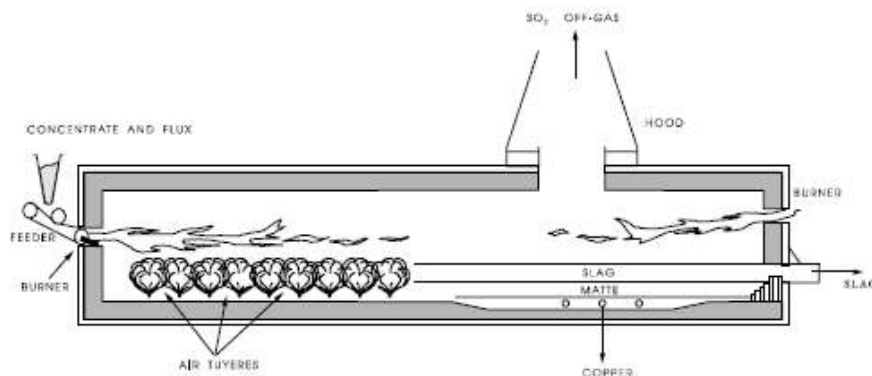
از مهمترین مزایای فرآیندهای کوره‌ی تشعشی می‌توان به نیاز اندک به سوخت هیدروکربنی و سهولت حذف SO_2 از گازهای خروجی این کوره‌ها اشاره کرد. تنها عیب این کوره‌ها، اتلاف نسبتاً بالای مس در سرباره و گرد و غبار خروجی از دودکش است اما مقدار زیادی از این مس قابل بازیابی است [۳]. در حال حاضر بیش از ۵۰ درصد از تولیدات مس در دنیا از طریق کوره‌های تشعشی انجام می‌گیرد. در جدول ۱-۱ لیست کوره‌های اتوکمپو راه‌اندازی شده در دنیا تا سال ۲۰۰۰ آورده شده است [۸].

جدول ۱-۱. لیست کوره‌های اتوکمپو راه‌اندازی شده در دنیا تا سال ۲۰۰۰

Copper Smelting Start-up
1949 Outokumpu Oy, Harjavalta, Finland
1956 Furukawa Co. Ltd., Ashio, Japan
1966 Combinatul Chimico Metalurgic, Baia Mare, Romania
1967 The Dowa Mining Co. Ltd., Kosaka, Japan
1970 Nippon Mining Co. Ltd., Saganoseki, Japan
1971 Sumitomo Metal Mining Co. Ltd., Toyo, Japan
1971 Hindustan Copper Ltd., Ghatsila, India
1972 Peko Wallsend Metals Ltd., Mount Morgan, Australia
1972 Hibi Kyodo Smelting Co. Ltd., Tamano, Japan
1972 Norddeutsche Affinerie AG, Hamburg, Germany
1972 Nippon Mining Co. Ltd., Hitachi, Japan
1973 Karadeniz Bakir Isletmeleri AS, Samsun, Turkey
1973 Peko Wallsend Metals Ltd., Tennant Creek, Australia
1973 Nippon Mining Co. Ltd., Saganoseki, Japan
1974 Hindustan Copper Ltd., Khetri, India
1975 Rio Tinto Minera SA, Huelva, Spain
1976 Phelps Dodge Corporation, Playas, USA
Gécamines, Luilu, Zaire
1978 Kombinat Górniczo-Hutniczy Miedzi, Glogow, Poland
1979 Korea Mining and Smelting Co. Ltd., Onsan, Korea
1981 Norilsk Mining and Metallurgical Comb., Norilsk, Russia
1982 Caraiba Metals SA, Camacari, Brazil
1983 Philippine Associated Smelting and Refining Co., Isabel, The Philippines
1985 Jiangxi Copper Corporation, Guixi, China
1986 Mexicana de Cobre SA, El Tajo, Mexico
1987 MDK G Damianov, Srednogorie, Bulgaria
1988 Codelco, Chuquicamata, Chile
1988 Magma Copper Co., San Manuel, USA
1988 Roxby Management Services Pty Ltd., Olympic Dam, Australia
1995 Compania Minera Disputada de las Condes SA, Chagres, Chile
1995 Kennecott Utah Copper Corporation, Utah, USA
1997 Jinlong Copper Co. Ltd., Tongling, China
1998 Indo-Gulf Fertilizers & Chemical Ltd., Gujarat, India
1999 WMC Resources Ltd., Olympic Dam, Australia
2000 Boliden Mineral AB, Rönnskär, Sweden
Southern Peru Copper Corporation, Ilo, Peru
National Iranian Copper Industries Co., Khatoon Abad, Iran

فرآیند صنعتی نورندا: این فرآیند معمولاً برای تولید مس با عیار بسیار بالا ۷۵-۷۰٪ به کار می‌رود و برای تولید مس حفره‌دار کاربردی ندارد. رآکتورهای نورندا در تولید مس با عیار بسیار بالا کاملاً موفق بوده‌اند و هرکدام از آنها در صورتی که از هوای حاوی اکسیژن ۳۳-۲۴٪ استفاده کنند، روزانه ۱۱۰۰ تا ۱۹۰۰ تن کانی

پرعیار شده‌ی خام را می‌توانند به مات مس تبدیل کنند. این رآکتورها بخش عمده‌ی نیاز گرمایی خود را از پودر زغال که همراه کانی پرعیار شده بارگیری می‌شود تامین می‌کنند که در مواردی که زغال فراوان و قیمت آن نسبت به قیمت سوخت‌های هیدروکربنی ارزان باشد، این نیز مزیت به شمار می‌رود [۳]. خروجی این کوره مات مس با عیار بالا (تا ۷۵٪ مس)، گاز خروجی حاوی ۱۵ تا ۲۵ درصد حجمی دی اکسید گوگرد و سرباره با ۶٪ مس است. مات تولیدی برای تولید بلیستر به کنورتور و گاز خروجی به واحد اسید سولفوریک منتقل می‌شود. سرباره نیز مورد بازیابی قرار می‌گیرد تا مس موجود در آن بازیابی شود [۱]. شکل ۱-۱۰ شمایی از یک کوره نوراذا را نشان می‌دهد.

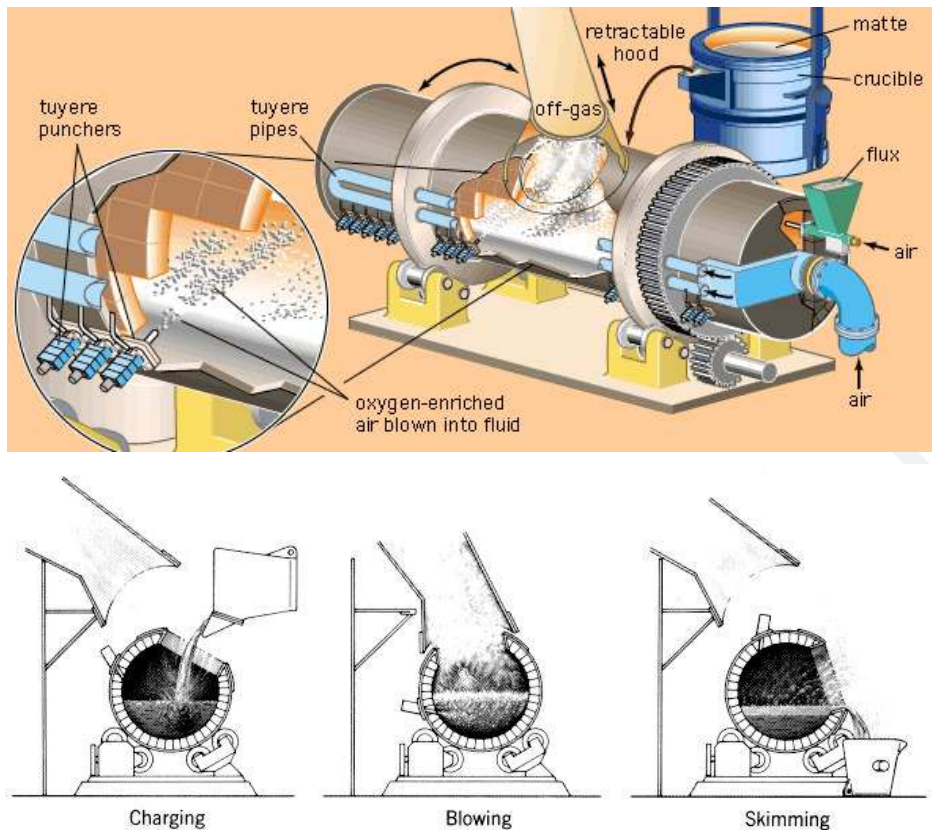


شکل ۱-۱۰. شمایی از یک کوره نوراذا [۵]

۱-۲-۶. کنورتور

تبدیل مس شامل اکسید کردن گوگرد و آهن باقی‌مانده در مات مس بدست آمده از مرحله‌ی ذوب مات (توسط هوا) است. عمل تبدیل، آهن و گوگرد را از مات جدا کرده و مس حفره‌دار خام ۹۹٪ تولید می‌کند. این فرآیند عموماً در یک کنورتور افقی استوانه‌ای پیرس-اسمیت که با آجرهای دیرگداز آستر شده، انجام می‌گیرد. گاهی اوقات کنورتور دارای یک سیستم پیشرفته جمع‌آوری گاز است [۳].

مات مذاب از طریق یک دهانه‌ی مرکزی بزرگ به داخل کنورتور ریخته می‌شود و هوای اکسنده از طریق یک ردیف زنبورک که در طول کنورتور قرار دارند، دمیده می‌شود. مات با دمای حدود ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افزوده می‌شود و گرمای تولید شده در کنورتور که ناشی از اکسایش آهن و گوگرد است برای خودسوز کردن فرآیند کافی است. محصول فرآیند تبدیل، مس حفره‌دار است که ۰/۰۲-۰/۰۱ درصد گوگرد دارد [۳ و ۵]. تا زمانی که مقدار گوگرد به کمتر از ۰/۰۲٪ کاهش نیابد اکسید مس به نحو چشمگیری تشکیل نمی‌شود، بنابراین اکسایش مس مسئله‌ساز نیست [۳]. شکل ۱-۱۱ شمایی کلی کنورتور پیرس اسمیت و مراحل مختلف کار کنورتور را نشان می‌دهد.



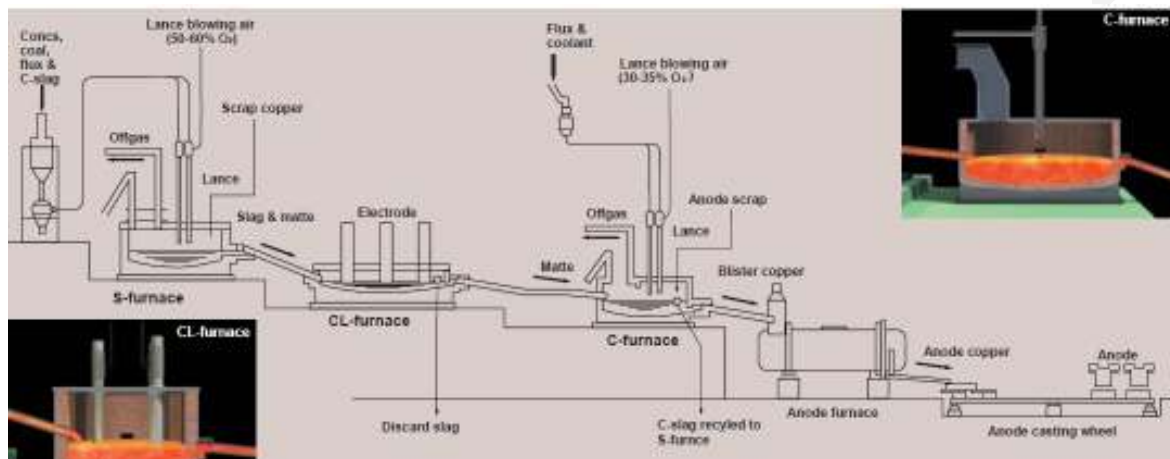
شکل ۱-۱۱. شمای کلی کنورتور پیرس اسمیت و مراحل مختلف کار کنورتور

۳-۱. تولید پیوسته و تک مرحله‌ای مس

با توجه به آن چه گفته شد، هر سه مرحله‌ی استخراج پیرومتالورژیکی، یعنی تشویه، ذوب و تبدیل، کنترل کننده‌ی فرآیند اکسایش می‌باشند که بطور متوالی دی‌اکسید گوگرد، اکسید آهن (که به همراه مواد باطله و روان‌ساز به صورت سرباره درمی‌آید) و نهایتاً مس فلزی تولید می‌کنند. این روش، با روش تشویه و ذوب بطور توأم در کوره تشعشعی شروع شده و با ذوب مقداری کانی پرعیار شده در کنورتورها و با حضور اکسیژن فراوان ادامه می‌یابد. در سال‌های اخیر، مرحله‌ی سوم یا اکسایش Cu_2S به مس حفره‌دار بطور موفقیت آمیزی به صورت روش مداوم درآمده است که تولید مات مس و مس بلیستر را در یک مرحله امکان‌پذیر می‌سازد. از جمله فرآیندهای مهم در تولید پیوسته مس می‌توان به فرآیندهای نوندا، اتوکمپو و میتسوبیشی اشاره نمود [۳]. در طراحی‌های جدید کوره‌های نوندا و اتوکمپو امکان تولید مات و مس بلیستر به طور همزمان در یک محفظه وجود دارد. به عنوان مثال در حال حاضر دو کوره اتوکمپو با این طراحی در کشورهای لهستان و استرالیا در حال کار است [۸].

به عنوان مثال فرآیند میتسوبیشی یک فرآیند پیوسته ذوب مس است که با استفاده از سه کوره عمل ذوب و تبدیل مس را انجام می‌دهد. سه کوره با راه‌گاههای سرپوشیده به هم متصل است. مذاب از طریق این راه‌گاهها و در

اثر نیروی وزن از هر کوره به کوره بعدی منتقل می‌شود. کنسانتره مس همراه با هوای غنی از اکسیژن از طریق یک لوله به داخل کوره ذوب تغذیه می‌شود. سپس اکسید شده و طی فرآیند گرم‌مازا ذوب می‌شود تا مخلوط مات مذاب (۶۸٪ مس) و سرباره تولید شود. سرباره به علت اختلاف وزن مخصوص مات مذاب در کوره حذف سرباره، حذف می‌شود و مات در کنورتور (کوره سوم) بیشتر اکسید شده و مس بلیستر تولید می‌شود. شکل ۱-۱۲ شمایی از فرآیند میتسوبیشی را نشان می‌دهد [۹].



شکل ۱-۱۲. شمایی از فرآیند میتسوبیشی [۹]

از فرآیندهای میتسوبیشی در حال کار در دنیا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ژاپن، NAOSHIMA
- کانادا، KIDD CREEK
- کره، ONSAN
- اندونزی، GRESIK
- استرالیا، PORT KEMBLA

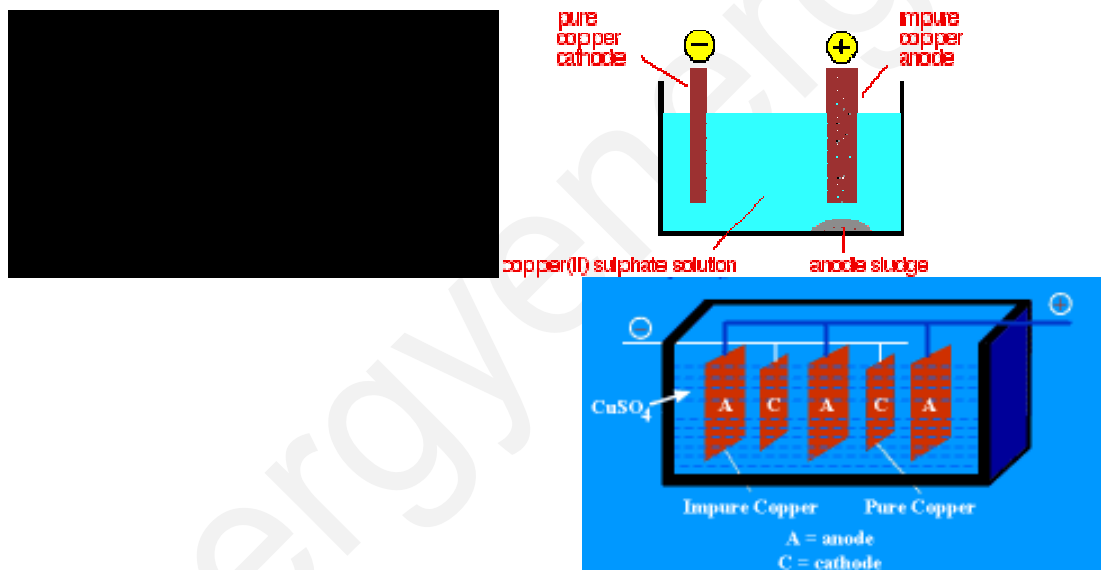
۴-۱. تولید آند مسی

ناخالصی‌های موجود در مس بلیستر ممکن است طلا، نقره، بیسموت، آنتیموان و ... باشند. پالایش حرارتی و سپس الکترولیتی به منظور افزایش هر چه بیشتر خلوص مس بلیستر است. در پالایش حرارتی مس بلیستر همراه با فلاکس به داخل کوره آند شارژ می‌شود که دمای آن ۱۱۰۰ درجه نگه‌داشته می‌شود. در ابتدا با دمش هوا و ایجاد اتمسفر اکسیدی برای مذاب، مس و کلیه ناخالصی‌ها اکسید می‌شوند. ناخالصی‌ها به صورت سرباره جدا می‌شود.

اکسید مس باقی مانده با ایجاد یک اتمسفر احیایی احیا شده و مس با خلوص بالاتر تولید می شود. مذاب تولیدی نهایتاً به صورت آند ریخته گری می شود و به منظور خالص سازی بیشتر به واحد پالایش الکترولیتی منتقل می شود [۵].

۵-۱. پالایش الکترولیتی

در پالایش الکترولیتی، طی فرآیند الکترولیز آند در محلول حاوی سولفات مس و اسید سولفوریک، آند مسی در محلول حل شده و روی کاتد رسوب می کند. وقتی مس روی کاتد رسوب می کند ناخالصی های فلزی ته نشین می شود و لجن را تشکیل می دهد. مس کاتدی نهایتاً ذوب شده و به صورت شمش یا مفتول ریخته گری می شود. در شکل ۱-۱۳ شماتیک فرآیند الکترولیز نشان داده شده است [۵].



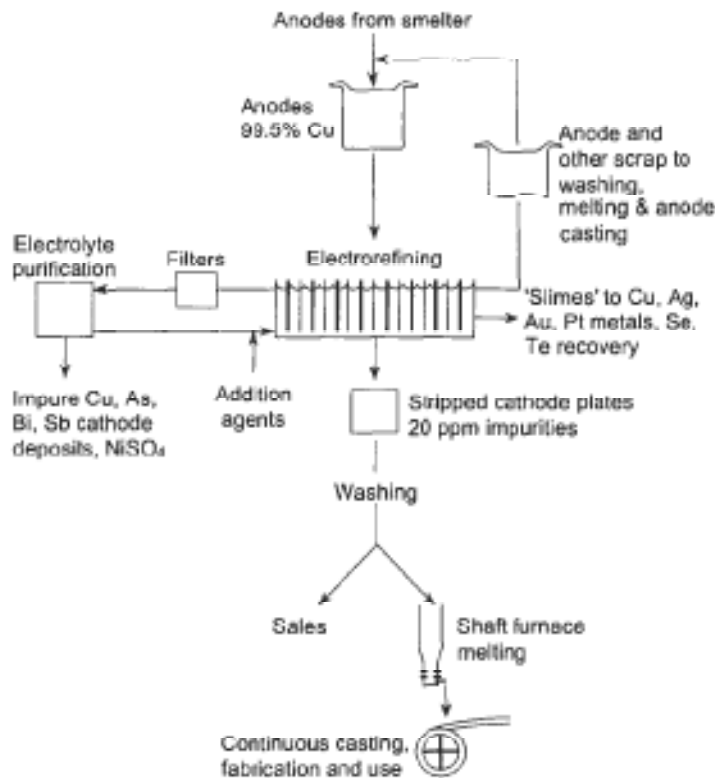
شکل ۱-۱۳. شمایی از فرآیند الکترولیز در پالایشگاه الکترولیتی

فرآیند الکترولیز شامل مراحل زیر است:

✓ انحلال الکتروشیمیایی مس از آندهای ناخالص مسی در محلول الکترولیت $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$

✓ رسوب مس خالص از این الکترولیت روی کاتد و ته نشین شدن ناخالصی های آند

شکل ۱-۱۴ فلوشیت یک واحد پالایشگاه صنعتی را نشان می دهد.



شکل ۱-۱۴. فلوشیت یک واحد پالایشگاه صنعتی [۱].

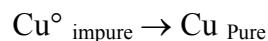
اصول کلی الکترولیز به این ترتیب است که با استفاده از پتانسیل الکتریکی بین آند مسی و یک کاتد فلزی در محلول الکترولیت $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ فرآیند زیر اتفاق می‌افتد:

(۱) کاتیونهای Cu^{++} در الکترولیت با فرآیند نفوذ و همرفت در الکترولیت حرکت می‌کند.

(۲) در سطح کاتد الکترونها با یونهای Cu^{++} مجدداً ترکیب شده و فلز مس (بدون ناخالصی‌های آند) را تولید می‌کنند.



واکنش کلی که در سلول اتفاق می‌افتد، واکنش زیر است که پتانسیل آن برابر صفر است:

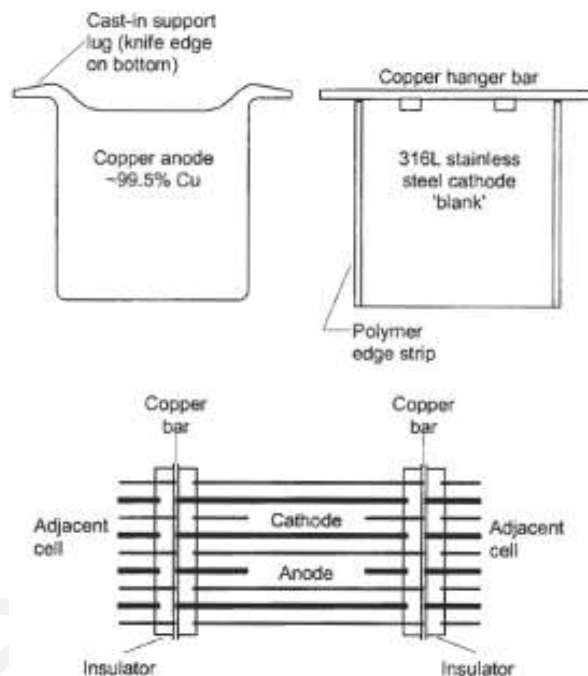


در عمل، با ایجاد اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد بر مقاومت به جریان غلبه می‌شود. مقداری ولتاژ اضافی نیز برای رسوب مس روی کاتد (۰/۰۵ ولت) و حل شدن مس در آند (۰/۱ ولت) نیاز است. پتانسیل بین آند و کاتد در صنعت حدود ۰/۳ ولت است [۱].

ناخالصی‌های موجود در آند نظیر طلا، پلاتین، سلنیم، سرب و قلع در الکترولیت حل نمی‌شود و ته سلول

الکترولیز رسوب می‌کنند. سایر ناخالصی‌ها نظیر بیسموت، کبالت، نیکل و آهن در الکترولیت حل می‌شوند اما از آنجا که با وجود مس نمی‌توانند روی کاتد رسوب کنند این عناصر در محلول الکترولیت می‌مانند [۱].

الکترولیز صنعتی با استفاده از آندهای به ابعاد $1\text{m} \times 1\text{m}$ و ضخامت $0.04-0.05$ متر و کاتدهای به ضخامت $0.001-0.003$ متر انجام می‌شود که به فاصله 0.05 متر از یکدیگر و به صورت یک در میان قرار دارند و بین آنها توسط الکترولیت پر شده است. کاتدهای اولیه از جنس فولاد زنگ نزن هستند که به میله مسی جوش خورده‌اند. مس به مدت ۷ تا ۱۰ روز روی این کاتدها رسوب می‌کند. کاتدهای پوشیده شده از مس با اسپری آب داغ شسته شده و به روش مکانیکی از ورق فولادی جدا می‌شود. صفحات فولادی به دقت شسته شده و مجدداً برای الکترولیز استفاده می‌شوند. شکل ۱-۱۵ چگونگی قرار گرفتن آند و کاتد در سلول الکترولیز را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱-۱۵. چگونگی قرار گرفتن آند و کاتد در سلول الکترولیز [۱]

الکترولیت توسط بخار آب تا $60-65^{\circ}\text{C}$ گرم شده که حین عبور از سلولها چند درجه افت دما خواهد داشت. الکترولیت با یک سرعت مشخص داخل سلولها در حال گردش است [۱].

آندهای خورده شده در این بخش شسته شده و برای ذوب مجدد به بخش ذوب می‌رود. الکترولیت باقیمانده نیز بازیابی شده و مجدداً استفاده می‌شود [۱].

میزان مصرف انرژی برای تولید هر تن کاتد حدود $300-400$ کیلووات ساعت است. این مقدار با افزایش راندمان جریان و ایجاد جریان الکتریکی مناسب در زمان الکترولیز به حداقل می‌رسد [۱].

۶-۱. استخراج مس از کانه‌های اکسیدی (هیدرومتالورژی (SX-EW))

اگر چه مس اغلب اوقات به شکل سولفیدی یافت می‌شود، به صورت اکسیدی نیز به شکل کربنات‌ها، اکسیدها، سیلیکات‌ها و سولفات‌ها، به ویژه در آفریقا، وجود دارد. اغلب کانی‌های اکسیدی به طریقه‌ی موثرتری تحت عملیات هیدرومتالورژیکی، یعنی انحلال در اسید سولفوریک و به دنبال آن رسوب یا استخراج الکتریکی مس از محلول، قرار می‌گیرند [۱]. حدود ۲۰٪ تولید مس با استفاده از فرآیند هیدرومتالورژی انجام می‌گیرد. این روش شامل سه مرحله لیچینگ، استخراج حلالی (SE) و پالایش الکترولیتی (EW) است.

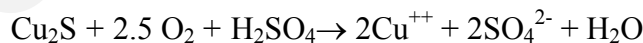
۱-۶-۱. لیچینگ

فرآیند لیچینگ عبارت است از انحلال مینرال مس در محلول آبی $H_2SO_4-H_2O$. در فرآیند لیچینگ در شرایط فشار اتمسفر محلول $H_2SO_4-H_2O$ داخل هیپ‌های بزرگ (توده، مواد معدنی) عبور داده می‌شود و مینرال مس در این محلول حل می‌شود. شماتیک فرآیند استخراج مس به روش هیدرومتالورژی در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است [۱].

واکنش انحلال مینرال‌های غیرسولفیدی مس در محلول اسیدسولفوریک مطابق واکنش زیر است:

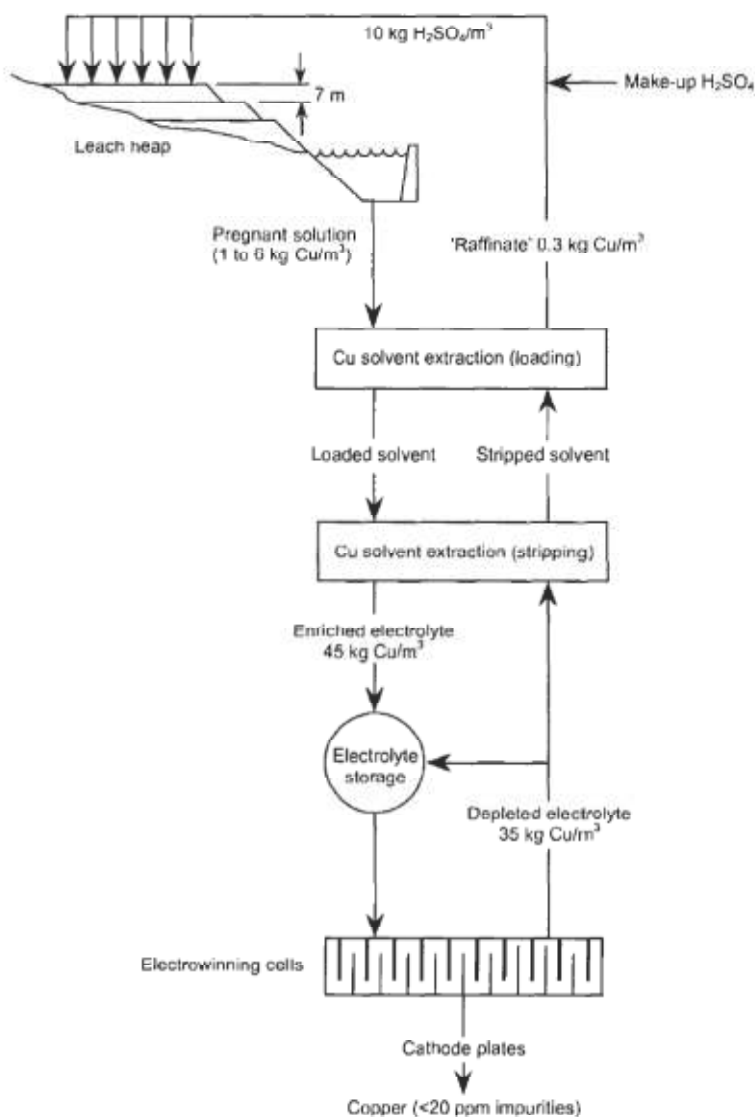


انحلال مینرال‌های سولفیدی، به اکسیژن نیز نیاز دارد که از O_2 هوا تأمین می‌شود.



محصول هیپ لیچینگ محلول حاوی Cu^{++}/m^3 ۱-۶ kg است که در پایین هیپ جمع‌آوری شده و به بخش

استخراج حلالی فرستاده می‌شود [۱].



شکل ۱-۱۶. شماتیک فرآیند استخراج مس به روش هیدرومتالورژی [۱]

۱-۶-۲. استخراج حلالی

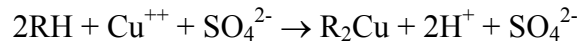
محصول بخش لیچینگ دو مشخصه دارد:

- ۱) بسیار رقیق از مس ($1-6 \text{ kg Cu/m}^3$)
- ۲) بسیار ناخالص ($1-10 \text{ kg Fe/m}^3$)

به منظور انجام فرآیند پالایش الکترولیتی نیاز است که الکترولیت خالص و غنی از مس باشد ($>35 \text{ kg Cu/m}^3$). این غلظت بالا اولاً موجب می‌شود که یونهای Cu^{++} همواره برای رسوب روی کاتد موجود باشند و ثانیاً یک کاتد مسی متراکم، صاف و با خلوص بالا و قابل ارائه به بازار تولید کنند. فرآیند استخراج حلالی شرایط تولید الکترولیت خالص غنی از Cu^{++} را از محلول لیچینگ فراهم می‌کند [۱].

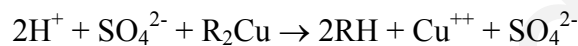
فرآیند استخراج حلالی شامل مراحل زیر است [۱]:

- ۱) تماس محلول آبی حاصل از لیچینگ با محلول آلی و در نتیجه استخراج Cu^{++} از محلول آبی و پیوند با فاز آلی. ماده آلی طبق واکنش زیر Cu^{++} را از محلول حاصل از لیچینگ استخراج می‌کند:



RH می‌تواند آلدکسیم^۵ یا کتوکسیم^۶ باشد.

- ۲) جدایش وزنی محلول آبی عاری از مس (رافینیت) و محلول آلی حاوی مس
 ۳) بازگشت رافینیت با غلظت کم مس به بخش لیچینگ
 ۴) تماس محلول آلی حاوی مس با الکترولیت اسیدسولفوریک غلیظ و در نتیجه جدایش مس از فاز آلی و وارد شدن به الکترولیت. واکنش جدایش مس از فاز آلی طبق واکنش زیر اتفاق می‌افتد:



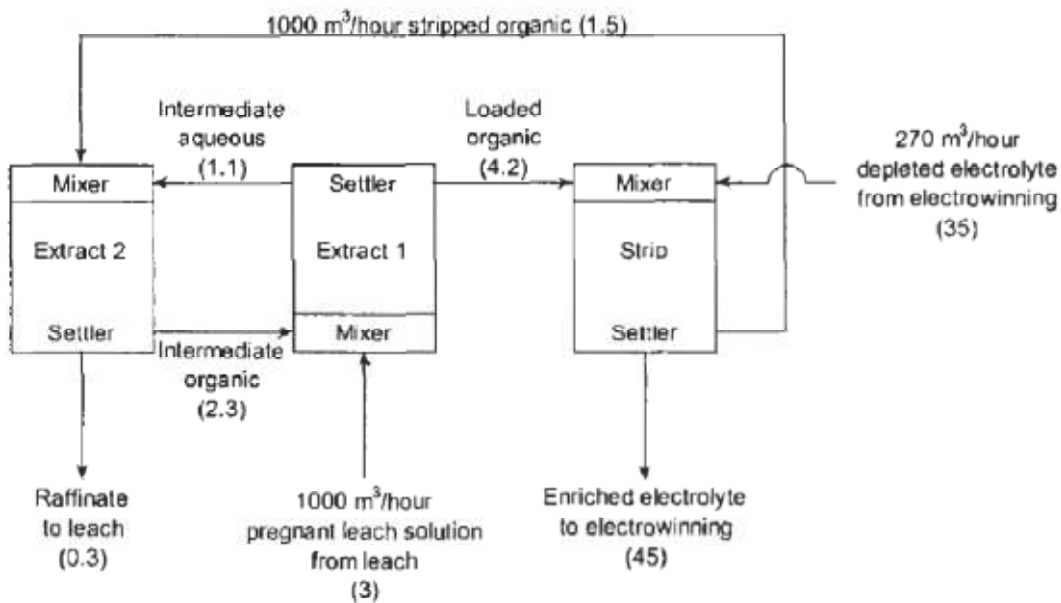
- ۵) جدایش وزنی محلول آلی، عاری از مس و الکترولیت آبی غنی از Cu^{++}
 ۶) بازگشت محلول آلی به چرخه لیچینگ
 ۷) فرستادن الکترولیت غنی از Cu^{++} به بخش پالایش الکترولیتی برای رسوب Cu^{++} به صورت مس خالص.

این فرآیند به صورت پیوسته می‌باشد. مراحل ۱ و ۲ در یک محفظه (Extraction Mixer Settler) و مراحل ۶ و ۷ نیز در یک محفظه (Strip Mixer Settler) اتفاق می‌افتد [۱].

به طور خلاصه فاز آلی [۱]:

- ۱) ابتدا با مس موجود در محلول رقیق اسیدسولفوریک (حاصل از لیچینگ) غنی می‌شود.
 ۲) از محلول حاصل از لیچینگ جدا می‌شود.
 ۳) در تماس با الکترولیت غلیظ H_2SO_4 ، مس خود را از دست می‌دهد.
 در واقع تفاوت غلظت اسیدسولفوریک در محلول لیچینگ و الکترولیت منجر به انجام فرآیند می‌شود [۱].
 شماتیک فرآیند استخراج حلالی در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است.

5 - aldoxime
 6 - ketoxime



شکل ۱-۱۷. شماتیک فرآیند استخراج حلالی [۱]

۱-۶-۳. پالایش الکترولیتی

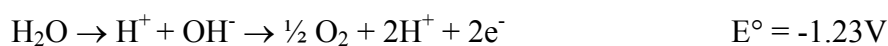
در پالایش الکترولیتی، الکترولیت حاصل از بخش استخراج حلالی به صورت مس خالص فلزی رسوب خواهد کرد. پالایش الکترولیتی شامل مراحل زیر است:

- ۱) غوطه‌ور کردن کاتدهای فلزی و آندهای خنثی (اما رسانا) در الکترولیت $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$
- ۲) ایجاد اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد
- ۳) رسوب مس خالص فلزی از الکترولیت روی کاتدها

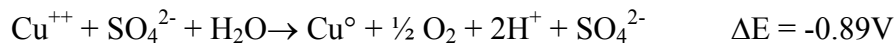
آنها معمولاً از جنس ورق‌های سربی هستند که نسبتاً خنثی هستند اما به مرور زمان خورده می‌شوند. کاتدها نیز ورقه‌های فولاد زنگ نزن هستند. عمل رسوب مس روی کاتد حدود یک هفته طول می‌کشد. بعد از آن کاتد به طور مکانیکی از ورقه فولادی جدا شده، شسته شده و برای فروش ارسال می‌شود [۱]. واکنش پالایش الکترولیتی مشابه واکنشی است که در الکترولیز رخ می‌داد.



اما واکنش آند کاملاً متفاوت است. در آند واکنش آزاد شدن گاز اکسیژن اتفاق می‌افتد.



واکنش کلی به شکل زیر خواهد بود:

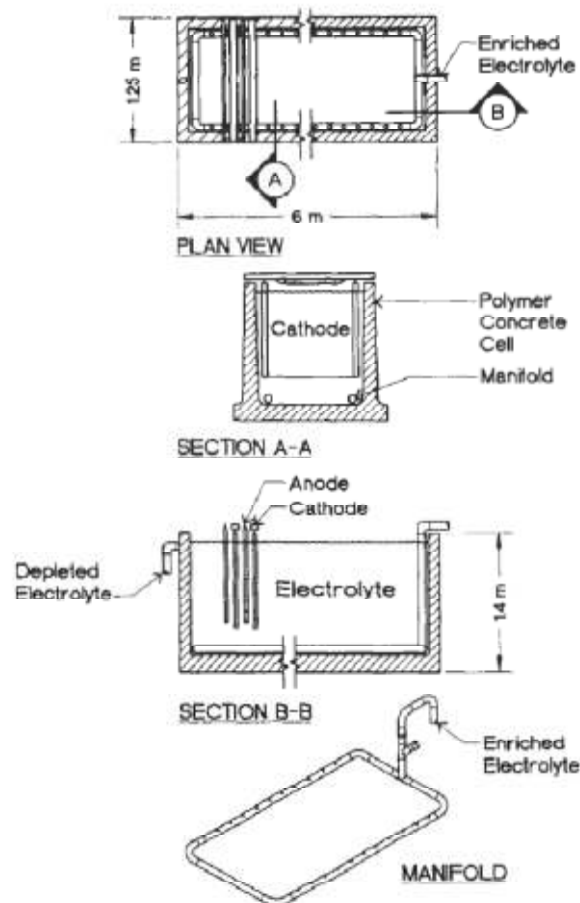


محصولات پالایش کاترولیتی عبارتند از:

- مس خالص در کاتد
- گاز اکسیژن در آند
- اسید سولفوریک در محلول

مس برای فروش به بازار ارسال می‌گردد و گاز اکسیژن وارد اتمسفر می‌شود و اسیدسولفوریک برای استفاده

مجدد بازیابی می‌شود. شکل ۱-۱۸ شمایی از یک سلول پالایش کاترولیتی را نشان می‌دهد [۱].



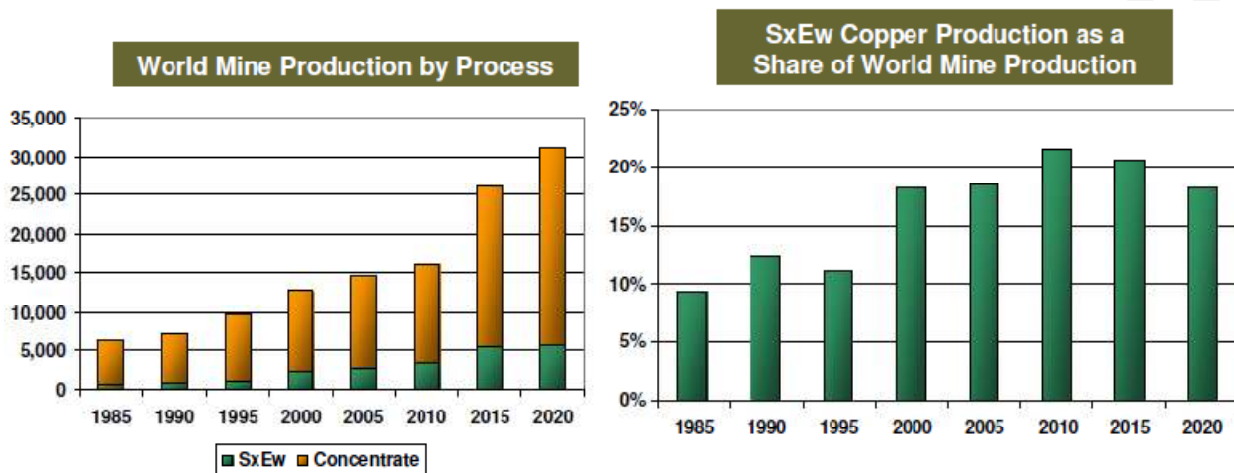
شکل ۱-۱۸. شمایی از یک سلول پالایش کاترولیتی [۱]

برای انحلال، ابتدا سنگ معدن به اندازه کافی خرد شده تا برای استخراج موثر، سطح زیادی بدست آید. سپس با یک ماده‌ی حلال یعنی اسید سولفوریک، به روش وزنی در توده‌ها یا انباشته‌های بزرگ کانه‌ی کم‌عیار، یا توسط

تلاطم مکانیکی در حوضچه‌ها یا مخازن تماس پیدا می‌کنند [۱].

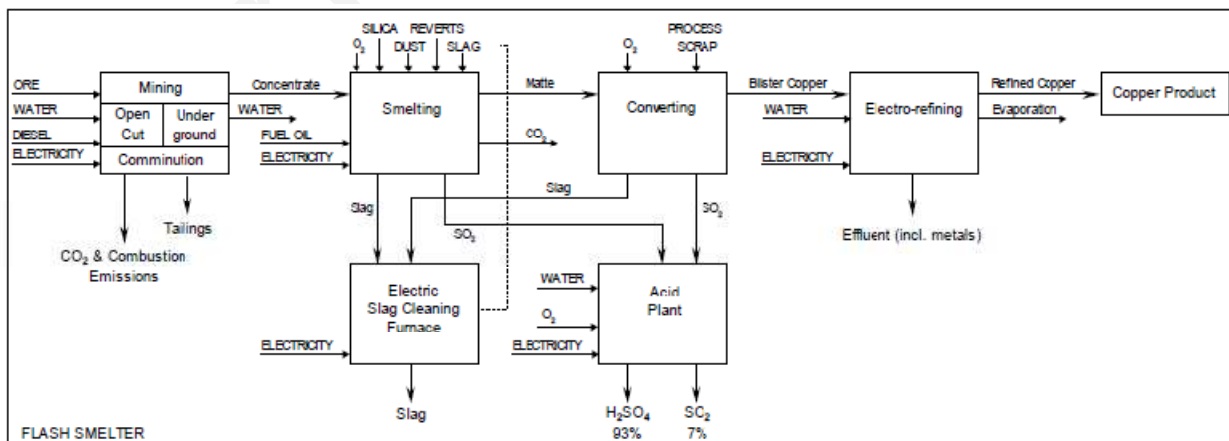
غلظت سولفات مس حاصل، طی فرآیند استخراج با حلال افزایش می‌یابد. سولفات مس غلیظ با پمپ‌های مخصوص به واحد احیای الکتریکی فرستاده و وارد سلول‌های احیا می‌شود که حاوی آند سربی و کاتدهای فولاد ضد زنگ می‌باشد. مس از محلول جدا شده و بر سطح کاتد می‌نشیند [۱].

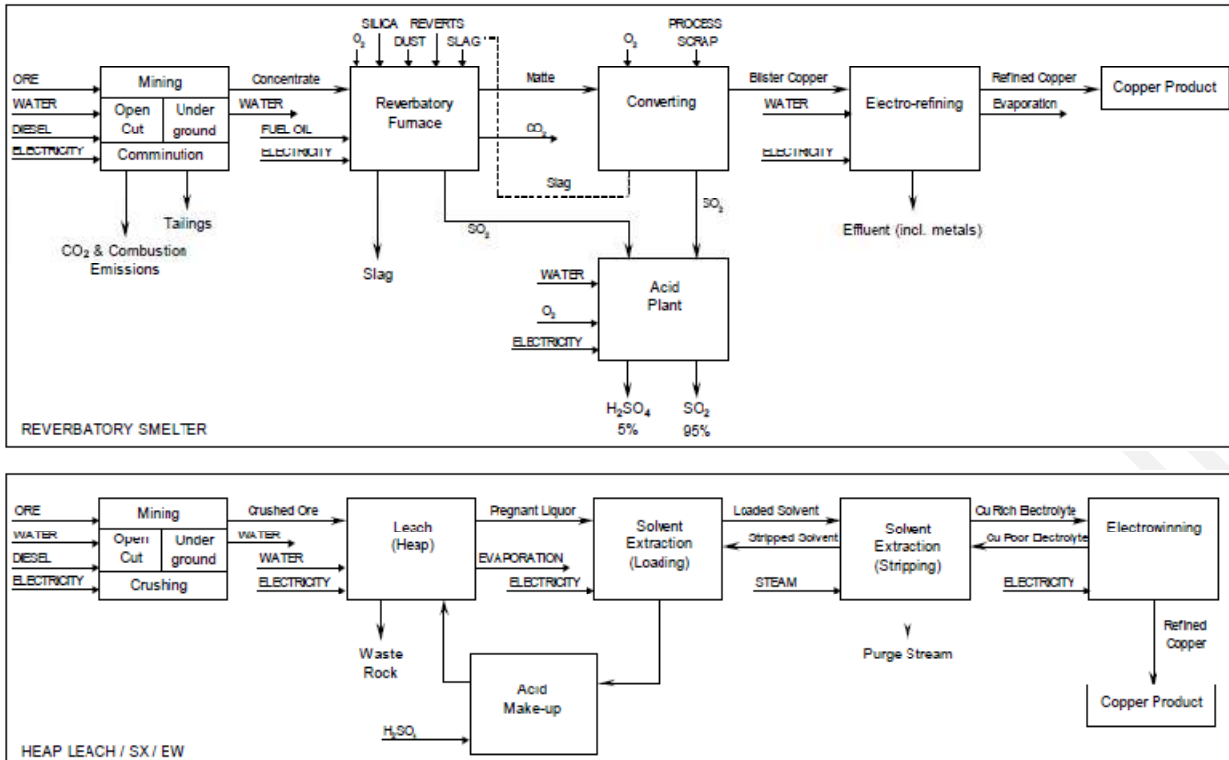
شکل ۱-۱۹ سهم هر یک دو فرآیند پیرومتالورژی و هیدرومتالورژی در تولید مس در دنیا تا سال ۲۰۱۰ و پیش‌بینی سهم هر یک تا سال ۲۰۲۰ را نشان داده است.



شکل ۱-۱۹. سهم هر یک از دو فرآیند پیرومتالورژی و هیدرومتالورژی در تولید مس در دنیا (واحد ۱۰۰۰ تن) [۴]

شکل ۱-۲۰ مقایسه فلوشیت کلی روش‌های کوره‌های تشعشعی، ریورب و روش SX-EW را نشان می‌دهد. برای هر روش ورودی‌ها و خروجی‌های هر یک از واحدها نشان داده شده است.





شکل ۱-۲۰. مقایسه فلوشیت کلی روش‌های کوره‌های تشعشعی، ریورب و روش SX-EW [۱۰]

۷-۱. ذوب و ریخته‌گری کاند مسی

کاتدهای بدست آمده از استخراج و پالایش الکترولیتی در محیط کنترل شده‌ی احیایی برای ریخته‌گری به اشکال صنعتی ذوب می‌شوند. سوخت‌های مورد استفاده، کم‌گوگرد هستند تا از جذب آن در محصول مس اجتناب شود. عمل ذوب غالباً در کوره‌هایی با تنوره‌ی عمودی (آسارکو) انجام می‌گیرد که در آن کاتدها حین حرکت به سمت پایین توسط گازهای داغ متصاعد تولید شده بر اثر احتراق سوخت در روزنه‌های تعبیه شده در دورادور پایین کوره، گرم می‌شوند. ذوب کامل و سریع است و مادامی که اتمسفر ملایم احیایی برقرار باشد اکسایش یا جذب ناخالصی اتفاق نمی‌افتد [۳].

۸-۱. فرآیند تولید برق در نیروگاه‌های بخاری

از آنجا که در مجتمع مس معمولاً از گاز خروجی از کوره‌های ریورب برای استفاده در نیروگاه استفاده می‌شود، لذا در این بخش شرح مختصری درباره فرآیند تولید برق در نیروگاه‌های بخاری (حرارتی) ارائه شده است. این نوع نیروگاه‌ها که عموماً دارای ظرفیت تولید برق بالایی می‌باشند، از سوخت مازوت و یا گاز طبیعی برای تولید بخار توسط بویلر جهت به حرکت درآوردن پره‌های توربین و روتور ژنراتور استفاده شده و در نهایت موجب تولید برق می‌گردد. در این نیروگاه‌ها از سیستم خنک کننده خشک و تر جهت خنک کردن آب حاصل از چگالش بخار خروجی از توربین بخار استفاده می‌گردد.

این نیروگاه‌ها معمولاً به یکی از دو منظور ذیل مورد استفاده قرار می‌گیرند:

۱. نیروگاه‌های بخاری جهت تولید برق

۲. نیروگاه‌های بخاری جهت مصارف صنعتی

نیروگاه‌های بخار به منظور تامین انرژی الکتریکی به سه نوع تبدیل انرژی نیاز دارند:

(۱) انرژی شیمیایی موجود در سوخت‌های فسیلی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و توسط حرارت تولید

شده آب مایع به بخار تبدیل می‌شود. این کار در دیگ بخار انجام می‌شود.

(۲) تبدیل انرژی حرارتی بخار به انرژی مکانیکی، این کار توسط توربین انجام می‌شود.

(۳) تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی، این کار توسط ژنراتور انجام می‌شود.

با استفاده از حرارت منبع حرارتی بخار مورد نیاز در دیگ بخار تأمین می‌شود. این بخار با فشار و دمای بالا وارد

توربین شده و توربین را به حرکت در می‌آورد. بخار خروجی از توربین باید به نحوی وارد سیکل نیروگاه شود، از

آنجایی که امکان پمپ نمودن بخار وجود ندارد، بخار خروجی توربین ابتدا در سیستم خنک کننده تبدیل به مایع

می‌شود و توسط پمپ آب مجدداً وارد سیکل نیروگاه می‌گردد.

این نوع نیروگاهها (توربینها) از نظر فشار بخار تولیدی در بویلر و بخار مصرفی در توربین به دو دسته عمده تقسیم می‌گردند.

در توربین‌های از نوع فشار ثابت (constant pressure) بویلر و توربین هیچ نوع انعطافی از خود نشان نمی‌دهند و لذا از این نوع توربینها (نیروگاهها) در جهت تولید بار پایه استفاده می‌گردد.

در توربین‌های از نوع فشار متغیر (sliding pressure) می‌توان بر روی بویلر و توربین، تغییرات فشار را اعمال نمود. این نوع مولدها معمولاً جهت تولید بار میانی هفته بکار می‌روند.

قدرت قابل دسترسی این نوع مولدها از چند مگاوات تا یک هزار مگاوات متغیر است. لازم به توضیح است که راندمان این نوع نیروگاهها تا ۴۰ درصد هم می‌رسد.

روش تولید برق در این نوع نیروگاهها به این ترتیب است که سوخت فسیلی (ذغال سنگ، گاز، گازوئیل، مازوت) بوسیله مشعلهای خاصی، به محفظه‌ای بنام کوره، پاشیده می‌گردد و با اشتعال آن در مجاورت هوا که بوسیله فن‌های بزرگی تأمین می‌شود، حرارت قابل توجهی در این محفظه تولید می‌گردد. حرارت حاصله، آب (گرمی) را که با پمپ از داخل لوله‌های تعبیه شده در آن عبور می‌کند پس از طی مراحل به بخاری با درجه حرارت بالا و فشار زیاد که در اصطلاح به آن بخار خشک می‌گویند، تبدیل می‌نماید. بخار خشک حاصله پس از خروج از کوره وارد توربین می‌شود.

بخار وارده به توربین آن را به حرکت در می‌آورد و ژنراتور را که با توربین هم محور و کوپله است به همراه آن به گردش در می‌آید و جریان برق تولید می‌شود. بخار ورودی به توربین با از دست دادن بخش عمده‌ای از حرارت و فشار خود وارد محوطه‌ای بنام کندانسور می‌شود. در کندانسور این بخار به لحاظ تماس با سطح سرد، تقطیر می‌شود و به آب تبدیل می‌گردد. آب تقطیر شده مجدداً از هیترهای متعددی عبور داده شده و گرم می‌شود و در نهایت توسط پمپ مجدداً به درون کوره هدایت می‌شود و سیکل خود را دوباره طی می‌کند.

آب خنک‌کن (آبی که جهت ایجاد سطوح سرد در کندانسور بکار می‌رود) که خود ضمن سرد کن بخار خروجی از توربین، گرم شده است به برج خنک‌کن هدایت می‌شود و پس از خنک شدن دوباره به مدار خود باز می‌گردد.

۹-۱. مقایسه مصرف انرژی در فرآیندهای مختلف تولید مس

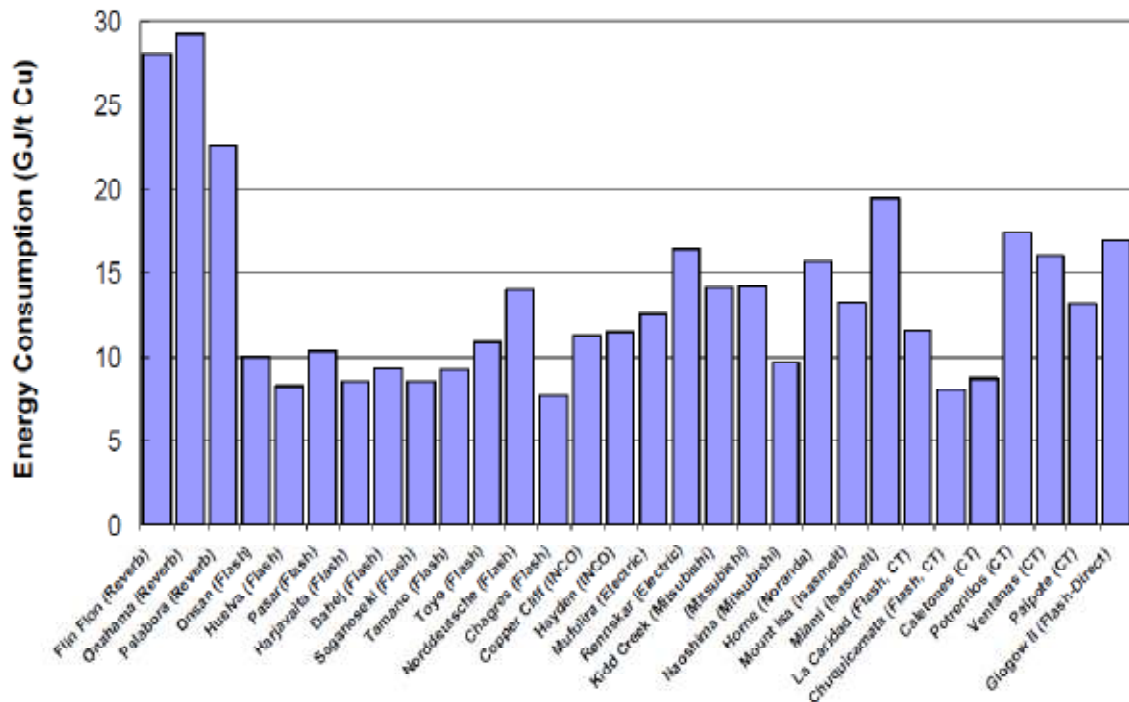
در روش‌های سنتی از تشویه، کوره‌های ریورب (یا کوره‌های الکتریکی برای سنگ‌های پیچیده‌تر) برای تولید مس و تبدیل آن به مس بلیستر در کنورتور استفاده می‌کردند که مصرف انرژی آن ۳۰-۴۰ MBTU برای هر تن کاتد بود. در این کوره‌ها همچنین به علت کم بودن گوگرد در گاز خروجی احداث واحد تولید اسید سولفوریک مرقون به صرفه نیست. پس از آن استفاده از کوره‌های تشعشی گسترش یافت. در این کوره‌ها از انرژی گرمایی حاصل از واکنش گرمای سوختن ترکیبات سولفیدی استفاده می‌شود. مصرف انرژی در واحدهایی که از کوره‌های تشعشی استفاده می‌کنند تا ۲۰ MBTU برای هر تن کاتد کاهش می‌یابد. علاوه بر این به علت غلظت بالای گوگرد در گاز خروجی احداث واحد اسید سولفوریک مرقون به صرفه است [۶].

از آنجا که مصرف انرژی در فرآیندهای استخراج و تولید فلزات غیر آهنی بسیار بالاست همواره سعی بر این بوده که تکنولوژی‌های تولید به سمت مصرف کمتر انرژی پیش برود. جدول ۱-۲ موازنه میزان انرژی و مواد مصرفی ۷ فرآیند ذوب متفاوت را نشان می‌دهد. طبق اطلاعات ارائه شده در جدول، کوره‌های تشعشعی و روش میتسوبیشی بیشترین راندمان را در استفاده از انرژی دارد.

جدول ۱-۲. میزان انرژی مصرفی در روش‌های مختلف ذوب مس (GJ/ton Cu) [۷]

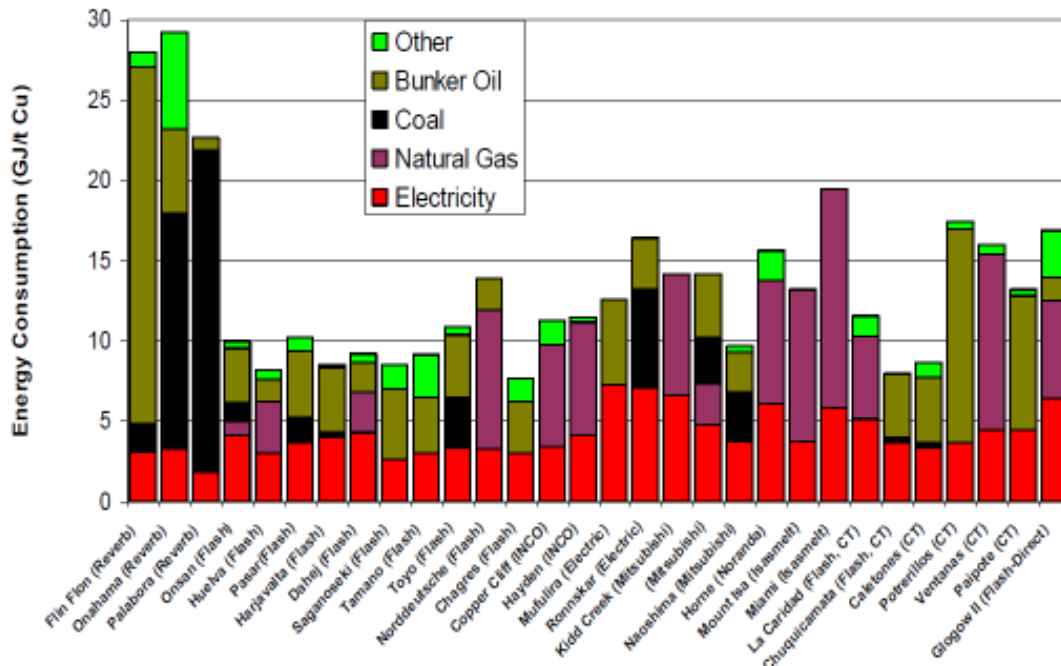
Process	Teniente Converter	Reverb dry charge	Electric furnace	INCO flash	Outookumpu flash	Noranda reactor	Mitsubishi reactor
Materials handling	0.70	0.77		0.77	0.60	0.83	0.70
Dry wt const	0.85	0.70	2.82	1.86	1.23	0.80	1.29
Smelting:							
Fuel	4.25	14.50			0.80	3.72	6.46
Electricity	0.64	0.64	19.03	0.05		1.26	1.58
Surplus steam		-4.35			-3.43	-1.82	-8.00
Converting Electricity	0.40	1.26	2.92	0.94	0.64	0.37	1.42
Fuel	0.54	0.32	3.58	0.09	0.25		
Slag Cleaning	1.10				1.49	1.31	1.35
Gas cleaning:							
Hot gas	0.8	2.83	0.78	0.59	0.42	0.69	0.86
Cold gas		0.40	2.21	0.31	0.21		0.32
Fugitive emissions	3.5	3.57		3.57	3.57	3.57	0.89
Acid plant	3.2	3.87	4.74	3.19	3.86	3.10	4.08
Water	0.10	0.10		0.10		0.10	0.10
Anode furnace	5.82	5.82	5.10	5.82	5.82	5.82	5.82
Materials:							
Miscellaneous					0.04	0.65	0.63
Oxygen				3.53	3.04	3.17	1.29
Electrodes			0.86				0.16
Fluxes	0.04	0.03	0.12	0.02	0.01	0.02	0.06
Water	0.08	0.08		0.08	0.08		0.08
Anode furnace	0.47	0.47	0.51	0.47	0.47	0.47	0.47
Total	22.49	30.93	42.52	21.26	18.92	24.01	19.77

شکل ۱-۲۱ میزان انرژی مصرفی به ازاء تولید هر تن مس در ۳۰ کارخانه تولید مس دنیا را نشان می‌دهد. تکنولوژی مورد استفاده در کارخانه‌های مزبور نیز در شکل مشخص می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین مصرف انرژی مربوط به واحدهایی است که از کوره‌های ریورب استفاده می‌کنند و کمترین مصرف مربوط به واحدهایی است که از کوره‌های تشعشعی استفاده می‌کنند. میزان مصرف برای واحدهای دارای تکنولوژی اینکو، کوره الکتریکی و میتسوبیشی کمتر از تکنولوژی ریورب اما بیشتر از کوره تشعشعی گزارش شده است. در شکل ۱-۲۲ نیز سهم هر یک از انواع منابع تامین انرژی (برق، گاز طبیعی، مازوت و زغال) را در تامین انرژی مورد نیاز در همان کارخانه‌ها را نشان می‌دهد.



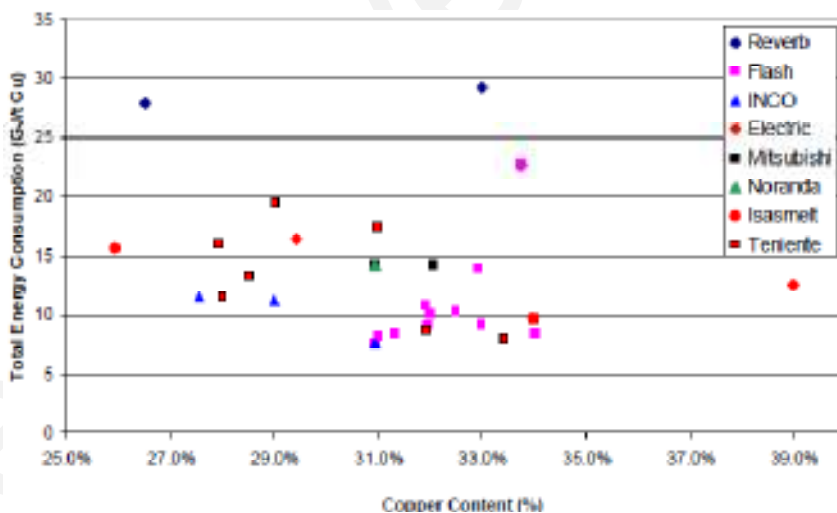
شکل ۱-۲۱. میزان انرژی مصرفی به ازاء تولید هر تن مس در ۳۰ کارخانه تولید مس دنیا [۷]

همانطور که در شکل نیز مشخص است نوع سوخت مصرفی در کارخانه‌های مختلف متفاوت است. به عنوان مثال در سه کوره ریورب مشخص شده در شکل، مصرف مازوت کاملاً متفاوت است به طوری که در یکی از کارخانه‌ها مازوت بیشترین درصد سوخت مصرفی را تشکیل می‌دهد در حالی که در دو کارخانه دیگر زغال بیشترین سوخت مصرفی است که این بیانگر آن است که علاوه بر تکنولوژی، میزان دسترسی به سوخت و قیمت سوخت نیز در انتخاب نوع سوخت مؤثر بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که در بعضی کارخانه‌های با تکنولوژی کوره تشعشعی از گاز طبیعی نیز به عنوان سوخت استفاده شده است در حالی که در برخی دیگر اصلاً از گاز طبیعی استفاده نشده است.



شکل ۱-۲۲. سهم هر یک از انواع منابع انرژی در تامین انرژی مورد نیاز در ۳۰ کارخانه تولید مس دنیا [۷]

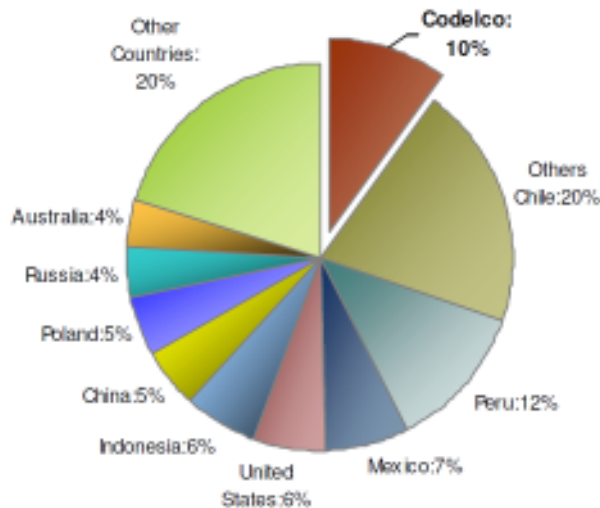
میزان مصرف انرژی بر اساس درصد مس در کنسانتره مصرفی نیز می‌تواند متغیر باشد. در شکل ۱-۲۳ میزان مصرف انرژی هر یک از کوره‌های ذوب مات (در ۳۰ کارخانه فوق‌الذکر) بر اساس درصد مس کنسانتره آورده شده است.



شکل ۱-۲۳. میزان مصرف انرژی هر یک از کوره‌های ذوب مات بر اساس درصد مس کنسانتره [۷]

۱-۱۰. آمار تولید و مصرف مس در دنیا

بیشترین منابع مس دنیا در شیلی، پرو، آمریکا، چین و... است. از این میان سهم شیلی ۳۰٪، پرو ۱۲٪، مکزیک ۷٪ و آمریکا ۶٪ است. شکل ۱-۲۴ سهم کشورهای مختلف در منابع مس دنیا نشان داده شده است.



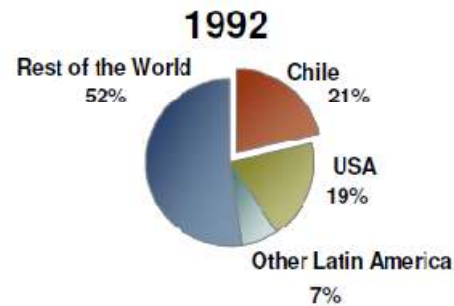
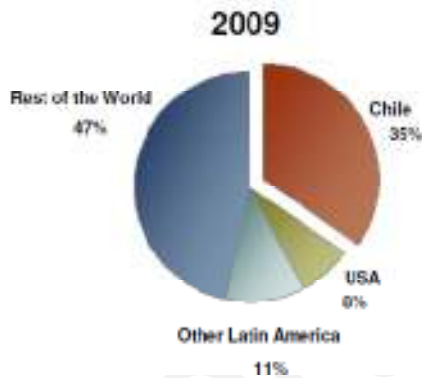
شکل ۱-۲۴. سهم کشورهای مختلف در منابع مس دنیا [۴]

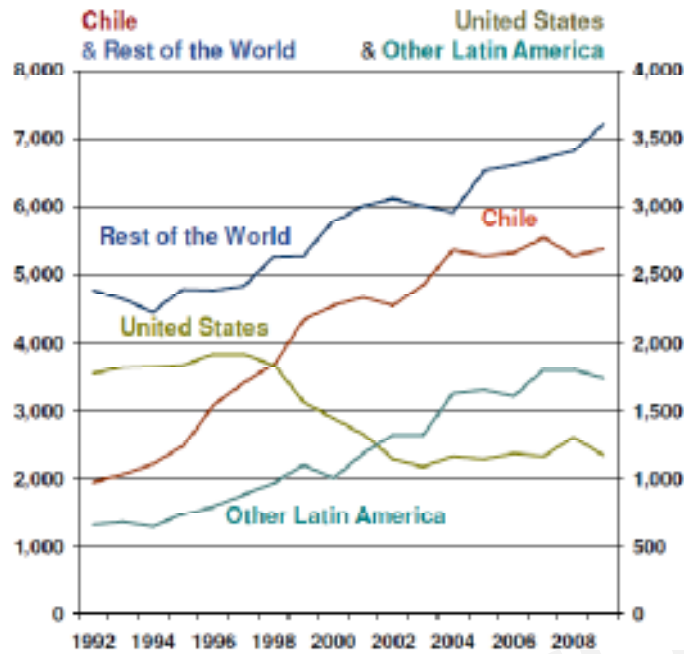
تولید مس در دنیا در سال ۲۰۰۹، حدود ۱۶۰۰۰ هزار تن بوده است. از این مقدار نزدیک به ۵۰۰۰ هزار تن آن در شیلی تولید شده است. جدول ۱-۳ میزان تولید کشورهای مختلف دنیا از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد [۱۱]. تولید مس ایران مطابق با آمار ارائه شده در این جدول بیش از ۲۵۰ هزار تن در سال ۲۰۰۹ بوده است. طبق آمار بزرگترین تولیدکنندگان مس در دنیا کشورهای شیلی، آمریکا، پرو، چین و استرالیا هستند. همانطور که در نیز نشان داده شده است ۳۵٪ تولید مس دنیا در سال ۲۰۰۹ در کشور شیلی است. سهم سایر کشورهای آمریکای لاتین ۱۱٪ و سهم آمریکا ۸٪ است [۳]. شکل ۱-۲۶ نیز بزرگترین کمپانی‌های تولید مس در دنیا و سهم هر یک را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳. میزان تولید کشورهای مختلف دنیا از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ (Thousands of short tons) [۱۱]

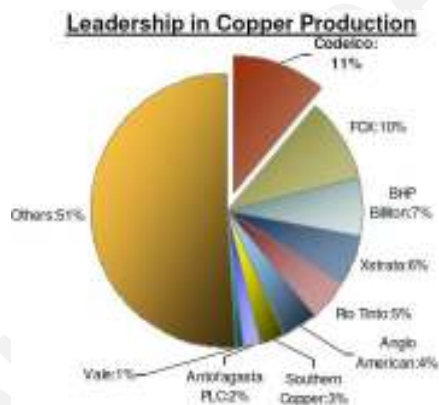
COUNTRY	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009p
Australasia										
Australia	914	960	968	915	941	1,010	947	960	974 r	947
Papua New Guinea	224	225	233	216	191	213	214	187	176	184
Total Australasia	1,138	1,185	1,201	1,131	1,133	1,223	1,161	1,147	1,150 r	1,131
Americas										
Argentina	160	211	225	219	194	206	199	199	173	158
Brazil	34	33	34	30	109	144	158	219	232	236
Canada	699	698	665	615	620	656	665	657	669	545
Chile	5,073	5,224	5,049	5,406	5,966	5,865	5,909	6,125	5,876	5,941
Mexico	402	409	363	394	447	473	368	372	272	263
Peru	611	796	931	929	1,142	1,113	1,156	1,312	1,398	1,405
United States	1,598	1,477	1,256	1,230	1,275	1,257	1,319	1,288 r	1,442 r	1,299
Total Americas	8,577	8,848	8,523	8,823	9,754	9,715	9,774	10,172	10,062 r	9,847
Europe										
Bulgaria	103	107	105	103	104	104	122	121	116	107
Poland	501	522	554	546	585	564	548	498	473	484
Portugal	84	91	85	85	105	99	87	99	98	95

COUNTRY	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009p
Scandinavia	99	95	95	108	108	112	110	84	78	76
Serbia	51	30	34	23	13	14	13	18	21	21
Total Europe	838	845	873	865	916	893	880	821	786	783
Asia										
Russian Federation	584	595	730	694	694	705	744	761	777	818
China	795	802	780	816	977	998	1,126	1,043 r	1,127 r	1,060
India	37	38	34	32	33	25	32	36	34	33
Indonesia	1,107	1,155	1,282	1,106	929	1,174	900	870	718 r	1,070
Iran	143	146	146	162	161	181	238	269	273	281
Japan(2)	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—
Kazakhstan(3)	474	518	522	535	509	443	479	448	463	447
Mongolia(4)	—	—	—	—	—	—	—	144 r	143 r	146
Philippines	35	26	21	22	18	18	19	24	20	54
Total Asia	3,175	3,280	3,515	3,367	3,323	3,545	3,538	3,595 r	3,555 r	3,909
Africa										
Namibia	6	17	20	18	15	12	7	11	10	9
South Africa	179	123	100	99	96	98	99	107	120	128
Congo	36	42	42	70	82	111	141	157	236	415
Zambia	275	349	376	384	443	477	523	561	602 r	619
Total Africa	496	531	538	571	636	697	769	836	968 r	1,171
Other(5)	339	331	320	320	519	547	600	675 r	692 r	777
TOTAL WORLD	14,563	15,020	14,970	15,077	16,087	16,414	16,523	17,047 r	17,039 r	17,459



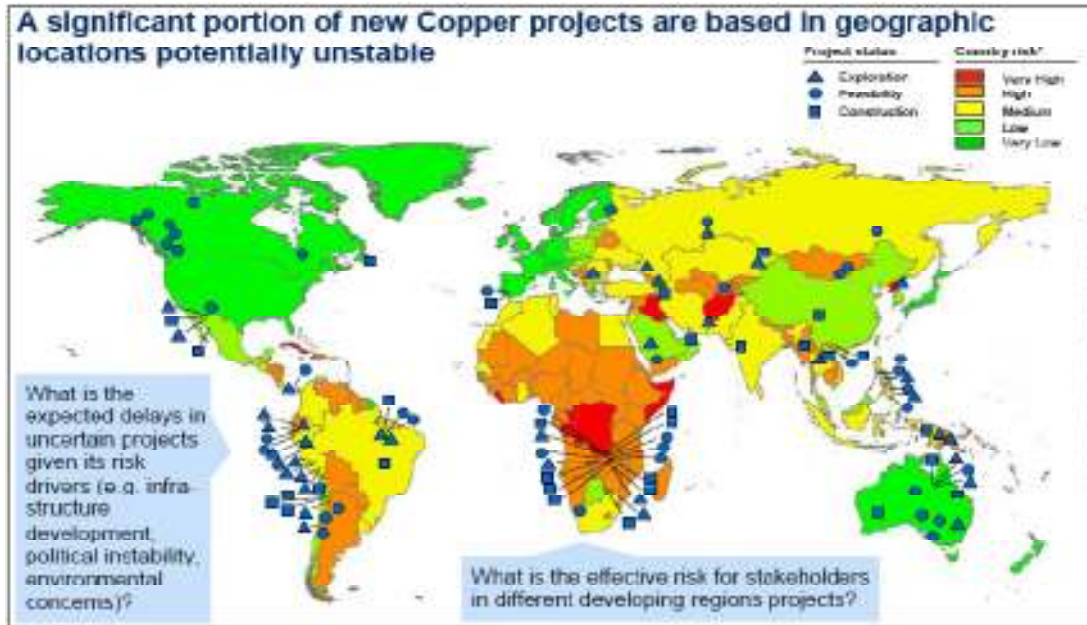


شکل ۱-۲۵. سهم شیلی در تولید مس دنیا [۴]



شکل ۱-۲۶. بزرگترین کمپانی‌های تولید مس در دنیا و سهم هر یک در تولید در سال ۲۰۰۹ [۴]

در شکل ۱-۲۷ پروژه‌های بالقوه تولید مس در دنیا در سالهای آتی آورده شده است. میزان ریسک هر کدام بر اساس ۸ فاکتور تعیین شده است. از مهمترین این فاکتورها می‌توان به ریسک اقتصادی، سیاسی، امکان دسترسی به حمایت‌های مالی بانکی و حمایت‌های مالی کوتاه مدت اشاره کرد.



شکل ۱-۲۷. پروژه‌های بالقوه تولید مس در دنیا در سالهای آتی [۴]

مراجع:

1. W.G.davenport, M. King, M. Schlesinger, A. K. Biswas, Extractive Metallurgy of Copper, Forth Edition, Elsevier Science Ltd, 2002
2. <http://www.nicico.com>
3. فرجی، ح.، فنون استخراج مس، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۷۱
4. Diego Hernandez, Metal Bulletin Copper Conference 2010, 2010
5. AP 42 Section 12.3, Fifth Edition, Volume I, U.S. Environmental Protection Agency, 1986
6. Copper Smelting, Pollution Prevention and Abatement Handbook, 1998
7. Andrzej Warczok, Gabriel Riveros, Energy efficiency in batch- Continuous and One-Step Copper Pyrometallurgical Processes,
8. www.outokumpu.ru, Outokumpu Flash Smelting Technology
9. Mitsubishi brochure
10. D. P. Giurco, M. Stewart and J. G. Petrie, Decision making to support sustainability in the copper industry: technology selection, 6th world congress of Chemical Engineering, Melbourne, 2001
11. Copper Development association, Annual Data 2010