

بررسی وضعیت احتراق (مشعل‌های) کوره ریورب مس سرچشمه و تأثیر آن بر عیار مات و مقدار مگنتیت سرباره

جواد قربانیان، منصور سلطانیه، حکمت رضوی‌زاده و عبدالستار بزونه

چکیده: کوره ریورب از قدیمی‌ترین کوره‌های تهیه مات است که با انجام اصلاحات هنوز در نقاط مختلف جهان و در ایران کاربرد دارد. عمده‌ترین تغییرات این کوره استفاده از مشعل‌های اکسی فیول در سقف کوره است. استفاده از اکسیژن خالص در مشعل‌های اکسی فیول موجب بالا رفتن توان ذوبی کوره و نیز افزایش پتانسیل اکسیژن در اتمسفر کوره می‌شود. اکسی فیول کردن کوره‌ها باعث بالا رفتن مصرف نسوز و افزایش تشکیل ترکیبات مضر مثل مگنتیت (Fe_3O_4) در این کوره‌ها می‌شود.

در این پژوهش ضمن انجام محاسبات احتراق با استفاده از نرم افزار FACT، حجم، ترکیب و فشار جزئی گازهای ناشی از احتراق مشعل‌ها محاسبه و در دو حالت مازوت سوز و ترکیبی (اکسی فیول- مازوت سوز) با هم مقایسه شدند. در شرایط صنعتی و تولیدی در کارخانه مس سرچشمه، برای مدت ۹۰ روز ورودی و خروجیهای دو نوع کوره ریورب (اصلاح شده با مشعل‌های اکسی فیول و اصلاح نشده) با هم مقایسه شدند. جهت بررسی شرایط احتراق کوره‌ها، گازهای خروجی برای مدت پنج روز به صورت پیوسته اندازه‌گیری و آنالیز شدند. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که اکسی فیول کردن کوره‌ها با بالا بردن توان ذوبی و حرارتی کوره همراه بوده است که باعث افزایش میزان مات تولیدی شده است. اما بر عیار مات و مقدار مگنتیت سرباره تأثیر چندانی نداشته است. همچنین آزمایش‌ها نشان دادند که کوره‌های مس سرچشمه با مکش هوای اضافی بالایی، حدود ۲/۸ برابر هوای لازم برای احتراق روبرو هستند که باعث مشابه شدن شرایط اتمسفری دو کوره، کاهش غلظت دی اکسید گوگرد (SO_2) و افزایش مقدار اکسیژن در گاز خروجی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کوره ریورب، اتمسفر، پتانسیل اکسیژن، مات، مگنتیت

۱. مقدمه

ذوب و تهیه مات مهم‌ترین روش استخراج مس از سنگهای سولفور محسوب می‌شود. اختلاف میل ترکیبی آهن و مس با گوگرد و اکسیژن بیشترین نقش را در تشکیل مات و سرباره دارد. اصول ترمودینامیکی یا مبانی نظری تولید مات در کوره‌های مختلف یکسان است.

با توجه به تغییرات انرژی آزاد استاندارد واکنش زیر در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، Cu_2S پایدارتر از FeS و FeO پایدارتر از

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۷/۱۸ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۴/۱/۳۱ به تصویب نهایی رسیده است.

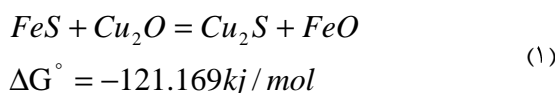
جواد قربانیان، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ghorbanian_j@iust.ac.ir

دکتر منصور سلطانیه، استادیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران mansour_soltanieh@iust.ac.ir

دکتر حکمت رضوی‌زاده، دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران hrazavizadeh@iust.ac.ir

عبدالستار بزونه، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران،

Cu_2O است و اگر مس به صورت اکسید در سرباره حضور داشته باشد، بر طبق واکنش (۱) به سولفید مس تبدیل می‌شود.



واکنش (۱) نشان می‌دهد که تا زمانی که FeS در محیط عملیات حضور داشته باشد، Cu_2O ناپایدار بوده و در صورت تشکیل به Cu_2S تبدیل می‌شود.

بنابراین میل ترکیبی بیشتر مس با گوگرد و میل ترکیبی کمتر مس با اکسیژن نسبت به سایر عناصر همراه شارژ، مبنای تولید مات است [1].

سرباره کوره ریورب تا حد امکان باید فاقد اکسید مغناطیسی Fe_3O_4 باشد.

وارد شدن این اکسید در سرباره باعث بالا رفتن نقطه ذوب، کم شدن سیالیت و بالا رفتن قابلیت حل کردن مات در سرباره می‌شود [1].

در این کوره‌ها حرارت لازم برای ذوب کنسانتره و تامین دما در محدوده ۱۳۰۰-۱۱۵۰ سانتیگراد با احتراق مازوت، گاز طبیعی و از طریق ۴ تا ۶ مشعل تامین می‌شود.

انرژی حرارتی حاصل غالباً از طریق تشعشع از سقف کوره به کنسانتره منتقل می‌شود. کوره بطور پیوسته در حال کار بوده و مات و سرباره بطور متناوب و مجزا از مجراهایی که در کوره تعبیه شده تخلیه می‌شوند.

مشکلاتی که این مشعل‌ها دارند مثل مصرف زیاد سوخت، آلودگی‌های زیست محیطی، آهنگ پایین انتقال گرما، عدم یکنواخت بودن گرما و ... باعث شد که در این کوره‌ها از مشعل‌های اکسی فیول استفاده کنند.

در مشعل‌های اکسی-فیول بجای هوا از اکسیژن استفاده می‌شود. در این نوع مشعل‌ها، شعله مستقیماً به سطح شارژ برخورد می‌کند. علاوه بر انتقال حرارت از طریق تشعشع، بخشی از گرما به صورت هدایت به شارژ منتقل می‌شود که ناشی از برخورد محصولات گرم احتراق به کنسانتره سرد است.

با برخورد شعله به سطح شارژ سرد، تجمع مجدد H_2O و CO_2 باعث تولید گرمای اضافی و افزایش سرعت ذوب کنسانتره می‌شود.

لذا دمای شعله در مشعل‌های اکسی-فیول بیش از مشعل‌های معمولی هواسوز است.

بنابراین گرادیان حرارتی بیشتر در این نوع مشعل‌ها موجب افزایش سرعت ذوب می‌شود.

افزایش انتقال حرارت در مشعل‌های اکسی-فیول موجب افزایش توانایی کوره در پذیرش تغییر سرعت شارژ و ترکیب مواد مصرفی می‌گردد [1,2].

مشعل‌های اکسی-فیول واحد ذوب مس سرچشمه به نحوی طراحی شده اند که شعله مشعل‌های اکسی-فیول پس از عبور از شعله‌های افقی به راحتی به بستر شارژ برخورد کند گازهای خروجی از کوره ریورب بسیار گرم بوده و دمای آنها بین ۱۲۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند.

عملاً نیمی از انرژی حاصل در دهانه مشعل‌ها توسط این گازهای گرم به خارج برده می‌شود.

گازهای خروجی حاوی مقدار کمی SO_2 هستند که مقدار آن بستگی به محیط‌گازی ایجاد شده در داخل کوره دارد و هر قدر این محیط بیشتر اکسید کننده باشد مقدار SO_2 محتوی آنها بیشتر خواهد بود. یکی از ترکیبات مضر که در کوره ریورب تشکیل می‌شود مگنتیت است.

تشکیل مگنتیت در کوره ریورب اثرات زیر را به همراه دارد [3-5]:

۱- افزایش ویسکوزیته سرباره و جلوگیری از جدایش مات و سرباره و در نتیجه اتلاف بیشتر مس در سرباره،

۲- ترکیب با سایر اکسیدها، به ویژه Cr_2O_3 (حاصل از دیرگدازهای کرم-منیزی) و تشکیل لایه جامدی با چگالی بین مات و سرباره که مانع جدایش به دو لایه مات و سرباره می‌گردد.

۳- رسوب مگنتیت در کف کوره‌های ذوب به دلیل وزن مخصوص بیشتر مگنتیت جامد نسبت به سرباره و مات ته نشین شده و بالا آمدن کف کوره ریورب مگنتیت یا از طریق سرباره برگشتی کنورتور وارد کوره می‌شود و یا تحت شرایط اکسیدی کوره تشکیل می‌شود.

لذا بررسی شرایط ترمودینامیکی اتمسفر و خصوصاً پتانسیل اکسیژن در اتمسفر کوره ریورب یکی از راه‌های کنترل مقدار مگنتیت در کوره ریورب محسوب می‌شود.

در شکل ۱ شرایط تشکیل فاز مگنتیت بر حسب تغییرات درجه حرارت و پتانسیل شیمیایی اکسیژن نشان داده شده است.

چنانکه مشاهده می‌شود در شرایط ذوب مس با سرباره اشباع از سیلیس تا دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد مگنتیت می‌تواند به راحتی از فاز سرباره رسوب کند.

با افزایش دما در ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل مگنتیت مشکل به نظر می‌رسد.

اگر بخواهیم از تشکیل مگنتیت جلوگیری کنیم شرط اول آنست که سرباره از سیلیس اشباع شده باشد.

چنانکه در شکل دیده می‌شود، اگر دمای کوره را ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر بگیریم در $LogP_{O_2}$ بالاتر از ۶/۵- فاز مگنتیت همراه با مات می‌تواند تشکیل شود.

لذا باید سعی شود پتانسیل اکسیژن کمتر از این مقدار نگهداری شود. بررسی‌های زیادی در زمینه پتانسیل اکسیژن، پتاسیل گوگرد، دما و تشکیل مگنتیت صورت گرفته است [7-11]، یکی دیگر از این نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است [4].

برای بدست آوردن این دیاگرام از فرمول ۲ استفاده شده است.



در این رابطه با اندازه گیری نسبت گازهای CO و CO_2 موجود در اتمسفر کوره و داشتن ثابت تعادل واکنش فوق در هر دما می‌توانیم P_{O_2} را بدست آوریم.

با استفاده از این رابطه و در دست داشتن نسبت CO_2/CO در هر دما در حالتی که سرباره اشباع از مگنتیت و سیلیکات آهن باشد P_{O_2} محاسبه و بدست آمده است.

با توجه به مطالب ذکر شده برای جلوگیری از تشکیل مگنتیت بررسی و کنترل اتمسفر و شرایط احتراق می‌تواند عامل مهمی محسوب گردد.

لذا در این پژوهش، شرایط اتمسفری کوره از لحاظ نوع سوخت و شرایط احتراق از لحاظ تئوری و در شرایط واقعی، مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت و تاثیر آن بر میزان تولید مات، عیار مات و مگنتیت تشکیل شده تعیین شد.

گازهای خروجی از کوره‌ها برای مدت پنج روز بصورت مستمر و پیوسته آنالیز گردید.

در مجتمع مس سرچشمه جهت ذوب بار در کوره‌ها از دو نوع سوخت سنگین یا مازوت و گاز طبیعی استفاده می‌شود. آنالیز شیمیایی مازوت و گاز طبیعی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. آنالیز شیمیایی هوای مصرفی نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سوخت مازوت [۱۲]

ترکیب	S	H ₂	C	N ₂	O ₂	ASH
درصد	2.3	9.7	85.6	1	1	0.4

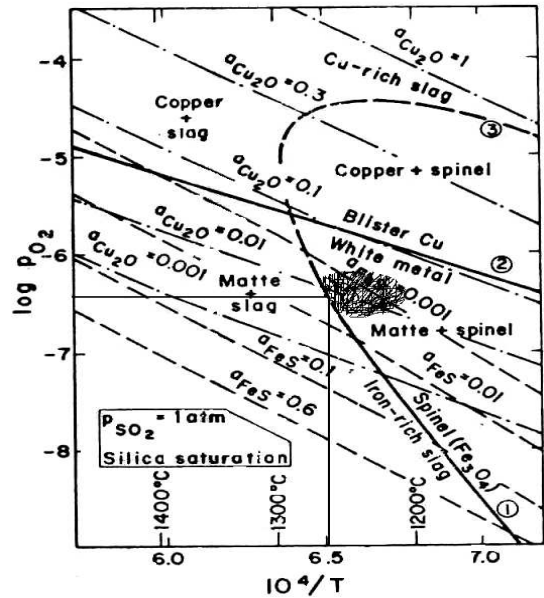
جدول ۲: آنالیز گاز مصرفی

ترکیب	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂
درصد	94.1	3.2	0.6	0.2	0.2	1.2	0.5

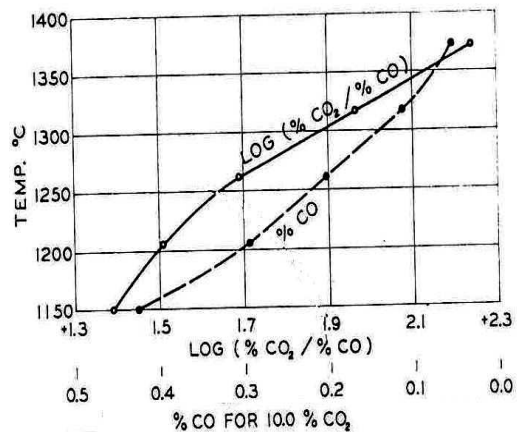
جدول ۳. آنالیز هوای احتراقی [۱۲]

ترکیب	O ₂	N ₂	H ₂ O
درصد	20.2	75.8	4

برای انجام محاسبات تعادلی واکنش‌ها از بخش (Equilibrium) نرم افزار FACT93 استفاده شد. برای انجام محاسبات، ورودی‌ها بصورت مولی به نرم افزار داده شد. ورودی‌ها به نرم افزار شامل مقدار گاز، اکسیژن، سوخت، گوگرد سوخته شده از بار و هوای مصرفی بود. با وارد کردن این اطلاعات به FACT درصد هر یک از گازهای نهایی، حجم نهایی گازها و پتانسیل جزئی گازها در دما و فشار مورد نظر محاسبه شد. در ابتدا، برای انجام محاسبات، مقدار گوگرد حذف و سوخته شده از بار ۱۸ تا ۳۰ درصد کل گوگرد ورودی متغیر فرض شد و سپس در محاسبات حالت ۳۰ درصد که به شرایط صنعتی نزدیکتر بود در نظر گرفته شد. رطوبت همراه بار ۷ درصد وزنی بار در نظر گرفته شد و چنین فرض شد که تمام ورودی‌ها در دمای محیط و فشار یک اتمسفر وارد کوره می‌شوند. با وارد کردن ورودی‌های هر یک از کوره‌ها (مطابق جدول ۴ برای حالت ترکیبی و جدول ۵ برای حالت مازوت سوز) پتانسیل اکسیژن در اتمسفر کوره برای سوختن گوگرد بین ۳۰-۱۸ درصد از گوگرد بار محاسبه گردید. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول ۶ نشان داده شده است. شکل ۳ نیز پتانسیل جزئی اکسیژن را برای حالت ۳۰ درصد سوختن گوگرد به عنوان نمونه نشان می‌دهد. (کل شارژ برابر است با مجموع کنسانتره+ سنگ آهک+ غبار ورودی+ سیلیس) از پارامترهای مهم دیگر در بررسی گازها و اتمسفر کوره، مقدار و حجم گازهای خروجی می‌باشد. هرچه مقدار گازهای خروجی کوره بیشتر باشد، مقدار حرارتی که از طریق این گازها خارج می‌شود افزایش می‌یابد. در نتیجه اتلاف حرارتی کوره بالا می‌رود.



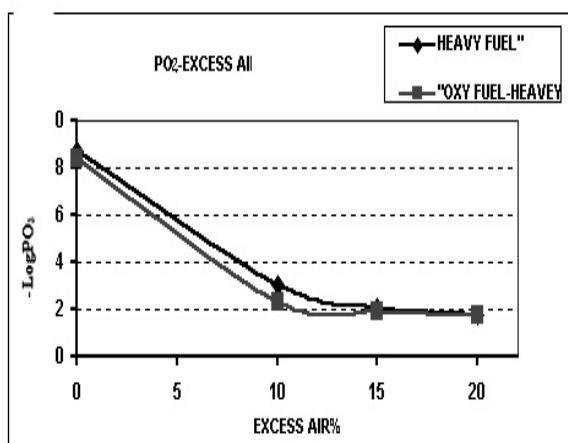
شکل ۱. دیاگرام فازی در عملیات ذوب با سرباره اشباع از سیلیس بر حسب تغییرات دما و فشار جزئی گاز اکسیژن [6]



شکل ۲. منحنی اشباع مگنتیت برای سرباره اشباع از SiO₂ در ارتباط با دما [۳]

۲. نحوه انجام آزمایش‌ها

در این پروژه، ابتدا حجم هوای مورد نیاز برای احتراق از طریق محاسبات تئوریک با فرض سیستم احتراق کامل انجام پذیرفت و سپس با استفاده از نرم‌افزار FACT و براساس شرایط عملی کارخانه، حجم و ترکیب گازهای خروجی از کوره محاسبه شد. در زمان انجام پروژه در کارخانه مس سرچشمه یک کوره در شرایط ترکیبی (مازوت سوز واکسی فیول) و یک کوره در حالت مازوت سوز کار می‌کرد. لذا برای مدت ۹۰ روز کلیه مواد ورودی اعم از بار و مواد اولیه، میزان سوخت و هوای مصرفی، مقدار گاز طبیعی و همچنین آنالیز مواد خروجی شامل مات و سرباره ثبت گردید. سپس به کمک نرم افزار FACT اثر اتمسفر کوره بر نوع و مقدار گازهای خروجی بررسی شد. جهت بررسی وضعیت عملی کوره‌ها،



شکل ۳. پتانسیل جزئی اکسیژن در اتمسفر کوره در درصدهای مختلف هوای احتراقی (درصد گوگرد سوخته شده = ۳٪، محاسبه شده توسط FACT)

از آنجاکه به دلیل دمای بالا امکان اندازه‌گیری گازها بصورت پیوسته از داخل کوره ممکن نبود، اندازه‌گیری از محل ورودی گازهای هر دو کوره به دودکش انجام شد. در جدول ۷ حجم گازهای خروجی و درجه حرارت دودکش ذکر شده است.

جدول ۴. ورودیهای کوره ریورب در حالت ترکیبی

کسالتزه (ton/day)	اکسیژن (Nm ³ /hr)	گاز طبیعی (Nm ³ /hr)	سوخت مازوت (kg/hr)	کل شارژ (ton/day)	سنگ آهک (ton/day)
627.5	2800	2030	3220	750	71

استفاده از مشعل‌های اکسی‌فیول به دلیل آنکه در این نوع مشعل‌ها از اکسیژن خالص به جای هوا استفاده می‌شود باعث می‌شود، حجم گازهای خروجی از کوره به میزان ۱۱ درصد کاهش یابد. در مرحله بعد جهت بررسی و مقایسه شرایط واقعی کوره با محاسبات انجام شده در شرایط واقعی، به مدت پنج روز گازهای خروجی کوره آنالیز شد.

جدول ۵. ورودیهای کوره ریورب در حالت مازوت سوز

کسالتزه (ton/day)	اکسیژن (Nm ³ /hr)	گاز طبیعی (Nm ³ /hr)	سوخت مازوت (kg/hr)	کل شارژ (ton/day)	سنگ آهک (ton/day)
627.5	-	-	4950	750	71

جدول ۶. پتانسیل جزئی اکسیژن در اتمسفر کوره به ازاء درصدهای مختلف هوای احتراقی اضافی (محاسبه شده توسط FACT)

	در صد سوختن گوگرد	-Log P _{O2}			
		در صد هوای اضافی			
		0	10	15	20
سوخت ترکیبی	18	8.3704	2.3319	1.9272	1.7326
	20	8.3754	2.3356	1.9281	1.7329
	23	8.3806	2.3411	1.9295	1.7334
	25	8.3835	2.3347	1.9304	1.7337
	30	8.3889	2.3535	1.9327	1.7344
مازوت سوز	18	8.7706	3.076	2.059	1.794
	20	8.7614	3.0764	2.0592	1.7939
	23	8.7481	3.0756	2.0587	1.7935
	25	8.7395	3.0752	2.0585	1.7932
	30	8.7188	3.074	2.0578	1.7925

شد. این دستگاه‌ها بصورت پیوسته گاز را آنالیز کرده و برحسب زمان ثبت می‌کردند.

اندازه‌گیری و آنالیز عناصر موجود در مات، سرباره و کنسانتره در آزمایشگاه کارخانه مس سرچشمه و با استفاده از دستگاه XRF انجام گرفت. در نهایت برای مدت نود روز شرایط دو نوع کوره (مازوت سوز و ترکیبی) با هم مقایسه شد. نتایج حاصل در شکل‌های ۱۰-۶ ارائه شده است.

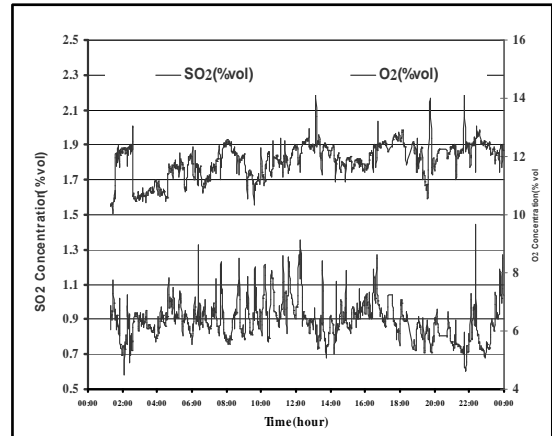
۳. وسایل و روشهای اندازه‌گیری

مقدار مگنتیت سرباره با استفاده از دستگاه SATMAGAN موجود در کارخانه سرچشمه اندازه‌گیری شد. گازهای خروجی از کوره از طریق یک پروب و شلنگ نسوز به مجموعه دستگاه‌های آنالیزاتور منتقل و ثبت گردید.

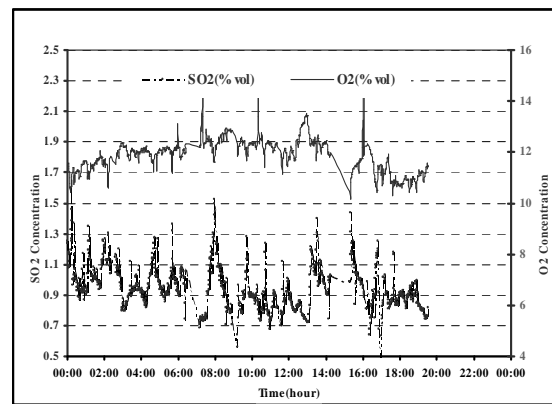
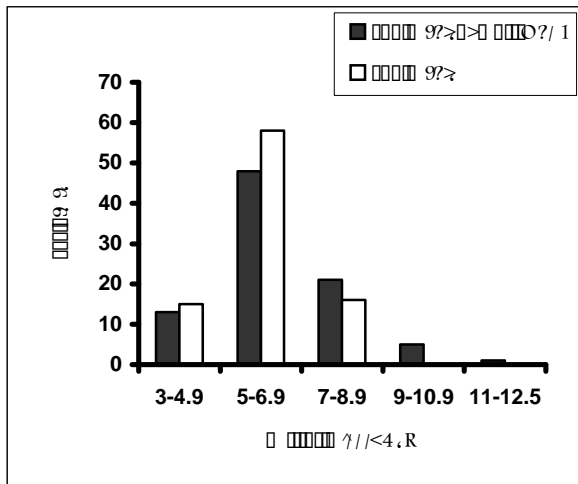
اندازه‌گیری گاز SO₂ با دستگاه HORIBA مدل VIA-510 و اندازه‌گیری گاز O₂ با دستگاه HORIBA مدل MPA-510 انجام

جدول ۸. میانگین مقدار SO₂ و O₂ در طول زمان اندازه گیری

Date	Average Concentration(% vol) of SO ₂				Average Concentration (% vol) of O ₂			
	Time Period				Time Period			
	0-8	8-16	16-24	0-24	0-8	8-16	16-24	0-24
82/10/4	1.01	0.95	0.86	0.95	11.88	11.98	10.95	11.88
82/10/5	0.89	0.92	0.86	0.89	11.31	11.69	12.22	11.85
82/10/6	0.87	0.85	0.88	0.87	10.96	11.34	11.71	11.34
82/10/7	0.92	0.86	0.87	0.88	11.66	12.13	12.06	11.95
82/10/8	0.88	0.96	...	0.92	12.14	11.95	...	12.05
Average	0.91	0.91	0.87	0.90	11.59	11.82	11.74	11.81

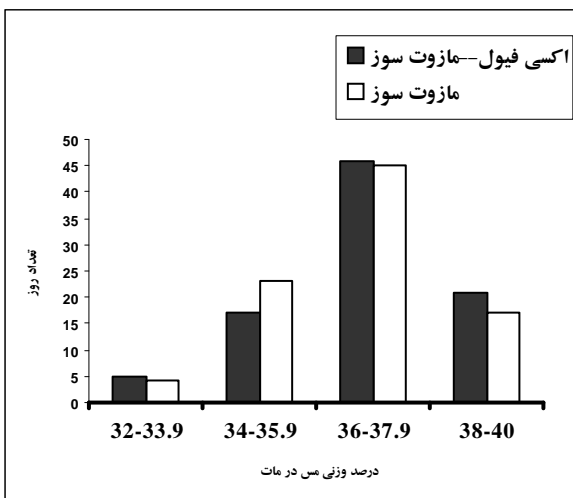


شکل ۴. غلظت O₂ و SO₂ در گاز خروجی کوره ها (۸۲/۱۰/۴)



شکل ۵. غلظت O₂ و SO₂ در گاز خروجی کوره ها (۸۲/۱۰/۵)

شکل ۶- تغییرات درصد وزنی مگنتیت سرباره در دو کوره مازوت سوز و ترکیبی



شکل ۷. تغییرات عیار مات در دو کوره مازوت سوز و ترکیبی

جدول ۷. نتایج اندازه گیری حجم گازهای خروجی از کوره ها

Date	Stack Temperature K	Volume Flow Rate at Standard Condition(Nm ³ /hr)
82/10/04	550	464356
82/10/05	563	440730
82/10/06	554	368975
82/10/07	547	429697
82/10/08	553	447972
Total Average	553	430346

۴. تحلیل نتایج

جدول ۶ نشان می‌دهد که با افزایش حجم هوای اضافی مصرفی، پتانسیل اکسیژن نیز افزایش می‌یابد. در صورتی که بیشتر از ۱۵ درصد هوای اضافی استفاده شود، پتانسیل اکسیژن در دو نوع کوره ترکیبی و مازوت سوز به هم نزدیک شده و تفاوت چندانی بین آنها مشاهده نمی‌شود. زیرا که اکسیژن موجود در هوای اضافی تا حد خاصی برای سوزاندن گوگرد مصرف می‌شود.

از این حد بیشتر به دلیل نوع و روش ذوب ویژه کوره‌های ریورب که تماس مستقیم گاز با کنسانتره به طور کامل وجود ندارد، اکسیژن اضافی پس از انجام کلیه واکنش‌های محتمل وارد گاز می‌شود و باعث بالا رفتن پتانسیل جزئی اکسیژن در اتمسفر می‌شود، که در هر دو کوره نیز این عامل مشاهده می‌شود.

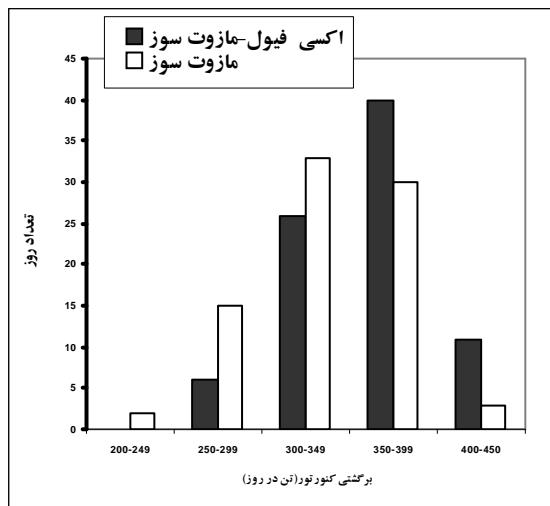
این نتیجه حاصل می‌شود که چنانچه حجم هوای اضافی ورودی به کوره زیاد باشد عملاً در حالت کلی و نه موضعی، پتانسیل اکسیژن در دو کوره تفاوت چندانی نخواهد داشت.

چنانکه در شکل ۷ مشاهده می‌شود عیار مات در هر دو کوره با نوسانات و تغییرات همراه است. که دلیل آن تغییرات لحظه‌ای و عملی داخل کوره، شرایط احتراق، ترکیب مواد مصرفی و عوامل متغیر لحظه‌ای است که در شرایط صنعتی اعمالی بر کوره، با توجه به حجم بالای مواد ورودی به آن رخ می‌دهد.

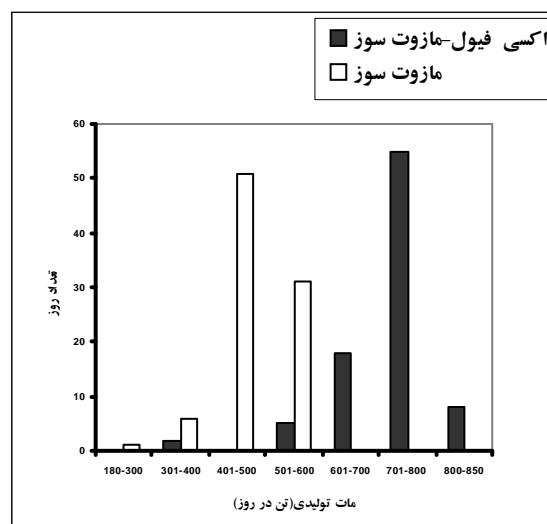
اما در حالت کلی تغییر نوع مشعل‌های کوره از حالت مازوت سوز به ترکیبی تاثیر قابل توجهی بر عیار مات نداشته است. علت این امر را می‌توان محدودیتهای موجود به دلیل شرایط ترمودینامیکی و نیز شرایط ویژه ذوب در این نوع کوره‌ها (کوره‌های ریورب) دانست. دلیل عدم تغییر عیار مات، شرایط ویژه ذوبی در این نوع کوره‌ها می‌باشد. در این کوره‌ها برخلاف کوره‌های تشعشعی، ارتباط مستقیم بین اکسیژن و کنسانتره وجود نداشته و شرایط اکسیداسیون مستقیم شارژ برقرار نمی‌باشد.

در این کوره‌ها مات از ذوب تپه‌های شارژ داخل کوره و از طریق مشعل‌ها و انعکاس حرارت آنها از سقف اتفاق می‌افتد. لذا حتی با تغییر نوع مشعل‌ها از مازوت سوز به ترکیبی اگر چه سرعت ذوب دهی کوره بالا می‌رود، اما چون نوع کوره و روش ذوب تغییری نکرده است و ارتباط مستقیم بین کنسانتره و اکسیژن برقرار نشده است، تغییرات عیار مات مشاهده نمی‌شود. اما بدلیل تغییر سوخت و شرایط احتراق سرعت ذوب و دمای تولید افزایش می‌یابد.

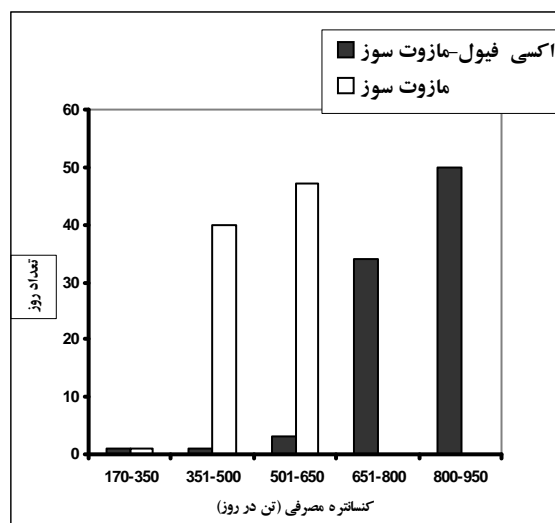
چنانکه ذکر گردید تغییر نوع مشعل‌ها بر عیار مات تاثیر قابل توجهی ندارد. اما سرعت ذوب را در کوره‌ها بالا برده است. چنانکه در شکل‌های ۸-۱۰ مشاهده می‌شود میزان مصرف سرباره برگشتی کنورتورها، میزان مصرف کنسانتره و نیز میزان مات تولیدی در کوره ترکیبی بیشتر از کوره مازوت سوز بوده است. دلیل این امر چنانکه قبلاً نیز گفته شد سرعت ذوب بالاتر مشعل‌های اکسی فیول به دلیل استفاده از اکسیژن خالص و تولید دمای بالاتر می‌باشد.



شکل ۸. میزان مصرف سرباره برگشتی (تن در روز) در دو کوره مازوت سوز و ترکیبی



شکل ۹. میزان تولید مات (تن در روز) در دو کوره مازوت سوز و ترکیبی



شکل ۱۰. میزان کنسانتره مصرفی (تن در روز) در دو کوره مازوت سوز و ترکیبی

جدول ۱۰. ترکیب گاز خروجی از کوره‌ها، محاسبه شده با FACT، با فرض آنکه هوای اضافی وارد کوره نشود و با فرض آنکه ۲/۸ برابر هوای مورد نیاز وارد کوره شود.

ترکیب	بدون هوای اضافی (%)	با ۲/۸ برابر هوای اضافی (%)
SO ₂ %	2.78	0.89
O ₂ %	0.227×10 ⁻⁶	13.8
CO ₂ %	11.07	3.7
H ₂ O%	14.24	4.5
N ₂ %	69.35	76.85
%CO	1.61	0.69×10 ⁻⁴
Total gas (Nm ³ /hr)	115406	395110

اندازه‌گیری‌های انجام شده، حجم بالایی از گاز خروجی را نشان می‌داد. علاوه بر آن درصد اکسیژن در گاز خروجی نیز بسیار بالاتر از مقادیر مورد انتظار بود.

با استفاده از برنامه نوشته شده در نرم افزار Excell برای حالت احتراق کامل و با دادن مقادیر مختلف درصد هوای اضافی، پیش‌بینی شد که حدود ۳ برابر حجم هوای احتراقی لازم، هوا وارد کوره می‌شود. برای بررسی صحت این فرضیه بار دیگر ورودی‌های همان روز کوره ولی با فرض اینکه حدود ۲/۸ برابر هوای احتراقی، هوا وارد کوره‌ها شود، به نرم افزار FACT داده شد. ورودی کوره‌ها مطابق جدول ۹ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از محاسبه در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

این محاسبه حجم گازهای خروجی را حدود ۴۰۰ هزار متر مکعب برآورد کرد که عددی مشابه اندازه‌گیری‌های عملی انجام شده بود و نشان داد که در حدود ۲/۸ برابر حجم هوای احتراقی لازم، هوای اضافی وارد کوره می‌شود. همچنین این محاسبه درصد SO₂ را ۰/۸۹ درصد نشان داد که با اندازه‌گیری‌های عملی انجام شده (جدول ۸) نیز مطابقت داشت و نشان دهنده درست بودن فرض مذکور بود.

اما نتیجه مهمی که از بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های فوق مشخص شد این بود که اتمسفر کوره در موقعیت کاملاً اکسیدی قرار دارد. براساس مطالعات و منابع موجود چنانچه پتانسیل اکسیژن در داخل کوره به ۱۰^{-۷} افزایش یابد و یا درصد اکسیژن در گاز خروجی بیشتر از ۱ درصد باشد شرایط برای رسوب مگنتیت فراهم می‌باشد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها حاکی از این مطلب است که اتمسفر هر دو کوره در شرایط اکسیدی می‌باشد و البته در کوره ریورب شماره ۲ به دلیل استفاده از مشعل‌های اکسی فیول و ذوب موضعی پتانسیل اکسیژن بالاتر می‌باشد و احتمال تشکیل مگنتیت و رسوب در منطقه زیر مشعل‌ها به دلیل فوق و نیز به دلیل افزایش میزان استفاده از برگشتی کنورتور در این کوره بالاتر است که میزان رشد

میزان مگنتیت سرباره معرف خوبی از شرایط اتمسفری کوره است. چنانکه در شکل ۶ میزان مگنتیت در کوره تغییر چندانی نکرده است و در تعداد روزهای کمی درصد مگنتیت سرباره ترکیبی بالاتر بوده است.

دلیل این امر سرعت ذوب دهی بالاتر این کوره‌ها است که باعث افزایش مقدار مصرف سرباره برگشتی کنورتور در این کوره‌ها نیز می‌شود. (شکل ۶) از آنجا که این سرباره دارای درصد بالایی از مگنتیت (تا حدود ۲۷ درصد) است، لذا مگنتیت بیشتری وارد کوره شده و باعث رشد سریعتر کف و بالا آمدن آن می‌شود.

شرایط عملیاتی کوره‌ها از لحاظ وضعیت احتراق، رشد کف و میزان مگنتیت بالای مات و سرباره نشان‌دهنده این مطلب بود که هوای اضافی زیادی وارد کوره می‌شود.

چنانکه در حین انجام آزمایش‌ها و بررسی شرایط صنعتی کوره‌ها، گاه دمش هوا از طریق نازل‌های مشعل‌های مازوت سوز قطع می‌شد و کوره بدون هیچگونه اختلالی به کار خود ادامه می‌داد.

این نشان‌دهنده ورود هوا از طریق منافذ کوره‌ها است. برای بررسی دقیقتر برای مدت پنج روز از گاز خروجی کوره‌ها بصورت پیوسته نمونه‌برداری انجام گرفت که نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. چنانکه دیده می‌شود در طول زمان نمونه‌گیری برای مدت پنج روز غلظت SO₂ کم و درحد ۱ درصد است.

در حالیکه غلظت اکسیژن بسیار بالایی در گازهای خروجی مشاهده می‌شود. این حجم بالای اکسیژن موید این مطلب است که مقدار قابل توجهی هوای اضافی وارد کوره می‌شود.

با اندازه‌گیری حجم گازهای خروجی از کوره (جدول ۷) مشخص شد که حجم گازهای خروجی نیز نسبت به حالت پیش‌بینی شده بسیار بالاتر می‌باشد و در حدود ۴۰۰ هزار متر مکعب می‌باشد که موید همان مطلب فوق یعنی ورود و مکش بالای هوا به داخل کوره می‌باشد.

برای بررسی دقیق‌تر ورودی یک روز کوره مطابق با جدول ۹ به نرم‌افزار FACT داده شد و حجم گاز خروجی با این فرض که هوای اضافی وارد کوره نشود محاسبه گردید که نتایج در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۹. مجموع مواد ورودی به کوره های ریورب

مواد	کلسانتره ton/day	آهک ton/day	کل شارژ Ton/day	مازوت kg/hr	گاز m ³ /hr	اکسیژن m ³ /hr
۸۲/۱۰/۴	1096	39.6	1274	7600	1510	2150
۸۲/۱۰/۵	1112	48.5	1302	7500	1530	2140
۸۲/۱۰/۶	1128	38	1317	7500	1500	2100
۸۲/۱۰/۷	1054	74	1280.6	7650	1540	2100
۸۲/۱۰/۸	1082	85	1308	7550	1500	2100

[4] Elwood, E.C., Henderson, T.A., "some expolarotary experiments on the formation and control of magnetite during copper smelting operation," Trans of Instution of mining & metallurgy, vol 62, pp 52-65, 1952-53.

[5] Yannopoulos, J.C., Agarwal, J.C., "Extractive metallurgy of Copper, pyrometallurgy and electronic refining", the metallurgical society of AIME, las vegas,nevada, feb 1976.

[6] Rosenqvist, T., "Thermodynamic of Copper Smelting" proceedings of Sulfide Smelting, pp. 239-256, Canada, 1983.

[7] Sridhar, R., Toguri, G.M., Simeonov, S., "Copper Losses and Thermodynamic Consideration on Copper Smelting", Metallurgical Trans.B, pp. 97-200, 1997.

[8] Somesiri, C., Gaskell, D.R., "The Activities of Sulfide and Oxide Components and the Solubility of Copper-Iron-Sulfur-Oxygen Matts at 1300°C" Metallurgical & Materials Trans , Vol 26 B.Dec., pp.1157-1163. 1995.

[9] Simeonov, S., Sridhar, R., Toguri, J.M., "Sulfide Capacities of Fayalite: Basic Slags," Metallurgical & Materials Trans B, Vol 26 B , April, PP.325-334, 1995.

[10] Krivsky, N., Schuhmann, R., "Thermodynamics of the Cu-Fe-S System at Matte Smelting Temperature", Journal of Metals , July, pp. 981-988, 1957.

[11] Roghani, G., Takeda, Y., Itagaki, K., "Phase Equilibrium and Minor Elements Distribution between FeO_x . SiO_2 . MgO Based Slag and Cu_2S - FeS Matte at 1573K under High Partial Pressure of SO_2 ", Metallurgical & Materials Trans. Vol 31B, Aug, pp. 705-715, 2000.

[12] Diaz, L.S., "Sarcheshmeh Copper Project Smelter Calculation", The Ralph M.Parsons Comoan, USA, 1973.

بیشتر کف در کوره شماره ۲ مس سرچشمه نیز موید این مطلب است.

۵. نتیجه گیری

۱- محاسبات FACT نشان داد که اکسی فیول کردن کوره‌های ریورب باعث کاهش حجم گازهای خروجی بمیزان ۱۱ درصد می‌شود و در نتیجه آن درصد SO_2 در گاز خروجی چنین کوره‌هایی افزایش می‌یابد.

۲- اکسی فیول کردن کوره‌های ریورب باعث بالا رفتن توان ذوب‌دهی و افزایش تولید روزانه به میزان ۳۰-۴۰ درصد می‌شود.

۳- پتانسیل اکسیژن اندازه‌گیری شده در کوره‌های ریورب مس سرچشمه بسیار بالاتر از حد تعادلی است. (درصد اکسیژن در گاز خروجی به ۱۲ درصد رسیده است).

۴- محاسبات نشان می‌دهد که کوره‌ها بطور متوسط با ۲۸۰ درصد هوای اضافه کار می‌کنند.

۵- محاسبات با نرم افزار FACT نشان می‌دهد چنانچه کوره ریورب با ۲۸۰ درصد هوای اضافه کار کند، باید درصد SO_2 آن در دمای $1250^{\circ}C$ معادل ۰/۸۹ درصد باشد که با درصد SO_2 اندازه‌گیری شده یعنی ۰/۸۹ هم‌مانگی دارد.

۶- اندازه‌گیری‌ها نشان داد که تغییر کوره از حالت مازوت سوز به ترکیبی تاثیر چندانی بر عیار مات نداشته است.

۷- اندازه‌گیری‌ها نشان داد اگر چه اتمسفر کوره نقش ویژه‌ای در تشکیل مگنتیت دارد، اما با تغییر نوع مشعل‌های کوره مس سرچشمه به دلیل حجم هوای اضافی زیادی که وارد این کوره‌ها می‌شود و نیز در مقایسه با حجم بالای مگنتیتی که از طریق سرباره کنورتور وارد کوره می‌شود، تغییر نوع مشعل‌ها، از اهمیت کمتری در تشکیل مگنتیت برخوردار است و به دلیل بالا رفتن سرعت ذوب و استفاده بیشتر از مگنتیت برگشتی رشد کف با سرعت بیشتری انجام می‌شود.

۶. تقدیر و تشکر

از حمایت‌های مالی مجتمع مس سرچشمه که در انجام این پروژه ما را یاری نمودند تقدیر و تشکر می‌گردد.

مراجع

[1] Biswass, A., Davenport, W. G., "Extractive metallurgy of copper" 2nd Edition, pergamon press, 1980.

[2] Gorje, D.B., Jaylor, J.C., "Copper updating-an update", the metallurgical society of A.I.M.E, Dalas.Texas, pp 143-163,1982.

[3] Mossman, H.W., "Magnetite in the Hurley Copper Smelter", Journal of Metals, pp. 1182-190. Sept,1959.