

الحَمْدُ لِلَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مواد و متالورژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تاثیر ناخالصی ها بر سینتیک احیای هماتیت توسط مواد فرار زغال سنگ

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد (گرایش استخراج فلزات)

اساتید راهنما:

دکتر جلیل وحدتی خاکی

دکتر ابوالفضل باباخانی

تحقیق و نگارش:

حسین یآوری مهربانی

تابستان ۱۳۹۱

اظهار نامه

اینجانب حسین یآوری مهربانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پایان نامه: "بررسی تاثیر ناخالصی با برسیسک احیای هایت توسط مواد فرار زغال سنگ"، تحت راهنمایی آقایان دکتر جلیل وحدتی خانی و دکتر ابوالفضل باباخانی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه فردوسی مشهد و یا Ferdowsi University of Mashhad به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر گردد.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم بہ ہمدی ہمدستان...

و تقدیم بہ خانوادہ ام...

پاسکزاری:

بدین وسیله بر خود لازم می‌ینم از راهنمایی‌های اساتید محترم راهنا، آقایان دکتر
جلیل وحدتی‌خاکی و دکتر ابوالفضل باباخانی‌قردانی می‌نایم.

همچنین از کمک‌های راهکشی آقایان محمد حسین همتی، منصور زارع و خانم عاطفه
سکینی‌کمال شکر ادارم. در پایان از زحمات جناب آقای فریدونی مسؤل
محترم آزمایشگاه عملیات حرارتی قردانی می‌نایم.

چکیده

در این پژوهش اثر چهار ناخالصی Al_2O_3 ، CaO ، MgO ، SiO_2 بر فرایند احیا هماتیت توسط مواد فرار بررسی گردید. داده های به دست آمده از آزمایشات نشان داد که احیای هماتیت خالص توسط مکانیسم واکنش فصل مشترک کنترل می شود. در مورد اکسید سیلیسیم و منیزیم نیز شرایط مشابهی حاکم است. سیلیس به دلیل تشکیل فاز پایدار فیالیت حین پخت باعث کاهش نرخ احیا گردید. افزودن اکسید منیزیم به میزان ۱٪ موجب بهبود شرایط احیا گردید اما افزایش مقدار آن به دلیل تشکیل فاز پایدار مگنزو وستیت موجب کاهش سرعت احیا گردید. افزودن آهک موجب انحراف مکانیسم کنترلی واکنش از حالت فصل مشترکی می شود. بهترین نتیجه در این حالت مربوط به ۳٪ آهک بود و با افزایش مقدار آن به دلیل تشکیل فازهای پایدار نرخ احیا کاهش یافت. اکسید آلومنیوم در دو دمای ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه موجب کاهش سرعت احیا به دلیل تشکیل اسپینل هرساینیت بر روی وستیت گردید. در دمای ۹۰۰ به دلیل ایجاد ترک در ساختار ذرات اکسید آهن سرعت احیا افزایش یافت.

کلمات کلیدی: هماتیت، احیا، ناخالصی، مواد فرار، سینتیک شیمیایی، زغال سنگ

فهرست مطالب

۱	چکیده
۲	فصل اول
۳	۱-۱- مقدمه
۶	۲-۱- منابع اکسید آهن
۷	۳-۱- منابع زغال سنگ کک نشو
۸	فصل دوم
۹	۱-۲- احیاء اکسیدهای آهن از جنبه ترمودینامیکی
۱۲	۲-۲- عوامل احیا کننده اکسیدهای آهن
۱۳	۱-۲-۲- احیاء با گاز CO
۱۵	۱-۱-۲-۲- واکنش بودوارد
۱۷	۲-۲-۲- احیاء با گاز H _۲
۲۱	۳-۲- بررسی سینتیک فرایند احیای مستقیم
۲۱	۱-۳-۲- مکانیسم های کنترل سرعت در فرایند احیای توسط مواد فرار زغال سنگ
۲۳	۱-۱-۳-۲- جوانه زایی
۲۵	۲-۱-۳-۲- سینتیک شیمیایی
۳۱	۳-۱-۳-۲- انتقال جرم
۳۳	۴-۲- زغال سنگ
۳۳	۱-۴-۲- ترکیب زغالسنگ
۳۵	۲-۴-۲- مواد فرار زغالسنگ
۳۷	۵-۲- نقش مواد فرار زغال سنگ در احیای اکسیدهای آهن

فصل سوم ۳۹

۱-۳- مواد آزمایش ۴۱

۱-۱-۳- اکسید آهن (هماتیت) ۴۱

۲-۱-۳- زغال سنگ ۴۱

۳-۲-۱-۳- محاسبه درصد خاکستر ۴۳

۴-۱-۳- اکسید آلومینوم ۴۴

۵-۱-۳- ناخالصی های اضافه شده به اکسید آهن ۴۴

۲-۳- اضافه کردن ناخالصی در اکسید آهن ۴۴

۳-۳- احیای چندلای ای ۴۵

۴-۳- محاسبه درصد احیا ۴۷

فصل چهارم ۴۹

۱-۴- بررسی فرایند احیاء نمونه های خالص در دماهای گوناگون ۵۰

۲-۴- بررسی سینتیکی احیاء هماتیت خالص توسط مواد فرار زغال ۵۲

۳-۴- اثر افزودن اکسید منیزیم (MgO) بر احیا هماتیت خالص توسط مواد فرار زغال ۵۷

۴-۴- اثر افزودن اکسید کلسیم (CaO) بر احیا هماتیت خالص توسط مواد فرار زغال ۶۴

۵-۴- اثر افزودن اکسید سیلیسیم (SiO₂) بر احیا هماتیت خالص توسط مواد فرار زغال ۷۱

۶-۴- اثر افزودن اکسید آلومینیم (Al₂O₃) بر احیا هماتیت خالص توسط مواد فرار زغال ۷۷

فصل پنجم ۸۳

۱-۵- نتیجه گیری ۸۴

۲-۵- پیشنهادات ۸۶

٨٧ فصل ششم

٨٨ منابع

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: ترکیب شیمیایی زغال مطلوب برای استفاده در فرایند های ذوب احیایی ۵
- جدول ۱-۲: مقایسه بهره شیمیایی احیا و ستیت به آهن در دماهای گوناگون با گاز هیدروژن و منواکسید کربن ۲۰
- جدول ۲-۲: مکانیسم های احتمالی کنترل کننده سرعت در فرایند احیا ۲۱
- جدول ۳-۲: مدل های ریاضی پیشنهادی برای سینتیک واکنش ۲۸
- جدول ۴-۲: انرژی فعالسازی احیای هماتیت ۲۹
- جدول ۵-۲: مقادیر گزارش شده انرژی فعالسازی برای احیای هماتیت ۳۱
- جدول ۶-۲: اجزای مواد فرار برای انواع مختلف زغالسنگ (کربن ثابت: ۵۶/۵ درصد وزنی، خاکستر: ۴ درصد وزنی) ۳۵
- جدول ۱-۳: ترکیب شیمیایی و اندازه دانه پودر هماتیت ۳۹
- جدول ۲-۲: اندازه دانه و آنالیز تقریبی زغالسنگ ۴۱
- جدول ۳-۲: درصدهای گوناگون ناخالصی ۴۲
- جدول ۱-۴: مقادیر انرژی فعال سازی احیای هماتیت حاوی ناخالصی MgO ۶۱
- جدول ۲-۴: مقادیر انرژی فعال سازی احیای هماتیت حاوی ناخالصی CaO ۶۸
- جدول ۲-۴: مقادیر انرژی فعال سازی احیای هماتیت حاوی ناخالصی SiO₂ ۷۴

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲: نمودار فازی آهن و اکسیدهای آن همراه با خطوط هم فشار اکسیژن در دماهای مختلف ۱۰
- شکل ۲-۲: اثر تغییرات اکتیویته بر پتانسیل اکسیژن برای اکسیدهای آهن و عامل احیا کننده ۱۲
- شکل ۳-۲: نمودار تعادلی سیستم آهن-کربن-اکسیژن ۱۵
- شکل ۴-۲: تعادل بین اجزای واکنش بودوارد با تغییرات دما و فشار ۱۷
- شکل ۵-۲: نمودار تعادلی سیستم آهن-هیدروژن-اکسیژن ۱۹
- شکل ۶-۲: نمودارهای تعادلی سیستم های آهن-کربن-اکسیژن و آهن-هیدروژن-اکسیژن ۲۰
- شکل ۶-۲: نمونه ای از نتایج آزمون TGA احیای هماتیت در مراحل اولیه ۲۵
- شکل ۷-۲: احیای جهت دار استوانه‌ای هماتیته (بالا) و ستون پودر فشرده (پایین) ۲۷
- شکل ۸-۲: شمایی از انتقال جرم در لایه‌ی مرزی گاز ۳۲
- شکل ۹-۲: نمایش انتقال حرارت و اجزای یک المان زغال سنگ در حین فرارزدایی ۳۴
- شکل ۹-۲: مواد فرار زغال سنگ در دماهای مختلف ۳۶
- شکل ۱۰-۲: سیستم احیای چندلایه‌ای برای گندله های کامپوزیتی زغالسنگ اکسید آهن ۳۶
- شکل ۱۱-۲: الگوی تفرق اشعه X نمونه های احیا شده به صورت جزئی ۳۶
- شکل ۱-۳: لایه‌های مواد در بوته اصلی و بوته شاهد ۴۴
- شکل ۲-۳: شماتیک سیستم موزد استفاده برای احیا و وزن سنجی همزمان ۴۴
- شکل ۱-۴: اثر دما و زمان بر احیاء هماتیت خالص ۴۸
- شکل ۲-۴: میزان خروج مواد فرار و محصولات ناشی از تجزیه حرارتی زغال سنگ در بوته شاهد ۴۹
- شکل ۳-۴: نمودار آرنیوسی برای احیای هماتیت توسط مواد فرار زغال تا مرحله مگنتیت ۵۱
- شکل ۴-۴: احیا هماتیت در سه دمای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ که بر اساس مدل واکنش فصل مشترکی ۵۴
- شکل ۵-۴: نمودار آرنیوسی برای احیای هماتیت توسط مواد فرار زغال برای کل فرایند ۵۴

- شکل ۴-۶: منحنی های احیا بر حسب زمان برای اکسید آهن حاوی MgO در سه دمای الف: ۷۰۰ ب: ۸۰۰ ج: ۹۰۰ درجه سانتیگراد..... ۵۶
- شکل ۴-۷: اثر افزودن MgO بر احیای هماتیت در دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد ۵۷
- شکل ۴-۸: نمودارهای سینتیکی احیا اکسید آهن با استفاده از مدل $g(X)=1-(1-X)^{0.5}$ برای نمونه خالص و حاوی ناخالصی MgO برای سه دمای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ درجه ۶۰
- شکل ۴-۹: نمودار آرنیوسی برای ناخالصی MgO..... ۶۱
- شکل ۴-۱۰: منحنی های احیا بر حسب زمان برای اکسید آهن حاوی CaO در سه دمای الف: ۷۰۰ ب: ۸۰۰ ج: ۹۰۰ درجه سانتیگراد ۶۳
- شکل ۴-۱۱: اثر افزودن CaO بر احیای هماتیت در دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد ۶۴
- شکل ۴-۱۲: نمودارهای سینتیکی احیا اکسید آهن با استفاده از مدل $g(X)=1-(1-X)^{0.5}$ برای نمونه خالص و حاوی ناخالصی CaO برای سه دمای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ درجه ۶۷
- شکل ۴-۱۳: نمودار آرنیوسی برای ناخالصی CaO..... ۶۸
- شکل ۴-۱۳: منحنی های احیا بر حسب زمان برای اکسید آهن حاوی SiO₂ در سه دمای الف: ۷۰۰ ب: ۸۰۰ ج: ۹۰۰ درجه سانتیگراد ۷۱
- شکل ۴-۱۴: اثر افزودن CaO بر احیای هماتیت در دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد ۷۲
- شکل ۴-۱۵: نمودارهای سینتیکی احیا اکسید آهن با استفاده از مدل $g(X)=1-(1-X)^{0.5}$ برای نمونه خالص و حاوی ناخالصی SiO₂ برای سه دمای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ درجه ۷۳
- شکل ۴-۱۶: نمودار آرنیوسی برای ناخالصی SiO₂..... ۷۴
- شکل ۴-۱۷: منحنی های احیا بر حسب زمان برای اکسید آهن حاوی Al₂O₃ در سه دمای الف: ۷۰۰ ب: ۸۰۰ ج: ۹۰۰ درجه سانتیگراد ۷۶
- شکل ۴-۱۸: اثر افزودن Al₂O₃ بر احیای هماتیت در دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد ۷۷
- شکل ۴-۱۹: نمودار فازی Fe₂O₃-Al₂O₃..... ۷۸
- شکل ۴-۲۰: شماتیک مراحل مختلف احیای هماتیت حاوی Al که منجر به ترک خوردن ذرات می شود..... ۷۹

فصل اول

مقدمه

هدف از فرایندهای تولید آهن، جدا سازی آهن از دیگر کانه های موجود در سنگ آهن و در نهایت حذف اکسیژن آن می باشد. اصلی ترین راه تولید آهن، کوره های بلند می باشد که از کک متالورژیکی به عنوان عامل احیایی بهره می برند. در نظر گرفتن محدودیت منابع و قیمت بالای زغال های کک شو و همچنین مشکلات زیست محیطی واحد های تولید کک، تولید کنندگان آهن را به سمت توسعه روش های جایگزینی سوق داده که بتوانند از زغال های کک نشو نیز استفاده نمایند.

پیشی گرفتن دیگر تکنولوژی های تولید آهن و فولاد از کوره های بلند مدرن، که دارای کارایی و تولید بالایی می باشند مشکل به نظر می رسد، لذا این تکنولوژی جایگاه تثبیت شده خود را همچنان حفظ خواهد نمود. با این حال با توجه به هزینه بالای سرمایه گذاری و محدودیت ها و قوانین جدید محیط زیستی، ساخت کوره های جدیدی از این دست، در کشورهای پیشرفته متصور نیست. از همین رو انتظار می رود که روش های جایگزین تولید آهن نقش مهمی را در این صنعت بازی کنند.

روش احیا مستقیم یکی از روش های جایگزین برای تولید آهن می باشد که در قرن اخیر رشد فراوانی داشته اند. این روش به دو دسته کلی احیای مستقیم پایه گازی^۱ و احیای مستقیم پایه زغالی^۲ تقسیم بندی می شوند. در روش های احیای پایه گازی از گاز طبیعی به عنوان عامل احیا کننده استفاده می گردد و مهم ترین روش های صنعتی آن عبارتند از MIDREX و HYL که این دو روش در حال حاضر ۸۳ درصد کل آهن اسفنجی دنیا را تولید می کنند [۱]. از طرفی در روش های احیای پایه زغال از زغال سنگ به عنوان عامل احیا کننده استفاده می گردد.

¹ Gas-based Direct Reduction

² Coal-based Direct Reduction

روند رو به رشد تولید آهن اسفنجی با گاز طبیعی گرچه نه با سرعت گذشته ولی همچنان ادامه خواهد داشت. ولی آنچه مورد توجه کارشناسان قرار گرفته است محدودیت دسترسی به منابع گاز و قیمت بالای آن است. هر چند کشور ما به دلیل دارا بودن منابع گازی مشکل چندانی از این لحاظ ندارد اما محدودیت منابع گاز از یک سو و ارزش روز افزون گاز طبیعی از سوی دیگر دلایلی برای توجه به سایر روش‌های تولید آهن است. روش‌های پایه زغال از جمله روش‌هایی هستند که در سال‌های اخیر بخ صورت ویژه در دنیا مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از ویژگی‌های عمده‌ی روش‌های پایه‌زغال عدم نیاز به سرمایه‌گذاری‌های کلان است که موجب گردیده تا در کشوری مانند هند ۵۰ درصد کارخانه‌های تولید آهن با ظرفیت ۳۰۰۰۰ تن در سال و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کم به فعالیت اقتصادی بپردازند در حالی که در روش‌های پایه‌گازی ظرفیت حداقل بین ۸۰۰۰۰۰ تا ۱ میلیون تن در سال به ازای هر واحد و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری در مقایسه با پایه‌زغال بسیار بالاست.

روش‌های پایه زغال جایگزین به صورت زیر دسته بندی می شوند:

- فرایند احیا مستقیم که در آن سنگ آهن و یا دیگر اکسیدهای آهن در دمایی زیر نقطه ذوب تبدیل به آهن می شوند. محصول جامد حاصل از این فرایند آهن اسفنجی می باشد. فرایند تولید آهن اسفنجی و یا DRI بسته به نوع راکتور مورد استفاده به انواع گوناگونی همچون SL/RN، کوره دوار (Circofer®), Inmetco™/RedIron, and ITmk3®) و بستر سیال تقسیم (Fastmet®/Fastmelt®) می شوند.

- دسته دوم روش‌های ذوب احیایی (مثل Corex®, DIOS, AISI, Redsmelt®,NST, HIs melt®, Romelt) هستند که در آنها آهن مذاب تولید می گردد.

روش‌های پایه زغالی در مناطقی مطلوب تر است که :

- محدودیت تامین قراضه وجود دارد

- دسترسی کم به گاز طبیعی
- منابع مناسب زغال
- انرژی الکتریکی ارزان
- دسترسی به کانه های مناسب آهن

روش های جایگزین تولید آهن عموماً توانایی استفاده از محدوده وسیع تری از زغال ها را دارا می باشد. با این حال کارایی بهینه با استفاده از زغال هایی با خواص ویژه یه دست می آید (جدول ۱).

جدول ۱-۱: ترکیب شیمیایی زغال مطلوب برای استفاده در فرایند های ذوب احیایی [۲].

	Corex®	DIOS	AISI	Hismelt®	Romelt
Volatile matter, %	25–35	<40	<30	5–25	<20
Fixed carbon, %	55–65	58–87	>60	>60	42–48
Moisture, %	<5	4-6	<3	<10	<10
Ash, %	5–12	4–13	<15	5–15	<25
Sulphur, %	<0.5	<0.6	<0.6	<1	<1
Particle size, mm	8–40, <5% –8	<30 (Standard-DIOS)	5–30	–3	<15

هر چند هنوز بسیاری از روش های احیای مستقیم پایه زغال در دنیا به صورت کاملاً تجاری در نیامده اند اما مزیت های ویژه ای این روش ها از جمله سرعت بالای فرایند، تنوع ماده ای اولیه ای قابل استفاده در آن ها، هزینه ی سرمایه گذاری کم و منبع انرژی ارزان تر منجر به توسعه ای روزافزون این روش ها شده است. به خصوص این که زمینه ای فعالیت هایی برای ابداع روش های پاکیزه تر که صدمات زیست محیطی کمتری ایجاد می کنند در روش های پایه زغال فراهم آمده است. سهم روش های پایه زغال طی چند سال گذشته همواره در حال افزایش

بوده است به طوری که در سال ۲۰۰۹ سهم روش‌های پایه‌زغال در تولید آهن اسفنجی به حدود ۲۷ درصد تولید جهانی رسید [۳].

از جمله مزایای دیگر روش‌های پایه‌زغال امکان راه‌اندازی کارخانه در کنار معدن و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل ماده‌ی اولیه است. زیرا نیاز به فرایندهای گندله‌سازی و آماده‌سازی اولیه که هزینه‌های سرمایه‌گذاری کلانی می‌طلبد وجود ندارد.

در گذشته روش احیای مستقیم پایه‌زغال در کشور ما مورد توجه قرار نداشته است. علت این مسأله را می‌توان منابع فراوان و ارزان گاز طبیعی کشور دانست. در میان کشورهای دنیا، در سال ۲۰۰۹ هندوستان با تولید ۲۲ میلیون تن آهن اسفنجی مقام نخست تولید DRI را به خود اختصاص داد که تمامی آن به روش پایه‌زغال تولید شد و ایران نیز با ۸/۲ میلیون تن آهن اسفنجی در رتبه‌ی دوم قرار گرفت. تمام آهن اسفنجی تولیدی در ایران به روش احیای پایه‌گازی است و از این حیث رتبه‌ی نخست را در جهان داراست.

۱ ۴ منابع اکسید آهن

با توجه به شرایط تکنولوژیکی روش‌های پایه زغال مطلوب‌ترین نوع سنگ آهن در این فرایندها هماتیت با عیار ۶۰-۶۵ است. البته همان‌گونه که اشاره شد ماده‌ی اولیه بسته به فرایند می‌توان غبار یا سرباره‌ی کوره‌های فولادسازی و تولید آهن باشد. منابع سنگ آهن کشور در سه استان خراسان، یزد، سمنان و کرمان فراوان است اما برخی منابع هماتیت کشور پتانسیل استفاده در روش‌های فعلی احیای پایه‌زغال را ندارند. باید به خاطر داشت که پیش‌رفت این روش‌ها دامنه‌ی ماده‌ی اولیه‌ی قابل استفاده را افزایش خواهد داد. در روش‌های فعلی از هماتیت مخلوط با مگنتیت نیز استفاده می‌شود.

۴۱ منابع زغال سنگ کک نشو

منابع عمده‌ی زغال سنگ کشور در سه منطقه‌ی کرمان، البرز و طبس واقع است و ذخایر احتمالی زغال سنگ حرارتی ۳۰۰۰ میلیون تن برآورد شده است. امتیاز عمده‌ی به‌کارگیری احیای مستقیم پایه‌زغال در کشور امکان بالقوه‌ی دسترسی به منابع سنگ آهن و زغال سنگ کک نشو در کشور می‌باشد که خوشبختانه در اطراف اغلب معادن سنگ آهن به فاصله‌ی ۲۰۰ کیلومتری منابع زغال سنگ نیز یافت می‌شود.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های روش احیای مستقیم پایه‌زغال، پایین بودن سرعت واکنش‌های فرایند احیاست که منجر به پایین آمدن ظرفیت تولید کارخانه‌های احیای پایه‌زغال شده است. از این رو مسأله‌ی سینتیک احیای مستقیم اکسیدهای آهن با کربن طی چهل سال گذشته مورد مطالعه و توجه فراوان محققان قرار گرفته است. در این تحقیقات تأثیر عوامل مختلفی مانند نوع اکسید آهن، منبع کربن، اندازه‌ی ذرات، نحوه و نسبت اختلاط، دما و فشار فرایند و ... بر سازوکارهای درگیر در فرایند احیا مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته و الگوهای مختلفی برای تفسیر رفتار احیای اکسیدهای آهن در شرایط مختلف ارائه شده است. مطالعه بر روی احیا با استفاده از زغال سنگ به دلیل دشواری کنترل عوامل مؤثر بر احیا از اواخر دهه‌ی هشتاد میلادی مورد توجه قرار گرفت اما این بررسی‌ها گسترش چندانی نیافت. از اوایل قرن بیست و یکم توجه به استفاده از مواد اولیه‌ی ارزان‌تر، استفاده‌ی بهینه از آن‌ها و چالش‌های زیست‌محیطی موجب گردید تا نگاه‌ها متوجه زغال سنگ و استفاده‌ی بهینه از آن و مواد فرار موجود گردد.

فصل دوم

مروری بر منابع مطالعاتی

۲) مروری بر منابع

۲-۱) احیاء اکسیدهای آهن از جنبه ترمودینامیکی

قابلیت احیاء اکسیدهای آهن بستگی به فشار اکسیژن آنها دارد. شکل ۱-۲ نمودار تعادلی اکسیدهای آهن را که در محدوده فازهای مختلف با خطوط هم فشار رسم شده است نشان می دهد. از این شکل می توان به سهولت چگونگی احیاء اکسیدهای آهن را یا اکسایش آهن و اکسیدهای آن را نتیجه گیری کرد. چنانچه اکسید آهن به صورت هماتیت باشد نخست به مگنتیت سپس به ووستیت و بالاخره ووستیت به آهن احیاء می شود. بدیهی است چنانچه نمونه به صورت مگنتیت باشد ابتدا به ووستیت و بالاخره به آهن احیاء می شود. البته همانطور که از نمودار مشاهده می شود چنانچه احیاء در دماهای کمتر از ۵۷۰ درجه سانتیگراد انجام شود، مگنتیت مستقیماً به آهن احیا شده زیرا در دماهای کمتر از ۵۷۰ درجه سانتیگراد ووستیت از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است.

بطور کلی طبق قاعده فازها، هر اکسیدی از آهن در درجه حرارت و ترکیب شیمیایی معین فشار اکسیژن

مشخصی دارد. در واکنش تعادلی زیر:



احیاء اکسید آهن یعنی جریان واکنش از راست به چپ و فقط در صورت از بین رفتن تعادل شیمیایی واکنش

امکان پذیر است. عدم تعادل به دو روش زیر انجام می شود:

الف) جدا کردن اکسیژن یا آهن از سیستم باعث به هم خوردن تعادل و پیشرفت آن در جهت تولید اکسیژن و آهن می شود.

ب) تاثیرپذیری ثابت تعادل توسط تغییر درجه حرارت و فشار کل سیستم.