

مدل سازی و شبیه سازی فرآیند کوره قوس الکتریکی

Johannes Gerhardt BEKKER .Ian Keith CRAIG and Petrus Christiaan PISTORIUS

گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه پرتوریا، ۰۰۰۲ آفریقای جنوبی

ایمیل: igbekker@starmail.com , icraig@postino.up.ac.za

دپارتمان علوم مواد و مهندسی متالورژی، دانشگاه پرتوریا، ۰۰۰۲ آفریقای جنوبی

ایمیل: pistori@postino.up.ac.za

دریافت در ۲۹ ژوئن ۱۹۹۸، پذیرش نهایی در ۱۶ سپتامبر ۱۹۹۸

مدل به دست آمده در این مقاله برای آزمایش استراتژی‌های کنترل با استفاده از متغیرهای گاز خروجی در کنترل یک کوره قوس الکتریکی در نظر گرفته شده است. همچنین اشتقاق یک مدل فضای حالت غیرخطی چند متغیره از یک فرآیند EAF مورد بحث قرار میگیرد. مفروضاتی ساخته شده است که تلاش مدلسازی را تسهیل می کند. اصول اولیه ترمودینامیک، همراه با روابط تجربی، برای استخراج معادلات مدل استفاده می شود. یک مدل فضای حالت با متغیرهای فیزیکی مانند محتوای کربن در فولاد به عنوان حالت های مدل توسعه یافته است. میزان تغییرات مانند کربن گیری نیز در نظر گرفته می شود. شرایط عملیاتی معمولی برای یک کوره مورد بحث قرار می گیرد و شرایط اولیه برای یک شبیه سازی از آن استخراج می شود. یک جدول زمانی از رویدادهای مربوط به شرایط عملیاتی برای شبیه سازی تعیین می شود. شبیه سازی با شروع شرایط اولیه انجام می شود و با خط وقایع پیش می رود. نتایج شبیه سازی نشان داده شده و از نظر هدف مدل مورد بحث قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: کوره قوس الکتریکی؛ شبیه سازی EAF، کنترل گاز خروجی؛ مدل فضا-حالت.

۱. مقدمه

تاکید بر عملکرد کوره های قوس الکتریکی (EAFS) در دهه گذشته به سمت عملکرد کارآمدتر و سازگار با محیط زیست است. به گفته جونز، افزایش بهره وری مستقیماً با افزایش استفاده از اکسیژن در EAF مرتبط است، جایی که انرژی واکنش گرمازا جایگزین مقدار زیادی از انرژی الکتریکی ورودی می شود. مزایای استفاده از گاز خروجی پس از احتراق منجر به نسبت شارژ ضایعات بالقوه بالاتر (ژولکوفسکی) و اتلاف کلی انرژی کمتر می شود.

هر دوی این روش ها فاصله زمانی بارریزی تا بارریزی را کوتاه تر می کند ، اما همچنین منجر به تقاضای بیشتر برای سیستم گاز خروجی می شود.

سیستم گاز خروجی یک EAF نقش مهمی در عملیات EAF ایفا می کند. این ماده برای استخراج و احتراق گازهای خطرناک مثل CO استفاده می شود و همچنین بر فرآیند فولادسازی تأثیر می گذارد. سرعت استخراج گاز ، تأثیر مستقیمی بر فشار

EAF دارد ، بنابراین بر تشکیل حباب های هوا و در نتیجه نیاز به انرژی فرآیند و جذب نیتروژن در فولاد تأثیر می گذارد (Lankford).

محدودیت هایی در دما و فشار مجاز گاز زائد در هنگام عبور از کیسه خانه سیستم گاز خروجی وجود دارد.

با توجه به تقاضای بیشتر سیستم های خروجی گاز موجود ، در نتیجه ی ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی ، بررسی امکان معرفی کنترل سیستم پیشرفته ی گاز خروجی ، ارزشمند است. مزیت یک سیستم کنترل موثر می تواند هزینه کمتر برای تصفیه گازهای زائد و همچنین بهبود عملکرد کلی EAF باشد. این را می توان بدون تغییرات طراحی ، با اعمال کنترل پویا زمان واقعی به دست آورد. سیستم کنترل را می توان برای کل EAF یا به عنوان یک سیستم کنترل جداگانه فقط برای سیستم گاز خروجی اجرا کرد. این کار به بررسی استفاده از متغیرهای گاز خروجی در کنترل EAF می پردازد. در مقابل ، تلاش های دیگر در کنترل EAF عمدتاً بر کنترل الکتروود متمرکز شده اند (رویتور و همکاران).

کینگ و نایمن نشان دادند که چگونه از یک شبکه عصبی برای کنترل ولتاژ و جریان الکتروود یک سیستم قوس سه فاز استفاده می شود. برای اعمال کنترل پیشرفته بر روی یک فرآیند ، یک مدل فرآیند پویا در زمان واقعی برای تقریب شرایط در EAF در طیف وسیعی از شرایط عملیاتی مورد نیاز است. در ابتدا مدل اصلی ترجیح داده می شود زیرا فقط اندازه گیری محدودی از شرایط دینامیکی در داخل EAF در دسترس است. آستین و همکاران یک مدل دو بعدی برای کوره بلند ایجاد کردند که نشان دهنده واکنش های شیمیایی و ساختارهای فیزیکی است. مدل ها و شبیه سازی های دینامیک برای همه انواع کوره ها از جمله EAF ها ، به طور فزاینده ای محبوب می شوند، زیرا مهندسی فرآیند برای بهینه سازی این فرآیندها تلاش می کنند.

مدل های تعادل جرم و انرژی در ادبیات ذکر شده اند (به KOHLE مراجعه کنید). در مقابل ، تنها ارجاعات محدودی به مدل های دینامیک EAF در ادبیات وجود دارد، زیرا بسیاری از این مدل ها تمایل به اختصاصی بودن دارند. مورالس و همکاران در حال کاربر روی یک شبیه ساز ریاضی کامل برای عملیات EAF هستند . پترسون و همکاران یک مدل دینامیک EAF بر اساس تعادل جرم و انرژی استخراج کردند. آنها نشان می دهند که نقاط اندازه گیری اصلی مورد نیاز یک مدل جامع چیست.

سریدار و لاهیری مدل هایی را برای پیش بینی توزیع دمای EAF توسعه دادند. مقالاتی که بر جریان گاز EAF تمرکز دارند عبارتند از گاردین و همکاران که جریان گاز را در بالای حمام فولادی مذاب مطالعه می کنند و ژولکوفسکی و همکارانش که گاز خروجی پس از احتراق در کشتی را مطالعه می کنند. فریحان مطالعه ای در مورد مزایای هم زدن گاز در EAF برای بررسی واکنش بین FeO در سرباره و کربن در مذاب فولاد انجام داد. سرما و همکاران ، نتایج تجربی کاهش FeO در سرباره ذوب توسط گرافیت را ارائه کردند.

تأکید این کار دستیابی به مدلی است که برای شبیه سازی سیستم کنترل حلقه بسته و تأیید کنترل کننده اولیه مناسب باشد. بنابراین ، مدل نیاز به تقریب فرآیند فیزیکی از نظر پاسخ دینامیکی آن به دلیل تغییرات ورودی کنترل و اختلال دارد. هدف ، بدست آوردن همان نوع پاسخ با همان ترتیب شدت است که در یک EAF صنعتی یافت می شود.

بخش ۲ به شرح فرآیند می پردازد. بخش ۳ تمام فرضیات و ساده سازی ها را ارائه می دهد. بخش ۴ به تفسیر مدل غیر خطی می پردازد. بخش های فرعی ۴۰۱ تا ۴۰۱۵ مشتقات معادلات حالت و معادلات کمکی را ارائه می دهند. بخش ۵ شرایط اولیه

معمولی، جدول زمانی رویدادها و شرایط عملیاتی برای EAF انتخاب شده برای شبیه سازی در این مقاله را مورد بحث قرار می دهد. بخش ۶ نتایج شبیه سازی را مورد بحث قرار می دهد.

۲. شرح فرآیند

EAF ها معمولاً از منبع برق سه فاز برای تولید فولاد با ذوب ضایعات استفاده می کنند. در جایی که فلز داغ (با کربن و سیلیکون بالا) همراه با ضایع به EAF شارژ می شود (که در یک تولید کننده فولاد در آفریقای جنوبی امتحان شده است) دمیدن اکسیژن می تواند غلظت کربن و سیلیکون را کاهش دهد و منبع انرژی اضافی ایجاد کند. اکسیژن معمولاً از طریق یک یا چند لانس جانبی به داخل فلز دمیده می شود.

هنگامی که EAF در حال عملیات است سقف بسته می شود و گاز خروجی از طریق داکت سقف استخراج می شود. سیستم گاز خروجی از یک فن کششی استفاده می کند تا گاز خارج شده را از یک سیستم فیلتراسیون کیسه خانه عبور دهد. شکل ۱ یک توصیف شماتیک را ارائه می دهد. برای سادگی، یک فن معادل بدون کیسه خانه و فن استخراج در شکل ۱ نشان داده شده است. از آنجائیکه گازهای خارج شده نباید گازهای قابل احتراق را به داخل کیسه حمل کند، هوا از طریق شکاف لغزشی برای احتراق CO وارد می شود. اندازه ی شکاف لغزشی از ۰/۱ تا ۰/۴ متر متغیر است. در پایان فرآیند ساخت مقدار فولاد، سرباره از طریق درب سرباره حذف می شود و فولاد از طریق مجرای تخلیه، خارج می گردد.

۳. فرضیاتی برای تسهیل مدل سازی

مفروضات زیر تلاش مدل سازی را تسهیل می کنند و امکان ساده سازی را فراهم می سازند.

- (۱) فلز مایع، سرباره مذاب و فاز گاز همگی در یک دما هستند. این عناصر گروه سیال را تشکیل می دهند. جرم عناصر فاز گازی نسبت به سایر سیالات کوچک است.
- (۲) جامد در همان دمای ضایعات جامد است. این عناصر گروه جامد را تشکیل می دهند. سرعت ذوب گروه جامد و سرعت افزایش دمای گروه جامد (X_{13}) متناسب با تفاوت بین دمای گروه سیال (X_{12}) و دمای گروه جامد است.

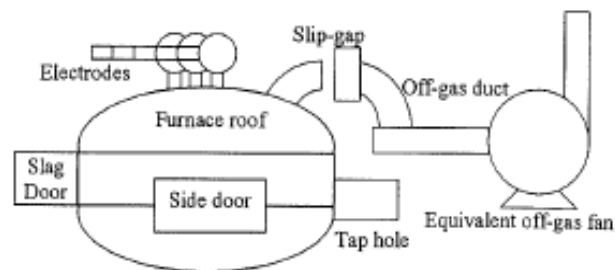


Fig. 1. Process description.

- (۳) از Etterich و plockinger (ص ۸۹ شکل ۷) مشاهده می شود که ۴۸٪ از گرمای جریان قوس به وسیله ی جا به جایی و ۱۷٪ از طریق تشعشع به مذاب فولاد جریان می یابد. انتقال حرارت از قوس ها به ضایعات ممکن است وجود داشته باشد، اما

از آنجایی که بیشترین بخش گرما به مذاب فولاد جریان می یابد ، راحت تر است که فرض کرد که تمام انتقال حرارت از قوس ها به فلز مایع است.

(۴) ضریب تقسیم توان ، انتقال حرارت از گروه سیال به گروه سیال به گروه جامد را توصیف می کند. گرمای انتقال یافته به قراضه ها می تواند برای افزایش دمای گروه جامد یا ذوب بخشی از ضایعات استفاده شود. ضریب $(X_{13}/12)$ برای سرعت ذوب ضایعات و سرباره جامد استفاده می شود ، در حالی که ضریب $(1-X_{13}/X_{12})$ برای سرعت گرمایش استفاده می شود.

(۵) شارهای اضافه شده به EAF فوراً ذوب نمی شوند ، اما در شرایط جامد و مخلوط نشده باقی می ماند تا زمانی که توسط گرمای گروه سیال ذوب شوند و بخشی از سرباره مایع را تشکیل دهند.

(۶) از آنجائیکه غلظت آهن در مذاب فولاد بسیار بیشتر از کربن یا سیلیکون است ، تمام اکسیژن دمیده شده به فولاد با آهن واکنش داده و FeO را در سرباره تشکیل می دهد.

(۷) تمامی FeO و SiO_2 که در EAF تشکیل می شوند بلافاصله در سرباره مذاب حل می شوند.

(۸) یک گاز حامل ، گرافیت را به سرباره می دهد تا محتوای Fe را کاهش دهد. گاز حامل معمولاً هوا و حاوی اکسیژن است. فرض بر این است که تمام گرافیت ها یا فوراً با FeO یا با گاز حامل در هنگام صعود به سطح واکنش می دهند . این بر این اساس است که هیچ ماده جامد کربنی در سرباره باقی نمی ماند. زمان معمول ماندن یک ذره کربن در سرباره ۱۰-۸ ثانیه است (مورالز و همکاران) .

(۹) شواهد تجربی توسط Sarma و همکاران ، سرعت واکنش FeO را متناسب با FeO در سرباره نشان می دهد.

(۱۰) DRI دارای ۹۳ درصد متالیزاسیون است و هنگامی که این DRI وارد EAF می شود ، ۹۳ درصد جرم به صورت آهن به مذاب فولاد و ۷ درصد به عنوان FeO به سرباره مایع اضافه می شود.

(۱۱) آهن موجود در DRI فوراً ذوب می شود. این بر اساس مشاهده ای است که دمای EAF را می توان با تطبیق نرخ شارژ DRI با توان الکتریکی ورودی کنترل کرد: ۳۳ کیلوگرم در دقیقه در هر مگاوات دمای ثابتی را ایجاد می کند (ماشلانکا).

به طور ضمنی DRI به طور موثر بلافاصله پس از ورود به EAF ذوب می شود ، با نیاز به گرمای نهان مرتبط که بلافاصله اثر خود را اعمال می کند.

(۱۲) ضایعات حاوی ناخالصی هایی که اکسید شوند نیست.

در عمل فولادسازی برای جلوگیری از محتوای ناخالصی بالا ، به ضایعات درجه بندی شده (Geldenhuis) برای نیازهای کم عنصر ولگرد در فولاد نیاز است.

(۱۳) مقدار متوسط (برای دمای از ۶۰۰ تا ۸۰۰ K) برای گرمای ویژه آهن برای ضایعات استفاده می شود.

$$C_p(Fe_{(S)}) = 0.039 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K}). \quad C_p(Fe_{(L)}) = 0.046 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \text{ for liquid iron.}$$

(۱۴) مواد افزودنی سرباره معمولی عبارتند از ۲/۳ آهک سوخته و ۱/۳ دولومیت (Geldenhuis) آهک سوخته حاوی ۹۷٪ CaO و ۳٪ MgO است در حالی که دولومیت حاوی ۵۷٪ CaO و ۴۳٪ MgO است (Turkdogan صفحه ی ۲۴۴-۲۰۹).

(۱۵) بخش های CaO و MgO سرباره ، توده ای می شوند و به عنوان یک متغیر حالت واحد ، با گرمای معادل همجوشی ، گرمای محلول ، جرم مولی و گرمای ویژه در نظر گرفته می شوند.

(۱۶) تمام عناصر وارد شده به EAF تا دمای مربوطه گرم می شوند. واکنشگرها قبل از شرکت در واکنش ها تا 1680 K گرم می شوند. همه ی واکنش ها در دمای 1680 K (دمای متوسط) انجام می شود تا از استفاده از دما به عنوان متغیر در قدرت واکنش شیمیایی جلوگیری شود.

(۱۷) تمام انرژی با گروه سیال مبادله می شود. گروه جامد از گروه سیال انرژی دریافت می کند. این بدان معنی است که نیروی قوس الکتریکی ابتدا فلز مایع را گرم می کند و سپس فلز مایع گرم می شود و سایر اجزای EAF را ذوب می کند. این یک ساده سازی راحت است.

(۱۸) تنها عناصر فاز گازی CO ، CO_2 و N_2 هستند. همه ی مقادیر O_2 هنگام ورود واکنش نشان می دهند و H_2 ناپدید گرفته می شود.

(۱۹) فشار در EAF را می توان از قانون گاز ایده آل به دست آورد.

۴. مشتق مدل غیر خطی

EAF در قالب یک فضای حالت چند ورودی ، چند خروجی (MIMO) با ۱۴ حالت توصیف شده است. دو بردار ورودی u و بردار اختلال d . مدل یک تابع برداری (f) از ۱۴ معادله دیفرانسیل معمولی (ODE) است که نرخ زمانی تغییر هر متغیر حالت را توصیف می کند. معادلات دیفرانسیل اکثرا غیر خطی هستند و بخشی از مجموعه ای هستند که شامل تمام توابع d ، u ، x است یعنی $x = f(x, u, d)$ که ابعاد آن عبارتند از :

براب جزئیات بیشتر به Bekker و همکاران مراجعه کنید. پیوست شامل فهرستی از نمادها است.

۴.۱ میزان تغییر ضایعات جامد

ذوب ضایعات شامل انتقال جرم (انتشار کربن) و انتقال گرما است. با توجه به هدف این مدل ، فرمولی که نرخ ذوب واقعی را تنها بر اساس انتقال گرما به دست می دهد قابل قبول است. نرخ تغییر ضایعات جامد (X_1) متناسب با نرخ انتقال گرما از گروه مایع به گروه جامد است که متناسب با اختلاف دما بین دو گروه است ضریب انتقال گرما $k_{ther1} = 0.4\text{ kW}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ که بسته به زمان ذوب مشاهده شده ، قابل تنظیم است. سطح تماس ، متناسب با جرم ضایعات در EAF است و یک منطقه ی خاص از $k_{area1} = 0.005\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ استفاده می شود که مربوط به ورق هایی با ضخامت 0.05 است.

ضریب توزیع برای تخصیص نیروی انتقال یافته به ذوب ضایعات ، بر خلاف نیروی انتقال یافته برای گرم کردن ضایعات ، همانطور که در این فرض وجود دارد ، استفاده می شود. ضایعاتی که در حال ذوب شدن است باید گرمای نهان همجوشی $(\lambda_{Fe} \text{ (kJ/mol)})$

و گرمای ویژه ضربدر اختلاف دما بین گروه مایع و گروه جامد را دریافت کند.

معادله نرخ ذوب ضایعات بر حسب واحد ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) در معادله (۱) داده شده است

$$\dot{x}_1 = \frac{-M_{Fe}k_{ther1}k_{area1}(x_1)(x_{12}-x_{13})(x_{13}/x_{12})}{(\lambda_{Fe} + C_p(Fe_{(S)})(x_{12}-x_{13}))} \dots\dots(1)$$

۴,۲ میزان تغییر جرم فلز مایع

جرم فلز مایع (x_2) توسط شش مکانیسم تعیین می گردد. ابتدا نرخ ذوب ضایعات فولاد، مانند معادله (۱) اما با علامت مخالف. ثانيا میزان اکسیداسیون Fe توسط O_2 به FeO. مکانیسم های سوم، چهارم، و پنجم کاهش FeO به Fe توسط تزریق گرافیت به سرباره و توسط کربن و سیلیکون محلول در مذاب فولاد است. مکانیسم ششم نرخ افزودن DRI است که حاوی ۹۳٪ Fe است (به فرضیات ۱۰ و ۱۱ مراجعه کنید). سرعت اکسیداسیون Fe توسط تزریق اکسیژن (به فرض ۶ مراجعه کنید) توسط معادله شماره (۲) داده شده است.

نرخ کاهش FeO توسط گرافیت در معادله شماره (۳) داده شده است. که متناسب با سرعت تزریق گرافیت و محتوای FeO در سرباره است (به فرض شماره (۸) مراجعه کنید).

$$\frac{2M_{Fe}d_1}{M_{O_2}} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{x_7k_{gr}M_{Fe}d_5}{(x_6+x_7+x_8)M_C} \dots\dots\dots(3)$$

میزان کاهش FeO توسط کربن محلول و سیلیکون محلول در مذاب فولاد در بخش های فرعی ۴,۳ و ۴,۴ مورد بحث قرار گرفته است. لطفا برای گسترش نرخ این دو معادله به این زیر بخش مراجعه کنید. معادلات ۸ و ۹ به ترتیب X_{Si} and X_{Si}^{eq} را می دهند و معادلات ۱۵ و ۱۶ به ترتیب X_C and X_C^{eq} را می دهند. بنابراین میزان تغییرات فلز مایع در معادله ۴ داده شده است:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = & \frac{M_{Fe}k_{ther1}k_{area1}(x_1)(x_{12}-x_{13})(x_{13}/x_{12})}{(\lambda_{Fe} + C_p(Fe_{(S)})(x_{12}-x_{13}))} \\ & + \frac{x_7k_{gr}M_{Fe}d_5}{(x_6+x_7+x_8)M_C} + \left(\frac{M_{Fe}}{M_C}\right)k_{dC}(X_C - X_C^{eq}) \\ & + \left(\frac{2M_{Fe}}{M_{Si}}\right)k_{dSi}(X_{Si} - X_{Si}^{eq}) - \frac{2M_{Fe}d_1}{M_{O_2}} + 0.93d_2 \dots\dots(4) \end{aligned}$$

۴,۳ میزان تغییر در کربن محلول

سرعت تغییر کربن محلول (x_3) در مذاب فولاد به دلیل واکنش با FeO در سرباره است. واکنش با FeO در سرباره ناشی از تفاوت تعادل است که به عنوان یک رابطه هندلولی بین کربن در مذاب فولاد و FeO در سرباره (درصد جرمی) تقریبی شده است. برای مذاب های کم کربن (که در آن $r_c = 0$) و برای سرباره های اساسی (که در آن $r_c = 1$) محصول تعادلی با دما از ۱,۸ در ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد تا ۰,۸۹ در ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد تغییر می کند. از آنجائیکه دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد نزدیک به دمایی نهایی tap است، یک محصول متوازن ثابت برای دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد تعیین شد و در طول شبیه سازی استفاده شد.

واکنش بین C و FeO در طول فرآیند فولادسازی از تعادل دور است و بنابراین مقدار دقیق ثابت تعادل، حیاتی نیست. در ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد (Turkdogan (معادله ۶۰۶ صفحه ۱۸۳) تعادل را با معادله ۵ نشان می دهد.

$$(\%FeO)(\%C)_{equilibrium} = 1.25 = k_{C\%} \dots\dots\dots (5)$$

رابطه بین $k_{C\%}$ و کسرهای مولی با معادله شماره ۶ تقریب زده شده است. معادله ۷ رابطه ثابت غلظت تعادل بدون بعد k_{XC} را نشان می دهد.

$$k_{C\%} = X_{FeO} X_C \left(\frac{M_{FeO} M_C}{M_{slag} M_{Fe}} 100^2 \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$k_{XC} = X_{FeO} X_C = k_{C\%} \left(\frac{M_{slag} M_{Fe}}{M_{FeO} M_C 100^2} \right) \dots\dots\dots (7)$$

۴،۴ میزان تغییر در سیلیکون محلول

سرعت کاهش سیلیکون (X_q) در مذاب فولاد به دلیل واکنش با FeO در سرباره است. واکنش با FeO در سرباره ناشی از تفاوت تعادل است که به عنوان یک رابطه هذلولی بین Si در مذاب فولاد و $(FeO)^2$ در سرباره (درصد جرمی) تقریبی شده است.

این شبیه به عملیات کربن در مذاب فولاد است. تعادل به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$(\%FeO)^2 \cdot (\%Si) = 0.00057 = k_{Si\%} \dots\dots\dots (12)$$

رابطه ی بین $k_{Si\%}$ و کسر مولی با معادله شماره ۱۳ تقریبی شده است. معادله ۱۴ رابطه ثابت غلظت تعادل بدون بعد k_{XSi} را نشان می دهد.

$$k_{Si\%} = X_{FeO}^2 X_{Si} \left(\frac{M_{FeO}^2 M_{Si}}{M_{slag}^2 M_{Fe}} 100^3 \right) \dots\dots\dots (13)$$

$$k_{XSi} = X_{FeO}^2 X_{Si} = k_{Si\%} \left(\frac{M_{slag}^2 M_{Fe}}{M_{FeO}^2 M_{Si} 100^3} \right) \dots\dots\dots (14)$$

$k_{XSi} = 8.08 \cdot 10^{-8}$ بدست آمد. X_{Si} کسر مولی سیلیکون در فولاد و X_{Si}^{eq} کسر مولی تعادل است.

این مطالب به ترتیب توسط معادلات (۱۵) و (۱۶) داده شده است.

$$X_{Si} = \frac{x_4 / M_{Si}}{x_2 / M_{Fe} + x_3 / M_C + x_4 / M_{Si}} \dots\dots\dots (15)$$

$$X_{Si}^{eq} = k_{XSi} \left(\frac{x_6 M_{FeO}}{x_7 M_{slag}} + \frac{x_8 M_{FeO}}{x_7 M_{SiO_2}} + 1 \right)^2 \dots\dots\dots (16)$$

سرعت واکنش توسط تفاوت محتوای واقعی سیلیکون از تعادل، مشابه معادله ۱۱ کنترل می شود. ثابت سرعت به صورت $k_{dSi} = 144 \text{ kg/s}$ تعیین شد. سرعت تغییر سیلیکون در اثر واکنش با FeO در سرباره توسط معادله ۱۷ ارائه شده است.

معادلات ۱۵ و ۱۶ و X_{Si}^{eq} را بدست می دهند.

$$\dot{x}_4 = -k_{dSi}(X_{Si} - X_{Si}^{eq}) \dots\dots\dots (17)$$

۴,۵ سرعت تغییر جرم سرباره جامد

سرعت تغییر سرباره جامد (X_5) به افزودن سرباره (d_3) و سرعت ذوب سرباره بستگی دارد. سرعت ذوب متناسب با اختلاف دما بین گروه مایع و گروه جامد است.

ضریب انتقال حرارت $k_{area5} = 0.12 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ است که بسته به نرخ ذوب سرباره مشاهده شده قابل تنظیم است. سطح تماس متناسب با جرم سرباره جامد در EAF و ناحیه خاصی از $k_{ther5} = 0.2 \text{ kW} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ استفاده می شود که مربوط به بلوک های مکعبی (تراکم 2500 kg/m^3) با اضلاع 0.02 متر است.

سرباره ای که در حال ذوب شدن است باید گرمای نهان همجوشی (λ_{slag}) و گرمای ویژه ضریب اختلاف دما بین گروه مایع و گروه جامد را دریافت کند. (λ_{slag}) و $C_p (slag_x)$ دارای واحدهای (KJ/g-atom (kg/g-atom.k)) به جای (KJ/(g-mol.k)) هستند. معادله سرعت ذوب سرباره جامد در واحدهای ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) توسط معادله ۱۸ داده شده است.

$$\dot{x}_5 = \frac{-M_{slag} k_{ther5} k_{area5} (x_5)(x_{12} - x_{13})(x_{13}/x_{12})}{(\lambda_{slag} + C_p(Slag_{(S)})(x_{12} - x_{13}))} + d_3 \dots\dots\dots (18)$$

۴,۶ میزان تغییر جرم سرباره مایع

سرعت افزایش سرباره مذاب (X_6) برابر است اما علامت مخالف سرعت ذوب سرباره جامد است.

$$\dot{x}_6 = \frac{M_{slag} k_{ther5} k_{area5} (x_5)(x_{12} - x_{13})(x_{13}/x_{12})}{(\lambda_{slag} + C_p(Slag_{(S)})(x_{12} - x_{13}))} \dots\dots (19)$$

۴,۷ میزان تغییر جرم اکسید آهن در سرباره

FeO در سرباره (X_7) توسط ۵ مکانسیم تعیین شده است. اولاً میزان اکسیداسیون Fe توسط تزریق اکسیژن و ثانیاً کاهش FeO توسط گرافیت. این دو مکانسیم به ترتیب همان معادلات ۲ و ۳ هستند اما با علامت مخالف و M_{FeO} جایگزین M_{Fe} می شود. سرعت سوم سرعت افزودن DRI با هفت درصد FeO است. سرعت چهارم و پنجم کاهش FeO توسط کربن و سیلیکون حاصل از ذوب فولاد است. سپس سرعت تغییر اکسید آهن در سرباره با معادله (۲۰) داده می شود. معادله ۸ و ۹ مقادیر X_C و X_C^{eq} را می دهند و معادله ۱۵ و ۱۶ مقادیر X_{Si} و X_{Si}^{eq} را به ترتیب ارائه می دهند.

$$\dot{x}_7 = \frac{2M_{FeO}d_1}{M_{O_2}} - \frac{x_7 k_{gr} M_{FeO} d_5}{(x_6 + x_7 + x_8) M_C} + 0.07 d_2 - \left(\frac{M_{FeO}}{M_C} \right) k_{dC} (X_C - X_C^{eq}) - \left(\frac{2M_{FeO}}{M_{Si}} \right) k_{dSi} (X_{Si} - X_{Si}^{eq}) \dots\dots\dots(20)$$

۴,۸ میزان تغییر جرم اکسید سیلیکون در سرباره

سرعت تغییر SiO_2 در سرباره (x_8) برابر اما مخالف علامت معادله شماره (۱۷) است. از آنجائیکه جرم های مولی متفاوت هستند این معادله باید در نسبت های M_{SiO_2} به M_{Si} ضرب شود. معادله (۱۵) و (۱۶) مقادیر x_{Si} و x_{Si}^{eq} را به ترتیب می دهند. سرعت تغییر SiO_2 در سرباره توسط معادله شماره (۲۱) داده شده است.

$$\dot{x}_8 = \left(\frac{M_{SiO_2}}{M_{Si}} \right) k_{dSi} (X_{Si} - X_{Si}^{eq}) \dots\dots\dots (21)$$

۴,۹ مونوکسید کربن در فاز گازی EAF

(X_9) CO در فاز گازی توسط چهار مکانیسم تعیین می شود. ابتدا کربن زدایی حمام فولادی. دوم واکنش FeO با گرافیت تزریق شده به سرباره. سوم احتراق CO در نشتی هوا و چهارم استخراج گاز از مجرای گاز خروجی.

میزان CO تولید شده توسط کربن زدایی برابر با معادله (۱۱) است، اما با علامت مخالف و ضربدر نسبت M_{CO} به M_C است زیرا جرم مولی متفاوت است که توسط معادله (۲۲) داده شده است:

$$k_{dC} (M_{CO}/M_C) (X_C - X_C^{eq}) \dots\dots\dots (22)$$

میزان CO تولید شده با تزریق گرافیت به سرباره با سرعت تزریق گرافیت (d_5) متناسب است. بر اساس فرضیه شماره (۸) تمام کربن وارد شده توسط تزریق گرافیت فوراً با FeO واکنش داده و CO و آهن تشکیل می دهد. این میزان تولید با معادله زیر نشان داده می شود:

$$d_5 M_{CO}/M_C \dots\dots\dots (23)$$

سرعت احتراق CO با سرعت ورود هوا به نشتی متناسب است. این متناسب با فشار نسبی EAF (x_{14}) نسبت به فشار هوای بیرون است. فشار نسبی معمولاً به دلیل نیروی کششی منفی خواهد بود. نشتی هوا دارای ترکیب هوای معمولی ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن است. این مقدار ۷,۳ مدل O_2 و ۲۷,۴ مدل N_2 در هر کیلوگرم هوا است. بر این اساس این فرض که تمام اکسیژن موجود در نشتی هوا با CO در سطح آزاد EAF می سوزد سرعت احتراق CO برابر است با:

$$-2M_{CO} k_{AIR1} k_{PR} x_{14} \dots\dots\dots (24)$$

سرعت استخراج گاز از EAF متناسب با نیروی مکش باد فن است. برای این مدل، نیروی کشش با جریان جرمی معادل، تقریب زده می شود. این تقریب که U_1 نامیده می شود، یکی از متغیرهای دستکاری شده فرآیند گاز خروجی است و دارای واحدهای $(kg^0 s^{-1})$ است. در شکاف لغزشی، هوا از اتمسفر خارج می شود تا CO باقیمانده در گاز EAF استخراج شده را احتراق کند و گاز خارج شده را احتراق کند و گاز خارج شده را خنک کند. ناحیه مجرا در شکاف لغزشی دارای بعد مشخصه h_d است. عرض شکاف لغزشی (U_2) متغیر دستکاری شده دیگر است و بعد دیگری ناحیه شکاف لغزشی است. سرعت جریان در هر ناحیه با نسبت بعد مشخصه مربوط به مجموع ابعاد مشخصه متناسب است. میزان استخراج گاز از EAF به صورت کسری از U_1 بیان می شود:

$$h_d/(k_U u_2 + h_d) \dots\dots\dots (25)$$

برای بهبود تقریب با تنظیم، یک K_U ثابت بدون بعد استفاده می شود. میزان استخراج CO از EAF به عنوان کسری از میزان کل استخراج گاز، برابر با کسر CO از ترکیب گاز در EAF است. با ترکیب سه مولفه همانطور که بحث شده معادله میزان CO در فاز گاز در EAF بدست می آید. وقتی فشار نسبی، منفی است (۲۶) استفاده می شود، اما زمانی که فشار نسبی مثبت است معادله (۲۷) مورد استفاده قرار می گیرد. این میزان تفاوت در ترکیب بین گاز و هوای EAF است. X_C^{eq} و X_C توسط معادلات (۸) و (۹) داده شده اند:

$$\dot{x}_9 = \frac{M_{CO} d_5}{M_C} - \frac{h_d u_1 x_9}{(k_U u_2 + h_d)(x_9 + x_{10} + x_{11})} + \left(\frac{M_{CO}}{M_C}\right) k_{dC}(X_C - X_C^{eq}) + 2M_{CO} k_{AIR1} k_{PR} x_{14} \dots\dots(26)$$

$$\dot{x}_9 = \frac{M_{CO} d_5}{M_C} - \frac{h_d u_1 x_9}{(k_U u_2 + h_d)(x_9 + x_{10} + x_{11})} + \left(\frac{M_{CO}}{M_C}\right) k_{dC}(X_C - X_C^{eq}) - \frac{k_{PR} x_{14} x_9}{(x_9 + x_{10} + x_{11})} \dots\dots(27)$$

۴،۱۰ دی اکسید کربن در فاز گازی EAF

(x_{10}^0) CO_2 در فاز گازی توسط ۲ مکانیسم نشان داده شده است. سرعت احتراق CO به CO_2 و استخراج گاز از طریق مجرای گاز خروجی. سرعت احتراق CO به CO_2 منفی در معادله (۲۴) است، جایی که M_{CO_2} جایگزین M_{CO} می شود. میزان استخراج CO_2 از EAF همان کسری از کل استخراج گاز به عنوان کسر CO_2 از ترکیب گاز در EAF است. کل استخراج گاز در بخش قبلی مورد بحث قرار گرفت. با ترکیب دو عنصر همانطور که بحث شد معادله میزان تغییر CO_2 در فاز گاز به دست می آید. معادله (۲۸) با فشار نسبی منفی و معادله (۲۹) با فشار نسبی مثبت استفاده می شوند.

$$\dot{x}_{10} = -\frac{h_d u_1 x_{10}}{(k_U u_2 + h_d)(x_9 + x_{10} + x_{11})} - 2M_{CO_2} k_{AIR1} k_{PR} x_{14} \dots\dots\dots(28)$$

$$\dot{x}_{10} = -\frac{h_d u_1 x_{10}}{(k_U u_2 + h_d)(x_9 + x_{10} + x_{11})} - \frac{k_{PR} x_{14} x_{10}}{(x_9 + x_{10} + x_{11})} \dots\dots\dots(29)$$

۴,۱۱ نیتروژن در فاز گازی EAF

(x_{11}^0) N_2 در فاز گاز توسط سه نرخ تعیین می شود. N_2 با هوای نشتی به داخل نشت می کند ، N_2 که با گاز حامل به داخل دمیده می شود و گاز را از طریق مجرای گاز خروجی خارج می کند. میزان N_2 که به داخل نشت می کند در رابطه مستقیم با فشار نسبی است

$$M_{N_2} k_{air2} k_{PR} x_{14} \dots\dots\dots(30)$$

میزان N_2 دمیده شده به EAF توسط سیستم تزریق گرافیت ، کسری از سرعت تزریق گرافیت است. به ازای هر ۱۵۰ کیلوگرم گرافیت تزریق شده ، ۹ کیلوگرم N_2 با گاز حاصل تزریق می شود. میزان استخراج N_2 متناسب با کسر N_2 از ترکیب گاز خروجی است. کل استخراج گاز در بخش ۴,۹ مورد بحث قرار گرفت. ترکیب سه جزء معادله میزان N_2 در فاز گاز را به دست می دهد. معادله (۳۱) برای فشار نسبی منفی و (۳۲) برای فشار نسبی مثبت است :

$$\dot{x}_{11} = -\frac{h_d u_1 x_{11}}{(k_U u_2 + h_d)(x_9 + x_{10} + x_{11})} - M_{N_2} k_{air2} k_{PR} x_{14} + \frac{d_5}{150} \dots\dots\dots(31)$$

$$\dot{x}_{11} = -\frac{h_d u_1 x_{11}}{(k_U u_2 + h_d)(x_9 + x_{10} + x_{11})} - \frac{k_{PR} x_{14} x_{11}}{(x_9 + x_{10} + x_{11})} + \frac{d_5}{150} \dots\dots\dots(32)$$

۴,۱۲ دمای فلز مایع

کل انرژی تولید شده در EAF مجموع همه منابع و تلفات است. اتلاف انرژی از طریق دیوار خنک شده با آب متناسب با اختلاف دمای بین دمای EAF و دمای بیرون است. انرژی کل برابر است با P_t : $(p_t + d_4 - k_{VT} x_{12})$ ؛ P_t تابعی از واکنش های شیمیایی ، ظرفیت حرارتی و ذوب ضایعات و سرباره است ، d_4 (توان) انرژی قوس الکتریکی است. تابع P_t در زیر بخش ۴,۱۵ مورد بحث

قرار گرفته است. میزان دمای فلز مایع، توان کل تقسیم بر ظرفیت حرارتی تمام سیالات است. فرض بر این است که انتقال حرارت بین فلز مایع و سرباره به اندازه کافی سریع است که سرباره و فلز مایع در همان دما هستند. معادله (۳۳) میزان دما را به دست می دهد.

$$\dot{x}_{12} = (p_t + d_4 - k_{VT}(x_{12} - T_{air})) \left[\frac{x_2 C_p(Fe_{(L)})}{M_{Fe}} + \frac{x_3 C_p(C)}{M_C} + \frac{x_4 C_p(Si)}{M_{Si}} + \frac{(2x_6 + 2x_7 + 3x_8)}{M_{slag}} C_p(Slag_{(L)}) \right] \quad \dots\dots\dots(33)$$

C_p ($slag_{(L)}$) از ترکدوگان برای سرباره مایع به دست می آید:

$$H_T = -356.31 + 0.0405T \text{ kJ/g-atom} \quad \dots\dots\dots(34)$$

۴،۱۳ ضایعات و دمای سرباره جامد

فلز مایع، ضایعات و سرباره جامد را گرم می کند. انتقال حرارت متناسب با اختلاف دما بین فلز مایع و ضایعات است. ضرایب انتقال حرارت $k_{ther1} = 0.4 \text{ kW} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ برای ضایعات و $k_{ther5} = 0.4 \text{ kW} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ برای سرباره جامد هستند. ثابت سطح - برای ضایعات و $k_{area1} = 0.005 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ برای سرباره جامد استفاده می شود. گرمای منتقل شده تقسیم بر ظرفیت گرمایی میزان تغییر دمای ضایعات و سرباره جامد را نشان می دهد:

$$\dot{x}_{13} = [(k_{ther1} k_{area1} x_1 (x_{12} - x_{13}) + k_{ther5} k_{area5} x_5 (x_{12} - x_{13})) (1 - x_{13}/x_{12})] / [x_1 C_p(Fe_{(S)})/M_{Fe} + 2x_5 C_p(Slag_{(S)})/M_{slag}] \quad \dots\dots\dots(35)$$

C_p ($slag_{(S)}$) از ترکدوگان برای سرباره جامد به دست می آید:

$$H_T = -348.33 + 0.03T \text{ kJ/g-atom} \quad \dots\dots\dots(36)$$

۴،۱۴ فشار نسبی

فشار اتمسفر، ثابت باقی می ماند. سپس میزان تغییر فشار مربوطه تنها به نرخ تغییر فشار EAF و مستقل از فشار اتمسفر بستگی دارد. برای بدست آوردن معادله ای برای نرخ تغییر فشار، یک روش استفاده از قانون گاز ایده آل، حل آن برای فشار و سپس گرفتن اولین مشتق با توجه به زمان است. دز انجام این کار، برای سادگی فرض می شود که حجم سطح آزاد ثابت می ماند. آنجایی که حجم سطح آزاد (۱۷۵ متر مکعب) با توجه به حجم جامدات و مایعات در EAF بزرگ است، این مطلب قابل قبول است. اکنون فقط کمیت مولی و میزان دما باید در نظر گرفته شود. هنگامی که میزان دما در نظر گرفته می شود، ظرفیت گرمایی با ظرفیت حرارتی معادل ثابت برای EAF (C_{EAF}) تقریب می شود. مقدار مولی توسط سه مکانیسم تغییر می کند. ابتدا میزان تزریق اکسیژن و میزان انتشار CO مرتبط. ثانیاً میزان تبادل گاز با جو از طریق نشت ناشی از فشار نسبی. ثالثاً میزان استخراج گاز توسط معادله (۳۷) داده شده است:

$$\frac{h_d u_1}{M_{GAS}(k_U u_2 + h_d)} \dots\dots\dots(37)$$

میانگین جرم مولی گازهای استخراج شده تقریباً $M_{GAS} = 0.03$ کیلوگرم بر مول است. گازی که به دلیل اختلاف فشار مبادله می شود، معمولاً هوا خواهد بود، زیرا اختلاف فشار باید منفی باشد. جرم مولی هوا تقریباً با همان N_2 است. وقتی همه اجزای معادله با هم ترکیب شوند، میزان تقریبی فشار نسبی بدست می آید:

$$\dot{x}_{14} = \frac{R \left(\frac{x_9}{M_{CO}} + \frac{x_{10}}{M_{CO_2}} + \frac{x_{11}}{M_{N_2}} \right) (p_i + d_4 - k_{VT} x_{12})}{Vol \cdot C_{EAF}} + \frac{R x_{12}}{Vol} \left(\frac{2d_1}{M_{O_2}} - \frac{u_1 h_d}{M_{GAS}(k_U u_2 + h_d)} - \frac{k_{PR} x_{14}}{M_{N_2}} \right) \dots\dots(38)$$

۴,۱۵ تبادل انرژی حرارتی-شیمیایی

جدول شماره ۱ میانگین آنتالپی های تشکیل، برای گونه های مختلف مورد استفاده در اینجا را نشان می دهد. آنتالپی های تشکیل، گرمای مولی همجوشی و ظرفیت های حرارتی مولی از کوباچروسکی به دست آمدند. اینها وابسته به دما هستند و از مقادیر متوسط برای محدوده دمایی مربوط استفاده می شود. همه گونه ها در دمای $K 1680$ (فرضیه شماره ۱۶ را ببینید) قرار دارند. AH آنتالپی تشکیل است. آنتالپی محلول باید با گونه های موجود در محلول محاسبه شود.

برای آنتالپی محلول از خط زیرین (S-) استفاده می شود. برای ۰ تا ۴ درصد C در محلول Fe مایع $\Delta H_{C-s} = 27 \text{ kJ/mol}$ (Rist & Chipman²¹). ضریب فعالیت FeD یک تابع ضعیف از دما است (تورکدوگان). سپس این نتیجه بدست می آید که آنتالپی محلول FeO در سرباره کم است و می توان آن را نادیده گرفت. آنتالپی محلول برای SiO_2 در سرباره $\Delta H_{SiO_2-s} = -45 \text{ kJ/mol}$. $\Delta H_{Si-s} = -132 \text{ kJ/mol}$ است. برای غلظت کم در فولاد - است (سیگورث و الیوت).

Symbol	Value
ΔH_{CO}	-117 kJ/mol
ΔH_{CO_2}	-396 kJ/mol
ΔH_{FeO}	-243 kJ/mol
ΔH_{SiO_2}	-946 kJ/mol

--جدول ۱ آنتالپی تشکیل معادلات زیر معادلات کمکی اند که همگی واحدهای (کیلو وات) هستند.

معادلات (۸) و (۹) به ترتیب x_C^{eq} را و معادلات (۱۵) و (۱۶) به ترتیب x_{Si}^{eq} و x_{Si} را می دهند

$$\begin{aligned}
p_1 &= \text{reaction}([C] + [FeO] \rightarrow Fe + CO) \\
p_1 &= (\Delta H_{C-S} + \Delta H_{FeO} - \Delta H_{CO})(k_{dC}/M_C)(X_C - X_C^{eq}) \\
p_2 &= \text{reaction}(Fe + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow FeO) \\
p_2 &= -(\Delta H_{FeO})2d_1/M_{O_2} \\
p_3 &= \text{reaction}(CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2) \\
p_3 &= -(\Delta H_{CO_2} - \Delta H_{CO})(2k_{air1})(k_{PR}x_{14}) \\
p_4 &= \text{reaction}([Si] + [FeO] \rightarrow Fe + [SiO_2]) \\
p_4 &= (\Delta H_{Si-S} - \Delta H_{SiO_2} - \Delta H_{SiO_2-S})(k_{dSi}/M_{Si})(X_{Si} - X_{Si}^{eq}) \\
p_5 &= \text{heating loss to oxygen stream} \\
p_5 &= -(d_1/M_{O_2})(x_{12} - T_{O_2})C_p(O_2) \\
p_6 &= \text{heating loss to oxygen in leak-air stream} \\
p_6 &= -k_{air1}k_{PR}x_{14}(x_{12} - T_{AIR})C_p(O_2) \\
p_7 &= \text{heating loss to oxygen in the leak-air stream} \\
p_7 &= -k_{air2}k_{PR}x_{14}(x_{12} - T_{AIR})C_p(N_2) \\
p_8 &= \text{heating loss to slag stream} \\
p_8 &= -2d_3C_p(\text{Slag}_{(S)})(x_{13} - T_{slag})/M_{slag} \\
p_9 &= \text{heating loss to DRI stream} \\
p_9 &= -0.93d_2 \frac{\lambda_F(Fe) + C_p(Fe_{(S)})(x_{12} - T_{DRI})}{M_{Fe}} \\
p_{10} &= \text{heating and melting loss to solid scrap and slag} \\
p_{10} &= -k_{ther1}k_{area1}x_1(x_{12} - x_{13}) \\
&\quad - k_{ther5}k_{area5}x_5(x_{12} - x_{13}) \\
p_{11} &= \text{heat of reaction } (C + [FeO] \rightarrow Fe + CO) \text{ from } d_5 \\
p_{11} &= \frac{x_7k_{gr}d_5(\Delta H_{FeO} - \Delta H_{CO})}{(x_6 + x_7 + x_8)M_C} \\
p_1 &= p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + p_8 + p_9 + p_{10} + p_{11}
\end{aligned}$$

۵. شبیه سازی

بحث با شرایط عملیاتی معمولی شروع می شود ، سپس به شرایط اولیه برای سیرنولاسیون ، جدول زمانی رویدادها و نتایج شبیه سازی منجر می شود.

۵.۱ شرایط عملیاتی معمولی EAF

یک تولیدکننده فولاد آفریقای جنوبی از مواد شارژ EAF معمولی زیر استفاده می کند.

- ۲۰ تن مانده ذوب در EAF باقی مانده است
- ۷۰ تن ضایعات با خلوص بالا
- ۶۰ تن فلز مایع با ۴٪ C و ۱٪ Si

- ۲۰ تن DRI با ۹۳٪ فلز پوشانی
- ۱۰ تن خط سوخته و ۵ تن دولومیت
- اکسیژن Nm^3 / t

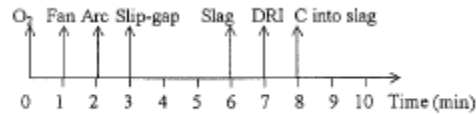


Fig. 2. Timeline of simulation.

زمان معمول بازریزی تا بازریزی ۱۰۰ تا ۱۲۰ دقیقه است. قطر eaf برابر ۱۰ متر و حجم سطح آزاد ۱۷۵ متر مکعب است. روش های "ته مانده ذوب" و سرباره پفکی معمولاً در عملیات EAF استفاده می شود. با عمل سرباره کف، گرافیت به داخل سرباره دمیده می شود، جایی که با FeO واکنش می دهد و CO تشکیل می دهد که سرباره را حبابی و کف می کند و کارایی قوس را بهبود می بخشد. برای کنترل دما استفاده می شود. DRI برای بحث دقیق در مورد عملیات EAF، مراجعه کنید به (مکینتاایر و لندری و جونز)

۵,۲ شرایط اولیه

برای این شبیه سازی لحظه ای پس از بسته شدن در EAF به عنوان نقطه شروع در نظر گرفته می شود. در این زمان فرض بر این است که اجزای زیر قبلاً اضافه شده اند:

* ۲۰ تن ته مانده ذوب ۰,۱٪ C و ۰٪ Si

* ۷۰ تن ضایعات، ۱٪ کربن، ۰٪ Si

* ۶۰ تن فلز داغ، ۴٪ کربن، ۱٪ Si

* ۶ تن آهک سوخته و ۳ تن دولومیت

شرایط اولیه برای نشان دادن شرایط معمولی در EAF انتخاب می شوند هنگامی که شبیه سازی شروع می شود، تقریباً ۴۰ تن قراضه باقی می ماند زیرا از قوس الکتریکی برای ذوب سوراخ در ضایعات برای فلز داغ استفاده شده است. شرایط اولیه زیر برای یک شبیه سازی محاسبه می شود:

* ۴۰۰۰۰ کیلوگرم فلز جامد و ۱۰۶۰۰۰ کیلوگرم فلز مایع

* ۴۰۰۰ ک.گ کربن و ۷۵۰ ک.گ Si در فلز مایع

* ۷۰٪ ضایعات، ۱ درصد کربن، ۰ درصد Si

* ۶۰ تن فلز داغ، ۴٪ کربن، ۱٪ Si

* ۶ تن آهک سوخته و ۳ تن دولومیت

شرایط اولیه برای نشان دادن شریط معمولی در EAF انتخاب می شوند. هنگامی که شبیه سازی شروع می شود ، تقریباً ۴۰ تن قراضه باقی می ماند زیرا از قوس الکتریکی برای ذوب سوراخ در ضایعات برای فلز داغ استفاده شده است. شرایط اولیه برای یک شبیه سازی محاسبه می شود:

*۴۰۰۰۰ کیلوگرم فلز جامد و ۱۰۶۰۰۰ کیلوگرم فلز مایع

*۴۰۰۰ کیلوگرم C و ۷۵۰ کیلوگرم Si در فلز مایع

*۸۰۰۰ کیلوگرم سرباره جامد و ۱۰۰۰ کیلوگرم سرباره مایع

*۰ کیلوگرم FeO و ۰ کیلوگرم SiO_2 در سرباره

*۱۱,۷ کیلوگرم Co ، ۹,۱ کیلوگرم CO_2 و ۱,۷ کیلوگرم N_2

*سیالات در ۱۶۸۰ K و جامدات در ۸۰۰ K

*شروع فشار نسبی EAF در 0 Pa

۵۰۳ جدول زمانی

شکل ۲ یک نمایش گرافیکی از اقدامات را نشان می دهد. فلش ها نشان می دهند که چه زمانی اختلالات یا اقدامات کنترلی رخ می دهند یا شروع می شوند. متغیرهای دستکاری شده به صورت زیر تنظیم می شوند:

*در زمان $t=1$ دقیقه جریان فن گاز خروجی از ۰ به ۱۶,۸۷۵ کیلوگرم بر ثانیه افزایش می یابد.

*در زمان $t=3$ دقیقه اندازه شکاف لغزش از ۰,۲۵ به ۰,۲ متر کاهش می یابد.

ورودی های اختلال زیر فرض می شوند:

*در $t=6$ ثانیه جریان اکسیژن به حداکثر $d_1=2.5$ کیلوگرم بر ثانیه تبدیل می شود.

*در $t=2$ دقیقه ، قوس الکتریکی در توان کامل $d_4=80$ مگاوات روشن می شود.

*در $t=6$ دقیقه شارها به طور مداوم در $d_3=20$ کیلوگرم بر ثانیه تا پایان شبیه سازی اضافه می شوند.

*در $t=7$ دقیقه ، DRI به طور مداوم در $d_2=40$ کیلوگرم بر ثانیه تا پایان شبیه سازی اضافه می شود.

شکل ۳: فلز مایع و جرم قراضه

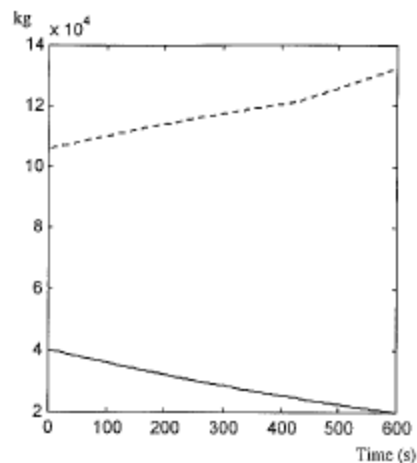


Fig. 3. Liquid metal (dashed) and scrap mass.

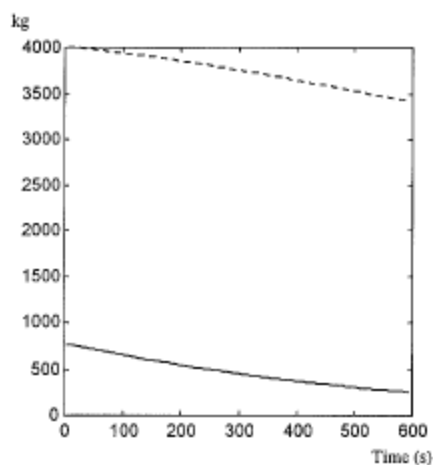


Fig. 4. Carbon (dashed) and silicon in liquid metal.

شکل ۴: کربن و سیلیکون در فلز مایع

۶. نتایج شبیه سازی

معادلات با استفاده از یک الگوریتم عددی اندازه گام ثابت مرتبه چهارم *rungekutta* حل می شوند. سپس چهارده متغیر حالت در بابر زمان رسم می شوند و نتایج با بحث در اینجا ارائه می شوند:

شکل ۳ توده فلز مایع و ضایعات را در همان نمودار نشان می دهد. افزودن DRI به طور مستقیم، جرم فلز مایع را برای سه دقیقه آخر افزایش می دهد. قبل از افزودن DRI آشکار است که سرعت افزایش جرم فلز مایع برابر با نرخ کاهش جرم قراضه است.

شکل ۴، جرم کربن و سیلیکون در محلول در فلز مایع را نشان می دهد. شکل ۵، FeO و SiO_2 در محلول در سرباره مایع را نشان می دهد. تزریق کربن به سرباره، افزایش FeO را کند می کند. شکل ۶ رابطه بین درصد جرم FeO در سرباره و درصد جرم کربن در فلز مایع را نشان می دهد. برای این سطح از محتوای کربن، محتوای تعادل FeO بسیار کوچک (نزدیک به صفر) است.

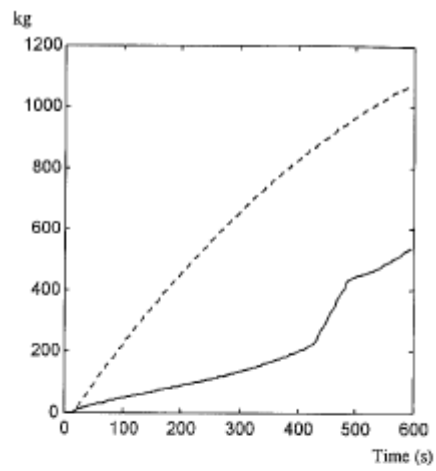


Fig. 5. SiO₂ (dashed) and FeO in liquid slag.

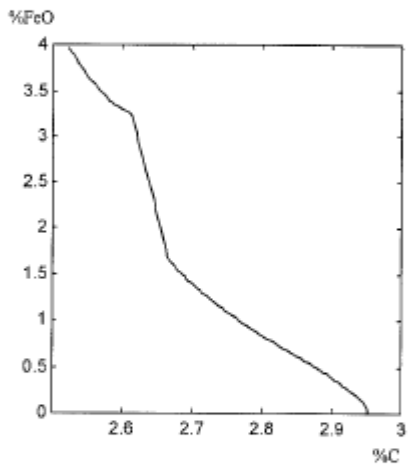


Fig. 6. %FeO in slag against %C in liquid metal.

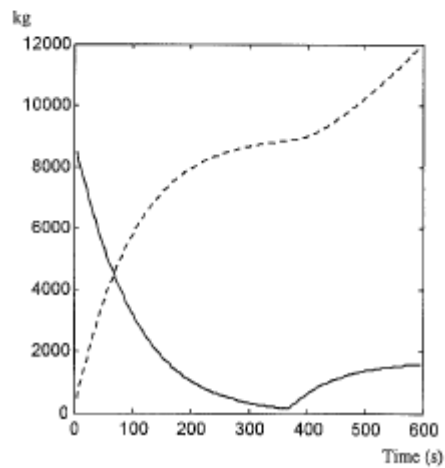


Fig. 7. Liquid slag (dashed) and solid slag.

شکل ۵: FeO و SiO_2 در سرباره مایع

شکل ۶: FeO ٪ در سرباره در برابر C ٪ در فلز مایع

شکل ۷: سرباره مایع و سرباره جامد

فرآیند با تزریق و افزودن DRI از تعادل دورتر می شود، اما تزریق کربن دوباره آن را به تعادل نزدیک می کند. شکل ۷ جرم های سرباره جامد و مایع را نشان می دهد.

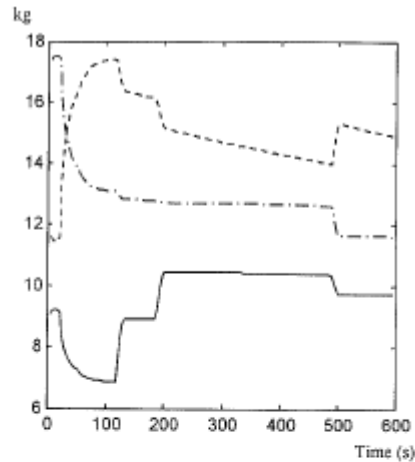


Fig. 8. CO (dashed), N_2 (dot-dashed) and CO_2 .

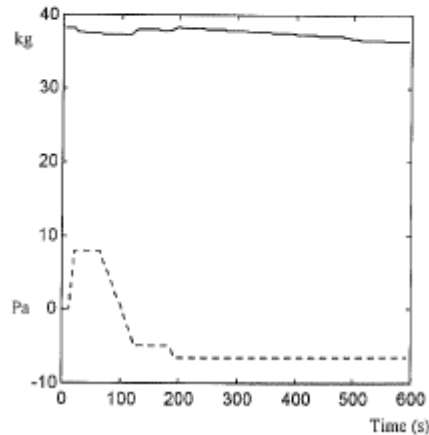


Fig. 9. Sum of the gas-masses and relative pressure.

شکل ۸: CO و N_2 و CO_2

شکل ۹: مجموع جرم گاز و فشار نسبی

شکل ۸ سه جزء گاز را با هم نشان می دهد و منطقی است که مقدار CO به طور چشمگیری با وارد شدن جریان اکسیژن افزایش می یابد. در حالی که فن هنوز روشن نیست، افزایش CO منجر به افزایش فشار EAF می شود که به نوبه خود باعث خروج گازهای EAF زیادی می شود که منجر به کاهش N_2 و CO_2 می گردد.

شکل ۹ مجموع جرم های گاز را به همراه فشار نسبی EAF نشان می دهد. اگرچه قانون گاز ایده آل تعیین می کند که مقدار کل مولی در EAF ثابت می ماند، جرم تغییر می کند زیرا ترکیب گاز تغییر می کند. و CO₂ یک گاز سنگین است و با محتوای بیشتر CO₂، جرم کل گاز افزایش می یابد. مقدار مولی نیز با دما تغییر می کند. شکل ۱۰ تغییرات دمای گروه سیال و دمای گروه جامد را نشان می دهد. توجه داشته باشید که با ذوب شدن مواد جامد، دمای گروه جامد به آرامی به دمای گروه سیال نزدیک می شود. هدف از استخراج، به دست آوردن مدلی بود که برای شبیه سازی سیستم کنترل حلقه بسته و تأیید کنترل کننده اولیه مناسب باشد مدلی که در اینجا به دست می آید، پاسخ دینامیکی فرآیند فیزیکی را به اندازه کافی برای هدفش دقیق می کند. به منظور اعمال مدل برای نشان دادن یک EAF صنعتی خاص، پارامترهای قابل تنظیم در مدل باید طوری انتخاب شوند که پاسخ های مدل با پاسخ های EAF واقعی مطابقت داشته باشد. در یک بررسی اولیه این برای داده های دمای فولاد EAF و ترکیب کربن انجام گرفت. شبیه سازی مدل تعدیل شده تطابق خوبی با داده های طرح داد. چنین تنظیمی خارج از محدوده این کار شکست خورده است و در ارجاع ۲۴ مورد بررسی قرار می گیرد.

۷. نتیجه گیری

مدل مشتق شده در این مقاله برای آزمایش استراتژی های کنترل با استفاده از متغیرهای گاز خروجی در کنترل یک EAF در نظر گرفته شده است. استخراج یک مدل فضای حالت غیر خطی چند متغیره برای این فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. مفروضاتی که ساخته شد و نمایش فضای حالت چارچوبی جامع برای توسعه یک مدل فرآیند EAF ارائه کرد. سپس از اصول اولیه ترمودینامیک برای استخراج مدل استفاده شد و از رفتار مطابق با مشاهدات فیزیکی اطمینان حاصل کرد. شرایط عملیاتی معمولی برای یک EAF مورد بحث قرار گرفت و یک شبیه سازی با این شرایط عملیاتی انجام شد. به منظور اعمال مدل برای نشان دادن یک EAF صنعتی خاص، پارامترهای قابل تنظیم در مدل باید طوری انتخاب شوند که پاسخ مدل با پارامترهای EAF واقعی مطابقت داشته باشد.

ارجاعات

- 1) J. A. T. Jones: *Iron Steel Eng.*, **72** (1995), 37.
- 2) O. A. Zhulkovsky, A. G. Chernyatevich and A. V. Gress: *Steel in Translation*, **23** (1993), 73.
- 3) The making, shaping and treating of steel, 10th ed., ed. by W. T. Lankford *et al.*, Association of Iron and Steel Engineers, Pittsburgh, (1985).
- 4) M. A. Reuter, M. Oosthuizen, I. J. Barker, M. S. Rennie and A. De Waal: 8th IFAC MMM Conf., Sun City, South Africa, (1995), 97.
- 5) P. E. King and M. D. Nyman: *J. Appl. Phys.*, **80** (1996), 1872.
- 6) P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 458.
- 7) S. Köhle: *Stahl Eisen*, **112** (1992), 59.
- 8) R. D. Morales, H. Rodríguez-Hernandez, P. Garnica-Conzalez and J. A. Romero-Serrano: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 1072.
- 9) C. Petersohn, E. Burstrom and P. Hahlin: 4th European Electric Steel Congr., Madrid, Spain, (1992).
- 10) E. Sridhar and A. K. Lahiri: *Steel Res.*, **65** (1994), 433.
- 11) P. Gardin, C. Soide, A. Dez and I. Guillaume: *Ironmaking Steelmaking*, **19** (1992), 306.

- 12) R. J. Fruehan: *ISS Trans.*, **12** (1991), 33.
- 13) B. Sarma, A. W. Cramb and R. J. Fruehan: *Metall. Trans. B*, **27B** (1996), 717.
- 14) E. Plöckinger and O. Etterich: *Elektrostahlerzeugung*, 3rd ed., Verlag Stahleisen m. b. H., Dusseldorf, (1979).
- 15) W. Masclanka: *Int. Symp. on Modern Developments in Steelmaking*, Jamshedpur, India, (1981).
- 16) J. M. A. Geldenhuis: *SAIMM Colloquium on Pyrometallurgy*, Randburg, South Africa, (1997).
- 17) E. T. Turkdogan: *Fundamentals of Steelmaking*, Institute of Materials, London, (1996).
- 18) J. G. Bekker, I. K. Craig and P. C. Pistorius: 9th IFAC MMM Conf., Köln, Germany, (1998).
- 19) E. T. Turkdogan: *Physicochemical properties of molten slags and glasses*, The Metals Society, London, (1983).
- 20) O. Kubaschewski, C. B. Alcock and P. J. Spencer: *Materials Thermochemistry*, 6th ed., Pergamon Press, Oxford, (1993).
- 21) A. Rist and J. Chipman: *Rev. Metall.*, **53** (1958), 796.
- 22) G. K. Sigworth and J. F. Elliott: *Met. Sci.*, **8** (1974), 298.
- 23) E. H. McIntyre and E. R. Landry: *Iron Steelmaker*, **20** (1993), 61.
- 24) J. G. Bekker: Master's Dissertation, University of Pretoria, South Africa, (1998). (in preparation)

پیوست

--

$x_1 = m(\text{Fe}_{(s)})$, mass of solid iron (kg)
 $x_2 = m(\text{Fe}_{(l)})$, mass of liquid steel (kg)
 $x_3 = m(\text{C})$, carbon in solution in steel (kg)
 $x_4 = m(\text{Si})$, silicon in solution in steel (kg)
 $x_5 = m(\text{Slag}_{(s)})$, solid slag mass (kg)
 $x_6 = m(\text{Slag}_{(l)})$, liquid slag mass (kg)
 $x_7 = m(\text{FeO})$, FeO in slag (kg)
 $x_8 = m(\text{SiO}_2)$, SiO₂ in slag (kg)
 $x_9 = m(\text{CO})$, carbon-monoxide (kg)
 $x_{10} = m(\text{CO}_2)$, carbon-dioxide (kg)
 $x_{11} = m(\text{N}_2)$, nitrogen in gas-phase (kg)

$x_{12} = T(\text{fluid group})$, temperature (K)
 $x_{13} = T(\text{solid group})$, temperature (K)
 $x_{14} = P(\text{furnace})$ relative pressure (Pa)
 $u_1 = \dot{m}(\text{turb})$, off-gas turbine flow (kg/s)
 $u_2 = w(\text{slipgap})$, slip gap width (m)
 $d_1 = \dot{m}(\text{Oxy})$, oxygen fuel flow (kg/s)
 $d_2 = \dot{m}(\text{DRI})$, DRI addition flow (kg/s)
 $d_3 = \dot{m}(\text{slag})$, slag addition (kg/s)
 $d_4 = p(\text{Arc})$, electric arc power (kW)
 $d_5 = \dot{m}(\text{graphite})$, graphite injected (kg/s)

جدول ۱ مقادیر ثابت های بدون بعد را نشان می دهد

جدول A-1

جدول A-2 ثابت های هوا و مساحت را نشان می دهد.

جدول A-3 میزان و ثابت های حرارتی را نشان می دهد.

چهار ثابت دمایی T_{DRI} , T_{Slag} , T_{O_2} , T_{AIR} در نظر گرفته شد.

داده های ترمودینامیکی مانند گرمای نهان، گرمای ویژه یا آنتالپی تشکیل از کوباشفسکی و همکاران به دست آمدند، مگر اینکه مرجعی منبع متفاوتی را نشان دهد.

Table A-1. Dimensionless constants.

K_w	k_U	k_{GC}	k_{GS}
15.0	8.44	$491 \cdot 10^{-6}$	$8.08 \cdot 10^{-8}$

Table A-2. Air and area constants.

Air [mol.kg ⁻¹]		Area [m ² .kg ⁻¹]	
k_{AD1}	k_{AIR2}	k_{area1}	k_{area2}
7.3	27.4	0.005	0.12

Table A-3. Rate and thermal constants.

Rate [kg.s ⁻¹]		Thermal [kW.K ⁻¹ .m ⁻²]	
k_{GC}	k_{GS}	k_{heat}	k_{ther5}
12	144	0.4	0.2