

مدلسازی و بررسی افزایش تولید و کاهش مصرف انرژی در تهیه گندله در صنایع فولاد

علی اصغر حمیدی

استادیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

حسن پایاب

فارغ التحصیل مهندسی انرژی - واحد علوم و تحقیقات - دانشگاه آزاد اسلامی

(تاریخ دریافت ۸۱/۹/۲۷، تاریخ تصویب ۸۳/۱۱/۲۴)

چکیده

مدل ریاضی در پایلوت پلنت واحد گندله سازی با در نظر گرفتن واکنشهای سنگ آهک، مگنتیت و کربن در گندله ارائه می شود. معادلات دیفرانسیل جرم، انرژی و مومنتم بصورت همزمان حل می شوند. تغییرات درجه حرارت، فشار و غلظت برحسب ارتفاع بستر با نتایج تجربی مراحل مختلف شامل خشک شدن، پخت و سرد شدن گندله ها مقایسه می شوند. درصد سنگ آهک در گندله تا حصول بازبسته مناسب (B₄) و حداکثر احیاءپذیری و حداقل چسبندگی تغییر داده می شود. برای افزایش تولید و کاهش مصرف انرژی در سه حالت از کک استفاده شده است. در حالت اول با افزودن مقادیر مختلف کک به گندله درجه حرارت گاز ورودی به بستر کاهش داده می شود. در حالت دوم علاوه بر کاهش درجه حرارت، زمان گندله سازی نیز کاهش داده می شود. در حالت سوم علاوه بر موارد مذکور تزریق اکسیژن به کوره نیز انجام می شود و میزان پتانسیل افزایش تولید و کاهش مصرف انرژی معین می گردد.

واژه های کلیدی: مدلسازی، گندله سازی، کاهش انرژی، افزایش تولید، سنگ آهن، کک

مقدمه

فهم و توسعه واحدهای موجود و طراحی های جدید کمک می کند. در این راستا مدلسازی جهت بهبود فرایند تولید گندله و استفاده از سوخت جامد کک در گندله انجام شده است و نتایج تجربی با مدل مقایسه شده است. هدف اصلی در این تحقیق کاهش مصرف انرژی و بررسی پارامترهایی از قبیل خشک کردن گندله ها، اکسیداسیون ماگنتیت، اکسیداسیون کربن و تکلیس سنگ آهک در فرایند گندله سازی می باشد. در داخل گندله ها مقاومت های انتقال حرارت و جرم ناشی از هدایت حرارتی و نفوذ جرم در نظر گرفته می شوند.

روش تحقیق

مواد اولیه از قبیل سنگهای آهن، Carajas, Ferteco, CVRD از کشور برزیل، گل گهر سیرجان، چادرملوی یزد و افزودنیها بنتونیت، آهک و کک می باشند. تولید گندله

در حال حاضر در کشور ایران و سایر کشورهای دنیا تولید فولاد با استفاده از واحدهای گندله سازی و میدرکس در حال گسترش است در طرح پنج ساله سوم مرز تولید فولاد واحدهای صنعتی به ۱۲/۵ میلیون تن در سال خواهد رسید به همین منظور تولید فولاد با حداقل هزینه های ممکن و حفظ کیفیت محصول ضروری می باشد. در شرکت فولاد خوزستان انرژی با سهمی در حدود ۱۵ درصد کل هزینه تمام شده فولاد بعنوان شاخص اصلی در کاهش هزینه ها مدنظر می باشد. گندله سازی یکی از واحدهای مهم شرکت فولاد خوزستان می باشد که در آن گندله از سنگ آهن تغلیظ شده در دیسکهای دوار بصورت گندله خام تهیه شده و سپس جهت تامین استحکام لازم و اکسیداسیون گندله ها وارد سیستم کوره پخت می شود. گندله ها پس از طی مراحل خشک شدن، پخت و خنک سازی به واحدهای احیاء مستقیم جهت احیاء انتقال داده می شوند. مدل ریاضی به

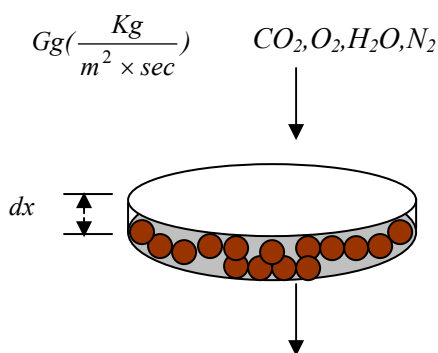
در گندله از صفر الی ۱/۵ درصد تغییر می کند. هدف از تهیه گندله با استفاده از کک کاهش مصرف انرژی و درجه حرارت گازهای ورودی به بستر می باشد. بدلیل انجام واکنشهای حرارت زا ناشی از سوختن کک و همچنین واکنشهای اکسیداسیون ماگنتیت به هماتیت سعی شده است که حد مناسب کک در گندله بدست آید. گندله ها بوسیله جریان گازهای داغ از پایین بستر به سمت بالا در مدت زمان ۵ دقیقه خشک می شوند. در انتهای زمان پخت در حالتی که درصد کربن در گندله صفر درصد باشد درجه حرارت گازهای ورودی تا 1340°C افزایش می یابد. افزودن کربن سبب افزایش دما در مرکز گندله می شود لذا درجه حرارت موردنیاز گازهای ورودی برای پخت گندله ها وقتی درصد ترکیب کربن ۰/۷۵ درصد کربن در گندله مقایسه می شوند. آزمایشها در سه حالت ذیل دنبال می شوند و مقدار کاهش مصرف انرژی و پتانسیل افزایش تولید، همچنین کیفیت فیزیکی و شیمیایی گندله بررسی می گردد:

- ۱ - افزودن کک به گندله ها و کاهش درجه حرارت گازهای ورودی به بستر
- ۲ - افزودن کک به گندله ها و کاهش درجه حرارت گازهای ورودی به بستر و کاهش زمان گندله سازی
- ۳ - افزودن کک به گندله ها و کاهش درجه حرارت گازهای ورودی به بستر و کاهش زمان گندله سازی همراه با تزریق اکسیژن به کوره.

مروری بر تحقیقات گذشته

در پیلوت پلنت پدیده های فیزیکی و شیمیایی همانند واحد گندله سازی مدل می شوند. همانطوریکه گندله ها از یک ناحیه به ناحیه دیگر انتقال می یابند تغییرات فیزیکی و واکنشهای شیمیایی همزمان با انتقال جرم و حرارت بین فاز گاز و گندله های در حین خشک شدن، فایرینگ و سرد شدن گندله ها اتفاق می افتد. مدلهائی جهت تولید گندله در منابع مختلف به شرح ذیل ارائه شده است. [۱] Dianbing Hung فقط واکنش کربن را در گندله در نظر گرفته است و از واکنشهای سنگ آهک و ماگنتیت در گندله صرف نظر نموده است. [۲] Chejne و Jana واکنشهای سنگ آهک، کربن و خشک شدن رطوبت گندله ها را در نظر گرفته است. [۴] J.H.Voskmp توزیع درجه حرارت و غلظت در داخل گندله ها را صرف نظر کرده

با استفاده از سنگهای مذکور در یک پیلوت پلنت^۱ شرکت فولاد خوزستان انجام شده است. این کوره توانائی تولید گاز و درجه حرارت موردنیاز برای پخت گندله ها به همان روش و فرایند تولید گندله در واحد گندله سازی را دارد. شماتیک واحد پیلوت پلنت در شکل (۳۱) رسم شده است. ظرفیت کوره در حدود ۵۰ کیلوگرم گندله می باشد. ارتفاع کل گندله ها در کوره ۴۰ سانتیمتر است و ۱۰ سانتیمتر آن گندله های پخته شده^۲ می باشد که در کف کوره ریخته می شود. هدف از استفاده گندله های پخته در کف کوره در واحد گندله سازی جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد پالتهها و گریت بارها می باشد. ارتفاع گریت بار کف کوره پیلوت پلنت ۲ سانتیمتر است. قطر داخلی کوره ۲۶ سانتیمتر بوده و بوسیله آجرنسوز به ضخامت ۱۲ سانتیمتر عایق بندی شده است. جهت جریان گازهای ورودی با تغییر محل محفظه احتراق تغییر می کند این کوره به تجهیزاتی از قبیل کنترل کننده دبی حجمی، درجه حرارت و فشار مجهز می باشد توسط تجهیزات نصب شده مقادیر دبی گازهای ورودی و خروجی کوره، دما در نقاط مختلف بستر، افت فشار بستر و آنالیز درصد ترکیب گازهای خروجی از کوره اندازه گیری می شود. هوای اضافه جهت ایجاد یک محیط اکسیدکننده در بستر گندله ها از جداره جانبی کوره^۳ وارد بستر گندله ها می شود. در حین پخت مراحل مختلف جریان گاز از پایین به بالا^۴ و یا از بالا به پایین^۵ عوض می شود. این عمل بوسیله جابجا کردن در محفظه احتراق و استفاده از مسیرها و شیرهای موجود در مسیر گازها ممکن می گردد. دبی حجمی هوا و گاز دودکش^۶ بوسیله دبی سنج از نوع اریفیس، دبی حجمی گاز طبیعی بوسیله کنتور از نوع توربینی و درصد ترکیب گازهای خروجی از بستر بوسیله آنالیزور پرتابل Testo 450 اندازه گیری می شود. خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، و مینرالوژی مواد اولیه از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. جهت بدست آوردن بازیسته (B₄) مناسب برای حداکثر متالیزاسیون و استحکام گندله و حداقل چسبندگی، مقدار آهک بین صفر تا ۳/۵ درصد تغییر می کند و محدوده مناسب برای برای بازیسته برابر ۰/۶ الی ۰/۷ حاصل می شود. البته پارامترهای دیگری از قبیل میزان سایش^۷ و درصد خلل و فرج^۸ گندله نیز در نظر گرفته می شوند. جهت کاهش مصرف انرژی کک به گندله افزوده می شود. میزان کک



شکل ۱: المان به شعاع R و ضخامت dx.

معادله ارگان جهت محاسبه افت فشار

با استفاده از دبی حجمی گازهای ورودی به بستر و خصوصیات فیزیکی گاز میزان افت فشار گاز از بستر محاسبه می شود.

$$\frac{dp}{dz} = \left[\frac{150(1-\varepsilon)^2 \cdot \mu_g}{d^2 \varepsilon \cdot \rho_g} \cdot G + 1.75 \frac{G^2(1-\varepsilon)}{d\varepsilon^3 \cdot \rho_g} \right] \quad (1)$$

موازنه انرژی فاز گاز

جریان گاز در حین عبور از بستر گندله ها تبادل حرارت می کند. با در نظر گرفتن موازنه انرژی در فاز گاز برای المان نشان داده شده در شکل (۱) رابطه ذیل بدست می آید.

(انرژی گاز ورودی در مقطع X) - (انرژی گاز خروجی در مقطع X + ΔX) - (تبادل انرژی با گندله ها) = تغییر انرژی گاز موجود در المان مربوطه در واحد زمان

$$C_g \cdot G \frac{\partial T_g}{\partial X} = -h \cdot a(T_g - T_p) \quad (2)$$

تغییرات انرژی فاز گاز نسبت به زمان در مقایسه با سایر ترمها قابل صرف نظر می باشد [۸].

موازنه انرژی در گندله

گندله ها در معرض جریان گاز داغ قرار دارند و درجه حرارت آنها رو به افزایش است. گرادیان درجه حرارت در داخل گندله ها نقش مهمی در زمان مورد نیاز برای پخت دارد. در نظر گرفتن گرادیان درجه حرارت در جهت شعاع در داخل گندله ها امکان بررسی دقیقتر انجام واکنشها را

است. همچنین کربن را به عنوان یک ماده اضافه شونده به گندله در نظر نگرفته و تبخیر رطوبت گندله ها را فقط از سطح گندله در نظر گرفته است. در این حالت انتقال رطوبت بصورت حرکت کاپیلار آب از داخل گندله به سطح آن صورت می گیرد ولی وقتی مقدار رطوبت در گندله به زیر مقدار بحرانی برسد فرض درستی نمی باشد. [۹] Karl Heinz مدلی برای پروسس واحد گندله سازی با اضافه کردن کک به گندله بدون در نظر گرفتن اثرات کنترل کیفی آن ارائه کرده است. [۱۱] R.W. Young مدلی برای سیستم Kiln Cooler ارائه کرده است که پدیده خشک شدن همراه با واکنشهای سنگ آهک و اکسیداسیون ماگنتیت را به کمک روش Shrinking core ارائه نموده است. [۵] J.R. Wynnycky اکسیداسیون ماگنتیت، کک و خشک شدن گندله ها را بدون در نظر گرفتن کلسینه شدن سنگ آهک بررسی نموده است. همچنین انتقال حرارت بین گاز و جامد را در نظر گرفته ولی از گرادیان درجه حرارت و غلظت در داخل گندله ها صرف نظر کرده است و پدیده خشک کردن گندله ها را بصورت مختصر بررسی کرده است.

در تحقیق کنونی موارد ذیل مورد بررسی قرار گرفته است. تبخیر رطوبت ابتدا در سطح گندله صورت می گیرد و سپس در حالت بحرانی، گندله بصورت لایه لایه خشک می شود و تبخیر رطوبت به سمت داخل گندله پیشرفت می کند. متعاقباً واکنشهای سنگ آهک، ماگنتیت و کک صورت می پذیرد در تمامی واکنشها سه مرحله اساسی کنترل واکنش از قبیل دیفیوژن از لایه فیلم گاز اطراف گندله، دیفیوژن در داخل گندله و واکنش شیمیائی در نظر گرفته می شود. میزان پتانسیل صرفه جوئی انرژی و افزایش تولید همچنین کیفیت فیزیکی و شیمیایی گندله بررسی می گردد.

مدلسازی ریاضی

در طی فرایند پخت گندله دمای سطح گندله دمای سطح گندله ها از ۲۵ تا ۱۳۴۰ درجه سانتیگراد برحسب زمان متغیر است. لذا حجم گاز طبیعی ورودی و نهایتاً حجم گازهای حاصل از احتراق متغیر خواهد شد. مطابق شکل ذیل یک المان به شعاع R و ضخامت dx حاوی گندله ها جهت موازنه جرم و انرژی در نظر گرفته میشود.

معادلات مربوط به خشک شدن گندله

آب در داخل گندله ابتدا بصورت مایع از خلل و فرج گندله به سطح گندله و از آنجا بصورت بخار به فاز گاز در اثر گرادیان غلظت منتقل می شود. گاز مجاور گندله بصورت بخار اشباع فرض می شود. در حالت بحرانی در حین خشک شدن گندله، هسته مرطوب لحظه به لحظه کوچکتر شده تا نهایتاً به صفر برسد در این حالت گندله کاملاً خشک شده است. بنابراین معادلات تبخیر رطوبت گندله در دو حالت بالای مقدار بحرانی و زیر مقدار بحرانی متفاوت خواهد بود.

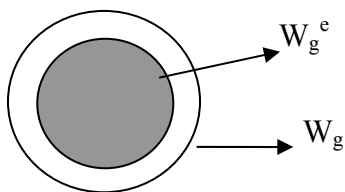
موازنه جرم برای افزایش میزان رطوبت گاز و کاهش رطوبت گندله ها در حالت بالای مقدار بحرانی برای المان نشان داده شده در شکل (۱) به شرح ذیل می باشد:

مقدار بخار آب گاز خروجی - مقدار بخار آب گاز ورودی = تغییرات مقدار آب در المان مربوطه

$$\frac{G}{\rho_g} \cdot \frac{\partial W_g}{\partial X} = (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial W_p}{\partial t}$$

(۵)

اصولاً خشک شدن گندله را می توان به دو مرحله تقسیم کرد: مرحله اول خشک کردن گندله بالای مقدار رطوبت بحرانی و مرحله دوم کمتر از مقدار رطوبت بحرانی است. در مرحله اول تغییرات رطوبت گندله برابر مقدار رطوبتی است که در اثر گرادیان غلظت بخار آب از سطح گندله به فاز گاز منتقل می شود.



شکل ۲: لایه مرزی اطراف گندله (بالای حد بحرانی).

$$-(1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{\partial W_p}{\partial t} \right) = K_m \cdot a \cdot (W_g^e - W_g)$$

(۶)

a: سطح گندله ها به ازای واحد حجم بستر می باشد.

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon)}{d}; m^2 / m^3$$

در حالت دوم وقتی مقدار رطوبت به زیر مقدار بحرانی

ممکن می سازد. با نوشتن موازنه انرژی برای المان به شعاع r و ضخامت dr در داخل گندله تغییر درجه حرارت به سمت مرکز گندله بدست می آید.

تغییر انرژی در المان مربوطه در داخل گندله = انرژی ناشی از تبخیر + انرژی مصرفی در اثر واکنش + انتقال انرژی هدایتی در فاصله r - انتقال انرژی هدایتی در فاصله r + Δr.

$$K_p \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r^2 \frac{\partial T_p}{\partial r}) + \Sigma r_i \Delta H_i \cdot N_i + \Delta H_v$$

$$\left(\frac{dw_p}{dt} \right) = P \cdot C_p \frac{\partial T_p}{\partial t}$$

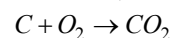
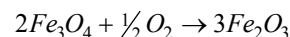
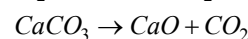
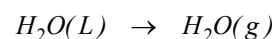
$$(B.C-1): K_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \Big|_{r=\frac{d}{2}} = h(T_g - T_p)$$

$$(B.C-2): \frac{\partial T_p}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

(۳)

موازنه جرم

واکنش تبدیل کربنات کلسیم به آهک و گاز دی اکسید کربن و همچنین واکنش تبدیل آهن ماگنتیتی به هماتیتی و سوختن کربن، در زمانهای مختلف پخت انجام می شوند. واکنشهای موردنظر براساس سه مرحله انتقال جرم از فاز گاز به سطح جامد، دیفیوژن در داخل جامد و نهایتاً انجام واکنش محاسبه شده اند. معادلات و سرعت واکنشها به شرح ذیل می باشند [۱۰]، [۷].



$$r^{\circ} Lime = \frac{4\pi r_0^2 (C^{eq} CO_2 - C_{CO_2})}{\frac{1}{K_e} + \left[\frac{r_0}{r_{1(t)}} \right]^2 \frac{K_1}{K_1 \cdot R \cdot T_s} + \frac{r_0 [r_0 - r(t)]}{r_{1(t)} \cdot D_s}}$$

$$r^{\circ} mag = \frac{15\pi r_m(t)^2 (C_{O_2}^{eq} - C_{O_2})}{\frac{1}{K_r} + \frac{r_m^2(t)}{r_0^2 \cdot k_{g(O_2)}} + \frac{r_m(t)}{D_{O_2}} \cdot \left[1 - \frac{r_m(t)}{r_0} \right]}$$

$$r^{\circ} carbon = \frac{4\pi r_c(t)^2 (C_{O_2} - C_{O_2}^{eq} / Keq)}{\frac{1}{K_r} + \frac{r_c^2(t)}{r_0^2 \cdot k_{g(O_2)}} + \frac{r_c(t)}{D_{O_2}} \cdot \left[1 - \frac{r_c(t)}{r_0} \right]}$$

(۴)

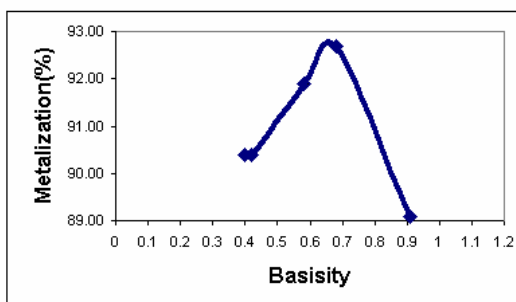
دی اکسید کربن ورودی به المان در مقطع X - (دی اکسید کربن خروجی در مقطع $X + \Delta X$) + (دی اکسید کربن تولیدی در اثر واکنشها) = (تغییرات غلظت دی اکسید کربن در المان)

تغییرات غلظت دی اکسید کربن در گاز و گندله در واحد زمان در مجاور سه ترم دیگر قابل صرفنظر می باشد.

$$\frac{G}{\rho_g} \cdot \frac{\partial CO_2}{\partial x} = \{(r^{\circ} Lime \cdot N_1 + r^{\circ} carbon(1 - \varepsilon))\} \quad (9)$$

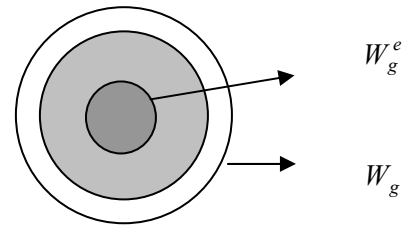
نتایج و بحث

افزودن سنگ آهک سبب افزایش بازیسیته گندله و کاهش ساییش گندله می شود. البته همانطوریکه از اشکال (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است. بازیسیته مناسب گندله برای ترکیب حداکثر متالیزاسیون و استحکام و حداقل چسبندگی در حدود ۰/۶ الی ۰/۷ می باشد. درصد چسبندگی^۹ با بازیسیته سیر صعودی دارد. با استفاده از فیلتر کیک چادرملو برای حد کمینه چسبندگی مقدار بازیسیته برابر ۰/۶۸ بدست می آید. جهت بررسی کیفیت گندله های تولیدی ضمن اضافه کردن کک از ۰ الی ۱/۵ درصد با حفظ بعضی از متغیرهای مستقل مبادرت به تهیه گندله شده است. پخت گندله در سه مرحله مجزا انجام گردیده است. اولین مرحله آن خشک کردن گندله ها بوسیله جریان گاز داغ است که گاز از پایین به بستر وارد شده است. کلیه خواص فیزیکی گندله ها را در لایه های مختلف به فاصله ۱ سانتیمتر در هر ۲ ثانیه محاسبه شده اند. نتایج تجربی با مدل کامپیوتری در اشکال (۷) تا (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۴: تغییرات متالیزاسیون بر حسب بازیسیته (تست سبید در واحدهای احیاء مستقیم).

می رسد گندله بصورت لایه لایه خشک می شود تا در نهایت مرز هسته مربوط در گندله به صفر برسد. شکل ذیل خشک شدن گندله را در این حالت نشان می دهد.



شکل ۳: کاهش رطوبت گندله (پایین حد بحرانی).

معادله خشک شدن گندله براساس نفوذ رطوبت در لایه خشک شده و نهایتاً انتقال به فاز گاز بصورت ذیل می باشد.

$$-(1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{\partial W_P}{\partial t} \right) = \frac{a}{(d/2)^2} * \left(\frac{((W_g^e(r_c) - W_g))}{\frac{d/2 - r_c}{(d/2)r_c D_{H_2O}} + \frac{1}{K_m (d/2)^2}} \right) \quad (7)$$

موازنه جرم اکسیژن

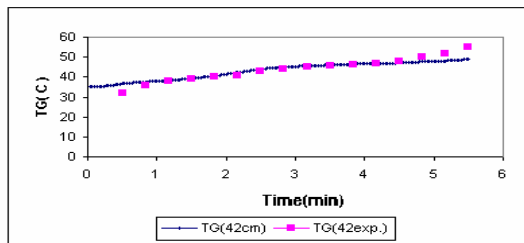
اکسیژن گاز در اثر اکسیداسیون کربن و سنگ ماگنتیت در جهت ارتفاع بستر کاهش می یابد. (اکسیژن ورودی به مقطع X - (اکسیژن خروجی از مقطع $X + \Delta X$) - اکسیژن مصرفی در اثر واکنشها = تغییرات غلظت اکسیژن در المان تغییرات غلظت اکسیژن در گاز و گندله در واحد زمان در مجاور سه ترم دیگر قابل صرفنظر کردن است.

$$\frac{G}{\rho_g} \cdot \frac{\partial CO_2}{\partial x} = \{(r^{\circ} mag / 40 \cdot N_1 + r^{\circ} carbon(1 - \varepsilon))\} \quad (8)$$

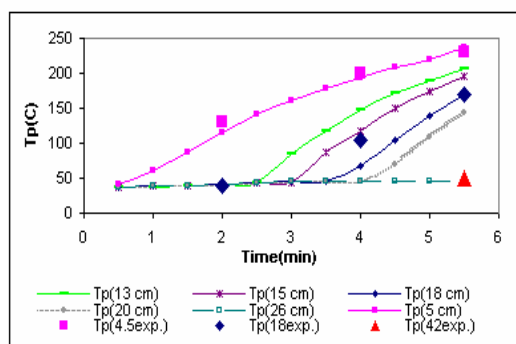
موازنه جرم دی اکسید کربن

ترکیب دی اکسید کربن در واکنش اکسیداسیون کربن و تکلیس سنگ آهک در طول بستر افزایش می یابد.

داده شده است. نتایج درجه حرارت و افت فشار در طی کل زمان پخت (مدت زمان ۲۴ دقیقه) در ارتفاعهای مختلف بستر کوره با نتایج تجربی در اشکال (۱۲) و (۱۳) مقایسه شده است.

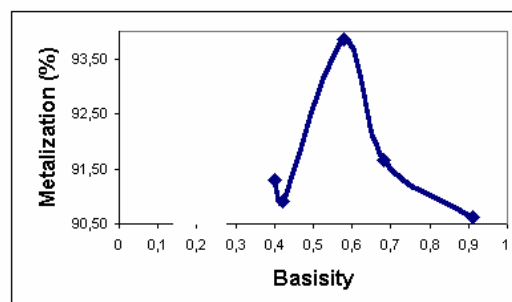


شکل ۸: مقایسه درجه حرارت گاز خروجی از بستر با نتایج تجربی.

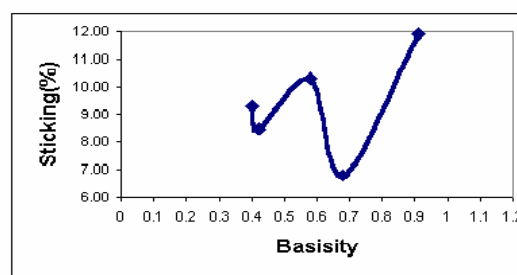


شکل ۹: مقایسه درجه حرارت گندله ها با نتایج تجربی.

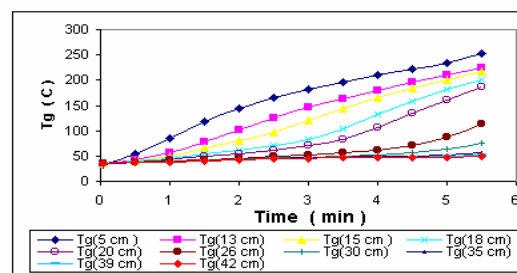
همانطوریکه در شکل (۱۱) نشان داده شده است کاهش رطوبت در گندله ابتدا بصورت بیش از مقدار بحرانی و سپس کمتر از مقدار بحرانی صورت می گیرد. در دو دقیقه اول مرحله Updraft کاهش رطوبت بصورت تبخیر آب از سطح گندله صورت می پذیرد و پس از این مدت در فاصله ۱۳ سانتیمتری از کف کوره اولین لایه گندله خام بصورت لایه لایه شرو به خشک شدن می کند. در فاصله ۴۲ سانتیمتر بالای بستر در مرحله Updraft درصد رطوبت گندله ها کاهش نمی یابد و در مرحله بعدی Downdraft که جهت جریان از بالا به پایین است خشک خواهد شد. زمان شروع و پایان واکنشهای اکسیداسیون ماگنتیت و کربن همچنین تکلیس سنگ آهک در طی یک دوره پخت گندله در اشکال (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۵: تغییرات متالیزاسیون بر حسب بازیسیته (آزمایش چسبندگی).

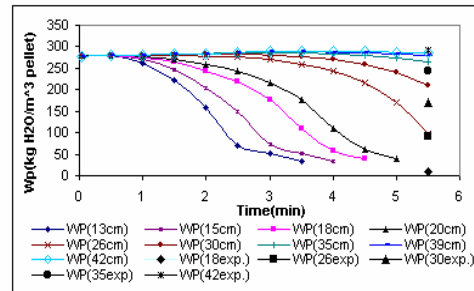
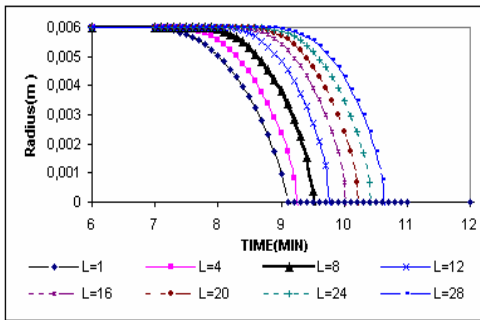


شکل ۶: تغییرات چسبندگی گندله ها بر حسب بازیسیته (B4).



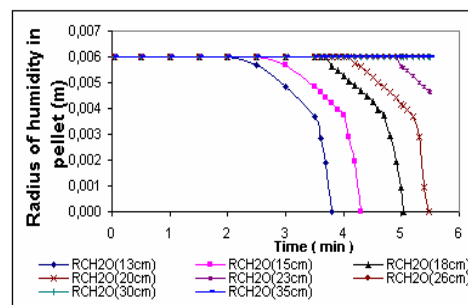
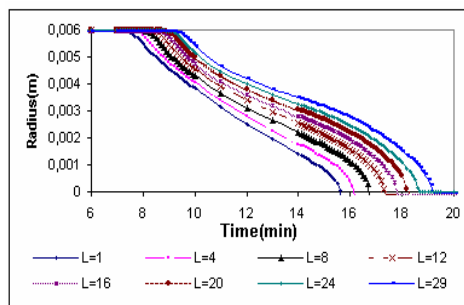
شکل ۷: درجه حرارت گاز در ارتفاعهای مختلف کوره بر حسب زمان.

شکل (۷) درجه حرارت گاز بر حسب زمان در سطوح مختلف بستر در شرایط پایین به بالا را نشان می دهد. در شکل (۹) مقایسه درجه حرارت گاز خروجی از بالای بستر با نتایج تجربی در فاصله ۴۲ سانتیمتری از کف بستر نشان داده شده است. تغییرات درجه حرارت گاز خروجی بین ۳۵ تا ۵۰ درجه سانتیگراد می باشد. انرژی گاز صرف تبخیر آب در گندله ها شده است. همچنین در شکل (۸) درجه حرارت گندله ها با نتایج خروجی از مدل مقایسه شده است. بعد از مرحله Updraft آزمایش متوقف شده و با خارج نمودن گندله ها از کوره رطوبت گندله ها در مقاطع مختلف بستر اندازه گیری شد و با نتایج مدل مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در شکل (۱۰) نشان



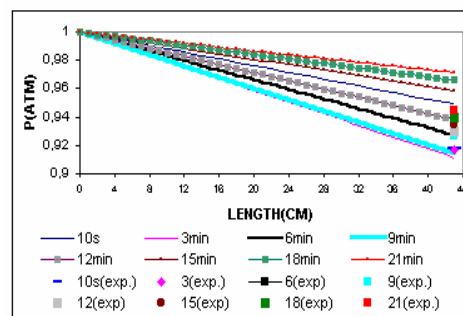
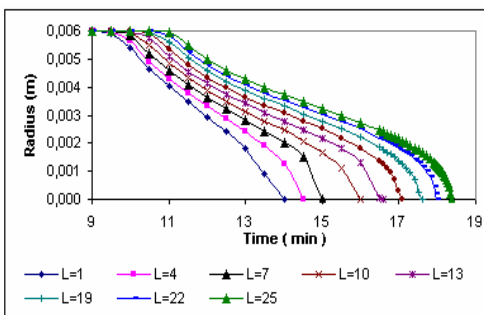
شکل ۱۴: شعاعی از گندله که سنگ آهک آن هنوز واکنش نکرده است در ارتفاعهای مختلف کوره بر حسب زمان نشان می دهد.

شکل ۱۰: مقایسه میزان رطوبت در گندله ها با نتایج تجربی.



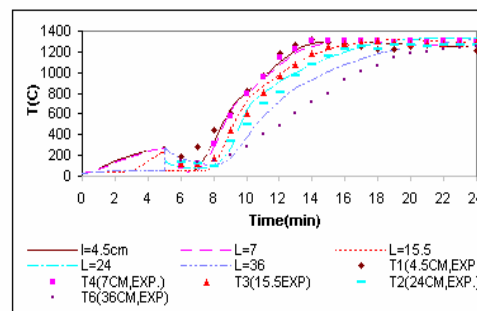
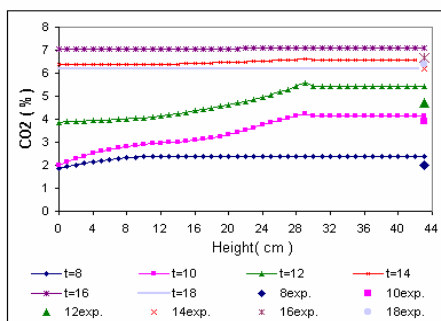
شکل ۱۵: شعاعی از گندله که ماگنتیت آن هنوز واکنش نکرده است در ارتفاعهای مختلف بستر بر حسب زمان نشان می دهد.

شکل ۱۱: شعاع هسته مرطوب در گندله در ارتفاعهای مختلف بر حسب زمان.



شکل ۱۶: شعاعی از گندله که کربن آن هنوز واکنش نکرده است در ارتفاعهای مختلف بر حسب زمان نشان می دهد.

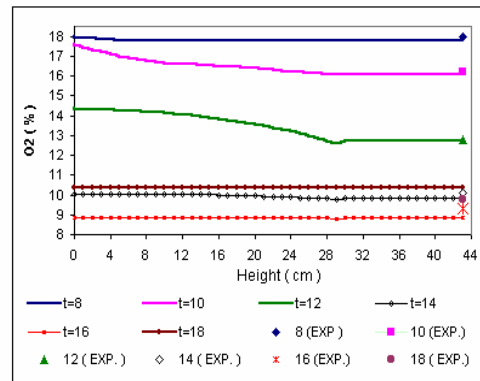
شکل ۱۲: مقایسه میزان افت فشار گاز با نتایج تجربی تا انتهای زمان فایرینگ.



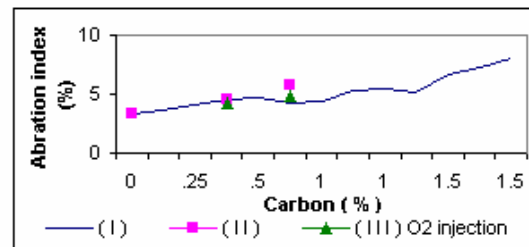
شکل ۱۷: مقایسه درصد CO₂ در گاز خروجی از بستر با نتایج تجربی.

شکل ۱۳: مقایسه درجه حرارت گندله ها تا انتهای زمان فایرینگ در ارتفاعهای مختلف بر حسب زمان.

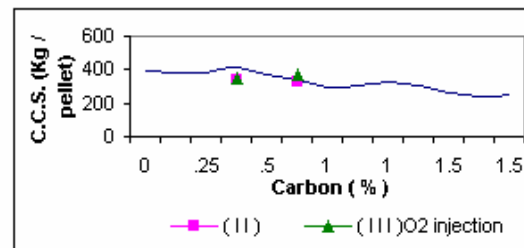
گازهای خروجی بدلیل اکسیداسیون کک و ماگنتیت در طی عبور از بستر کاهش می یابد. از آنجا که درصد O_2 در انتهای ناحیه پخت در گاز خروجی از بستر به مقدار ۹ درصد کاهش می یابد و دلیل آن افزایش درجه حرارت گاز به حدود ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد می باشد و سبب افزایش افت فشار گاز در مسیر مخصوصاً در حین عبور از بستر گندله ها می شود و دبی جرمی گاز عبوری از بستر کاهش می یابد. اگر ظرفیت بیشتری برای فن ها انتخاب می شد مشکلی ایجاد نمی شد. لذا در این راستا جهت ایجاد یک محیط اکسید کننده مناسب به کوره اکسیژن تزریق می شود تا کیفیت فیزیکی و شیمیایی گندله ها بهبود یابد. با نصب دبی سنج از نوع رتامتر، اکسیژن دبی در حدود $25-37 \text{ NM}^3/\text{hr}$ به کوره دمیده می شود و درصد O_2 در گاز به بیش از ۱۵ درصد افزایش می یابد. با تزریق اکسیژن به کوره همانطوریکه در اشکال (۱۹) تا (۲۱) نشان داده شده است خواص فیزیکی و شیمیایی گندله ها بهبود نسبی می یابند. افزایش بیش از حد کک به گندله خواص فیزیکی و شیمیایی گندله را تحت تاثیر قرار داده بطوریکه میزان سایش را افزایش و استحکام گندله ها را کاهش می دهد. لذا لازم است میزان افزایش کک در محدود قابل قبول باشد. حداکثر مقدار سایش قابل قبول ۷ درصد و حداقل استحکام^۱ قابل قبول 250 Kg/pellet می باشد. شکل (۱۹) نشان می دهد اگر درصد کربن در گندله کمتر از یک درصد باشد مقدار A.I. از $4/6$ درصد کمتر خواهد شد و شکل (۲۰) نشان می دهد اگر درصد کربن در گندله به بیش از $1/15$ درصد برسد میزان استحکام در گندله به 300 کیلوگرم به ازای هر گندله کاهش می یابد. باید توجه داشت در مخلوط انتخاب شده مقدار درصد ماگنتیت در گندله به حدود ۱۵ درصد می رسد لذا میزان کک $0/75$ درصد مناسب می باشد در این حالت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گندله حفظ شده است. بنابراین در مدل کامپیوتری مقدار کک برابر $0/75$ درصد در نظر گرفته شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. شکل (۲۱) افزایش مقدار تخلخل را بر حسب درصد کک را نشان می دهد. افزایش مقدار تخلخل در واحدهای احیاء مستقیم در تسهیل نفوذ گاز به داخل گندله موثر است و باعث افزایش متالیزاسیون می شود. تغییرات متالیزاسیون بر حسب درصد کربن در



شکل ۱۸: مقایسه درصد CO_2 گاز خروجی از بستر با نتایج تجربی.

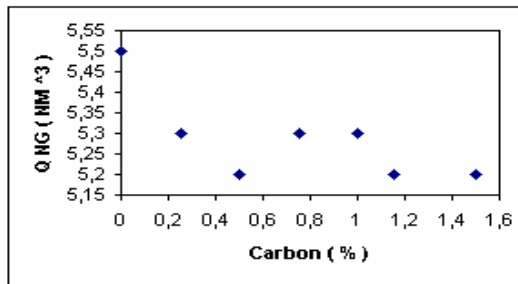


شکل ۱۹: درصد سایش گندله بر حسب درصد کربن (در سه حالت I, II, III).

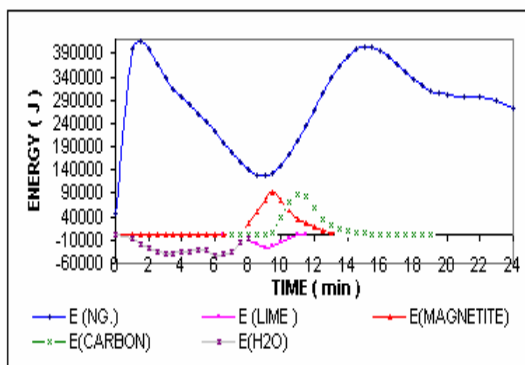


شکل ۲۰: میزان استحکام گندله بر حسب درصد کربن (در سه حالت I, II, III).

در اشکال (۱۷) و (۱۸) درصد O_2 , CO_2 گازهای خروجی از دودکش با نتایج تجربی مقایسه شده است. درصد ترکیب CO_2 در گاز بدلیل تکلیس سنگ آهک و اکسیداسیون کک در حین عبور از بستر افزایش می یابد. در مرحله Downdraft گاز در حین عبور از لایه Hearth layer بستر گندله های پخته واکنشی صورت نمی پذیرد و درصد ترکیب گاز ثابت می ماند. درصد O_2 نیز در



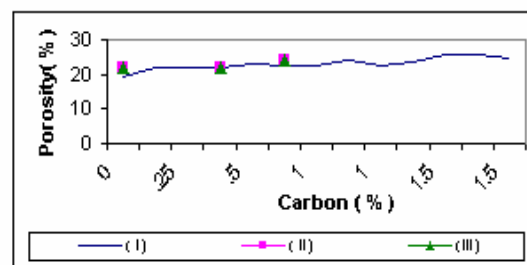
شکل ۲۴: کاهش مصرف گاز طبیعی در یک دوره پخت در پایلوت پلنت بر حسب درصد کربن (در حالت I).



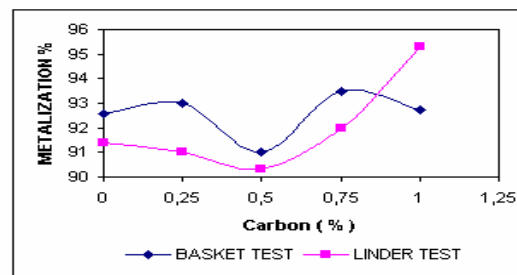
شکل ۲۵: توزیع انرژی مصرفی و تولیدی در پایلوت پلنت در طی زمان یک دوره پخت.

شکل (۲۵) انرژی های تولیدی و مصرفی در طی پخت گندله از ابتدای مرحله خشک کردن گندله ها تا انتهای زمان فایرینگ را نشان می دهد. تبخیر رطوبت و تکلیس سنگ آهک همراه با جذب انرژی می باشد و انجام واکنشهای اکسیداسیون سنگ آهن ماگنتیت و کربن همراه آزاد شدن انرژی می باشند. سهم انرژی و زمان شروع و پایان هر واکنش شیمیایی و فیزیکی مشخص شده است. در ناحیه ای که واکنش های گرمازا انجام می شوند، مصرف گاز طبیعی کاهش یافته است. در آزمایشهای سری اول^{۱۱} افزایش دمای بیش از حد در مرکز گندله ها سبب می شود که در داخل گندله ها یک هسته که درصد FeO آن نسبتاً بالا است و توسط آهن ربا قابل جذب است تشکیل شود. لذا با کاهش زمان فایرینگ از افزایش دما در مرکز کاسته می شود و شرایط لازم جهت پخت گندله در دمای مناسب را ممکن می سازد. در آزمایشهای سری دوم^{۱۲} علاوه بر کاهش دمای گاز ورودی به بستر زمان پخت نیز کاهش داده می شود. نتایج بدست آمده در ذیل آمده است.

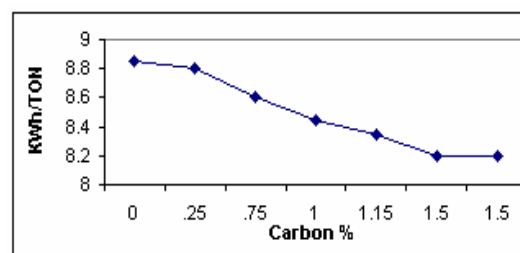
شکل (۲۲) توسط دو آزمایش Basket test در کوره های احیاء مستقیم و دستگاه آزمایشگاهی تست لیندر نشان داده شده است و بهبود نسبی یافته است. میزان انرژی مصرفی جهت آسیاب مخلوط سنگ آهن وقتی عاری از کک است در حدود ۸/۸ KWh/ton می باشد. در صورتیکه درصد کک در گندله به ۱/۵ درصد برسد میزان انرژی مصرفی جهت آسیاب ۸/۳ KWh/ton کاهش می یابد. این کاهش انرژی ناشی از وجود کک بسیار نرم و کاهش بلین مخلوط استفاده شده می باشد. شکل (۲۴) میزان کاهش مصرف گاز طبیعی را در حالت اول که فقط درجه حرارت گاز ورودی به بستر کاهش داده شده است را برحسب درصد کربن در گندله نشان می دهد.



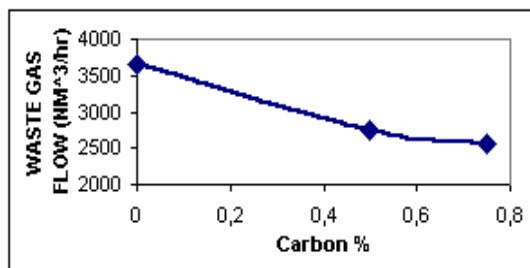
شکل ۲۱: افزایش درصد خلل و فرج گندله بر حسب درصد کربن (در سه حالت I, II, III).



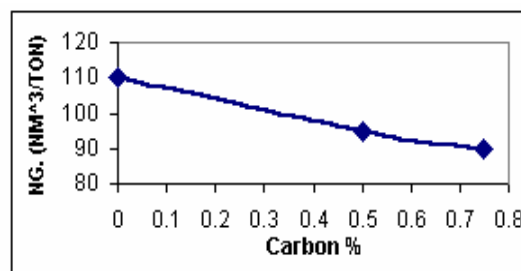
شکل ۲۲: مقایسه درصد متالیزاسیون آهن اسفنجی بر حسب درصد کربن (در آزمایش مرحله I).



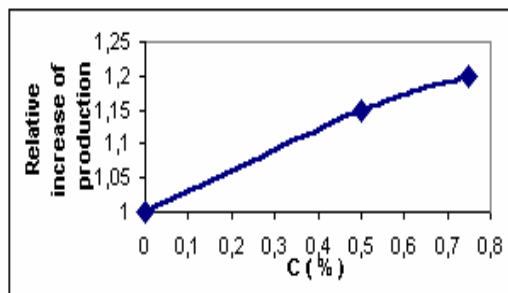
شکل ۲۳: کاهش مصرف برق آسیاب در اثر کاهش بلین موردنیاز برحسب درصد کربن.



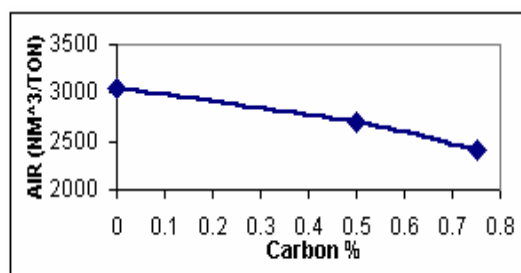
شکل ۲۸: کاهش تولید گاز دودکش در یک دوره پخت در پایلوت پلنت بر حسب درصد کربن (در حالت II).



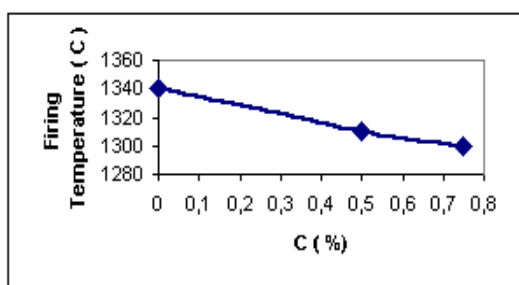
شکل ۲۶: کاهش مصرف گاز طبیعی در یک دوره پخت در پایلوت پلنت بر حسب درصد کربن (در حالت II).



شکل ۲۹: افزایش نسبی تولید در پایلوت پلنت بر حسب درصد کربن (در حالت II).



شکل ۲۷: کاهش مصرف هوا در یک دوره پخت در پایلوت پلنت بر حسب درصد کربن (در حالت II).

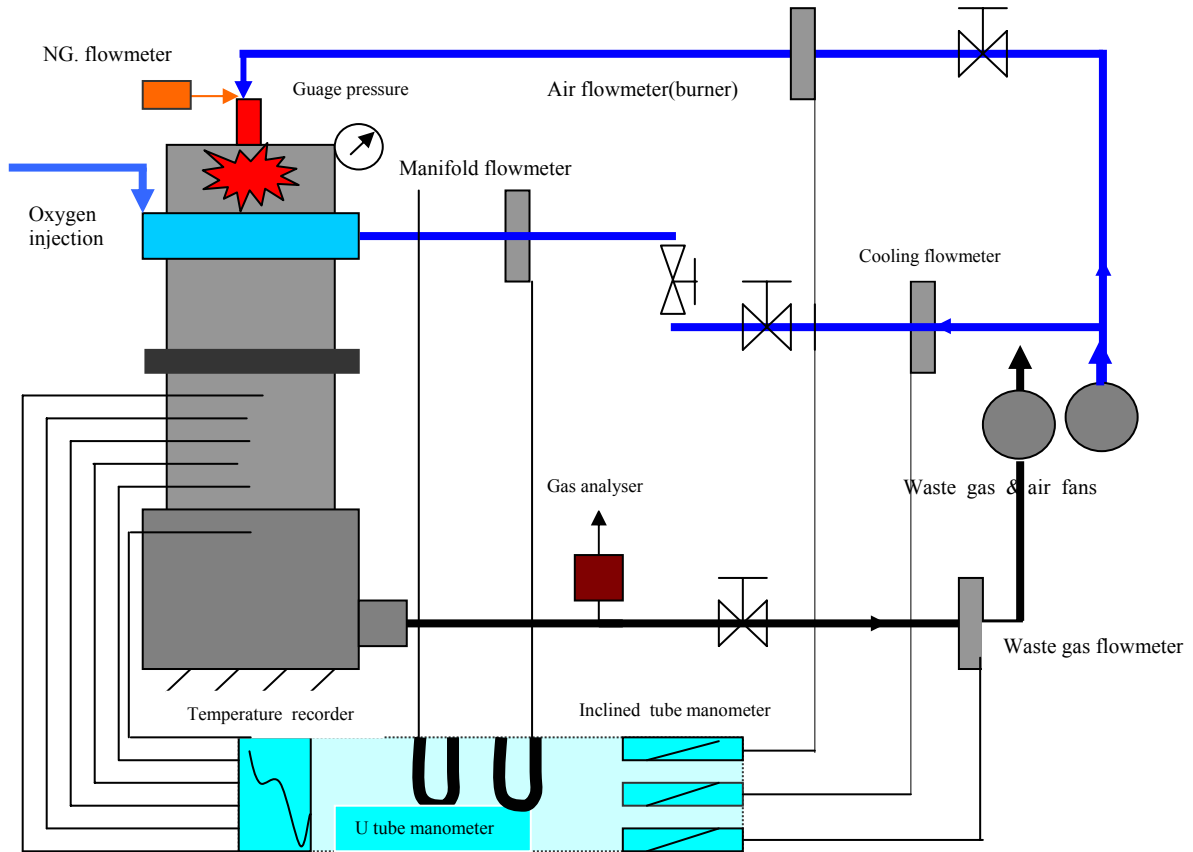


شکل ۳۰: کاهش درجه حرارت گاز ورودی به بستر بر حسب درصد کربن (در حالت II, III).

نتیجه گیری

مدل ارائه شده پدیده های انتقال حرارت، احتراق گاز، تبخیر آب، اکسیداسیون ماگنتیت، اکسیداسیون کربن و تکلیس سنگ آهک را در گندله همراه با محاسبات انرژی شبیه سازی نموده است. با استفاده از مدل، شروع و پایان هریک از واکنشهای شیمیایی و پدیده های فیزیکی، توزیع درجه حرارت در بستر و گندله ها بدست می آید. از نتایج تجربی پایلوت پلنت جهت بررسی نتایج مدل استفاده می شود بعلاوه کیفیت گندله نیز چک می شود. مشخص گردیده است که درصد مناسب کک برای مخلوط انتخاب شده (هماتیت و

کاهش مصرف انرژی ناشی از کاهش گاز طبیعی، هوای مصرفی و گازهای دودکش بر حسب درصد کربن در اشکال (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) نشان داده شده است. کاهش مصرف انرژی الکتریکی برق بدلیل کاهش حجم هوا و گاز دودکش سبب کاهش اثر گلخانه ای ناشی از گاز CO_2 در محیط زیست می گردد. افزایش درصد CO_2 سبب افزایش دمای کره زمین می گردد [۱۲]. کاهش زمان پخت در پایلوت پلنت معادل حالتی است که در واحد گندله سازی سرعت Traveling grate افزایش می یابد. لذا می توان در واحد گندله سازی تناژ تولید را افزایش داد. میزان پتانسیل افزایش تولید بر حسب درصد کربن در شکل (۲۹) نشان داده شده است. در شکل (۳۰) میزان کاهش درجه حرارت گاز ورودی به بستر بر حسب درصد کربن نشان داده شده است. کاهش دمای ورودی به میزان ۴۰ درجه سانتیگراد نقش بسیار مهمی در کاهش تعمیرات پالت، گریت بارها و نسوز کوره دارد. افزودن کک در واحد گندله سازی بعد از آسیاب ها و قبل از دیسکهای گندله سازی با استفاده از یک فیدر مناسب ممکن می باشد.



Parameter	Waste fan	Air fan	1	2	3	4	5	6
Pressure (mbar)	60	60	-	-	-	-	-	-
Temperature (C°)	25-500	25	25	25	25	25-600	25	25
Flow (NM ³ /hr)	3720	1620	0-220	0-320	0-20	0-550	0-18	0-700
Density (kg/m ³)	0.52	1.2	-	-	-	-	-	-

شکل ۳۱: دیاگرام جریان پایلوت پلنت نیمه صنعتی شرکت فولاد خوزستان.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سنگ ها و افزودنیها.

Analyse(%)	Ferteco	C.V.R.D	Carajas	G.E.G	Chadernalo	Carbon	Bentonite	CaCO ₃
mixture(total)	20.30	23.70	20.30	3.40	28.10	1.00	0.70	2.50
Fe _{total}	67.5	68	66.2	67.75	68	0	2.48	0
FeO	2.3	0.35	0.5	19.25	13.5	0	Fe ₂ O ₃ =3	0
SiO ₂	1.35	1.2	0.75	1.5	1.3	8	67.45	1.08
Al ₂ O ₃	0.5	0.33	1.2	0.3	0.76	3.15	12.23	0.04
CaO	0.06	0.02	0.08	0.3	0.39	0.08	4.46	36.49
MgO	0.03	0.05	0.05	1.35	0.19	0.11	1.37	16.71
P	0.022	0.031	0.03	0.04	0.03	0	0	0
S	0.015	0.01	0.029	0.08	0.027	0.53	0	0
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0.12	0
Na ₂ O	0	0	0	0	0	0.25	2.22	0
C	0	0	0	0	0	79.5	0	0
Ash	0	0	0	0	0	14.22	0	0
L.O.I.	0	0	0	0	0	85.78	8.9	44.71

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گندله های پخته شده (حالت I).

Test no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Blaine(cm ² /gr)	2133	1788	1982	1751	2118	2203	1825	1984	2207	2018	1842	1925	2078
Screen-45μ	81.5	81	80	82.3	80.8	79	75.8	77.6	74.3	81	78.4	84	82.4
Lime dolomit(%)	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Bentonite(%)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Drop No.	5	3.5	3.6	3.6	3.1	4.1	3.2	3.2	3.3	4	3.3	3.2	3.5
Coke(%)	0	0	0.5	0.5	0.5	0.75	1	1	1	1.15	1.5	1.5	1.5
Firing temperature	1340	1340	1310	1310	1320	1300	1320	1310	1290	1290	1300	1290	1290
Abrtion index (%)	3.3	3.7	4.5	4.5	4.7	4.2	4.4	5.3	5.5	5.1	6.7	7.2	8
Porosity(%)	19.5	21.8	21.9	21.9	22.9	22.6	22.7	23.1	22.5	23.4	25.9	25.6	24.9
C.C.S(Kg/Pellet)	394	385	417	417	376	340	300	303	324	307	262	242	252
Fe _{total} (%)	67	67.03	66.72	66.72	66.8	67.1	67	67	66.8	66.8	66.6	66.4	66.8
FeO(%)	0.11	0.11	0.22	0.22	0.15	0.27	1.25	0.66	0.35	0.6	0.72	0.93	0.54
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ (%)	1.8	2.34	2.59	2.59	2.55	2.71	2.52	2.67	2.52	2.64	2.8	3.18	2.9
CaO+MgO(%)	1.7	1.87	1.47	1.47	1.98	1.02	1.71	1.22	1.8	2.02	1.1	1.44	1.73
P(%)	0.03	0.028	0.028	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03

جدول ۳: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گندله های پخته شده (حالت II,III).

Condition	Second condition		Third condition (oxygen injection)	
	1	2	3	4
Test no.				
Blaine(cm ² /gr)	1958	1972	1930	2016
Screen-45μ	80.5	80	84	80.4
Lime dolomit(%)	1.5	1.5	1.5	1.5
Bentonite(%)	0.75	0.75	0.75	0.75
Coke(%)	0.5	0.75	0.5	0.75
Firing temp.(C°).	1310	1310	1310	1300
Abration index(%)	4.6	5.2	4.6	5
Porosity(%)	21.9	24.1	24.9	24.8
C.C.S. (Kg/Pellet)	334	292	341	373
Fe _{tot} (%)	67.05	66.8	66.93	66.92
FeO(%)	1.12	0.66	0.26	0.21

CO₂ خواهد شد. CO₂ یکی از گازهای گلخانه ای محسوب می شود.

۴- کاهش گاز دودکش به میزان ۳۲٪ که سبب کاهش مصرف برق به ازاء تن تولید برای فن گاز دودکش خواهد شد.

۵- کاهش درجه حرارت گاز ورودی به بستر گندله ها از ۱۳۴۰ به ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد. کاهش درجه حرارت علاوه بر کاهش مصرف انرژی سبب افزایش عمر مفید گریت بارها، پالت ها و نسوز کوره می گردد و کاهش توقفات و تعمیرات واحد را سبب می گردد.

۶- افزایش درصد خلل و فرج گندله سبب افزایش تولید

ماگنتیت) در حدود ۷۵٪ درصد می باشد و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گندله تغییر نخواهد کرد. اگر درصد کربن در گندله به بیش از ۱ درصد افزایش یابد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گندله تحت تاثیر قرار می گیرد. با استفاده از مدل و آزمایشهای تجربی نتایج ذیل حاصل گردید.

۱- افزایش ظرفیت تولید به میزان ۲۰٪

۲- کاهش مصرف گاز طبیعی به میزان ۱۸٪

۳- کاهش هوای مصرفی به میزان ۲۱٪ که سبب کاهش مصرف برق به ازاء تن تولید برای فن هوا خواهد شد، بعلاوه سبب کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از گاز

r^0_{Lime} atm : سرعت تجزیه سنگ آهک	آهن اسفنجی در واحدهای احیاء مستقیم می شود.
kmol/(one pellet.sec)	
r^0_{mag} : سرعت اکسیداسیون ماگنتیت	فهرست علائم
kmol/(one pellet.sec)	a: سطح ویژه بستر
r^0_{carbon} : سرعت اکسیداسیون کربن	C_g : ظرفیت حرارتی گاز
kmol/ (m ³ sec)	d_p : قطر گندله
atm	R: ثابت تعادل گازها
m	r: شعاع گندله
C°	T: درجه حرارت
m	X: جهت محور یا ارتفاع بستر
(kmol. M ⁻³)	C_j : غلظت ترکیب j در گاز
(kg _{H2O} .m ⁻³)	W_g : رطوبت در فاز گاز
(kg _{H2O} .m ⁻³)	W_p : رطوبت گندله
(kg.m ⁻³)	ρ_g : دانسیته گاز
(m ³ gas/m ³ bed)	ϵ : درصد خلل و فرج بستر
(m ³ gas/m ³ pellet)	ϵ : درصد خلل و فرج گندله
	$m^2 m^{-3}$
	kJ
	m
	m^2/sec : ضریب نفوذ مولکولی ترکیب j در فاز گاز
	G: شدت جرمی گاز ورودی به بستر
	$kg \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$
	h: ضریب انتقال حرارت
	$kJ m^{-2} sec^{-1} k^{-1}$
	K_{eq} : ثابت تعادل واکنش
	$kJ m^{-1} sec^{-1} k^{-1}$: K_p : ضریب انتقال حرارت هدایتی گندله
	$m sec^{-1}$: K_r : ضریب سرعت واکنش
	L: ارتفاع کل بستر گندله ها (کوره)
	m
	N_1 : تعداد گندله به ازای واحد حجم بستر
	m^{-3}
	P: فشار گاز

مراجع

- 1 - Dianbing, H. and Lingtan, K. "A model for the process of firing iron ore pellet containing solid fuel." *ICHEME - 5 TH International Symposium on Agglomeration*.
- 2 - Chejne Janna, F., Ruiz Sierra, J. C. and Badie, J. M. (1996). "Mathematical model for energy saving in indurations of iron ore pellets." *Iron Making and Steel Making*, Vol. 23, No. 5, PP. 406-410.
- 3 - Holman, J. P. (1981). *Heat Transfer*, Mc Graw - Hill, Inc. PP. 139-145.
- 4 - Voskamp, J. H. and Brasz, (1975). "Digital simulation of the steady state behavior of moving bed processes." *Measurement and Control*, Vol. 8, PP. 23-32.
- 5 - Wynnycky, J. R. and Batterharm, (1985). "Iron ore sintering and pellet induration processes." *In 4th International Symposium on Agglomeration, ISS-AIME*, Toronto, Canada, PP. 957,1994.
- 6 - Jianguo, Xu, and Froment, G. F. (1989). "Methane steam reforming ; I & II diffusional limitation and Reactor simulations." *AIChE Journal*, Vol. 35, No. 1.
- 7 - Szekely, J. and Themelis, N. J. (1971). *Rate phenomena in process metallurgy*, chap.18, Newyork, Wily Inter science.
- 8 - Kucukada, K., Thibault, J., Hodouin, D., Paquet, G. and Caron, S. (1999). "Modeling of a pilot scale iron ore pellet induration Furnace." *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 33, No. 1, PP. 1-12.
- 9 - Boss, K. H., Cappel, F. and Lurgi Gmb, H. (1986). "Methods to reduce energy consumption and increase specific production rates in the straight grate pelletizing process." *Metallurgical plant and Technology (MPT8)*, PP.12-25.
- 10 - Cross, M. and Blot, P. (1999). "Optimizing the operation of straight-grate iron ore pellet induration systems using process models." *Metallurgical and Materials Transaction B*, Vol. 30B, PP. 813.
- 11- Young, R. W., Cross, M. and Gibson, R. D. (1979). "Mathematical model of grate kilen cooler process used for indurations of iron ore pellets." *Iron Making and Steel Making*, No. 1.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 – Pot Grate test	2 – Hearth Layer	3 – Manifold	4 – Up Draft
5 – Down Draft	6 – Waste gas	7 – Abrasion Index	8 – Porosity
9 – Sticking	10 – Cold Compression	11 – Condition I	12 – Condition II