

بهینه سازی فرآیند پخت پیوسته گندله از نظر میزان انرژی مصرفی و کیفیت گندله

سید خطیب الاسلام صدرنژاد (استاد)

علی فردوسی (کارشناسی ارشد)

چکیده

پخت گندله اکسید آهن، به علت مصرف زیاد انرژی، فرایندی گران است. در نتیجه کاهش مصرف انرژی یک گام اساسی برای بهبود اقتصاد تولید گندله محسوب می شود. در این مقاله از روش مدلسازی ریاضی به منظور امکان یابی کاهش مصرف سوخت در راستای افزایش سرعت تولید و بهبود خواص گندله پخته شده استفاده می شود. در طرح مدل مراحل هم چون خشک کردن، پیشگرم کردن، پختن و سرد کردن گندله مورد توجه قرار می گیرند. معادلات موازنه جرم، انرژی و مومنتوم با در نظر گرفتن فرایندهای خشک شدن رطوبت، تکلیس سنگ آهک، اکسیداسیون مگنتیت و احتراق کربن، برای کوره پخت گندله نوشته شده و به روش تفاضل محدود به طور همزمان حل می شوند. توزیع دما، سرعت و ترکیب شیمیایی گاز در نقاط مختلف بستر گندله و نیز تاریخچه دمایی مقطع کوره و چگونگی پیشروی واکنش های فیزیکی و شیمیایی در درون گندله در طول فرآیند برای نقاط مختلف بستر بدست می آید. مدل حاصل قادر به پیش بینی میزان سوخت مصرفی در فرآیند پخت و کیفیت گندله پخته شده خواهد بود. تاثیر ارتفاع بستر، سرعت حرکت زنجیر متحرک و ترکیب گندله خام بر فرایند پخت گندله با استفاده از نرم افزار حاصل بررسی شده و در هر مورد حد بهینه تعیین می شود.

کلمات کلیدی: گندله سازی، شبیه سازی، موازنه جرم، انرژی و مومنتوم، مدل ریاضی

مقدمه

برای تولید گندله خام، نرمه سنگ آهن به همراه بنتونیت و دیگر افزودنی ها مثل سنگ آهک، نرمه کوک و رطوبت برای دستیابی به شکل کروی در دیسکهای گندله سازی به چرخش در آورده می شوند تا گندله خام تولید شود [۱]. گندله های خام دارای استحکام کوچکی هستند. بنابراین باید به نحوی سخت شوند. به این منظور گندله ها بر روی یک زنجیر متحرک بار شده و تشکیل یک بستر فشرده می دهند. برای حفاظت از زنجیر متحرک در مقابل دمای بالای گاز، ابتدا مقداری گندله پخته و سپس گندله خام روی باند پخت پهن می شود. گاز گرم، بسته به دما و مرحله پخت از بالا و یا از پایین به داخل بستر گندله دمیده شده و در نهایت سرد می شود [۲]. بیشترین اتلاف گرما در فرایند پخت گندله مربوط به تکلیس آهک، تبخیر رطوبت و حرارت محسوس گازهای

داغ است. انرژی مورد نیاز برای جبران تلفات حرارت باید از طریق احتراق سوخت توسط مشعل ها و واکنش مگنتیت با کربن تامین شود. چهار تحول فیزیکی/شیمیایی اساسی در هنگام پخت گندله رخ می دهد: تبخیر و تقطیر آب، تکلیس سنگ آهک، اکسیداسیون مگنتیت و احتراق کربن. اگر چه امکان بازیابی بخشی از حرارت تلف شده و بازگشت آن به سیستم وجود دارد، اما حرارت مورد نیاز برای پخت گندله به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از گرمای لازم برای انجام تحولات فوق است. میزان حرارت قابل بازیابی نیز با تغییر شرایط عملیات تغییر می کند [۳].

افزایش رطوبت به مواد خام سازنده گندله، حرارت لازم برای پخت گندله را افزایش می دهد. افزایش آب به مخلوط پودر داخل دیسک های گندله سازی سبب گسترش توزیع اندازه، افزایش قابلیت نفوذ و کاهش کسر حفرات درون بستر گندله می شود. مهمترین تاثیر مربوط به توزیع اندازه است. کاهش نفوذ پذیری، تنزل دبی گاز و کاهش بازدهی فرآیند را باعث می شود. البته مقدار این کاهش قابل ملاحظه نیست زیرا گندله های بیش از حد ریز و بیش از حد درشت قبل از ورود به کوره پخت، بازگشت داده می شوند.

برای تعیین درصد بهینه رطوبت در گندله خام، دو فاکتور زیر را باید در نظر گرفت:

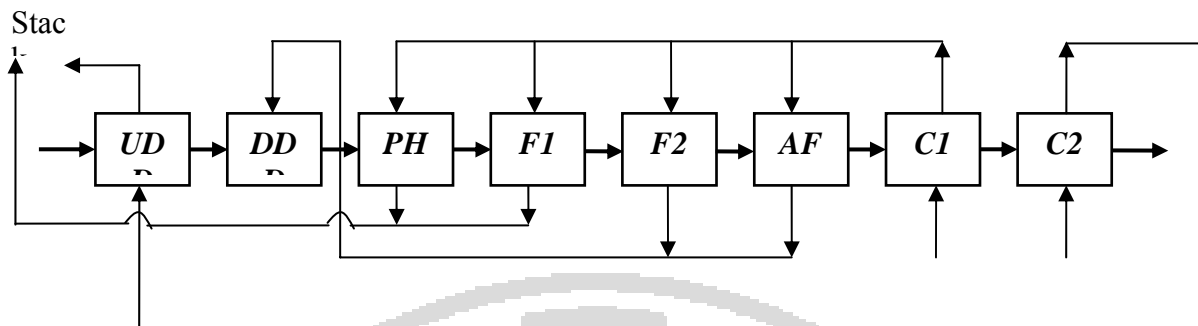
۱- مناسب بودن شرایط عملیاتی لازم برای ادامه کار دیسکهای گندله سازی

۲- حصول استحکام و نفوذپذیری کافی برای انجام مطلوب فرایند پخت

واکنش مگنتیت با کربن مشتمل بر مراحل همچون نفوذ متقابل اکسیژن و CO_2 در گندله و تجزیه سنگ آهک است. وجود آهک در گندله های خود گداز باعث افزایش گرمای مورد نیاز برای پخت می شود. این اثر البته خطی نیست، زیرا دمای پخت تابعی نزولی از مقدار موجود سنگ آهک است. به علت ضرورت حرکت گاز از درون لایه واکنش کرده به داخل گندله، بین واکنشهای مربوط به مگنتیت و سنگ آهک معمولاً "تداخل وجود دارد. در اثر واکنش تجزیه سنگ آهک، امکان افزایش فشار گاز در داخل گندله وجود دارد. بنابراین تا زمانی که تمام سنگ آهک تجزیه نشده، ممکن است احیاء مگنتیت حتی آغاز هم نشود. این اثر می تواند نقش مهمی در بازدهی فرآیند داشته و باعث به تاخیر افتادن واکنش مگنتیت و کوک و حتی اکسیداسیون مگنتیت در ناحیه کولینگ شود.

سیستم پخت گندله از پنج ناحیه تشکیل شده است: ناحیه خشک کردن (Drying) که با حرف D نشان داده می شود؛ ناحیه پیشگرم کردن (Preheating) که با PH نشان داده می شود؛ ناحیه پخت (Firing) که با F نشان داده می شود؛ ناحیه پس از پخت (After Firing) که با AF نشان داده می شود، ناحیه اول سرد کردن (Cooling) که با C1 نشان داده می شود و ناحیه دوم سرد کردن که با C2 نشان داده می شود. ناحیه خشک کردن با دو جریان روبه بالا (UDD) و روبه پایین (DDD) مشخص می شود. مراحل مختلف پخت و توزیع جریان گاز در واحد گندله سازی شرکت فولاد خوزستان در شکل ۱ نشان داده شده است. جریان گاز اولیه که وارد ناحیه سرد کردن می شود دو یا سه بار از میان بستر عبور می کند. این جریان سپس تقسیم شده و به صورت جریان روبه پایین در نواحی پیشگرم، پخت و پس از پخت، از میان بستر عبور می کند. مقداری از این گاز معمولاً دو باره در نواحی خشک کردن مورد استفاده قرار می گیرد. جریان دیگر در جهت بالا و از میان دومین ناحیه سرد کردن عبور کرده و بنابراین در اولین یا دومین ناحیه خشک کردن (به منظور کمک به جریان گاز اول) مورد استفاده قرار می گیرد.

هنگامیکه جریان گاز ابتدایی اولین مرحله سرد کردن را ترک می کند، دمایی در حدود $1000^{\circ}C$ دارد. به منظور پخت گندله با استفاده از حرارت حاصل از مشعل ها (Burner) در نواحی PH و F دمای جریان گاز ورودی به این نواحی تا $1300^{\circ}C$ افزایش می یابد. قسمتی از این جریان (خروجی از PH و F) به همراه جریان گاز خروجی از دومین ناحیه سرد کردن به منظور



شکل ۱ - مراحل مختلف پخت و توزیع جریان گاز در واحد گندله سازی شرکت فولاد خوزستان

خشک شدن بستر گندله، در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰°C، به گونه ای که ترکیدن گندله (Spalling) رخ ندهد، استفاده می شود. ترکیدن در اثر فشار بخار تولید شده در هنگام خشک شدن سریع گندله رخ می دهد. این پدیده عموماً "هنگامی رخ می دهد که دمای گاز از یک مقدار معین خیلی بیشتر شود. یک حالت دیگر، خرد شدن گندله های مرطوب (Decrepitating) در اثر ترکیبی از عواملی همچون وزن بستر گندله، تقطیر رطوبت موجود در گاز در حال عبور از روی بستر و نیروی اعمال شده در اثر افت فشار تولید شده برای کشش گاز از میان بستر است.

استفاده از ترکیبی از عملیات خشک کردن یا جریان به سمت بالا و به سمت پایین به منظور جلوگیری از شکستن گندله ها مفید است و باعث کاهش بازدهی حرارتی فرایند پخت می شود. نواحی مختلف فرایند به شدت بر یکدیگر تاثیر گذار بوده و تغییر دمای گاز ورودی به ناحیه پخت باعث تغییر شرایط گاز ورودی به ناحیه خشک شدن می شود که این خود منجر به تغییر دمای بستر و دمای گندله ورودی به ناحیه پخت می شود. بعضی از این تاثیرات برای اپراتور آشکار است. اما بسیاری از تغییرات دارای اثراتی می باشند که تشخیص و اصلاح آنها برای اپراتور مشکل است [۳].

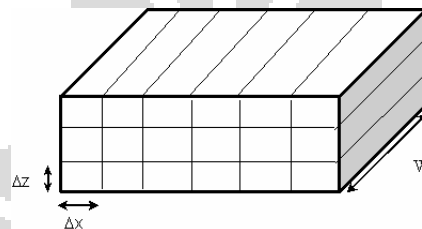
برای اصلاح بازدهی و بهبود اقتصاد فرایند، علاوه بر کاهش هزینه های پخت، کیفیت گندله پخته شده نیز باید در نظر گرفته شود. یک تغییر به ظاهر کوچک می تواند تاثیر زیادی بر بازدهی فرایند داشته باشد. یافتن مقادیر بهینه پارامترها به شیوه تجربی، امری وقت گیر و هزینه بر است. زیرا حجم زیادی گندله پخته شده بدون کیفیت در هنگام بررسی تولید خواهد شد که استفاده از آن مستلزم ضرر است. از سوی دیگر اندازه گیری تغییرات دمای گندله ها در طول فرایند پخت، علی رغم اهمیت دستیابی به آن، مستقیماً قابل انجام نیست. لذا استفاده از روشهای محاسباتی و شبیه سازی فرایند به روش ریاضی می تواند فواید قابل توجهی از جمله دستیابی به مقادیر بهینه پارامترها را به دنبال داشته باشد.

برای تعیین کیفیت گندله های پخته شده، داشتن دمای پخت ضروری است. این کمیت می تواند به سادگی از طریق مدلسازی ریاضی فرایند پخت گندله محاسبه شود. مدل‌های بسیاری تا کنون برای پخت گندله ارائه شده است. اولین کارها در این زمینه توسط وسانک Voskamp و براز Brasz [۵] صورت گرفته است. حسنک Hasenak [۶] انتقال حرارت هدایتی و نفوذ اکسیژن را در درون گندله در نظر گرفته و یونگ Young و همکارانش [۷] و نیز تورلبی Thurlby [۸-۱۰] مدل‌هایی برای فرایند پخت گندله ارائه کرده اند. تورلبی Thurlby و همکارانش [۱۱] مدل ارائه شده توسط حسنک Hasenak و براز Brasz را توسعه داده اند. اما به احتراق کوک در درون گندله توجهی نکرده اند. آنها فرض کرده اند که خشک شدن گندله فقط در سطح انجام شود. وینیکیچ Wynnyckyj و باترهمت Batterham [۱۲] تحقیقی در زمینه مدلسازی پخت گندله های اکسید آهن انجام داده اند. مطالعه آنها شامل جنبه های مهم پخت گندله اکسید آهن از قبیل خشک شدن، احتراق کوک و اکسیداسیون مگنتیت بوده است.

گرچه پخت گندله کاملاً پوشش داده شده توسط ایشان مطالعه شده، اما اثر شیب دما و غلظت در درون گندله در نظر گرفته نشده و توجه کمی به خشک شدن گندله نموده اند. در این مقاله نتیجه آخرین تحقیقات انجام شده در مورد شبیه سازی پخت گندله های آهنی در هسته "فرایندهای جدید تولید و توسعه مواد" در دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف ارائه می شود.

روش تحقیق

برای مدل سازی فرایند پخت باید پدیده های فیزیکی و شیمیایی مختلفی را در نظر گرفت. خشک شدن گندله ها، تجزیه سنگ آهک، اکسیداسیون مگنتیت و احتراق کوک همراه با انتقال جرم و حرارت بین گاز و جامد، مهمترین پدیده هایی هستند که در هنگام عبور گندله از نواحی مختلف کوره پخت در درون آن رخ می دهد. برای استخراج معادلات موازنه جرم و انرژی ابتدا بستر گندله همانند شکل ۲ المان بندی شده و چندین فرض ساده کننده در نظر گرفته می شود: (۱) انتقال حرارت توسط تابش ناچیز باشد، (۲) توزیع یکنواخت دما در عرض بستر، (۳) ثابت ماندن تخلخل گندله ها در مراحل مختلف پخت با وجود تابعیت خواص فیزیکی گندله نسبت به دما، (۴) تامین شدن یا جذب گرمای مربوط به تبخیر رطوبت، واکنشهای تکلیس و اکسیداسیون گندله ها و (۵) پایایی فرایند.



شکل ۲ - نحوه المان بندی بستر گندله مورد استفاده در این تحقیق

الف - موازنه انرژی برای گاز

گاز از میان بستر عبور کرده و با گندله ها تبادل حرارتی انجام می دهد. موازنه انرژی برای گاز عبوری از یک المان به ارتفاع Δz به صورت زیر است (تعریف علائم بکار برده شده در انتهای مقاله آمده است):

$$\frac{\partial(GC_g T_g)}{\partial z} + ha(T_g - T_p^s) = 0 \quad (1)$$

در معادله (۱) از تغییر دمای گاز با زمان در مقایسه با انتقال حرارت توسط جابه جایی صرف نظر شده است.

ب - موازنه انرژی برای جامد

برای محاسبه دمای گندله در نقاط مختلف بستر، موازنه انرژی برای مواد جامد در حال عبور در المانی به طول Δx نوشته می شود:

$$-\frac{\partial(MC_s T_s)}{\partial x} + ha(T_g - T_p^s) - (1 - \epsilon)\Delta H_v \frac{dW_p}{dt} + \sum (1 - \epsilon)R_i \Delta H_i = 0 \quad (2)$$

ج - موازنه انرژی برای یک گندله

به علت انجام واکنشهای مختلف در داخل گندله، شیب دما بین سطح و مرکز گندله قابل ملاحظه است. گزارش شده است که گرادیان دمایی درون گندله نقش مهمی در تعیین کمترین زمان لازم برای پخت دارد [۲۰ و ۲۱]. انتقال حرارت در داخل گندله توسط هدایت انجام شده و توسط معادله زیر بیان می شود:

$$k \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) + \sum \Delta H_j R_j + \Delta H_v \left(\frac{dW_p}{dt} \right) = \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (3)$$

د - تبخیر رطوبت

خشک شدن رطوبت آزاد، یک فرایند پیچیده است که فرض می شود در دو مرحله انجام می شود: مرحله اول وقتی که رطوبت بیشتر از مقدار بحرانی است اتفاق می افتد و خشک شدن گندله توسط انتقال جرم از سطح کنترل می شود. در این حالت سرعت خشک شدن از رابطه زیر بدست می آید [۲]:

$$-(1-\varepsilon)\frac{dW_p}{dt} = k_m a (W_g^e - W_g) \quad (4)$$

مرحله دوم مربوط به وقتی است که مقدار رطوبت کمتر از مقدار بحرانی است. بنابراین با افت سرعت همراه است. در این مرحله حرارت به درون گندله نفوذ کرده و رطوبت را به صورت یک مرز متحرک کوچک شونده تبخیر می کند. هنگامی که رطوبت به مقدار بحرانی رسید، فرض می شود که گندله ها از دو ناحیه تشکیل شده باشند: یک پوسته خشک و یک هسته مرطوب که توسط یک مرز از هم جدا شده اند. رطوبت هسته در مقدار بحرانی خود ثابت می ماند و تبخیر آب در سطح خارجی مرز متحرک انجام می شود. در این حالت رطوبت از میان پوسته خشک نفوذ کرده و به سطح می رسد و در سطح توسط انتقال جرم به گاز منتقل می شود. سرعت خشک شدن در این حالت از رابطه (۵) بدست می آید [۲]:

$$-(1-\varepsilon)\frac{dW_p}{dt} = \frac{a}{\left(\frac{d}{2}\right)^2} \frac{\left(W_g^e\right) r = r_c - W_g}{\frac{d/2 - r_c}{\left(\frac{d}{2}\right) r_c D_{H_2O}} + \frac{1}{k_m \left(\frac{d}{2}\right)^2}} \quad (5)$$

ه - واکنشهای شیمیایی در فرایند پخت گندله

در بررسی واکنشهای سنگ آهک، مگنتیت و هماتیت فرض می شود که سه مرحله کنترل کننده وجود داشته باشد: نفوذ از فیلم در سطح، نفوذ در داخل گندله متخلخل و واکنش شیمیایی. معادله سرعت واکنش تکلیس سنگ آهک توسط روش هسته انقباضی (Shrinking Core Model) به صورت زیر محاسبه است [۷]:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (6)$$

$$r_{lim}^0 = \frac{4\pi r_0^2 (C_{CO_2}^{eq} - C_{CO_2})}{\frac{1}{k_{g(CO_2)}} + \left[\frac{r_0}{r_i(t)}\right]^2 \frac{K_1}{k_1 RT_s} + \frac{r_0 [r_0 - r_i(t)]}{r_i(t) D_{CO_2}}}$$

معادلات سرعت برای واکنشهای اکسایش مگنتیت و احتراق کربن نیز به صورت مشابه می باشد.

و - موازنه جرم برای گاز

به علت انجام واکنشهای مختلف و همچنین تبخیر رطوبت در گندله، ترکیب گاز در طول بستر دائما در حال تغییر است. از آنجا که این تغییرات بر خواص فیزیکی گاز و سرعت واکنشها تاثیر می گذارند، اثر این تغییرات با نوشتن معادلات موازنه جرم برای اجزاء مختلف وارد مدل می شود. موازنه جرم H_2O ، O_2 و CO_2 به ترتیب مطابق معادلات ۷، ۸ و ۹ است.

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{GW_g}{\rho_g} \right) - (1-\varepsilon) \frac{dW_p}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{GC_{O_2}}{\rho_g} \right) - (1-\varepsilon)R_c - \frac{1}{4}(1-\varepsilon)R_m = 0 \quad (8)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{GC_{CO_2}}{\rho_g} \right) + (1-\varepsilon)R_c + (1-\varepsilon)R_m = 0 \quad (9)$$

ز - سرعت جریان گاز

در طول فرایند پخت، سرعت جریان گاز در نواحی مختلف متفاوت است. سرعت جریان گاز با استفاده از اختلاف فشار بین بالا و

پایین بستر توسط معادله ارگان [۱۳] و با این فرض که نفوذ پذیری بستر در طول فرایند ثابت است، محاسبه می شود.

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu}{d^2 \varepsilon^3 \rho_g} G + \frac{1.75(1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3 \rho_g} G^2 \quad (10)$$

مدلسازی پیشرفت استحکام در گندله ها

افزایش استحکام، هدف اصلی فرایند پخت گندله است. افزایش استحکام اغلب به صورت شاخصی برای کنترل کار کارخانه های گندله سازی به کار برده می شود. از آنجا که مدلسازی ریاضی به منظور بهبود کارآیی فرایندهای گندله سازی بویژه کاهش مصرف سوخت بکار برده می شود، مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای توضیح فرایند پخت حرارتی گندله های اکسید آهن باید در برگیرنده پیشرفت استحکام گندله پخته شده باشند. به علت رابطه تنگاتنگ اما پیچیده میان سوخت مصرفی و استحکام گندله های پخته شده، این موضوع اهمیت ویژه ای دارد.

کیفیت گندله تابعی از منحنی زمان-دما در طول مراحل پخت است. محاسبه استحکام گندله می تواند با استفاده از رابطه داده شده توسط محققین قبلی برای سخت شدن روی نوار زنجیری محاسبه شود [۱۴]:

$$Q_p = \int_0^t \frac{A_0}{T} \left[\exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \right] (Q_f - Q) dt \quad (11)$$

در این معادله پارامترهای α, β, T_0, A_0 و E به نوع و مشخصات سنگ معدن بستگی دارند. پارامتر کیفیت گندله با Q_p مشخص شده و توسط رابطه زیر با اندیس سایش AI گندله در ارتباط است:

$$Q = \frac{100 - AI}{AI} \quad (12)$$

معادله های موازنه جرم، انرژی و مومنتوم را باید با اعمال شرایط اولیه مناسب حل کرد. این شرایط مشخصات گندله خام ورودی (دما، ترکیب، قطر و تخلخل)، مشخصات بستر (ارتفاع لایه محافظ و گندله خام و سرعت حرکت گریت) و دمای گاز در نواحی پیشگرم و پخت می باشند.

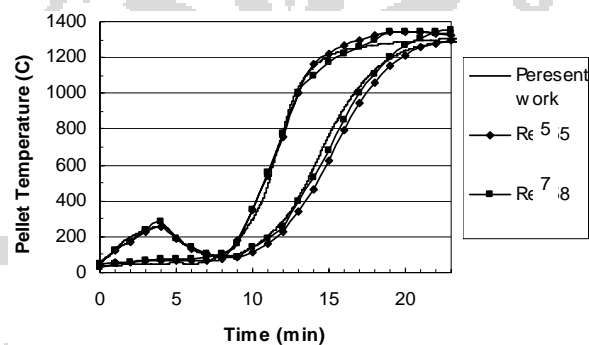
برای حل معادلات موازنه جرم، انرژی و مومنتوم ارائه شده در بالا و به منظور شبیه سازی فرایند پخت گندله، یک بسته نرم افزاری با استفاده از زبان برنامه نویسی ++Builder6 تهیه شد. این نرم افزار ویژگیهای گندله و بستر را در قسمت ورودی و نیز افت فشار نواحی مختلف و دمای تنظیم نواحی دارای مشعل را از ورودی گرفته و بر اساس آن میزان پیشروی واکنشهای فیزیکی و شیمیایی مختلف در طول فرآیند، دمای گاز و گندله در ارتفاعات مختلف بستر و در طول فرآیند و نیز دمای گندله در شعاعهای مختلف آن را محاسبه می کند. علاوه بر این میزان سوخت مصرفی در فرآیند و کیفیت گندله پخته و به طور خاص اندیس سایش گندله را پیش بینی می کند.

الف - بررسی اعتبار مدل

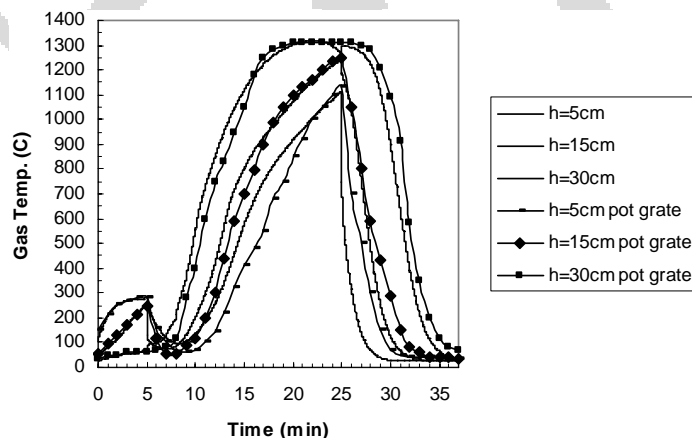
قبل از بکار گیری مدل، ابتدا باید اعتبار آن تحقیق شود. حجم زیادی از اطلاعات را که اساسا به منظور نمایش فرایند بکار می رود از کارخانه های مشغول به کار می توان بدست آورد. این قبیل داده ها در صورتی که به دقت و اندازه گیری کمیات مهم مدل به دست نیامده باشند، برای بررسی اعتبار مدل ارزشی ندارند. اطلاعاتی که باید اندازه گیری شوند عبارتند از: توزیع دما و سرعت گاز در طول بستر، فشار قسمت بالا و پایین بستر در طول گریت، سوخت مصرفی در مشعلها و خواص بستر گندله در بار ورودی و در قسمت خروجی فرآیند. تجربه محققین قبلی نشان داده است که کمترین همخوانی با نتایج مدل مربوط به دبی گاز است زیرا تعیین آن با دشواری فراوانی روبرو است. واقعی ترین کمیت دمای گاز، فشار در بالا و پایین بستر و خواص بستر گندله در ابتدا و انتهای

فرایند است. گرچه این نوع داده ها می توانند برای ارزیابی توزیع جریان گاز مورد استفاده قرار گیرند، اما نمی توانند پایه اساسی برای محاسبه دبی به حساب آیند [۴].

با وجود اینکه شرایط درون بستر در طول گزیت می تواند برای بررسی اعتبار مدل مفید باشد، اپراتور به دلایل عملی و هزینه آن نمی تواند آنها را اندازه گیری کند. این اطلاعات باید با مراجعه به اندازه گیری های دیگر استنتاج شود [۵ و ۴]. در این تحقیق به منظور بررسی صحت نتایج شبیه سازی، از نتایج محققین قبلی [۷ و ۵]، نتایج حاصل از کوره آزمایشگاهی و اطلاعات موجود در صنعت استفاده شده است. توزیع دمای گندله ها در نقاط مختلف بستر با نتایج تحقیقات دیگران [۷ و ۵] مقایسه شده و نتایج حاصل در شکل ۳ نمایش داده شده است. ملاحظه می شود که دمای محاسبه شده با نتایج تحقیقات گذشته همخوانی خوبی دارد. دمای گاز با نتایج حاصل از شبیه سازی کوره آزمایشگاهی گندله سازی نیز مقایسه شد. در شکل ۴ نتایج حاصل از شبیه سازی کوره پخت، با نتایج کوره آزمایشگاهی مقایسه شده است. ثابت شد که این نوع مقایسه نمی تواند انطباق کاملی بین نتایج تئوری و آزمایشی ایجاد کند. زیرا ظرفیت حرارتی کوره به همان اندازه گندله اهمیت می یابد. با وجود این، همخوانی کیفی میان نتایج تئوری و تجربی دلیلی بر صحت نتایج است [۷].



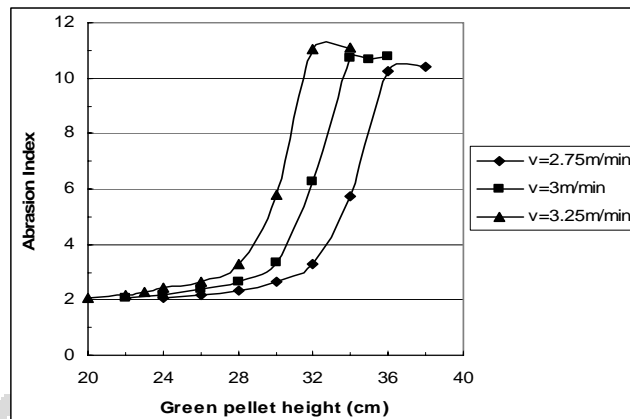
شکل ۳ - مقایسه توزیع دمای گندله با نتایج حاصل از کارهای قبلی [۷ و ۵]



شکل ۴ - مقایسه نتایج مدل (خطوط) با نتایج حاصل از کوره آزمایشگاهی (نقاط)

ب - محدودیت ها و توانایی مدل

امکان اندازه گیری تمام متغیرها و تعیین میزان پیشروی فرایندهای مختلف در طول عملیات ممکن نیست. سازگاری نتایج شبیه سازی برای چند عامل اصلی، دلالت بر صحت نتایج دارد. زیرا ممکن نیست دمای گاز و گندله در بستر و همچنین سوخت مصرفی



شکل ۵ - تغییرات اندیس سایش گندله پخته با تغییر سرعت حرکت و ارتفاع بستر

و کیفیت گندله پخته شده، به طور منفرد تعیین شوند. اگر توزیع جریان گاز صحیح نباشد، نتایج مدل انتقال حرارت نیز با داده های تجربی همخوانی نخواهد داشت و دمای جریان گاز ورودی و سوخت مورد نیاز در برنر ها غلط محاسبه خواهد شد. بنابراین بین مدل انتقال حرارت و محاسبات دمای گاز رابطه وجود دارد. اگر توزیع جریان گاز اصلاح شود، توزیع جریان حرارت با شدت بیشتری با داده های فرایند همخوانی خواهد داشت [۴].

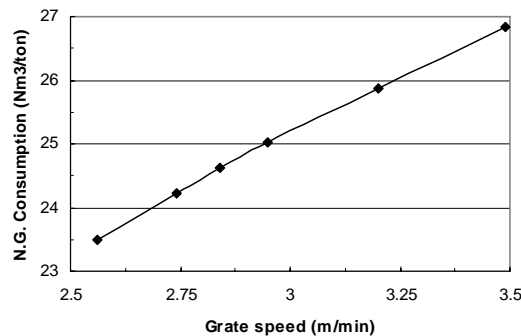
نتایج و بحث

برای افزایش تولید یک کارخانه گندله سازی می توان سرعت حرکت زنجیر و یا ارتفاع بستر گندله ها را افزایش داد. در بررسی حاضر به منظور بررسی اثر سرعت و ارتفاع بستر بر میزان انرژی مصرفی در فرایند پخت گندله های اکسید آهن، توان مصرفی آنها و در نتیجه افت فشار حاصل از آنها در تمام موارد ثابت در نظر گرفته شده است.

الف - اثر ارتفاع و سرعت حرکت بستر بر فرایند پخت گندله

با افزایش ارتفاع بستر تولید افزایش می یابد. در نتیجه میزان سوخت مصرفی کاهش می یابد. از سوی دیگر در یک ارتفاع ثابت، با افزایش سرعت حرکت بستر، یعنی با افزایش نرخ تولید، میزان سوخت مصرفی کاهش می یابد. افزایش ارتفاع و سرعت حرکت بستر به منظور افزایش تولید تا زمانی مفید خواهد بود که کیفیت محصول پخته شده در دامنه ای مطلوب قرار گیرد. زیرا افزایش تولید محدودیتهایی را از لحاظ کیفیت محصول ایجاد می کند. شکل ۵ تغییرات اندیس سایش گندله پخته با تغییر سرعت حرکت و ارتفاع بستر را نشان می دهد. با افزایش ارتفاع و سرعت حرکت بستر، اندیس سایش گندله نیز افزایش می یابد. این افزایش روندی دوگانه دارد. بدین گونه که افزایش تولید تا یک مقدار بحرانی باعث افزایش اندیس سایش با شیبی ملایم می شود. اما پس از آن، افزایش سرعت تولید باعث افت شدیدی در کیفیت گندله می شود. این مقدار بحرانی به ویژگیهای گندله و بستر وابسته است و برای شرایط اعمال شده حدود ۴۲۰ ton/h می باشد.

به منظور یافتن رابطه مطلوب بین دو متغیر سرعت و ارتفاع بستر، تغییرات سوخت مصرفی در فرایند پخت در یک نرخ تولید ثابت تعیین شد. نتایج حاصل در شکل ۶ ارائه شده است. در اینجا با تغییر همزمان سرعت و ارتفاع بستر، نرخ تولید در ۳۸۰ ton/h ثابت نگه داشته شده است. از سوی دیگر به منظور کنترل کیفیت محصول، اندیس سایش در تمام موارد کنترل شده است. نتایج نشان می دهند که در یک نرخ تولید ثابت، با کاهش سرعت بستر و افزایش ارتفاع آن، مصرف سوخت فرایند پخت کاهش



شکل ۶ - تغییرات سوخت مصرفی با سرعت حرکت بستر در نرخ تولید ثابت ۳۸۰ton/h

می یابد. در واقع، کمترین میزان مصرف انرژی هنگامی بدست می آید که با توجه به شرایط حاکم بر فرایند، سرعت بستر به کمترین مقدار ممکن برسد.

ب - تاثیر مگنتیت بر فرایند پخت گندله

مگنتیت در گندله به عنوان یک منبع انرژی داخلی بوده و بنابراین می تواند مقداری از انرژی مورد نیاز برای پخت گندله را تامین کند. به منظور بررسی اثر مگنتیت بر میزان سوخت مصرفی و امکان افزایش سرعت تولید در فرایند پخت، مگنتیت موجود در مواد اولیه تشکیل دهنده گندله را می توان تغییر داد. به علت اکسیداسیون مگنتیت، دمای گندله با سرعت بیشتری افزایش یافته و گرادیان دمایی درون گندله کاهش می یابد که منجر به افزایش کیفیت و کاهش زمان مورد نیاز برای پخت گندله می شود. بنابراین در صورت افزایش نسبت کسانتره مگنتیتی در خوراک، می توان سرعت حرکت بستر، و در نتیجه سرعت تولید را افزایش داد.

قدردانی

از شرکت فولاد خوزستان به سبب همکاری در تهیه داده های آزمایشی و تشویق انجام تحقیق قدردانی می شود.

مراجع

1. Meyer, K., Pelletizing of Iron Ores, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
2. Kucukada, K., Thibault, J., Hodouin, D., Paquet, G. and Caron, S., Modeling of a Pilot Scale Iron Ore Pellet Induration Furnace, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 33, No. 1, 1994, 1-12.
3. Cross, M. and Blot, P., Optimizing the Operation of Straight-Grate Iron-Ore Pellet Induration Systems Using Process Models, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 30B, August 1999, 803-813.
4. Batterham, R.J., Thurlby, J.A. and Thornton, G.J., Optimization of an Iron-Ore Indurator, The Chemical Engineer, September 1977, 629-632.
5. Voskamp, J.H. and Brasz, J., Digital Simulation of the Steady State Behavior of Moving Bed Processes, Measurement and Control, Vol. 8, 1975, 23-32.
6. Hasenack, N.A., Lebel, P.A.M. and Kooy, J.J., Induration Process for Pellets on a Moving Strand, Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking, Metals Society, London, 1975, 6-16.
7. Young, R.W., Cross, M. and Gibson, R.D., Mathematical Model of Grate-Kiln-Cooler Process Used for

- Induration of Iron Ore Pellets, Ironmaking and Steelmaking, 1979, No. 1, 1-13.
8. Thurlby, J.A., A Dynamic Mathematical Model of the Complete Grate/Kiln Iron Ore Pellet Induration Process, Metallurgical Transactions B, Vol. 19B, February 1988, 103-112.
 9. Thurlby, J.A., Gas Flow and Pressure Balancing in Modeling Grate/Kiln Induration, Metallurgical Transaction B, Vol. 19B, February 1988, 113-121.
 10. Thurlby, J.A., Energy Cost Minimization in Grate/Kiln Induration, Metallurgical Transaction B, Vol. 19B, February 1988, 122-132.
 11. Thurlby, J.A., Batterham, R.J. and Turner, R.E., Development and Validation of a Mathematical Model for the Moving Grate Induration of Iron Ore Pellets, International Journal of Mineral Processing, No. 6, 1979, 43-64.
 12. Wynnyckyj, J.R. and Batterham, R.J., Iron Ore Sintering and Pellet Induration Processes, In 4th International Symposium on Agglomeration, ISS-AIME, Toronto, Canada, 1985, 957-994.
 13. Gieger, G.H. and Porier, D.R., Transport Phenomena in Metallurgy, Addison Wesley, 1973.
 14. Batterham, R.J., Modeling the Development of Strength in Pellet, Metallurgical Transactions B, Vol. 17B, 1986, 479-485.
 15. Cang, D., Guan, Y., Bai, H., Zong, Y., Mao, Y. and Che, X., Consideration and Practice of Science, Technology and Strategy for Minimizing CO₂ Emission in Chinese Steel Industry, ISIJ International, Vol. 42, 2002, Supplement, S1-S4.

پیوست (فهرست علائم بکاربرده شده)

نشانه	واحد	کمیت	نشانه	واحد	کمیت
r_w	m	شعاع هسته مرطوب	a	m^2/m^3	سطح انتقال حرارت
R	$m^3 atm/mol.K$	ثابت جهانی گازها	C _g , C _s	J/kg°C	ظرفیت حرارتی گاز و گندله
R_i	mol/pellet.s	سرعت واکنش جزء i	C _{CO2} , C _{CO2} ^{eq}	mol/m ³	غلظت و غلظت تعادلی CO ₂ در گاز
W_g^c, W_g	kg/m ³	رطوبت و رطوبت تعادلی گاز	d_p	m	قطر گندله
T_g, T_s	°C	دمای گاز و جامد	D_i	m ² /s	ضریب نفوذ جزء i
T_p^s	°C	دمای سطح گندله	G	kg/m ² s	سرعت جریان گاز
ΔH_i	J/mol	گرمای واکنش جزء i	h	J/m ² sK	ضریب انتقال حرارت جابجایی
ΔH_v	J/kg	گرمای تبخیر	k_m	m/s	ضریب انتقال جرم
ε	-	کسر حفره بستر	k_p	J/mKs	هدایت حرارتی گندله
ε_p	-	تخلخل گندله	K_1	atm	ثابت تعادل تکلیس سنگ آهک
μ	kg/m.s	ویسکوزیته گاز	k_1	m/s	ثابت سرعت واکنش تکلیس
ρ_g, ρ_s	kg/m ³	چگالی گاز و جامد	M	kg/m ² s	دبی جرمی جامد
r_w	m	شعاع هسته مرطوب	r_c	m	شعاع بحرانی کربن
R	$m^3 atm/mol.K$	ثابت جهانی گازها	r_1	m	شعاع بحرانی سنگ آهک