بررسی اثر ارتفاع بستر و سرعت گریت در فرآیند پخت پیوسته گندله های اکسید آهن

علی فردوسی[1]، سید خطیب الاسلام صدرنژاد[2]، حسن پایاب[3]

چکیده

انرژی در صنایع آهن و فولاد سهم مهمی از هزینه کل را دارا بوده و بنابراین کاهش میزان سوخت مصرفی در صنایع آهن و فولاد تاثیر مستقیم بر قیمت تمام شده هر تن فولاد خواهد داشت. کوره های پخت گندله های اکسید آهن به علت مصرف انرژی زیاد آنها، فرایندهایی گران هستند. بنابر این کاهش مصرف انرژی در این فرایند یکی از گامهای اساسی برای کاهش مصرف انرژی در تولید فولاد است. یافتن متغییرهای بهینه توسط روشهای تجربی امری وقت گیر و هزینه بر است زیرا حجم زیادی گندله پخته بدون کیفیت، تولید می شود. برای تعیین دمای پخته شدن گندله ها و بدنبال آن کیفیت گندله پخته شده, می توان از مدلسازی ریاضی فرایند پخت گندله استفاده کرد. این مدل قادر به تعیین دمای گندله در قسمتهای مختلف بستر و در ارتفاعات مختلف آن و همچنین کیفیت گندله تولیدی می باشد. در اینجا با استفاده از مدل ریاضی تاثیر ارتفاع بستر گندله ها و سرعت حرکت گریت در طول زمان پخت بر میزان انرژی مصرفی در فرایند پخت گندله های اکسید آهن بررسی شده است و حالت بهینه تعیین شده است.

کلمات کلیدی: مدل ریاضی، گندله اکسید آهن، بهینه سازی مصرف انرژی

۱- مقدمه

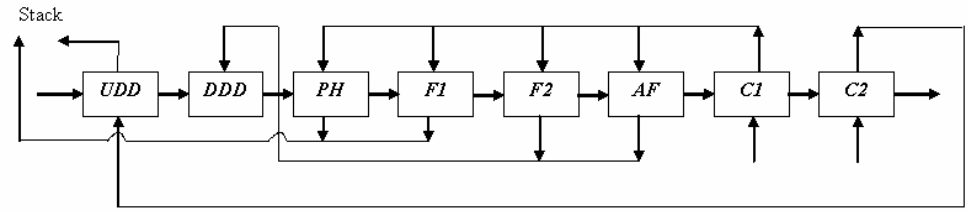
گندله ها به عنوان بار ورودی کوره بلند و تولید آهن اسفنجی به روش احیا مستقیم بکار می روند. گندله خام پس از خروج از دیسک دوار دارای استحکام کافی نبوده و باید پخته و سخت شود[۱]. این گندله ها بر روی یک شبکه متحرک بار شده و تشکیل یک بستر فشرده می دهند. به منظور حفاظت از گریت در مقابل دمای

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف

2 - استاد دانشگاه صنعتی شریف

3 - استادیار دانشگاه آزاد اسلامی

بالای گاز، ابتدا مقداری گندله پخته و سپس گندله خام بر روی باند پخت پهن می شود. گاز گرم، بسته به درجه حرارت و مرحله پخت از بالا و یا از پایین به داخل بستر گندله ها دمیده شده و در نهایت گندله ها سرد می شوند[۲]. این فرایند از هشت ناحیه کلیدی تشکیل شده است. ناحیه خشک کردن با جریان روبه بالا (UDD)، خشک کردن با جریان روبه پایین (DDD)، ناحیه پیشگرم کردن (PH)، ناحیه اول پخت (F1)، ناحیه دوم پخت (F2)، مرحله پس از پخت (AF)، ناحیه اول سرد کردن (C1) و ناحیه دوم سرد کردن (C2) که علت این تقسیم بندی دما و مسیر گاز ورودی و خروجی است. (شکل۱)



شکل۱. دیاگرام شماتیک جریان گاز و گندله در فرایند پخت گندله

نواحی مختلف فرایند به شدت بر یکدیگر تاثیر می گذارند، برای مثال تغییر دمای گاز ورودی به ناحیه پخت باعث تغییر شرایط گاز ورودی به ناحیه خشک کردن می شود که این خود منجر به تغییر دمای بستر در این ناحیه شده و بدنبال آن دمای گندله ورودی به ناحیه پخت تغییر می کند. بعضی از این تاثیرات برای اپراتور آشکار است اما بسیاری از تغییرات دارای اثراتی می باشند که تشخیص و اصلاح آن، اپراتور را با مشکل مواجه می کند.[۳]

در اصلاح بازدهی اقتصادی فرایند پخت گندله علاوه بر کاهش هزینه های پخت، کیفیت گندله پخته شده نیز باید در نظر گرفته شود. یافتن متغییرهای بهینه توسط روشهای تجربی امری وقت گیر و هزینه بر است زیرا حجم زیادی گندله پخته بدون کیفیت، تولید می شود. برای تعیین دمای پخته شدن گندله ها و بدنبال آن کیفیت گندله پخته شده, می توان از مدلسازی ریاضی فرایند پخت گندله استفاده کرد. مدلهای زیادی برای پخت گندله، در فرایندهای مختلف ارایه شده است. اولین کارها در این زمینه توسط Voskamp و Brasz [٤] صورت گرفت. Hasenak [۵] انتقال حرارت هدایتی و نفوذ اکسیژن را در درون گندله در نظر گرفت. Young و همکارانش [۶] وThurlby [۷-۹] مدلهایی برای فرایند گریت کیلن ارایه کردند. Thurlby و همکارانش[۱۰] مدل ارایه شده توسط Hasenak وBrasz را توسعه دادند. آنها در تحقیقشان به احتراق کک در درون گندله توجهی نکرده و فرض کردند خشک شدن گندله در سطح آن انجام می شود.Wynnyckyj و Batterhamt [۱۳]

تحقیقی در زمینه مدلسازی پخت گندله های اکسید آهن انجام دادند. مطالعه آنها شامل جنبه های مهم پخت گندله اکسید آهن، از قبیل خشک شدن، احتراق کک و اکسیداسیون مگنتیت بود. گرچه پخت گندله کاملا پوشش داده شده بود، اما اثر گرادیان دما و غلظت در درون گندله در نظر گرفته نشده بود و همچنین توجه کمی به خشک شدن گندله شده بود.

۲- مدلسازی فرایند پخت گندله

برای استخراج معادلات موازنه جرم و انرژی چندین فرض ساده کننده در نظر گرفته شد: (۱) انتقال حرارت توسط تابش ناچیز است. (۲) پروفیل دمایی در عرض بستر یکسان است. (۳) تخلخل گندله ها در مراحل مختلف ثابت می ماند اما خواص فیزیکی گندله به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شد. (۴) فرایند در حالت پایدار مدلسازی شده است. به این منظور کوره پخت گندله به نواحی مختلف خشک کردن، پیشگرم، پخت، پس از پخت و سرد کردن تقسیم شده است. مدل در برگیرنده فرایندهای خشک شدن گندله، تکلیس سنگ آهک، اکسیداسیون مگنتیت و احتراق کک در داخل گندله می باشد.

موازنه انرژی برای گاز عبوری از یک المان به ارتفاع Δz به صورت زیر است:

$$\frac{\partial(GC_gT_g)}{\partial z} + ha\left(T_g - T_p^s\right) = 0 \qquad (۱)$$

که G، C_g و T_g به ترتیب سرعت، ظرفیت گرمایی و دمای گاز، T_p^s دمای سطح گندله، h ضریب انتقال حرارت و a مساحت سطح گندله ها در واحد حجم می باشد.

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

برای محاسبه دمای گندله در نقاط مختلف بستر، موازنه انرژی برای جامد عبوری از المان به طول Δx نوشته می شود.

$$-\frac{\partial(MC_sT_s)}{\partial x} + ha\left(T_g - T_p^s\right) - (1-\varepsilon)\Delta H_v \frac{dW_p}{dt} + \sum(1-\varepsilon)R_i\Delta H_i = 0 \qquad (۲)$$

که C_s ظرفیت حرارتی گندله و M دبی جرمی بار جامد، ε و W_p تخلخل و رطوبت گندله و R_i و ΔH_i سرعت و تغییر انتالپی واکنشهای اجزای تشکیل دهنده گندله می باشند.

T_s دمای متوسط گندله بوده و توسط رابطه زیر محاسبه می شود[۱۲]:

$$T_s = \frac{\int_0^{d/2} 4\pi r^2 T_p(r) dr}{\int_0^{d/2} 4\pi r^2 dr} \quad (۳)$$

به علت انجام واکنشهای مختلف در داخل گندله، گرادیان دمایی بین سطح و مرکز آن قابل ملاحظه می باشد. گزارش شده است که گرادیان دمایی درون گندله نقش مهمی در تعیین کمترین زمان لازم برای پخت دارد.[۱] انتقال حرارت در داخل گندله توسط هدایت انجام شده و توسط معادله زیر بیان می شود:

$$k\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial T_p}{\partial r}\right) + \sum \Delta H_j R_j + \Delta H_v\left(\frac{dW_p}{dt}\right) = \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (۴)$$

که k هدایت حرارتی گندله می باشد. این معادله با استفاده از شرایط مرزی زیر حل می شود:

$$k\left.\frac{\partial T_p}{\partial r}\right|_{r=d/2} = h\left(T_g - T_p\right)$$

$$\left.\frac{\partial T_p}{\partial r}\right|_{r=0} = 0$$

فرض شده است که خشک شدن آب آزاد در دو مرحله انجام می شود. در مرحله اول که رطوبت بیشتر از مقدار بحرانی است، خشک شدن گندله توسط انتقال جرم از سطح کنترل می شود. در مرحله دوم که یک مرحله با افت سرعت است، مقدار رطوبت به زیر مقدار بحرانی می رسد و رطوبت به صورت یک مرز متحرک کوچک شونده، تبخیر می شود.[۱۳]

واکنشهای تکلیس سنگ آهک و اکسیداسیون مگنتیت وکک، با در نظر گرفتن سه مرحله کنترل کننده، انتقال جرم از گاز به سطح گندله، نفوذ در داخل گندله متخلخل و انجام واکنش شیمیایی، توسط روش هسته انقباضی (*Shrinking Core Model*) بررسی شده است.[۶] به علت انجام این واکنشها و همچنین تبخیر رطوبت در گندله، ترکیب گاز در طول بستر دائما در حال تغییر است. از آنجا که این تغییرات بر روی خواص فیزیکی گاز و سرعت واکنشها تاثیر می گذارند، اثر این تغییرات با نوشتن معادلات موازنه جرم برای اجزا مختلف وارد مدل شده است.

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 [۱۴] و با این فرض که نفوذ پذیری بستر در طول فرایند ثابت است، محاسبه می شود.

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{150(1-\varepsilon)^2\mu}{d^2\varepsilon^3\rho_g}G + \frac{1.75(1-\varepsilon)}{d\varepsilon^3\rho_g}G^2 \quad (۵)$$

پس از تعیین پروفیل دمایی گندله، مدل قادر به پیش بینی کیفیت محصول پخته می باشد.به منظور بررسی صحت نتایج شبیه سازی از اطلاعات بدست آمده از کوره پایلوت پلنت استفاده شده است.

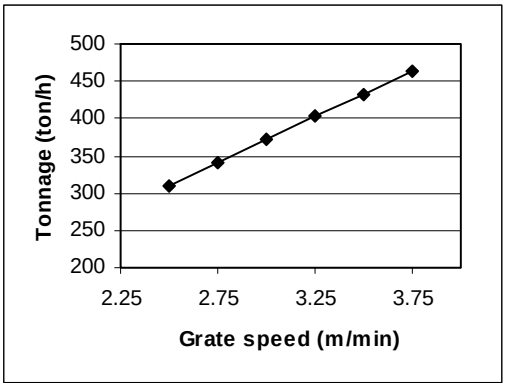
۳-یافته ها

برای افزایش تولید یک کارخانه گندله سازی می توان به دو روش عمل کرد:

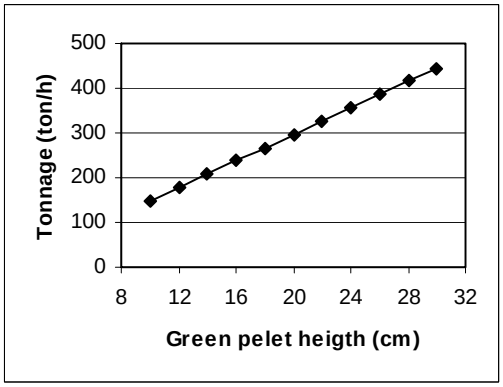
۱- افزایش سرعت حرکت گندله ها در کوره

۲- افزایش ارتفاع بستر گندله ها

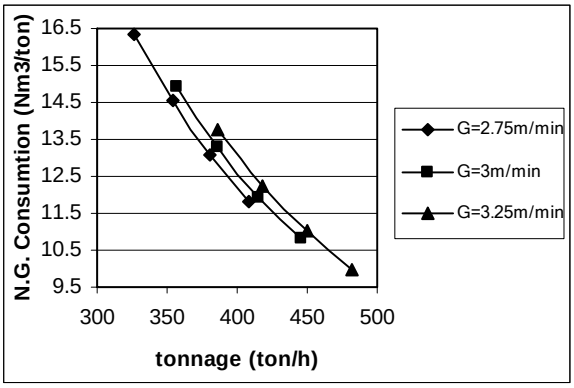
نمودارهای۱ و۲ تغییرات تناژ تولیدی را به ترتیب با افزایش سرعت گریت و افزایش ارتفاع گندله های خام نشان می دهند. برای بررسی اثر سرعت و ارتفاع بستر بر میزان انرژی مصرفی در فرایند پخت گندله های اکسید آهن، توان مصرفی فنها، و در نتیجه افت فشار حاصل از آنها، در تمام موارد ثابت در نظر گرفته شد. در نمودار۳ گاز طبیعی مصرفی در فرایند پخت بر اساس میزان تولید نشان داده شده است. در این نمودار دمای گاز ناحیه پخت در تمام موارد یکسان لحاظ شده است. در نمودار۴ اثر افزایش ارتفاع بستر بر مصرف سوخت نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع بستر که معادل با افزایش تولید می باشد، میزان سوخت مصرفی کاهش می یابد. از سوی دیگر در یک ارتفاع ثابت، با افزایش سرعت حرکت بستر، یعنی با افزایش تولید، میزان سوخت مصرفی کاهش می یابد.



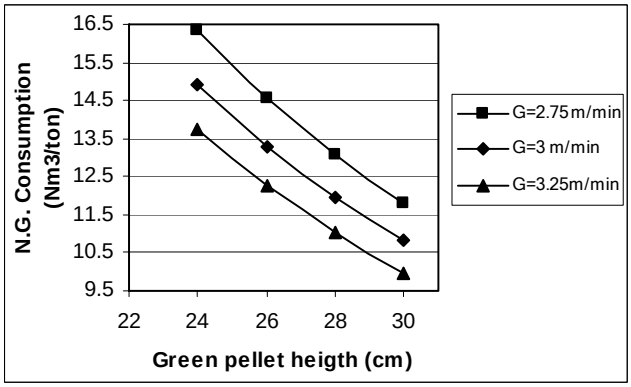
شکل۱. تغییرات تناژ تولیدی با تغییر سرعت حرکت بستر در ارتفاع بستر ثابت ۲۵cm



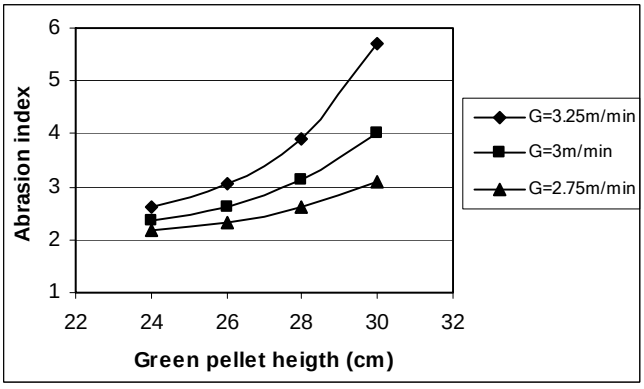
شکل۲. تغییرات تناژ تولیدی با تغییر ارتفاع بستر گندله ها در سرعت ثابت گریت ۳m/min



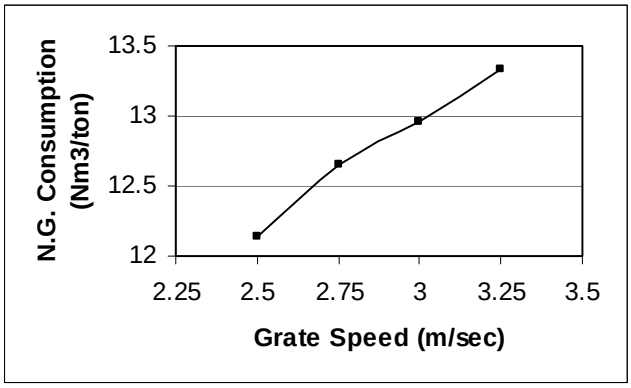
شکل۳. تغییرات گاز طبیعی مصرفی براساس میزان تولید



شکل۴. تغییرات گاز طبیعی مصرفی با تغییر سرعت حرکت بستر



شکل۵. تغییرات اندیس سایش گندله پخته با ارتفاع بستر



شکل۶. تغییرات سوخت مصرفی با سرعت حرکت بستر در نرخ تولید ثابت۳۸۰ton/h

به منظور بررسی خواص گندله پخته، یک پارامتر کیفیت تعریف شده و توسط آن اندیس سایش محصول پیش بینی شده است. در نمودار۵ تغییرات اندیس سایش با ارتفاع بستر نشان داده شده است.

به منظور یافتن رابطه ای بهینه بین دو متغیر سرعت و ارتفاع بستر، تغییرات سوخت مصرفی در فرایند پخت در یک نرخ تولید ثابت تعیین شد. در این حالت دمای گاز ورودی به گونه ای تغییر می کند که کیفیت (اندیس سایش) محصول بدون تغییر باقی بماند. نتایج حاصل در نمودار۶ ارائه شده است. در اینجا با تغییر همزمان سرعت و ارتفاع بستر، نرخ تولید در ton/h ۳۸۰ ثابت نگه داشته شده است. دمای ناحیه پخت به گونه ای تغییر کرده است که بزرگترین اندیس سایش گندله های پخته ۲/۹۵ باشد.

۴-بحث

نمودار۳ نشان می دهد که با افزایش میزان تولید در یک سرعت حرکت ثابت، سوخت مصرفی کاهش می یابد. این امر به این علت است که در سرعت حرکت ثابت، افزایش تولید، معادل با افزایش ارتفاع بستر می باشد که منجر به کاهش دبی گاز عبوری از میان بستر می شود که نتیجه آن کاهش انرژی لازم برای گرم کردن گاز ورودی به بستر گندله ها می باشد. از نمودار۴ چنین بر می آید که در یک تولید ثابت، با افزایش سرعت بستر، سوخت مصرفی افزایش می یابد. از آنجا که در یک تناژ ثابت، افزایش سرعت گریت، معادل با کاهش ارتفاع گندله های خام می باشد، در این حالت نیز افزایش مصرف سوخت به علت افزایش دبی گاز عبوری از بستر می باشد. 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 با افزایش تولید، محدودیتهایی را از

لحاظ کیفیت محصول ایجاد می کنند. از یک طرف افزایش ارتفاع بستر باعث کاهش دمای گاز عبوری از لایه های زیرین بستر شده که خود منجر به نرسیدن دمای گندله به دمای پخت و به دنبال آن کیفیت نامطلوب محصول می شود. از سوی دیگر، نتیجه افزایش سرعت گریت، زمان توقف کوتاه گندله ها در ناحیه پخت است، که می تواند منجر به افت خواص مکانیکی گندله پخته شود. مهمترین خواص گندله پخته، استحکام فشاری سرد و اندیس سایش آن می باشد. به این منظور باید ملاحظاتی برای کیفیت محصول در نظر گرفته شود. نمودار۵ نشان می دهد که با افزایش ارتفاع و سرعت حرکت بستر، اندیس سایش گندله نیز افزایش می یابد. بنابراین برای افزایش تولید باید دمای گاز ناحیه پخت را افزایش داد، که این امر خود منجر به افزایش میزان انرژی مصرفی می شود. از طرف دیگر در یک نرخ تولید ثابت، می توان با کاهش ارتفاع بستر و افزایش سرعت آن، دمای گاز ناحیه پخت را کاهش داد.

نتایج ارائه شده در نمودار۶ نشان می دهند که در این حالت با کاهش سرعت گریت و افزایش ارتفاع بستر، مصرف سوخت کاهش 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.

۵- نتیجه گیری

۱- با افزایش نرخ تولید، میزان انرژی مصرفی در فرایند پخت کاهش می یابد. به عبارت دیگر زمانی که یک کارخانه گندله سازی با حداکثر ظرفیت خود در حال کار است، کمترین مصرف انرژی را داراست.

۲- افزایش تولید واحد گندله سازی، اگر همراه با تغییر صحیح دمای ناحیه پخت نباشد، می تواند منجر به افت کیفیت محصول شود.

۳- افت خواص مکانیکی گندله پخته به علت پایین بودن دمای گاز در نقاط زیر بستر، در صورت افزایش ارتفاع، یا ناکافی بودن زمان توقف گندله ها در ناحیه پخت، در صورت افزایش سرعت حرکت بستر، می باشد.

۴- در صورت ثابت بودن نرخ تولید، زمانی که ارتفاع بستر افزایش و سرعت حرکت گریت کاهش یابد مصرف سوخت در فرایند پخت کاهش خواهد یافت.

۶- مراجع

1. K.Meyer, Pelletizing of Iron Ores, springer-vwerlag, Berlin.

2. M.Cross and P.Blot, “Optimizing the Operation of Straight-Grate Iron-Ore Pellet Induration System Using Process Models”, Metallurgical and Materials Transaction B, vol.3B, 1999, 803-813.
3. R.J.Batterham, J.A.Thurlby and G.J. Thornton, “Optimization of an iron-ore indurator”, The Chemical Engineer, September 1977, 629-632.
4. J.H.Voskamp and J.Brasz, “Digital Simulation of the Steady State Behavior of Moving Bed Processes”, Measurement and Control, vol.8, 1975, 23-32.
5. N.A.Hasenack, P.A.M.Lebelle and J.J.Kooy “Induration Process for Pellets on a Moving Strand”, Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking, Metals Society, London, 1975, 6-16.
6. R.W.Young, M.Cross and R.D.Gibson, “Mathematical Model for Grate-Kiln-Cooler Process Used for Induration of Iron Ore Pellets”, Ironmaking and Steelmaking, 1979, 1, 1-13.
7. J.A.Thurlby, “A Dynamic Mathematical Model of the Complete Grate/Kiln Iron Ore Pellet Induration Process”, Metallurgical Transactions B, vol.19B, February 1988, 103-112.
8. J.A.Thurlby, “Gas Flow and Pressure Balancing in Modeling Grate/Kiln Induration”, Metallurgical Transaction B, vol.19B, February 1988, 113-121.
9. J.A.Thurlby, “Energy Cost Minimization in Grate/Kiln Induration”, Metallurgical Transaction *B*, vol.19B, February 1988, 122-132.
10. J.A.Thurlby, R.J.Batterham and R.E.Turner, “Development and Validation of a Mathematical Model for the Moving Grate Induration of Iron Ore Pellet”, International Journal of Mineral Processing, No.6, 1979, 43-64.
11. J.R.Wynnyckyj and R.J.Batterham, “Iron Ore Sintering and Pellet Induration Process”, 4th International Symposium on Agglomeration, ISS-AIME, Toronto, Canada, 1985, 957-994.
12. J.Szekely and N. J. Themelis, Rate Phenomena in Process Metallurgy, 1971, New York, Wiley Interscience.
13. 3. K.Kucukada, J.Thibault, D.Hodouin, G.Paquet and S.Caron, “Modeling of Pilot Scale Iron Ore Pellet Induration Furnace”, Canadian Metallurgical Quarterly, vol.33, No.1, 1994, 1-12.
14. R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot, Transport Phenomena, 1960, John Wiley, New York.

Consideration the Effect of Grate Speed and Bed Height on Iron Ore Pellet Induration Processes by Using Mathematical Model

A. Ferdowsi[4](ferdowsi79@yahoo.com), S.K.Sadrnezhaad[5](sadrnezh@sharif.edu), H. Payab[6](h.payab@niscoir.com)

Abstract

Induration furnaces for iron ore pellets are expensive processes, due to their high energy consumption. Moreover, they are highly interactive and then complex to control. It is difficult to assess what the effects of an apparently small change, at one location, will have throughout the process. A mathematical model can identify the temperature profile of pellets during induration process. In this paper, mathematical model of straight grate pellet induration explained and then by using it, the effects of grate speed and bed height on induration of iron ore pellet were investigated. The energy consumption is reduced if the grate speed is low and the bed height is high.

Keywords: mathematical model, iron ore, pellet, energy, grate speed, bed height

[4] -M.Scs, Sharif University of Technology, Department of Material Science
[5] -Professor, Sharif University of Technology, Department of Material Science
[6] - Assistant professor, Azad University, Tehran

10th
ANNUAL CONGRESS
Iranian Metallurgical Engineer's Society

۲۳۱

دهمین کنگره سالانه
انجمن مهندسین متالورژی ایران

گـــواهی ارائـــه مقـــاله

گواهی می‌شود :

جناب آقای **سید خطیب الاسلام صدرنژاد** مقاله خود را تحت عنوان "**بررسی اثر ارتفاع بستر و سرعت گریت در فرآیند پخت پیوسته گندله های اکسید آهن**" در این کنگره ارائه نموده است.

دکتر جلال الحجازی
رئیس انجمن

دکتر علی حائریان اردکانی
دبیر کنگره