

Investigating possibility of using briquettes containing fine of pellets and reduction sludge in a direct reduction reactor

Saeid Habibinezhad¹, *Mohammad Mehdi Afsahi²

1- Master of Mineral Processing, Research and Development Affairs, Gol Gohar Iron and Steel Development Company, Sirjan, Iran.

2- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Citation: Habibinezhad S, afsahi M.M. Investigating possibility of using briquettes containing fine of pellets and reduction sludge in a direct reduction reactor. Metallurgical Engineering 2024; 27(1): 32-41 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2023.562887.1369>

doi : <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2023.562887.1369>

ABSTRACT

Two unconverted by-products, fine of pellets and reducing sludge, are produced during processing in sponge iron production Companies. In the present research, possibility of the by products briquetting and also direct charge, along with the reactor feed, into the reduction furnace have been investigated. The mentioned byproducts were changed to the briquettes with more than 6.3 mm size (quarter inch) by briquetting jack machine under 300 bar pressure, and their reducibility and strength were tested during passage from the reduction reactor. Experiments showed, the produced briquettes had a low strength to tolerate inserted stresses during moving in the furnace. Using sodium silicate solution (1.25-5 weight percent) as a binder in the composition of the briquettes, to prevent crushing, increased their strength more than 40 times. To increase total Fe of the samples and reaching a standard level, 15-20% sponge iron powder was added into the briquettes, increased total iron from 84% to 88% averagely.

Keywords: Briquette, Fine of pellets, Reducing sludge, Iron oxide, Reduction.

Received: 3 October 2022

Accepted: 20 August 2023

■ ■

* *Corresponding Author:*

Mohammad Mehdi Afsahi, PhD

Address: Department of Chemical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Tel: +98 (34) 32112686

E-mail: afsahi@ uk.ac.ir

بررسی امکان استفاده از بریکت حاوی ریزدانه گندله و لجن احیایی در راکتور احیا مستقیم

سعید حبیبی نژاد^۱، محمد مهدی افصیحی^۲

۱- کارشناس ارشد فراوری مواد معدنی، امور تحقیق و توسعه، شرکت توسعه آهن و فولاد گل گهر، سیرجان، ایران.

۲- دانشیار، بخش مهندسی شیمی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

چکیده

در کارخانه تولید آهن اسفنجی، دو محصول احیاء نشده جانبی در طی فرایند تولید، تحت عنوان ریزدانه گندله و لجن احیائی، تولید می‌شود. در این تحقیق امکان کلوخه کردن این مواد و شارژ مستقیم آنها در کوره صنعتی احیاء مستقیم، به همراه خوراک ورودی، بررسی شده است. مواد پسماند فوق با استفاده از دستگاه بریکت ساز، تحت فشار ۳۰۰ بار، به کلوخه‌های بزرگتر از ۶/۳ میلی متر (یک چهارم اینچ) تبدیل و احیاء شونده و استحکام آنها در عبور از راکتور احیاء مورد آزمایش قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد کلوخه‌های تولید شده استحکام کمی برای تحمل تنش‌های وارده در کوره را دارند. استفاده از محلول سیلیکات سدیم به میزان ۱/۲۵ تا ۵ درصد وزنی، بعنوان چسب در مواد کلوخه شده، باعث شد که استحکام نمونه ها، به منظور جلوگیری از خرد شونده‌گی، تا میزان ۴۰ برابر افزایش یابد. برای افزایش آهن کل نمونه‌ها و رساندن آن به میزان استاندارد، ۱۵ تا ۲۰ درصد پودر آهن اسفنجی به کلوخه‌ها اضافه شد. با این افزایش درصد آهن کل کلوخه ها، به طور متوسط از ۸۴ به ۸۸ درصد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: کلوخه (Briquette)، ریز دانه گندله، لجن احیایی، اکسید آهن، احیاء.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۱ | پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

۱. مقدمه

با حرکت گندله‌ها از ناحیه فوقانی به سمت پایین و حرکت گازهای احیائی از ناحیه کف راکتور به سمت ناحیه فوقانی در دمای بالا عمل احیاء انجام شده و محصول نهایی به صورت آهن اسفنجی از پایین راکتور خارج می‌شود [۱]. در مورد راکتور شافت و تکنولوژی میدرکس مطالعات زیادی صورت گرفته است [۵-۲]. امروزه روش‌های جدیدی برای احیاء مستقیم پیشنهاد شده که دیگر نیازی به تولید گندله نبوده و با زمان و انرژی کمتر مستقیماً از کنسانتره، آهن اسفنجی تولید می‌شود [۱۱-۶].

یکی از عوامل موثر در فرایند احیاء مستقیم اندازه گندله ورودی به راکتور است. اندازه گندله‌ها بر افت فشار بستر تاثیر می‌گذارد. بر اساس بررسی‌های انجام شده، برای بهبود در فرایند، اندازه گندله ورودی به کوره بزرگتر از ۶ mm می‌باشد [۱۲، ۱۳]. در خلال فرایند احیاء مستقیم دو محصول جانبی خام و احیاء پذیر با دانه بندی کوچکتر از ۶ میلی متر تحت عنوان ریزدانه گندله اکسید آهن و لجن‌های احیائی تولید می‌شود. ریزدانه گندله اکسید آهن محصولی است که از

امروزه به دلیل افزایش مداوم تقاضای بازار برای تولید فولاد، نیاز به استفاده از قراضه آهن به منظور ذوب در کوره قوس الکتریکی افزایش یافته است. آهن اسفنجی تولید شده در راکتورهای احیا مستقیم^۱ توانسته تا حد زیادی کمبود قراضه و بالا بودن هزینه بالای تامین آنرا جبران کند. از طرف دیگر ضرورت جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش مصرف انرژی منجر به افزایش استفاده از روشهای احیاء مستقیم شده است. در احیای مستقیم، در حالت جامد اکسیژن از سنگ آهن بوسیله گازهای احیاء کننده حذف می‌شود. گاز احیاء می‌تواند از طریق ریفرمینگ گاز شهری توسط بخار آب و یا از گازهای حاصل از گازی سازی زغال سنگ تامین شود. یکی از تکنولوژی‌های مربوط به راکتور شفت که به دلیل پیوسته بودن و سایر مزایا، گسترش یافته تکنولوژی میدرکس است. خوراک خام ورودی به راکتور در این روش می‌تواند گندله اکسید آهن، کلوخه سنگ آهن و یا ترکیبی از هر دو باشد.

1. Direct Reduced Iron (DRI)

* نویسنده مسئول:

دکتر محمد مهدی افصیحی

نشانی: کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی شیمی.

تلفن: ۳۲۱۱۲۶۸۶ (۳۴) ۰۹۸+

پست الکترونیکی: afsahi@uk.ac.ir

نمونه ترکیب شده از مواد کلوخه شونده و همچنین پخت نمونه‌های کلوخه شده در دمای ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد کلوخه با استحکام کافی برای عبور از فرایندهای احیاء مستقیم در راکتور احیایی را تولید می‌کند [۲۰].

در سال ۲۰۲۰ لومایر و همکاران [۲۱] تاثیر مواد اتصال دهنده آلی نشاسته و سلولز و همچنین بنتونیت برای بریکت کردن مواد ریزدانه گندله و لجن احیایی را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند بریکت‌ها استحکام کافی برای انجام فرایند احیاء را دارند. با این حال، در مقایسه با گندله اکسید آهن دارای تخلخل کمتر، چگالی ظاهری بالاتر و در نتیجه سطح احیاء پذیری پایین تری هستند.

در سال ۲۰۲۱ مومبلی و همکاران [۲۲] کلوخه شوندگی لجن احیاء، خروجی از کوره بلند، را مورد بررسی قرار داده و دریافتند که با استفاده از ماده اتصال دهنده جاروسیت می‌تواند کلوخه با استحکام بالا (مقاوم تا فشار مکانیکی ۴۰ تا ۵۰ بار) تولید کنند.

در سال ۲۰۲۱ لومایر و همکاران [۲۳-۲۴] تاثیر مواد اتصال دهنده یک ماده آلی و بنتونیت در کلوخه شوندگی در شرایط سرد و گرم مواد لجن احیایی، ریزدانه گندله اکسید آهن و آهن اسفنجی نیم احیاء شده را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند تولید کلوخه از مواد لجن احیایی و ریزدانه گندله و آهن اسفنجی نیم احیاء شده در ابعاد کمتر از ۱۰ میلی متر و مشکل از اتصال دهنده آلی در کنار بنتونیت می‌تواند کلوخه مناسب جهت تامین خوراک کوره احیاء مستقیم ایجاد کند.

در ناحیه احیاء مستقیم شرکت توسعه آهن و فولاد گل گهر دو خط تولید آهن اسفنجی به روش پیوسته میدرکس با ظرفیت دو میلیون تن در سال به بهره برداری رسیده است. خوراک ورودی به راکتورهای احیاء نیز توسط کارخانه گندله سازی مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر تامین می‌گردد. در این مجتمع محصولات جانبی ریزدانه گندله اکسید آهن و لجن احیایی بر اساس کیفیت مقاومت فشاری گندله خام ورودی به کوره در مقدارهای متفاوتی تولید می‌گردد. با هدف کاهش هزینه‌های تولید و جلوگیری از هدر روی مواد با ارزش، استراتژی استفاده مجدد از مواد ریزدانه حاصل از گندله اکسید آهن و لجن احیایی در دستور کار واحد تحقیق و توسعه مجتمع قرار داشته و این تحقیق نیز در این راستا انجام گرفته است.

بر اساس بررسی نویسندگان مقاله تا کنون تحقیقی در مورد احیاء ترکیبات بازیافتی شامل ریزدانه حاصل از گندله اکسید آهن و لجن احیایی از طریق شارژ مستقیم این مواد به صورت کلوخه در کوره صنعتی انجام نشده است. در این کار ابتدا مواد فوق به کمک چسب سیلیکات سدیم به صورت کلوخه درآمد. سپس، برای اولین بار، احیاء کلوخه‌ها در راکتور صنعتی احیا مستقیم در شرکت صنعتی و معدنی گل گهر مورد بررسی قرار گرفت. در حقیقت این کار به منظور

چشمه‌های سرند نصب شده قبل از ورود مواد به کوره با اندازه ۶/۳ میلی متر عبور کرده و قبل از ورود به کوره جدا می‌گردد. لجن احیایی به شکل پودر با ابعاد بسیار ریز در هنگام شستشوی گازهای خروجی از کوره و همچنین گاز خنک کاری در اسکرابرها تولید و در نهایت در کلاریفایرها جدا می‌گردند. دانه بندی ریز این مواد سبب گردیده که امکان استفاده از این مواد به عنوان خوراک ورودی به راکتور احیا وجود نداشته باشد. از طرف دیگر به دلایل مختلف از جمله ارزش اقتصادی این مواد و هزینه‌های حمل و نقل و مشکلات نگهداری آنها در محوطه کارخانه، بررسی و امکان سنجی استفاده از این مواد به عنوان خوراک ورودی به راکتور احیا، به منظور کاهش هزینه‌های تولید و افزایش سود آوری، از اهمیت زیادی برخوردار است [۱۴].

در اکثر صنایع، مقادیری مواد جانبی ایجاد می‌گردد که عمدتاً به واسطه دانه بندی ریز، امکان استفاده موثر از آنها وجود ندارد. این مواد با اینکه ارزش اقتصادی بالایی دارند ولی به واسطه محدودیت‌های ابعادی نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. بر این اساس استفاده از روش بریکت سازی به منظور تبدیل ذرات ریزدانه به توده ذرات متراکم شده با ابعاد بزرگتر از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. به منظور افزایش استحکام ساختاری در برابر تنش‌ها و فشارها^۲ در کلوخه معمولاً از مواد اتصال دهنده استفاده می‌شود. مواد اتصال دهنده که بر اساس ساختار مولکولی در سه گروه مواد آلی، مواد معدنی و مواد ترکیبی (ترکیب مواد آلی و معدنی) تقسیم بندی شده اند می‌توانند ذرات را، با ایجاد پیوند بین آنها، در قید یکدیگر نگهدارند [۱۹-۱۵].

افزودن بریکت به شارژ کوره احیا مستقیم فواید و مضراتی به شرح زیر به همراه دارد.

- با این روش ضایعات کارخانه شامل ریز دانه‌های گندله و نیز لجن احیایی به بهترین نحو دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- حضور کلوخه‌ها به عبور آسانتر گاز از بین گندله‌ها کمک می‌کند. به عبارت دیگر افت فشار بستر را کاهش می‌دهد.
- ایرادی که استفاده از بریکت در بستر بوجود می‌آورد این است که، به دلیل درشتی آنها نسبت به گندله، مقدار کمی ظرفیت تولید کوره را کاهش می‌دهد.

در هر صورت برای استفاده از بریکت به همراه گندله در شارژ کوره احیا مستقیم نیاز به تحقیق بیشتری وجود دارد. در ارتباط با اضافه کردن پسماندهای صنعتی به گندله، تحقیقاتی در سطح جهانی صورت گرفته است [۲۸-۲۰].

در سال ۲۰۱۷ در پتنت شماره WO 2016/089192 A1 کلوخه شوندگی مواد ریزدانه حاصل از گندله، لجن احیایی و غبار خروجی از کوره احیاء مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. آنها دریافتند مواد بنتونیت، سیمان و سیلیکات سدیم در

جدول ۱. مشخصات مربوط به گندله مورد استفاده

اندازه	استحکام فشاری ($\frac{kg}{m^2}$)	درصد سولفور	درصد آهن کل	درصد FeO
کمتر از ۶/۳ میلی متر	۲۶۹	۰/۰۱	۶۵/۹۲	۰/۶۵

جدول ۲. مشخصات مربوط به لجن احيائي

متوسط اندازه	درصد سولفور	درصد آهن کل	درصد آهن فلزی
۶۵ میکرومتر	۱/۵	۷۲	۲۵

جدول ۳. مشخصات مربوط به ریزدانه آهن اسفنجی

درصد آهن فلزی	درصد آهن کل	درصد کربن	درصد سولفور
۷۸	۸۷	۱/۵۴	۰/۰۱

ابتدا نمونه هایی شامل مواد ریزدانه حاصل از گندله و لجن احيائي در حضور و عدم حضور پودر آهن اسفنجی و چسب سيليكات سدیم با درصدهای وزنی متفاوت تهیه شد. سپس با استفاده از دستگاه کلوخه ساز صنعتی کلوخه هایی به شکل قرص با قطر ۱۶۰ میلی متر و ارتفاع ۵۰ میلی متر تولید گردید (شکل ۲). در مرحله بعد با استفاده از دستگاه جک بتن شکن تست سنجش استحکام نمونه ها انجام و هر کدام از نمونه های کلوخه، برش خورده و به ابعاد تقریباً یکسان و کوچکتر تبدیل شد. در گام بعد، از این نمونه ها در فرایند صنعتی احیا مستقیم استفاده و در خروجی از راکتور پس از احیا، درصد عبور کلوخه تعیین و آنالیز شیمیایی بر روی آنها انجام شد. در نتیجه آنالیز شیمیایی نمونه ها، پارامترهایی مانند درصد آهن کل، درصد آهن فلزی و متالیزاسیون (درجه احیا شونده) اندازه گیری شد.



شکل ۱. نمونه ای از کلوخه تولید شده از مواد اولیه موجود در جدول ۱ تا ۳

امکان سنجی استفاده مستقیم از مواد مذکور در کوره احیا بصورت بریکت انجام شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

در پژوهش حاضر مواد مورد استفاده شامل مواد ریزدانه حاصل از گندله اکسید آهن، لجن احيائي و ریزدانه آهن اسفنجی از شرکت توسعه آهن و فولاد گل گهر، با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ تا ۳ تهیه گردید. چسب سيليكات سدیم نیز از نوع صنعتی بوده و بدون خالص سازی مورد استفاده قرار گرفت. نمونه های کلوخه شده به دو شکل مختلف تهیه و در راکتور احیاء مستقیم شرکت توسعه آهن و فولاد گل گهر مورد آزمایش احیاء قرار گرفت. احیاء کلوخه ها در راکتور میدرکس کارخانه انجام و هر بار نمونه های احیاء شده، در آزمایشگاه شرکت با استفاده از روش استاندارد ۶۰۳۲۵-۶۵۲ مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. در آنالیز شیمیایی به روش تر میزان آهن فلزی، آهن کل و میزان آهنی شدن^۳ نمونه ها تعیین شد در کار انجام شده برای تولید کلوخه ها از دستگاه کلوخه ساز هیدرولیکی با قالب استوانه ای به قطر ۱۶۰ میلی متر و ارتفاع ۵۰ میلی متر و شفت استوانه ای به قطر ۱۵۹/۲ میلی متر نوع SBJ-6300 ساخت کشور چین استفاده شد. برای کلوخه کردن ذرات تنها باید فشار اعمال شده از سوی دستگاه بریکت ساز تنظیم شود. این مقدار برای تمام نمونه ها ثابت و برابر با ۳۰۰ بار بود که به مدت ۱۰ ثانیه و در دمای محیط بر نمونه ها اعمال شد. تست سنجش استحکام مقاومت فشاری کلوخه های تولیدی بوسیله دستگاه جک بتن شکن مدل CO 160 ساخت کشور ایران انجام شد. با استفاده از این تجهیز نمونه های بریکت شده بین فک های دستگاه قرار گرفته و این دستگاه نیز با اعمال نیرو، پس از خرد شدن نمونه میزان تحمل نهایی و استحکام فشاری نمونه را اندازه گیری و گزارش می کند

3. Metallization

۳. نتایج و بحث

در این بخش تاثیر درصد وزنی مواد ریزدانه گندله، لجن احیایی، پودر آهن اسفنجی و مقدار چسب سیلیکات سدیم بر میزان احیاء شونده و استحکام نمونه‌های کلوخه شده مورد بررسی قرار گرفته است.

استحکام کلوخه حاوی ریزدانه گندله و لجن احیایی (فاقد چسب)

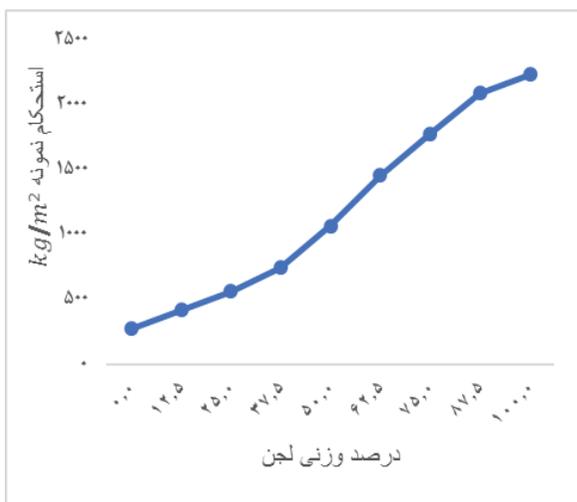
یکی از پارامترهای موثر در فرایند احیاء مستقیم، میزان استحکام ساختاری گندله در هنگام عبور از راکتور می‌باشد. بریکت اولیه دارای قطر ۱۶۰ میلی‌متر است و نمیتوان استحکام فشاری آنرا با دستگاه‌های رایج، که برای تعیین استحکام یک گندله طراحی شده، اندازه گیری کرد. از طرف دیگر استحکام فشاری کلوخه‌های کوچک شده به دلیل خرد شدن کلوخه اولیه کاهش می‌یابد. به این منظور از دستگاه جک بتن شکن برای اندازه گیری استحکام فشاری کلوخه استفاده شد. در این آزمایش ابتدا کنسانتره، مواد ریزدانه حاصل از گندله و لجن احیایی با درصدهای وزنی مختلف در دستگاه مربوطه در فشار ۳۰۰ بار به کلوخه تبدیل و در نهایت مقاومت فشاری نمونه‌های کلوخه شده به همان شکل اولیه اندازه گیری شد. دستگاه جک بتن شکن استحکام گندله‌ها را با واحد کیلوگرم نیرو بر متر مربع ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از انجام تست‌های اندازه گیری استحکام فشاری نمونه‌های کلوخه شده فاقد چسب در جدول ۴ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود استحکام فشاری نمونه‌ها با افزایش سهم ماده لجن احیایی نسبت به ماده ریزدانه گندله افزایش می‌یابد. ذرات لجن احیایی دانه بندی ریزتری نسبت به مواد ریزدانه گندله دارد و به همین علت در لابه‌لای بقیه ذرات قرار گرفته، باعث میشود که استحکام نمونه‌ها افزایش یابد. همانگونه که از داده‌های مربوط به استحکام نمونه‌ها پیدا است استحکام کلوخه حاصل از ریز دانه لجن، هشت برابر استحکام نمونه حاصل از ریز دانه گندله است. این استحکام برای گندله خشک شده ۸/۳۹ نیوتن معادل ۰/۸۶ کیلوگرم نیرو به ازای هر گندله است [۲۹]. این مقدار عموماً برای گندله با اندازه ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر ارائه می‌شود. استحکام فشاری برای گندله با قطر ۱۰ میلی‌متر ۱۱۰۰ کیلوگرم نیرو بر متر مربع بدست می‌آید. با مقایسه این عدد با اعداد موجود در جدول ۴ مشخص می‌شود که استحکام گندله از کلوخه (همراه با ریزدانه گندله و فاقد لجن) بیشتر و این استحکام از مقدار آن برای کلوخه (تنها حاوی لجن) کمتر است.

درصد عبور کلوخه از کوره احیاء مستقیم

در انجام این تست، روزانه ۱۰ عدد نمونه کلوخه با درصد وزنی مشخص از مواد تشکیل دهنده ریزدانه گندله اکسید آهن و

جدول ۴. استحکام فشاری نمونه‌های کلوخه شده از مواد ریزدانه و لجن‌های احیایی (فاقد چسب سیلیکات سدیم)

مقدار ریزدانه گندله (گرم)	مقدار لجن (گرم)	درصد وزنی لجن	استحکام نمونه ($\frac{kg}{m^2}$)
۴۰۰۰	۰	۰	۲۷۵
۳۵۰۰	۵۰۰	۵/۱۲	۴۱۷
۳۰۰۰	۱۰۰۰	۲۵	۵۶۰
۲۵۰۰	۱۵۰۰	۵/۳۷	۷۴۴
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰	۱۰۶۲
۱۵۰۰	۲۵۰۰	۵/۶۲	۱۴۵۴
۱۰۰۰	۳۰۰۰	۷۵	۱۷۷۵
۵۰۰	۳۵۰۰	۵/۸۷	۲۰۸۵
۰	۴۰۰۰	۱۰۰	۲۲۲۷



شکل ۲. استحکام نمونه بر حسب درصد وزنی لجن در نمونه‌های کلوخه شده فاقد چسب مربوط به جدول ۴

لجن احیایی مطابق جدول ۵ را در کوره احیاء مستقیم شارژ کرده و با جمع کردن نمونه‌ها از خروجی کوره و شمارش تعداد نمونه عبور کرده میزان درصد عبور برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد. طبق نتایج بدست آمده نمونه‌هایی که در آن‌ها درصد وزنی لجن‌های احیایی بیشتر می‌باشد درصد عبور بیشتری را دارند. علت آن نیز به نتایج حاصل از جدول ۴ برمی‌گردد. با افزایش درصد لجن احیایی مقاومت نمونه افزایش یافته و در نتیجه درصد عبور از کوره افزایش خواهد یافت. ولی همانگونه که از داده‌های موجود در جدول ۵ مشخص است به دلیل عدم استفاده از چسب، میزان عبور برای تمام نمونه‌های کلوخه شده کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد.

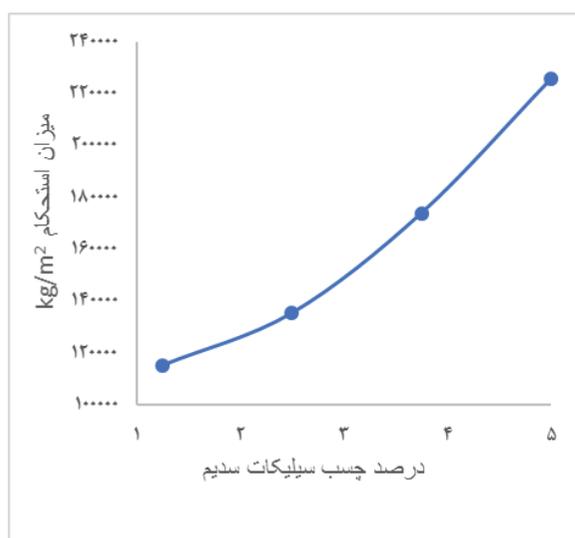
جدول ۵. درصد عبور نمونه‌های کلوخه شده با درصد وزنی مختلف از مواد تشکیل شونده (بدون چسب)

مقدار ریزدانه (گرم)	مقدار لجن (گرم)	درصد لجن	تعداد کلوخه ورودی	تعداد کلوخه خروجی از کوره	درصد کلوخه عبور کرده
۴۰۰۰	۰	۰	۱۰	۰	۰
۳۵۰۰	۵۰۰	۱۲/۵	۱۰	۰	۰
۳۰۰۰	۱۰۰۰	۲۵	۱۰	۰	۰
۲۵۰۰	۱۵۰۰	۳۷/۵	۱۰	۰	۰
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰	۱۰	۰	۰
۱۵۰۰	۲۵۰۰	۶۲/۵	۱۰	۰	۰
۱۰۰۰	۳۰۰۰	۷۵	۱۰	۱	۱۰
۵۰۰	۳۵۰۰	۸۷/۵	۱۰	۱	۱۰
۰	۴۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۲	۲۰

جدول ۶. استحکام نمونه‌های کلوخه شده با چسب سیلیکات سدیم

ریزدانه گندله (گرم)	درصد ریزدانه گندله	لجن احیا (گرم)	درصد لجن احیائی	سیلیکات سدیم (گرم)	درصد سیلیکات سدیم	استحکام نمونه $\frac{kg}{m^2}$
۲۴۷۵	۶۱/۸	۱۴۷۵	۳۶/۸	۵۰	۱/۲	۱۱۵۲۵۰
۲۴۵۰	۶۱/۲	۱۴۵۰	۳۶/۲	۱۰۰	۲/۵	۱۳۵۴۴۰
۲۴۲۵	۶۰/۶	۱۴۲۵	۳۵/۶	۱۵۰	۳/۷	۱۷۳۹۵۰
۲۴۰۰	۶۰	۱۴۰۰	۳۵	۲۰۰	۵	۲۲۵۶۱۰

درصد چسب سیلیکات سدیم است. با افزایش درصد سیلیکات سدیم میزان استحکام کلوخه بیشتر شده بطوریکه استحکام کلوخه همراه با ۵ درصد چسب سیلیکات سدیم ۳/۴ برابر استحکام گندله همراه با ۰/۷ درصد چسب بنتونیت است.



شکل ۳. استحکام نمونه بر حسب درصد وزنی چسب سیلیکات سدیم مربوط به جدول ۶

استفاده از چسب سیلیکات سدیم برای افزایش استحکام نمونه‌ها

به منظور افزایش استحکام کلوخه‌ها، مطابق جدول ۶ کلوخه‌هایی با درصد متفاوت از چسب سیلیکات سدیم تهیه شد. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود میزان چسب سیلیکات سدیم در نمونه‌های موجود از ۱/۲۵ تا ۵ درصد تغییر یافته است. چسب سیلیکات سدیم در این کلوخه‌ها در تماس با هوای آزاد و در دمای محیط، واکنش داده و در نهایت کلوخه‌ها سخت و مستحکم می‌گردند.

همانگونه که در شکل ۳ مشخص است میزان استحکام نمونه‌های کلوخه شده با افزایش درصد وزنی چسب سیلیکات سدیم افزایش یافته است. طبق نتایج حاصل از انجام این تست مشخص گردید که چسب سیلیکات سدیم می‌تواند در مقادیر کم لجن احیائی نیز استحکام مورد نیاز را در نمونه‌های کلوخه شده ایجاد نماید. استحکام بدست آمده برای گندله خشک شده حاوی ۰/۷ درصد وزنی چسب بنتونیت معادل ۵۱ نیوتن یا $kg_f/5/2$ است [۲۹]. این استحکام برای گندله با قطر ده میلیمتر معادل $kg_f/m^2/66700$ محاسبه می‌شود. با مقایسه این مقدار با نتایج بدست آمده در جدول ۶ ملاحظه می‌شود که این مقدار تقریباً معادل با استحکام کلوخه با ۱/۲

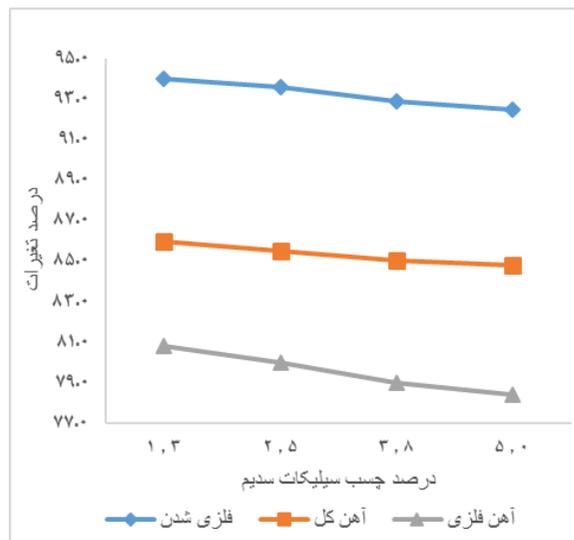
جدول ۷. درصد عبور نمونه‌های کلوخه شده با چسب سیلیکات سدیم

درصد عبور	تعداد نمونه عبوری از کوره	تعداد شارژ در کوره	چسب سیلیکات سدیم (%)	چسب سیلیکات سدیم (گرم)	لجن احیا (گرم)	ریزدانه گندله (گرم)
۷۰	۷	۱۰	۱/۲۵	۵۰	۱۴۷۵	۲۴۷۵
۸۰	۸	۱۰	۲/۵	۱۰۰	۱۴۵۰	۲۴۵۰
۹۰	۹	۱۰	۳/۷۵	۱۵۰	۱۴۲۵	۲۴۲۵
۹۰	۹	۱۰	۵	۲۰۰	۱۴۰۰	۲۴۰۰

جدول ۸. نتایج حاصل از احیا نمونه کلوخه شده با چسب سیلیکات سدیم

درصد فلزی شدن	آهن فلزی (درصد)	آهن کل (درصد)	محلوس چسب (درصد)	لجن احیایی (گرم)	ریزدانه گندله (گرم)
۹۳/۹۸	۸۲/۸۰	۸۵/۹۹	۱/۲۵	۱۴۷۵	۲۴۷۵
۹۳/۵۸	۸۰/۰۱	۸۵/۴۹	۲/۵	۱۴۵۰	۲۴۵۰
۹۲/۸۸	۷۹/۰۱	۸۵/۰۶	۳/۷۵	۱۴۲۵	۲۴۲۵
۹۲/۵	۷۸/۴۲	۸۵/۷۷	۵	۱۴۰۰	۲۴۰۰

و سبب حاوی نمونه‌های متفاوت به کوره احیا شارژ گردید. نمونه‌ها پس از خروج از کوره، تحت محیط بی اثر سرد شده و در نهایت مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. بر طبق نتایج درج شده در جدول ۸، درصد آهن فلزی و درصد آهن کل کلوخه‌های احیاء شده با افزایش درصد وزنی چسب سیلیکات سدیم، رابطه معکوس دارد. علت آن نیز این هست که با اعمال حرارت در راکتور، ترکیبات سیلیکاتی چسب در کلوخه باقی مانده و باعث می‌شوند که در نهایت درصد آهن کمتری حاصل شود. داده‌های جدول شماره ۸ و شکل ۴ نشان می‌دهد



شکل ۴. درصد تغییرات آهن کل، آهن فلزی و فلزی شدن کلوخه احیاء شده بر حسب درصد چسب سیلیکات سدیم بدون ریز دانه آهن اسفنجی

تأثیر استفاده از چسب سیلیکات سدیم در آزمایش مربوط به عبور نمونه‌ها از کوره احیا

کلوخه‌های تولید شده بر اساس جدول شماره ۶ در ساعت‌های مشخصی از شبانه روز در کوره احیاء مستقیم شارژ و در نهایت پس از جمع آوری نمونه‌های خارج شده از کوره، درصد عبور محاسبه و در جدول ۷ ثبت گردید.

همانگونه که از جدول ۷ مشخص است ۳/۷۵ درصد از سیلیکات سدیم کافی است تا استحکام لازم برای درصد عبور ۹۰ درصدی کلوخه از کوره احیا را فراهم کند. این مطلب اهمیت نقش استفاده از بیندر برای استحکام گندله‌ها را نشان می‌دهد.

بررسی میزان احیاء شدن نمونه‌ها

در نتیجه احیاء ترکیبات اکسیدی، اکسیژن موجود در ترکیبات داخل گندله در اثر واکنش با H_2 و CO به صورت بخار آب و دی اکسید کربن از گندله و در نهایت از کوره خارج می‌شوند. با کاهش میزان اکسیژن گندله، درصد آهن کل کاهش یافته، درصد آهن فلزی و در نتیجه درجه فلزی شدن (که از تقسیم میزان آهن فلزی به آهن کل حاصل می‌شود) افزایش می‌یابد. از آنجا که اندازه نمونه‌های کلوخه شده متشکل از مواد ریزدانه حاصل از گندله، لجن‌های احیایی و چسب سیلیکات سدیم بزرگتر از اندازه لازم برای نفوذ پذیری مناسب گاز می‌باشد، به این منظور بریکت اولیه ابتدا به اجسامی کوچکتر (مکعب هایی با طول ضلع تقریباً ۲۰ میلی متر) تبدیل گردید. سپس به منظور انجام تست احیاء، نمونه‌های خردایش شده درون سبب هایی از جنس فولاد با مش ۱۰ میلی متر قرار گرفته

جدول ۹. مشخصات کلوخه‌های احیا شده حاوی ریز دانه آهن اسفنجی و چسب سیلیکات سدیم

شماره نمونه	وزن کل کلوخه (گرم)	وزن ریز دانه اکسید آهن (گرم)	درصد گندله در نمونه	وزن لجن (گرم)	درصد لجن در نمونه	وزن ریزدانه آهن اسفنجی	درصد ریزدانه آهن اسفنجی	وزن چسب (گرم)	درصد چسب بکار رفته	آهن فلزی (درصد)	درصد فلزی شدن
۱	۴۰۵۰	۳۰۰۰	۷۴/۰۷	۵۰۰	۱۲/۳۵	۵۰۰	۱۲/۳۵	۵۰	۱/۲۳	۸۳/۶۶	۹۴/۳۷
۲	۴۱۰۰	۳۰۰۰	۷۳/۱۷	۵۰۰	۱۲/۲۰	۵۰۰	۱۲/۲۰	۱۰۰	۲/۴۴	۸۳/۰۵	۹۴/۳۲
۳	۴۱۵۰	۳۰۰۰	۷۲/۲۹	۵۰۰	۱۲/۰۵	۵۰۰	۱۲/۰۵	۱۵۰	۳/۶۱	۸۲/۶۷	۹۴/۲۵
۴	۴۲۰۰	۳۰۰۰	۷۱/۴۳	۵۰۰	۱۱/۹۰	۵۰۰	۱۱/۹۰	۲۰۰	۴/۷۶	۸۲/۰۱	۹۴/۱۵
۵	۴۲۵۰	۳۰۰۰	۷۰/۵۹	۵۰۰	۱۱/۷۶	۵۰۰	۱۱/۷۶	۲۵۰	۵/۸۸	۸۱/۳۹	۹۴/۰۶
۶	۴۳۰۰	۳۰۰۰	۷۷/۶۹	۵۰۰	۱۱/۶۳	۵۰۰	۱۱/۶۳	۳۰۰	۶/۹۸	۸۰/۷۹	۹۳/۹۶

شده به کوره احیا صنعتی شارژ گردید. در خروجی از کوره و پس از سرد شدن نمونه‌ها تحت محیط خنثی، درصد آهن کل، آهن فلزی و درصد فلزی شدن نمونه‌ها (درصد احیاء شونده‌گی)، اندازه گیری شد. نتایج این بررسی در جدول ۹ و شکل ۵ ارائه شده است. همانگونه که در جدول ۹ و شکل ۵ مشاهده می‌شود، درصد آهن کل نمونه‌های کلوخه شده در عمده درصد‌های چسب سیلیکات سدیم دارای مقادیری بالا تر از ۸۷ درصد، مقدار استاندارد کیفی، می‌باشد. مطابق نمودار ۵ تغییرات درصد آهن کل، درصد آهن فلزی و درصد فلزی شدن نسبت به تغییرات درصد چسب سیلیکات سدیم کم بوده و تغییر زیادی را نشان نمی‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر کلوخه حاصل از مواد ریزدانه گندله اکسید آهن و لجن احیایی تهیه و استحکام کلوخه و نیز امکان احیا آن از طریق شارژ مستقیم آن به کوره احیا بررسی شد. میزان نفوذ پذیری گازهای احیائی تابع اندازه کلوخه می‌باشد. به همین دلیل در واکنشهای احیاء، کلوخه به اجزاء کوچکتری تقسیم شد.

از بررسی انجام شده نتایج ذیل حاصل گردید:

۱. استحکام فشاری نمونه‌ها با افزایش سهم ماده لجن احیائی نسبت به ماده ریزدانه گندله اکسید آهن، به دلیل دانه بندی ریزتر آن و نیز احتمالاً به دلیل ترکیبات موجود در لجن افزایش می‌یابد. بطوریکه استحکام کلوخه حاصل از ریز دانه لجن، هشت برابر استحکام نمونه حاصل از ریز دانه گندله بدست آمد.

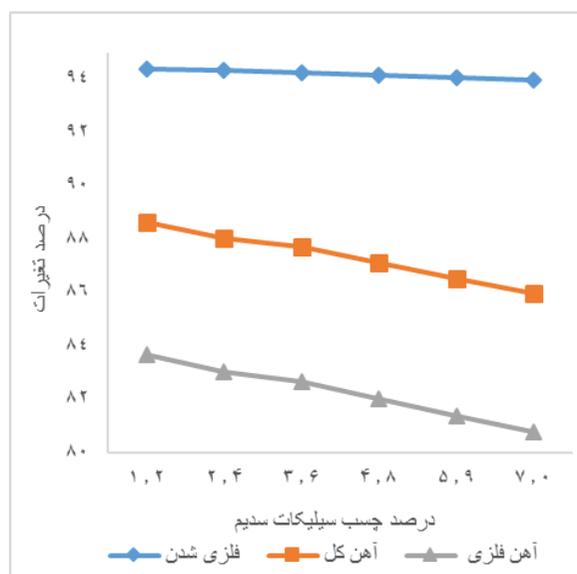
۲. کلوخه تهیه شده بدون چسب درصد عبور پایینی داشته و برای افزایش استحکام لازم است تا از یک چسب مناسب استفاده شود.

۳. عیار کلوخه احیا شده تابع مقدار اتصال دهنده است. بطوریکه با افزایش میزان چسب سیلیکات سدیم، اگر چه

که میزان درصد آهن کل نمونه‌های کلوخه شده در پایینترین سطح از درصد وزنی چسب سیلیکات سدیم (مقدار ۱/۲۵ درصد از چسب) از مقدار لازم که ۸۷ درصد می‌باشد کمتر بوده و این موضوع محدودیت برای استفاده از اتصال دهنده سیلیکات سدیم بوجود می‌آورد.

بررسی تاثیر افزودن ریزدانه آهن اسفنجی

یک روش برای جبران کمبود آهن کل در نمونه‌های احیا شده استفاده از آهن اسفنجی در کلوخه اولیه است. به این منظور به مواد اولیه کلوخه ۱۵ تا ۲۰ درصد پودر آهن اسفنجی اضافه و کلوخه‌های مختلف با درصد متفاوتی از ریز دانه گندله و نیز لجن احیایی مطابق جدول شماره ۹ تهیه شد. کلوخه‌های تهیه شده به قطعات تقریباً یکسانی تبدیل و در درون سبد در بسته ای قرار داده شد. سبدهای حاوی کلوخه‌های کوچک



شکل ۵. درصد آهن کل، درصد آهن فلزی و درصد فلزی شدن نسبت به میزان چسب سیلیکات سدیم همراه با ریز دانه آهن اسفنجی

References

- [1] Cavaliere P. Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. Springer; Switzerland, 2019.
- [2] R. Béchara, H. Hamadeh, O. Mirgaux, F. Pattison, Optimization of the iron ore direct reduction process through multiscale process modeling. *Materials*, 2018; 11 (7): 1094-1112.
- [3] Christoph Scharm, Felix Küster, Marcel Laabs, Qiuliang Huang, Olena Volkova, Markus Reinmöller, Stefan Guhl, Bernd Meyer, Direct reduction of iron ore pellets by H₂ and CO: In-situ investigation of the structural transformation and reduction progression caused by atmosphere and temperature. *Minerals Engineering*, 2022; 180(7): 107459.
- [4] A. Mirzajani, H. Ale Ebrahim and S.M.M. Nouri, Simulation of a direct reduction moving bed reactor using a three interface model. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2018; 35(3): 1019-1028.
- [5] Shams, A.; Moazeni, F. Modeling and Simulation of the MIDREX Shaft Furnace: Reduction, Transition and Cooling Zones. *Journal of Metals*, 2015; 67: 2681-2689.
- [6] Sohn, H.Y., Roy, S. Development of a Moving-Bed Ironmaking Process for Direct Gaseous Reduction of Iron Ore Concentrate. *Metals*, 2022; 12: 1889-1897.
- [7] Sohn, H.Y., Fan, D.-Q., Abdelghanyand, A. Design of Novel Flash Ironmaking Reactors for Greatly Reduced Energy Consumption and CO₂ Emissions. *Metals*, 2021; 11, 332.
- [8] Sohn, H.Y.; Elzohiery, M.; Fan, D.-Q. Development of the Flash Ironmaking Technology (FIT) for Green Ironmaking with Low Energy Consumption. *Journal of Energy Power Technology*, 2021; 3, 26.
- [9] Kinaci. Efe, Thomas Lichtenegger, Simon Schneiderbauer, Direct Reduction of Iron-Ore in Fluidized Beds, *Computer Aided Chemical Engineering*, 2018; 43: 217-222.
- [10] Plaul, F.J.; Böhm, C.; Schenk, J.L. Fluidized-bed technology for the production of iron products for steelmaking. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2009; 109(2): 121-128.

استحکام کلوخه افزایش می‌یابد ولی باعث می‌شود که عیار کلوخه کاهش یابد.

۴. سیلیکات سدیم چسبی ارزان و در دسترس بوده و بنابراین گزینه مناسبی برای استفاده از آن به منظور کلوخه سازی است.

این تحقیق در حقیقت نقطه شروعی برای بررسی امکان استفاده از مواد جانبی (ریزدانه گندله اکسید آهن و لجن احیایی) در فرایند تولید آهن اسفنجی از طریق کلوخه سازی و شارژ مستقیم آنها در کوره احیا مستقیم است. برای استفاده صنعتی از این مواد جانبی و شارژ آنها به همراه گندله به کوره احیا نیاز به بررسی و آزمایشهای بیشتری دارد که در تحقیقات بعدی مد نظر قرار خواهد گرفت

۵. تشکر و قدردانی

از مسئولین محترم شرکت توسعه آهن و فولاد گل گهر به ویژه مدیر عامل محترم و معاونت محترم بهره برداری و همچنین مدیر ناحیه احیاء مستقیم و مسئولین محترم فولاد کاویان گهر سیرجان به خاطر همکاری صمیمانه در انجام این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌گردد.

- [11] Wolfinger, Thomas, Daniel Spreitzer, Johannes Schenk, Analysis of the Usability of Iron Ore Ultra-Fines for Hydrogen-Based Fluidized Bed Direct Reduction—A Review, *Materials*, 2022; 15, 2687: 1-18.
- [12] Dutta S.K, Sah R. Direct Reduced Iron: production. In encyclopedia of iron, steel, and their alloys. Taylor and Francis. 2016; 1082-1108.
- [13] Umadevi T., Prasanna Kumar, Naveen F Lbo, P.C. Mahapatra, M. Prabhu and Madhu Ranjan, Effect of Iron Ore Pellet Size on its Properties and microstructure. *steel research international*, 2009; 80(10) 709-716.
- [14] Moser M, Fleischanderl A, Neuhold R, Kofler R. Innovative solutions on recycle of oxide fines and waste materials to optimize production costs. *Proceedings of the Ironmaking, Iron Ore and Agglomeration Seminars*, 2013; 356-363.
- [15] Bhattacharya SC, Kumar S. technology packages: screw-press briquetting machines and briquette- fired stoves. Published by Regional Energy Resources Information Center (RERIC), Asian Institute of Technology. Thailand, 2005: 1-64.
- [16] Zhang G, Sun Y, Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018; 82(1): 477- 487.
- [17] Sheila Devasahayam. A novel iron ore pelletization for increased strength under ambient conditions. *Sustainable Materials and Technologies*, 2018; 17: e00069
- [18] Cevik E., H. Ahlatci, Y. Sun . Characterization and Reduction Behavior of Cold-Bonded Composite Pellets for Direct Reduction Using an Organic Binder. *Metallurgist*, 2013; 57: 468-477.
- [19] Guanzhou QIU, Tao JIANG, Zhucheng HUANG, Deqing ZHU, Xiaohui FAN. Characterization of repairing Cold Bonded Pellets for Direct Reduction Using an Organic Binder. *ISIJ International*, 2003; 43(1): 20-25.
- [20] Alvarez R, Javier F. Method for producing briquettes from pellet fines, DRI sludge, DRI fines And Dust from DRI dedusting systems, for industrial use in Direct-Reduced Iron production processes. 2016; patent number: WO 2016/089192 A1.
- [21] Mombelli D, Luvizotto Gonçalves D, Mapelli C, Barella S, Gruttadauria A. processing and Characterization of Self-Reducing Briquettes Made of Jarosite and Blast Furnace Sludges. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021; 7: 1603-1626.
- [22] Lohmeier L, Thaler CH, Harris CH, Wollenberg R, Werner Schroder H, Siegfried Braeuer A. use of bentonite and organic binders in the briquetting of particulate residues from the midrex process for improving the thermal stability and reducibility of the briquettes. *Steel Research International*. 2021; 92: 1-11.
- [23] Lohmeier L, Thaler C, Harris Ch, Wollenberg R, Schröder H-W. Briquetting of Fine-Grained Residues from Iron and Steel Production Using Organic and Inorganic Binders. *Steel Research International*. 2020; 91: 1-10.
- [24] Lohmeier Laura, Ralf Wollenberg, Hans-Werner Schröder, Investigation into the Hot Briquetting of Fine-Grained Residual Materials from Iron and Steel Production. *steel research international*, 2020; 91, 2000237: 1-10.
- [25] Jagannath Pal, Innovative Development on Agglomeration of Iron Ore Fines and Iron Oxide Wastes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2019; 40(4): 248-264.
- [26] Sarkar, A., Mandal, A. K., Sinha, O. P., Pelletisation behaviour of fluxed iron ore pellets of varying basicities made with waste fines. *International Journal Sciences Engineering*, 2013; 5: 9-14.
- [27] Chizhikova, V. M., and Vainshtein, R. M., Composition of ironore pellets with different types of additives. *Metallurgy*, 2003; 47(9-10): 349-352.
- [28] Imazumi, T., Recycling of LD converter sludge and iron bearing fines using NCP cold bonded process. *Conservation and Recycling*, 1991; 6 (4): 167-179.
- [29] Srivastava, U., Komar S.K., Timothy C., Study of Organic and Inorganic Binders on Strength of Iron oxide pellets. *Metallurgical and materials transaction B*, 2013; 44B: 1000-1009.