FINEX تکنولوژی نوین تولید آهن بر پایه احیا مستقیم

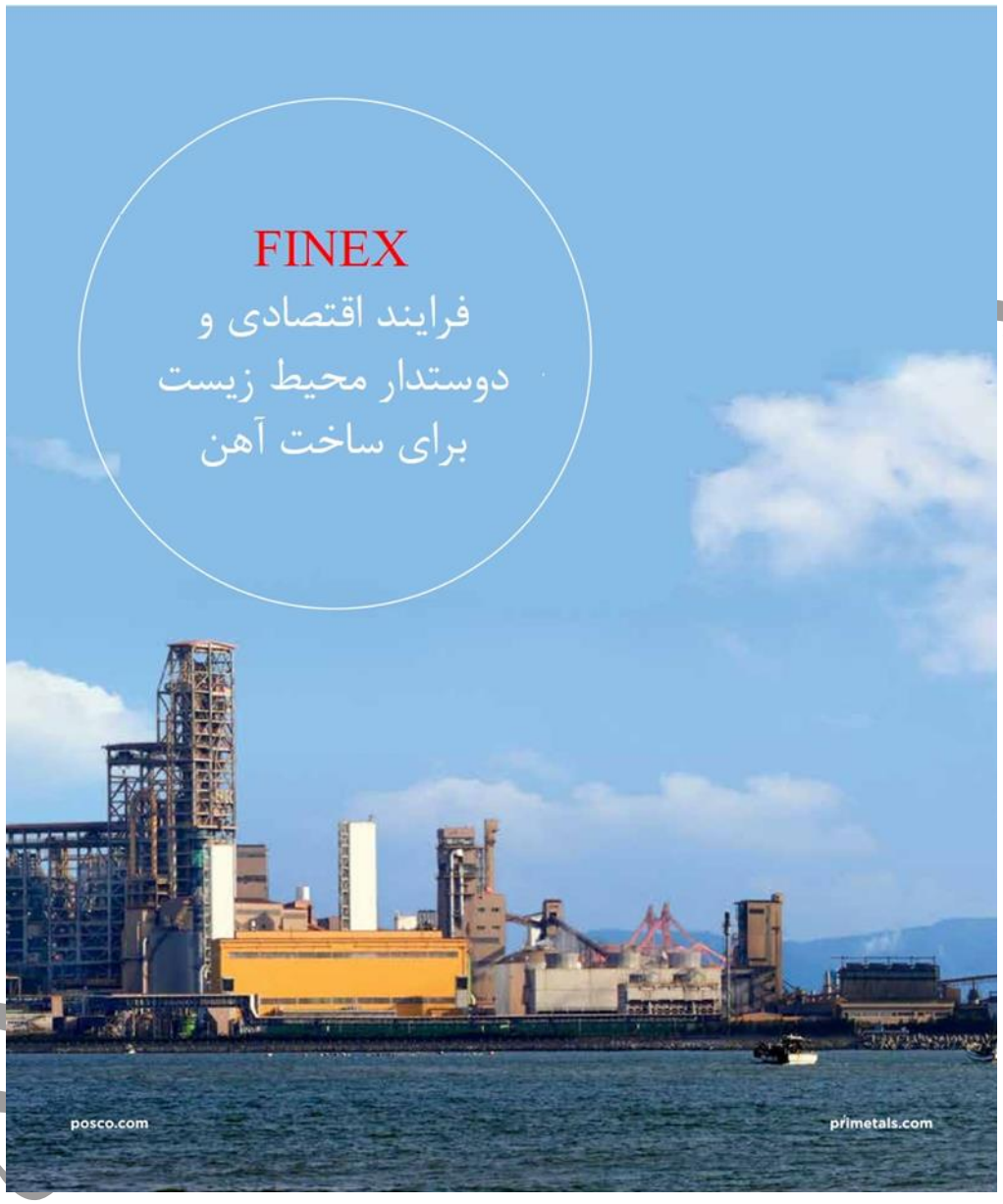
منصور طورانی[1]، *پژوهشکده فولاد، دانشگاه صنعتی اصفهان*

چکیده:

امروزه صنایع فولاد با چالش‌های زیادی به دلیل افزایش تقاضای انرژی؛ افزایش مداوم هزینه‌های مربوط به تهیه مواد خام، گاز طبیعی و کک سازی و همچنین کاهش پیوسته کیفیت و کمیت کانی‌های آهن مواجه می‌باشد. روش کوره بلند سنتی فرایندی پز هزینه و پر مصرف از لحاظ انرژی بوده و برآورده کردن تقاضاهای زیست‌محیطی سخت‌گیرانه و دستیابی به رقابت اقتصادی پایدار با استفاده از این روش سنتی تولید آهن بسیار مشکل می‌باشد. از طرف دیگر فرایند EAF وابستگی شدیدی به کیفیت مطلوب قراضه، HBI و چدن مورد استفاده دارد. برای غلبه و مواجه با مسائل اشاره شده؛ تکنولوژی‌های جدیدی توسط شرکت‌های تولید کننده فولاد در حال ابداع و توسعه می‌باشد. یکی از انواع تکنولوژی‌های نوین جهت تولید فلز داغ (آهن مذاب) بر پایه استفاده از سنگ‌آهن ریز و زغال کک نشو از طریق فرایند احیای مذاب[2] (SR)، تکنولوژی FINEX می‌باشد. فرایند FINEX قابلیت شارژ صددرصدی سنگ‌آهن نرم و ریز و عدم نیاز به فرایندهای پلت سازی و زینترینگ را دارا می‌باشد. قابلیت استفاده از کانی‌های ریز به معنی عدم نیاز به نصب و راه‌اندازی واحد زینترینگ و در نتیجه کاهش قیمت می‌باشد. شاید امروزه در بازار فولاد فرایند FINEX جذاب‌ترین تکنولوژی تولید آهن بوده که دارای پتانسیل بالایی از لحاظ بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید فلز داغ می‌باشد. در این مقاله مروری بر فرآیند FINEX صورت گرفته و از لحاظ مشخصات کلی با روش سنتی کوره بلند مقایسه شده است.

[1] faranimt@gmail.com
[2] . smelting reduction

۱- مقدمه:



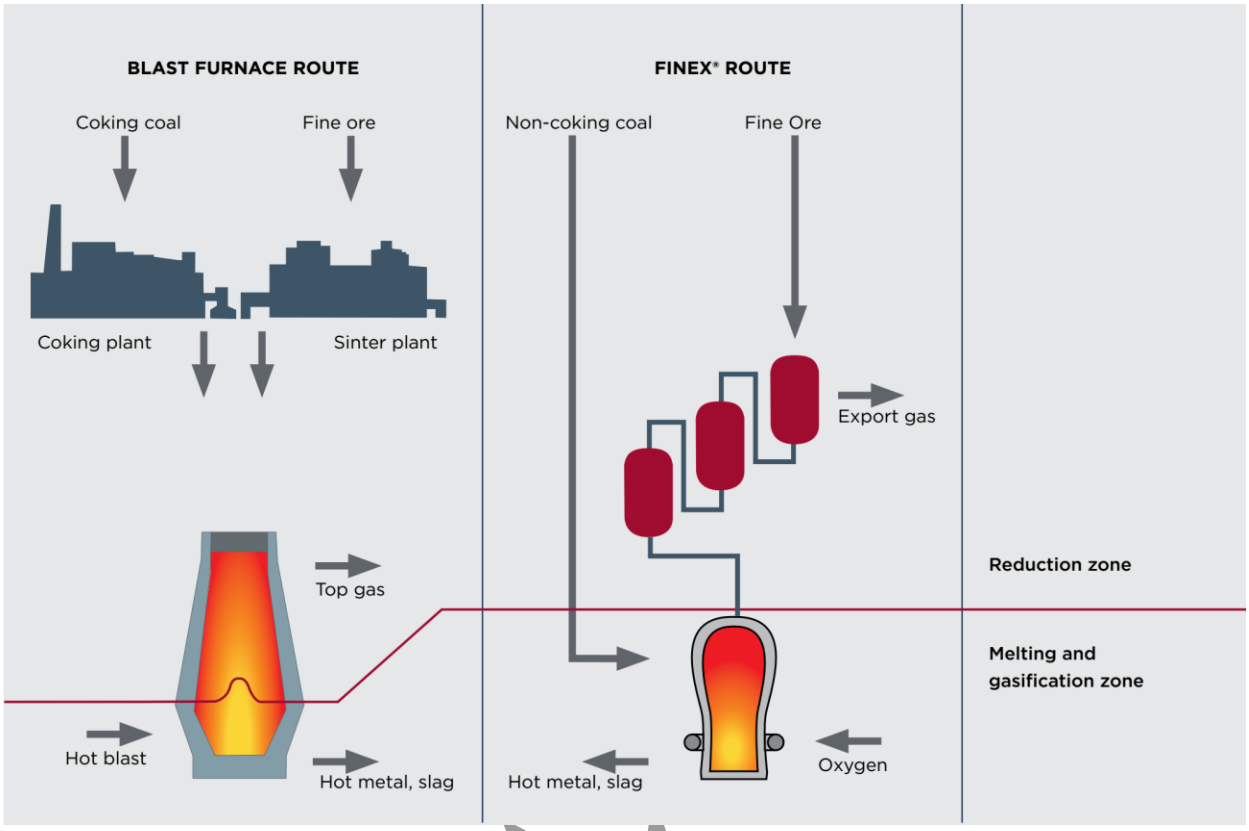
امروزه تولید آهن و فولاد در صنایع پیشرفته فولاد دنیا به دنبال پاسخ‌گویی به چالش‌های مختلف از جمله تأمین مواد خام مرغوب جهت تولید آهن، کاهش هزینه‌های تولید، استفاده از مواد نامرغوب نظیر سنگ‌آهن نرم و زغال کک نشو، کاهش آلودگی‌ها و گازهای گلخانه‌ای به دلیل قوانین و جریمه‌های مالی زیست‌محیطی بین‌المللی سخت‌گیرانه و افزایش کیفیت تولید می‌باشد.

در این میان، جایگزینی فرایندهای پیش گرم-پیش احیا و احیا-ذوب در روش متداول کوره بلند با تکنولوژی‌های جدید بر پایه ذوب مستقیم جهت تولید چدن مذاب از اهداف مهم در صنعت فولاد دنیا بوده است. تکنولوژی‌های نوینی نظیر FINMET، COREX، ROMELT، HIsmelt و FINEX از جمله فرایندهای ابداع شده جهت کاهش انتشار گازهای آلاینده، استفاده از سنگ‌آهن نرم، عدم استفاده از کک و جایگزینی آن با زغال کک نشو یا گاز طبیعی بوده‌اند.

اولین فرایند معرفی شده جهت استفاده از سنگ‌آهن نرم توسط شرکت Siemens آلمان با عنوان فرایند FINMET در دهه ۱۹۹۰ میلادی معرفی شد. محصول تولیدی توسط این فرایند بریکت داغ می‌باشد. فرایند COREX بر اساس احیا هم‌زمان با ذوب بوده که واکنش‌های متالورژیکی در دو اتاقک مجزای احیا[1] و ذوب کننده گازی[2] صورت می پذیرد.

FINEX نام تکنولوژی‌های تولید آهن توسعه‌یافته توسط Siemens VAI و POSCO می‌باشد. این فرایند اساساً ترکیبی از بستر سیال FINMET و ذوب کننده گازی COREX بوده و به همین دلیل نام FINEX برای آن انتخاب شده است. بنابراین تفاوت اصلی فرایند FINEX با فرایند COREX جایگزینی بخش شافت احیایی توسط تعدادی راکتور بستر سیال[3] می‌باشد. در مقایسه با فرایند کوره بلند که آهن مذاب از طریق فرایند زینترینگ و احیا توسط کک تولید می‌شود، در فرایند FINEX آهن مذاب مستقیماً از سنگ‌آهن ریز و زغال کک نشو بدست می‌آید و می‌تواند جایگزین فرایند سنتی تولید آهن به روش کوره بلند از طریق فرایند زینتر و احیا توسط کک شود. مقایسه دو فرایند FINEX و کوره بلند در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین مقایسه کلی در مورد عملکرد عملیاتی[4] مربوط به یک واحد کوره بلند شرکت Pohang و واحد ۱/۵ میلیون تنی FINEX مربوط به شرکت POSCO در جدول ۱ ارائه شده است.

[1] . Reduction shaft
[2] . Melter-Gasifier
[3] . Fluidized-bed reactor
[4] Operational performance



شکل ۱: مقایسه فرایندهای FINEX و کوره بلند.

جدول ۱: مقایسه عملکرد عملیاتی واحد کوره بلند سنتی شرکت Pohang و FINEX مربوط به شرکت POSCO.

Indices			Pohang BF4	1.5MT FINEX
Production		t/y	3.2 M	1.5 M
Availability		%	97.7	96.8
Coal Rate		kg/thm	750	710
	PCR	Kg/thm	166	160
Hot Metal	[S]	%	0.03	0.03
	[Si]	%	0.48	0.65

• PCR : Pulverized Coal Injection Rate

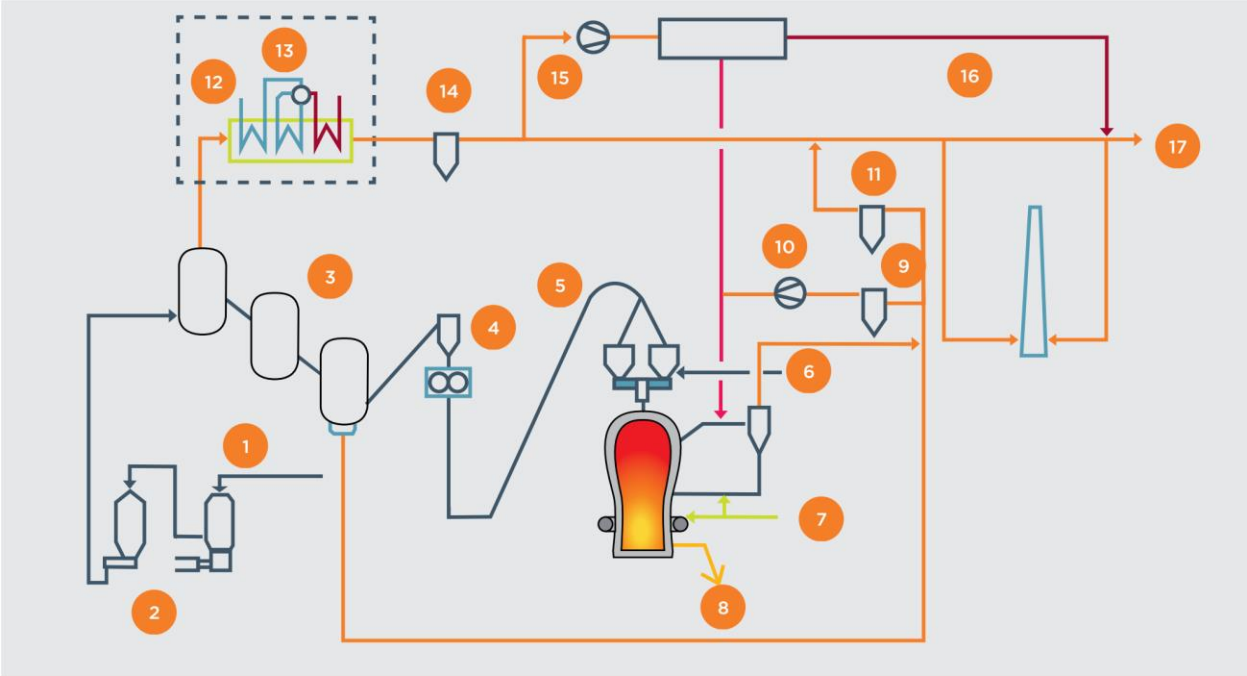
۲- تشریح فرایند FINEX

در فرایند FINEX تولید آهن در دو مرحله فرایند مجزا صورت می‌گیرد. در یک سری از راکتورهای بستر سیال، اکسیدهای آهن نرم و ریز به DRI[1] تبدیل شده، فشرده گشته و سپس به قسمت ذوب کننده گازی (کوره FINEX) منتقل می‌شود. زغال و بریکت‌های زغال‌سنگ شارژ شده به قسمت ذوب کننده گازی به‌صورت گاز در آمده[2] و علاوه بر گاز احیایی، انرژی لازم جهت ذوب را نیز فراهم می‌نمایند. واحد ذوب کننده گازی قلب فرایند نوین آهن‌سازی FINEX می‌باشد. در این قسمت نه تنها فلز داغ تولید می‌شود بلکه گاز مورد استفاده برای احیای کانی آهن در راکتورهای بستر سیال نیز تأمین می‌شود.

۲-۱- اصول کلی فرایند FINEX

نمودار روند[3] مربوط به فرایند FINEX در شکل ۲ نشان داده شده است. سنگ‌آهن نرم و ریز و افزودنی‌هایی نظیر دلومیت و سنگ‌آهک ابتدا در قسمت خشک‌کن، خشک شده و سپس به سیستم بستر سیال ۳ یا ۴ مرحله‌ای شارژ می‌شود. دو راکتور بالایی عمدتاً به عنوان مرحله پیش‌گرمایش کانی‌های نرم و رسیدن به دمای احیا عمل کرده که دمای مورد نیاز می‌تواند توسط احتراق جزئی گاز خروجی از راکتور سوم تأمین شود. در مراحل بعدی سنگ‌آهن به صورت مداوم در جهت مخالف با جریان گاز احیاکننده به DRI ریز احیا شده و افزودنی‌های ریز به صورت جزئی کلسینه می‌شوند؛ به‌طوری که در راکتور سوم کانی‌های نرم پیش احیا[4] شده و به درجه احیای حدود ۳۰٪ می‌رسند و در مرحله نهایی در راکتور چهارم احیای نهایی و تولید DRI با درجه احیای حدود ۹۰-۸۵ درصد صورت می‌گیرد. فشار عملیاتی در راکتورهای بستر سیال حدوداً بین ۵-۴ بار می‌باشد.

[1] . direct reduced iron
[2] . gasify
[3] . flow sheet
[4] . pre-reduce



شکل ۲: نمودار روند فرایند FINEX به همراه معرفی بخش‌های مختلف فرایند.

در مرحله بعدی DRI های ریز به فرم HCI[1] (تکه‌های داغ بهم فشرده شده) تبدیل شده و به صورت پیوسته و مداوم به قسمت ذوب کننده گازی شارژ می‌شوند. فشرده‌سازی مواد و تبدیل به بریکت‌های داغ قبل از شارژ به قسمت ذوب کننده گازی ضروری می‌باشد؛ زیرا به علت اطمینان از نفوذپذیری کافی در بستر، این قسمت امکان استفاده از مواد ریز را ندارد.

[1] . hot compacted iron

به وسیله نیروی گرانش، HCI های داغ از طریق منطقه گنبدی شکل[1] به سمت بستر زغال[2] سقوط می‌کنند. منطقه گنبدی شکل در بالای بستر ثابت[3]، فضای آزادی است که توسط گاز صعود کننده از قسمت پایین واحد ذوب کننده گازی، پر شده است. دمای این فضای آزاد در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود. زغال‌سنگ (ناصاف[4]، خرد شده و یا خارج از سایز) از بالای قسمت ذوب کننده گازی شارژ شده و در چنین دمای بالایی، رطوبت زغال‌سنگ از بین رفته و به زغال نیمه‌سوخته[5] در بالای بستر ثابت تبدیل می‌شود. سپس به سمت پایین حرکت کرده و سرانجام توسط اکسیژن خالصی که از دهانه لوله[6] خارج می‌شود واکنش داده و محترق می‌شود. فرایند گازی شدن زغال‌سنگ، انرژی لازم برای واکنش‌های متالورژیکی و ذوب شدن HCI و خاکستر زغال برای تبدیل به فلز مذاب و سرباره را تأمین می‌کند. سیستم PCI[7] جهت تزریق زغال‌سنگ همراه با اکسیژن از پایین فراهم شده است. در نتیجه به علت گرما و گاز احیایی تولید شده در طول فرایند گازی کردن زغال‌سنگ توسط اکسیژن، بار که عمدتاً حاوی HCI با درجه احیایی بین ۸۰-۷۰ درصد است، ذوب شده و به‌طور کامل به صورت فلز احیا می‌شود. مذاب داغ فلزی و سرباره در قسمت ذوب کننده گازی جمع‌آوری شده و مشابه اجزای کوره بلند به صورت پیوسته جاری می‌شوند. همان‌طور که بیان شد، اکسیژن خالص از طریق دهانه‌های لوله جهت احتراق زغال نیم‌سوخته در منطقه دمش[8] دمیده می‌شود. دمای ایجاد شده در منطقه دمش حدود ۳۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شده است.

گاز تولید شده که از واحد ذوب کننده گازی خارج می‌شود، عمدتاً شامل CO و H_2 با دمای در حد ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، گردوغبار، خاکستر و پودر آهن می‌باشند که از طریق بستر ثابت واحد ذوب کننده گازی به سمت بالا حرکت می‌کنند. از این گاز برای احیای ذرات سنگ‌آهن ریز در راکتورهای بستر سیال نیز استفاده می‌شود. البته قبل از استفاده از آن به عنوان گاز احیاکننده در بستر سیال، دمای آن با اضافه نمودن گاز سرد از سیستم خنک‌کننده گاز و با محصولات گازی سرد از واحد PSA[9] در دمای بین ۸۵۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌شود. متعاقباً در سیکلون‌های گاز داغ، غبارزدایی شده و غبارهای جدا شده در سیکلون‌ها توسط دهانه‌های غبارگیر به قسمت ذوب کننده گازی بازگردانده می‌شود.

---

1 . dome space
2 . Char bed
3 . fix bed
4 . lumpy
5 . char
6 . tuyere
7 . pulverized coal injection
8 . raceway
9 . pressure swing adsorption

گاز احیایی با شرایط مذکور برای احیای غیرمستقیم اکسیدهای آهن به سیستم بستر سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. گاز احیایی مورد استفاده که راکتورهای بستر سیال را ترک کرده‌اند، می‌توانند به صورت جزئی بازیابی شوند. برای این منظور، گاز بازیابی شده، فشرده گشته و CO_2 در واحد PSA از آن حذف می‌شود. به عنوان محصول درجه دوم، فرایند FINEX گاز خروجی[1] با مقادیر گرمازایی بین ۶۲۵۰-۵۵۵۰ کیلوژول بر مترمکعب را فراهم می‌آورد که می‌توانند به شبکه گاز مربوط به صنعت فولاد عرضه شود. با توجه به محاسبات انجام گرفته، انرژی استفاده شده برای احیای سنگ‌آهن و خروجی گاز راکتور به میزان حدود ۷۱۰ میلیون کالری بر هر تن چدن بوده و انرژی خروجی از گاز کوره FINEX حدود ۴۸۰ میلیون کالری بر هر تن چدن می‌باشد؛ که از این میزان حدود ۱۷۰ میلیون کالری بر هر تن چدن برای فشرده کردن گاز خروجی برای مصرف در کوره FINEX استفاده شده و میزان ۳۱۰ میلیون کالری بر هر تن چدن می‌تواند مورد صرفه‌جویی و استفاده مجدد قرار گیرد. گاز خروجی می‌تواند به عنوان سوخت برای تولید انرژی، اهداف گرمادهی، تولید محصولات شیمیایی/گاز سنتز و یا تولید DRI/HBI اضافی مورد استفاده قرار گیرد. آنالیز یک نمونه از گاز خروجی از فرایند FINEX در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: کیفیت دو نمونه از گاز خروجی از فرایند معمولی FINEX.

CO	34%
CO_2	43%
H_2	13%
H_2O	3%
CH_4	1%
N_2/Ar	6%
H_2S	<100 ppmv
Dust	5 mg/m³(STP)
Pressure	10 kPa g
Temperature	40 °C
Calorific value	5500 - 6250 kJ/m³(STP)
Export gas credit	approx. 8 GJ/t_{HM}

Components	Export gas
CO	28-32 %
H_2	8-12 %
CO_2	44-48 %
H_2O	3-4 %
CH_4	1-2 %
N_2/Ar	4-10 %
Dust	< 5 mg/m³(STP)
H_2S	< 100 ppmv
Calorific value	5500 - 6250 kJ/m³(STP)

همچنین میزان مواد مصرفی از جمله سنگ‌آهن، زغال‌سنگ و آب و همچنین انرژی‌های مصرف شده (برق و گاز) برای تولید یک تن فولاد مذاب با استفاده از طرح FINEX در جدول ۳ ارائه شده است. در طرح FINEX میزان نیاز

[1] . export gas

به آب برای تولید ۱ تن فولاد خام از ۱۵۵ مترمکعب می‌تواند به ۳۰ مترمکعب توسط عملیات مربوطه و استفاده از چرخه آب کاهش یابد.

جدول ۳: نرخ مواد مصرفی در فرایند FINEX.

Coal	819 kg/t_{HM} (dry)
Ore	1,624 kg/t_{HM}
Additives	250 kg/t_{HM}
Oxygen	485 m^3(STP)/t_{HM}
Nitrogen	370 m^3(STP)/t_{HM}
Make up water	1 m^3/t_{HM}
Electric energy	214 kWh/t_{HM}
Export gas credit	9 GJ/t_{HM}

۳- تفاوت فرایند FINEX با فرایند COREX:

تفاوت اصلی بین فرایندهای FINEX و COREX این است که قسمت کوره شافت احیا جایگزین ۴ راکتور بستر سیال شده است که قابلیت استفاده از اکسیدهای آهن نرم و استفاده مستقیم از زغال کک نشو را دارد. به همین دلیل فرایندهایی نظیر آماده‌سازی کانی‌های آهن و دیگر مواد مورد استفاده نظیر فرایندهای کک سازی و زینترینگ و در نتیجه صرف هزینه برای آماده‌سازی پلت‌ها در روش COREX لازم بوده ولیکن برای فرایند FINEX نیاز نمی‌باشد. گاز احیایی تولید شده در اثر تزریق اکسیژن به واحد ذوب کننده گازی فرایند FINEX که در قسمت بستر سیال استفاده می‌شود، نسبت به گاز احیایی مورد استفاده در کوره شافت فرایند COREX از شدت بسیار بالاتری برخوردار بوده و به همین دلیل نیاز به استفاده از ترکیب سنگ‌آهن تکه‌ای و گندله به عنوان مواد اولیه برای فرایند COREX می‌باشد. هر دو فرایند قابلیت تولید آهن نیم احیا شده را دارد و می‌توان از محصولات آن‌ها در کوره بلند استفاده نمود.

٤- ملاحظات زیست‌محیطی فرایند FIENX

بررسی‌های انجام شده درباره ارزیابی چرخه حیات بیانگر این است که روش FINEX در مقایسه با روش کوره بلند با معیارهای حفاظت از محیط‌زیست (انتشار گازهای آلاینده و تأثیر روی گرمایش زمین) تطابق بالاتری دارد. تجهیزات کمتر و اشغال فضای کمتر برای احداث کارخانه نیز از مزایای استفاده از این تکنولوژی می‌باشد.

جدول ۴: مقایسه عملکرد عملیاتی دو فرایند کوره بلند و FINEX.

		کوره بلند (۳/۲ میلیون تنی)	فاینکس (۱/۵ میلیون تنی)
میزان تولید [t/d]		۸۸۵۱	۴۳۰۵
قابلیت تأسیس واحد [%]		۹۸	۹۵
چدن مذاب	دما [°C]	۱۵۱۴	۱۵۳۰
	کربن [%]	۴/۵	۴/۵
	سیلیسیم [%]	۰/۵۳	۰/۸۵
	گوگرد [%]	۰/۰۲۷	۰/۰۲۷
سرباره	آلومینا [%]	۱۵/۶۲	۱۸/۰۳
	مقدار کل سرباره [Kg/t]	۲۹۸	۲۷۱

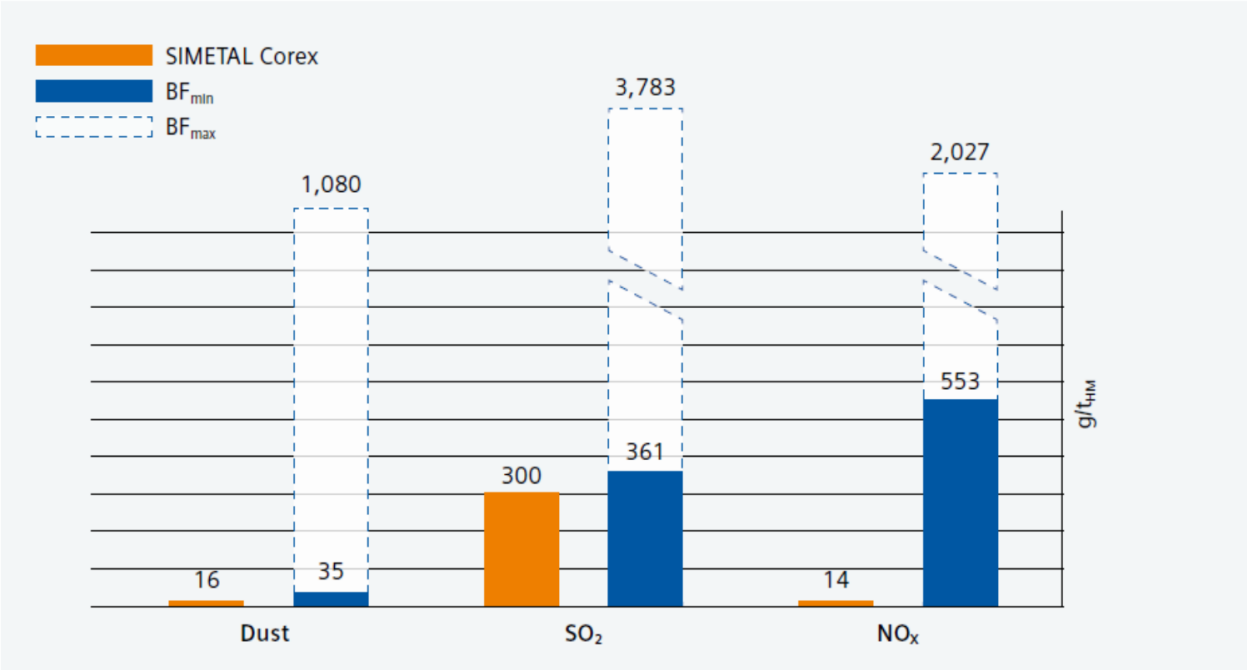
در فرایند FINEX انتشارات گازی و همچنین انتشارات مایعات نظیر گردوغبار، SO_2، NO_x، فنل‌ها، سولفیدها، آمونیاک و غیره به مراتب کمتر از فرایند سنتی کوره بلند می‌باشد. این موضوع اساساً بر پایه این حقیقت است که فرایند FINEX هیچ‌گونه نیازی به سنگ‌آهن زینتر شده نداشته و تنها مقدار کمی کک در مقایسه با فرایند کوره بلند استفاده می‌شود. واحد زینتر و کوره کک سازی منابع اصلی انتشارات در فرایند سنتی کوره بلند می‌باشد.

به دلیل کک سازی در محل[1] زغال‌سنگ در واحد ذوب کننده گازی، سهم بالایی از سولفور در داخل سرباره گیر افتاده و در نتیجه میزان انتشار گازهای SO_2 و H_2S به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. همچنین میزان زیادی از گوگرد در زغال‌سنگ با آهک واکنش داده و سولفید کلسیم تشکیل شده که در سرباره به دام افتاده و همراه با سرباره مایع خارج می‌شود، بنابراین امکان فرار ترکیبات SO_x به سمت اتمسفر خیلی ناچیز می‌باشد.

علاوه بر این به علت استفاده از اکسیژن خالص به‌جای دمش هوای گرم در فرایند FINEX انتشار نیتروژن به فرم NO_x به میزان زیادی کاهش می‌یابد. از آنجایی که بر خلاف اتمسفر اکسیدی به وجود آمده در طول فرایندهای زینترینگ و کک سازی و همچنین در هوا گرم‌کن مربوط به کوره بلند، در روش FINEX فرایندهای متالورژیکی در اتمسفر احیایی رخ می‌دهد، لذا انتشارات NO_x نیز در فرایند FINEX به‌ندرت اتفاق می‌افتد. بیان شده است که فرایند مذکور

1 . in-situ coking

میزان آلودگی‌های کمتری نظیر SO_x (حدود ۳ درصد)، NO_x (حدود ۱ درصد) و دی‌اکسید کربن را نسبت به روش‌های سنتی تولید می‌کند. از طرف دیگر، طبیعت بسته فرایند FIENX منجر به کاهش انتشارات مربوط به گردوغبار در فرایند مذکور به میزان حدود ۲۸ درصد می‌شود. مقایسه انتشارات مربوط به دو فرایند سنتی کوره بلند و FINEX در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: مقایسه انتشارات مربوط به گرد و غبار، SO_2 و NO_x برای دو فرایند کوره بلند و FINEX.

۵- انعطاف در مواد خام مصرفی

به‌طور عمده، طیف وسیعی از مواد خام می‌تواند در فرایند FINEX مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود هر دو مواد آهنی و مواد سوختی مورد استفاده بایستی مشخصات و خواص مورد نیاز برای عملکرد بهینه در واحد FINEX را با مد نظر قرار دادن ترکیب شیمیایی و قدرت حرارتی داشته باشند.

۵-۱- سوخت

معیار اساسی برای ارزیابی اولیه زغال‌سنگ و یا مخلوط‌های زغال برای فرایند FINEX به شرح زیر می‌باشد:

الف) حداقل میزان محتویات کربن حاوی ۵۵ درصد باشد.

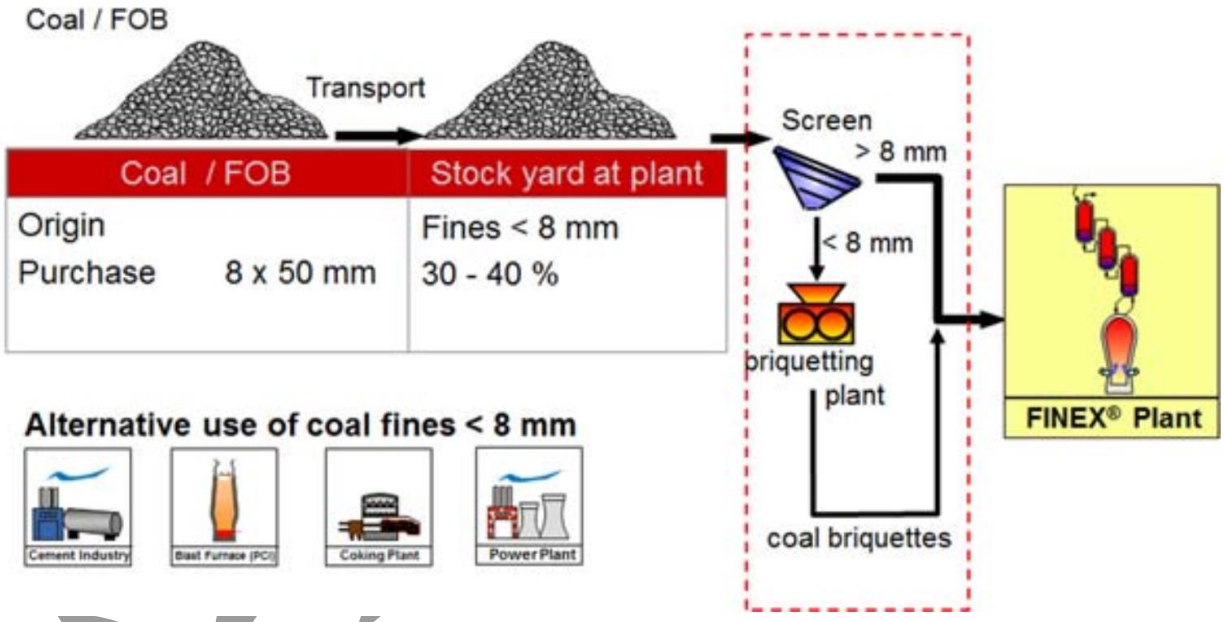
ب) میزان خاکستر تا حداکثر ۲۵ درصد باشد.

ج) ترکیبات فرار کمتر از ۳۵ درصد باشد.

د) ترکیبات گوگرد کمتر از ۱درصد باشد.

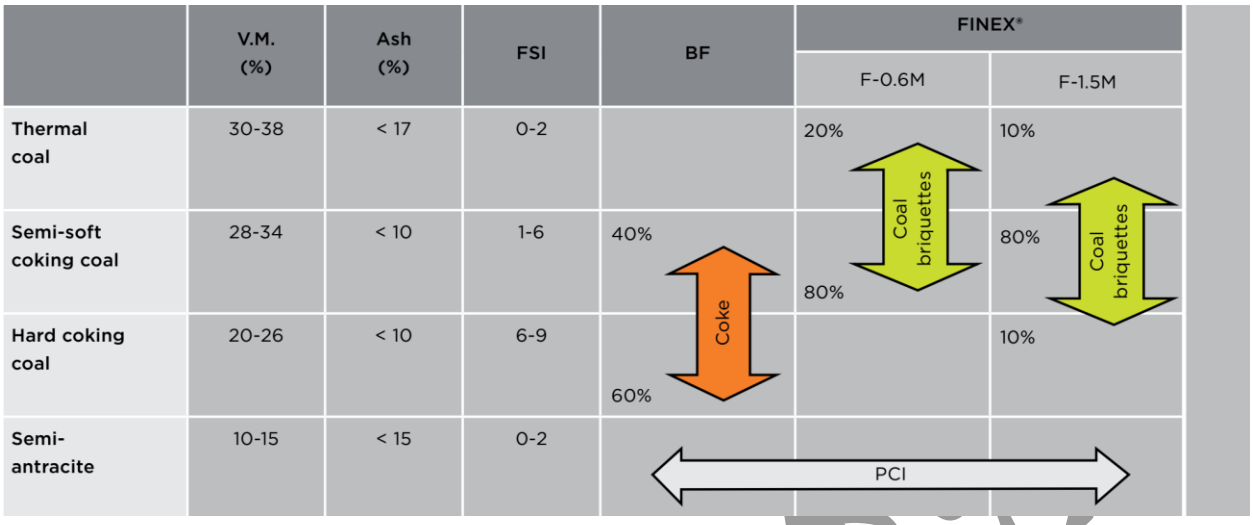
علاوه بر کیفیت‌های ارائه شده، زغال‌سنگ مورد استفاده بایستی پایداری حرارتی بالایی داشته باشد و اطمینان لازم جهت تشکیل یک بستر زغال char پایدار در واحد ذوب کننده گازی حاصل شود. برای فرایند FINEX زغال‌سنگ کلوخه‌ای و بریکت‌های زغال‌سنگ به صورت تنها و مخلوط می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

زغال‌سنگ‌های کوچک‌تر از سایز را می‌توان به شیوه‌های مختلف مورد استفاده قرار داد ولیکن توصیه می‌شود که یک واحد بریکت سازی برای زغال‌سنگ‌های کوچک‌تر از سایز راه‌اندازی شده و سهم کاملی از زغال‌سنگ در خود واحد FINEX مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۴: استفاده از کسر زغال‌سنگ‌های کوچک‌تر از سایز و واحد بریکت سازی زغال‌سنگ‌های خارج از سایز.

تجمیع و ادغام تکنولوژی بریکت سازی زغال‌سنگ، رنج مخلوط‌های زغال مناسب را برای فرایند FINEX افزایش می‌دهد. استفاده ۱۰۰ درصدی از بریکت‌های زغال‌سنگ امکان استفاده و ترکیب مخلوط‌های مختلف زغال‌سنگ با کیفیت‌های متفاوت برای تولید بریکت‌های زغال‌سنگ را فراهم می‌آورد. بازار گسترده‌ای برای زغال‌سنگ‌های نرم و ریز وجود داشته و بنابراین با خرید انواع کیفیت‌های مختلف زغال‌سنگ، هزینه مواد خام کاهش یافته و بریکت‌های زغال‌سنگ به‌منظور کارایی بهینه در داخل واحد ذوب کننده گازی FINEX تولید می‌شود.



شکل ۵: زغال‌سنگ‌های مورد استفاده به عنوان ماده اولیه برای فرایند FINEX.

با خرید زغال‌سنگ‌های با کیفیت کمتر برای بریکت سازی زغال‌سنگ مورد استفاده در فرایند FINEX هزینه‌های عملیاتی (OPEX[1]) نسبت به کوره بلند کاهش می‌یابد.

۵-۲- اکسید آهن

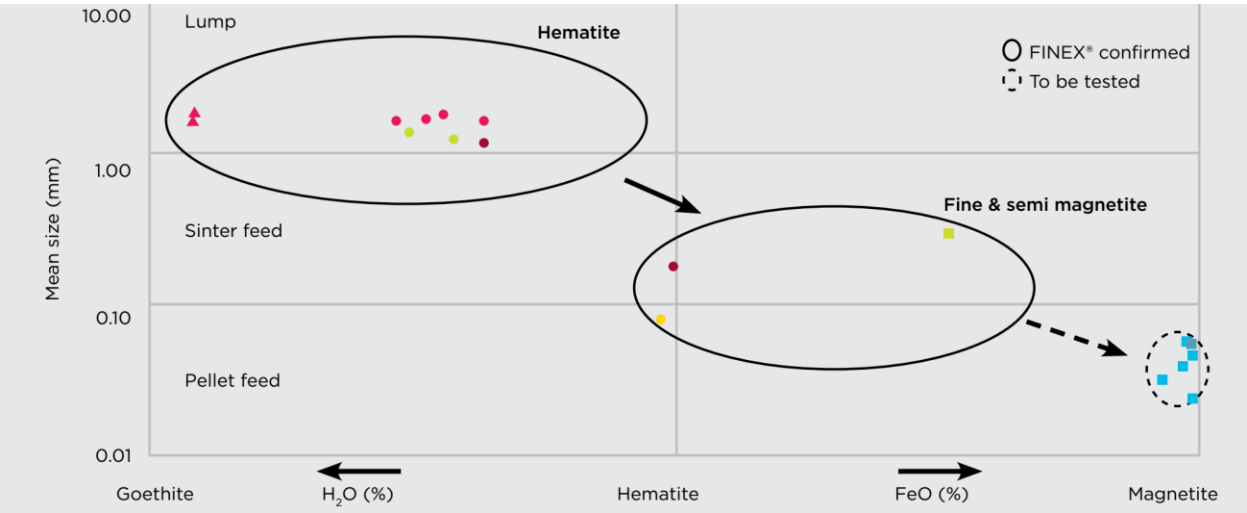
به‌طور عمومی، ۱۰۰ درصد سنگ‌آهن نرم به عنوان خوراک به راکتورهای بستر سیال شارژ می‌شود. تا حدود ۳۰ درصد استفاده پلت به عنوان خوراک نیز مناسب می‌باشد. با توجه به ترکیب شیمیایی و فیزیکی نظیر مقدار آهن کل، ساختار ترکیبی[2] و سایز دانه، برندها و مخلوط‌های مختلف سنگ‌آهن مورد توجه قرار گرفته‌اند.

مشابه حالت مورد استفاده در فرایند کوره بلند، میزان آهن موجود در کانی آهن بهره‌وری آن را تعیین می‌کند. نسبت مخلوط سازی بایستی با توجه به کیفیت کانی و قیمت آن تصمیم‌گیری شود. از آنجایی که حضور مقادیر بیشتر آلومینا در فرایند سرباره گیری FINEX نسبت به فرایند کوره بلند قابلیت تحمل بالاتری دارد، لذا حضور مقادیر بالای آلومینا در کانی سنگ‌آهن نیز مجاز می‌باشد. به‌طور کلی محدودیت خاصی در زمینه ساختار مواد تغذیه از لحاظ هماتیت و مگنتیت بودن برای راکتورهای بستر سیال وجود ندارد. به خلاصه می‌توان بیان نمود که داده‌های زیر بایستی توسط سنگ‌آهن شارژ شده به سیستم بستر سیال تأمین و برآورده شود.

جدول ۵: خواص مورد نیاز کانی آهن شارژ شده به سیستم بستر سیال فرایند FINEX.

[1] . operating expenses
[2] . composition structure

Criteria	Guideline Value	Remark
Chemical Analysis		
Fe content	min. 55% (up to local condition)	preferred: 60%
$SiO_2 + Al_2O_3$	max. 6%	limit is slag amount



شکل ۶: انعطاف کانی آهن مناسب برای فرایند FINEX.

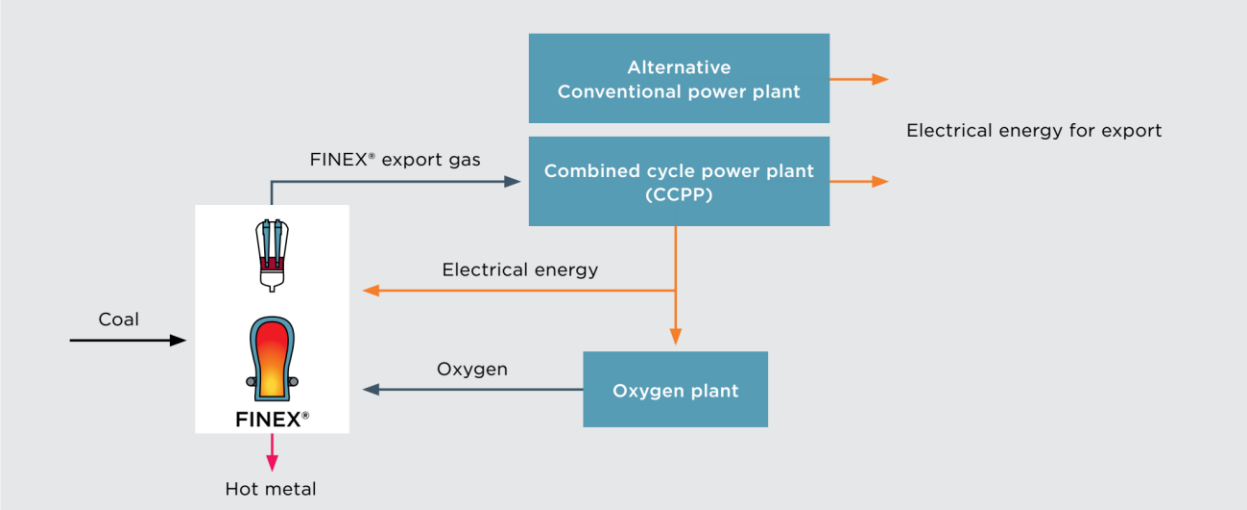
بر اساس استفاده از برندهای مختلف کانی در واحد FINEX، هر نوعی از کانی هماتیت بدون در نظر گرفتن برند آن می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. گئوتیت حاوی مقادیر زیاد آب نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین استفاده از مگنتیت ارزان‌قیمت تا ۳۰ درصد نیز مجاز می‌باشد.

٦- استفاده از اکسیژن خالص

در حالی که هدف از حضور اکسیژن در فرایند کوره بلند افزایش دمای هوای داغ می‌باشد؛ در فرایند FINEX از اکسیژن با خلوص بالا استفاده نموده و در نتیجه گاز خروجی تنها حاوی مقادیر کمی نیتروژن می‌باشد. از همین رو، مقادیر کالری خالص بیشتر از دو برابر مربوط به گاز خروجی از کوره بلند می‌باشد. بنابراین می‌تواند بازیابی شده و برای فرایندهای احیا و یا تولید گرما و انرژی مورد استفاده قرار گیرد. بسته به تقاضا و کشش صنعت فولاد، ارزش افزوده با بهره‌گیری از گاز خروجی به وجود آید.

۷- استفاده از گاز خروجی از فرایند FINEX

گاز خروجی از کوره فرایند FINEX مخلوطی از گاز خروجی[۱] بازیابی نشده، گازهای اضافی[۲] و گازهای پسماند[۳] از واحد نوسانات جذب سطحی (PSA) می‌باشد. گاز خروجی از فرایند FINEX می‌تواند به عنوان جایگزین گاز طبیعی، نفت، کک و یا زغال‌سنگ برای کاربردهای متعددی نظیر تولید انرژی الکتریکی، تولید آهن اسفنجی، اهداف گرمادهی، تولید بخار، خشک کردن مواد خام، واحدهای گندله‌سازی و تولید گازهای سنتز مورد استفاده قرار گیرد. بسته به ترکیب زغال‌سنگ مورد استفاده و تصمیم مبنی بر اعمال یا عدم اعمال گاز بازیابی شده، میزان و ترکیب گاز خروجی می‌تواند تا حد معینی متفاوت باشد.



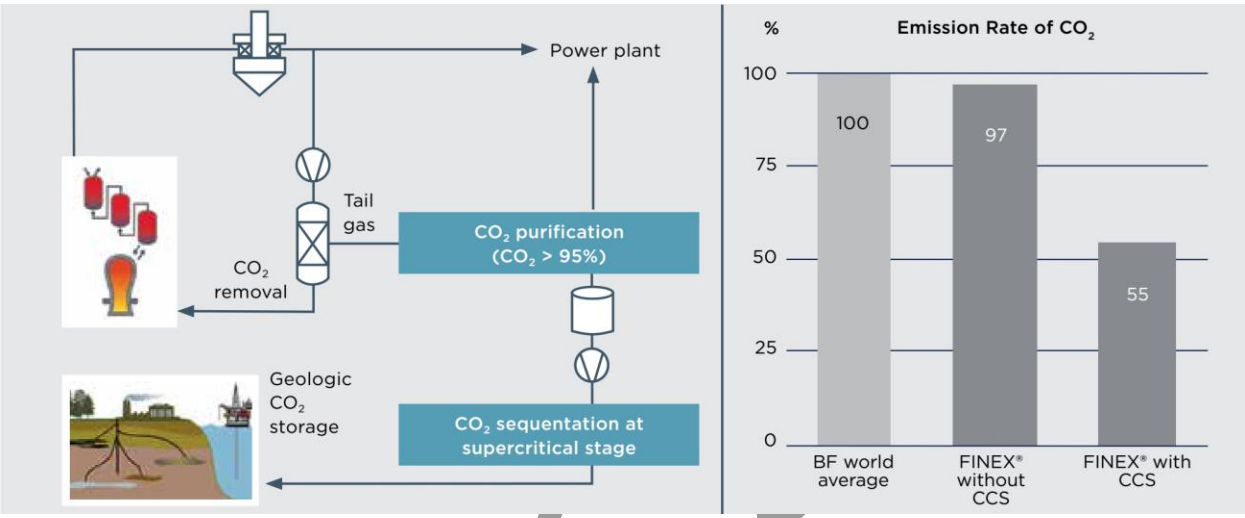
شکل ۷: تولید انرژی الکتریکی از گاز خروجی فرایند FINEX.

۸- پتانسیل بالا برای کاهش میزان CO2

فرایند FINEX امکان تولید CO_2 با خلوص بالا را برای استفاده بیشتر در فرایندهای جذب[۴]، بهبود بازیابی نفت و یا دیگر استفاده‌های اقتصادی فراهم می‌آورد. بر اساس حقیقت استفاده از گاز اکسیژن با خلوص بالا در قسمت ذوب کننده گازی جهت گازی کردن و احتراق زغال‌سنگ، گاز خروجی از فرایند FINEX حاوی مقادیر اندکی از نیتروژن می‌باشد. این واقعیت، اجازه بازیافت[۵] CO_2 در غلظت‌های بالا از گاز خروجی و سپس تولید با خلوص بالاتر (CO_2

[1] . off gas
[2] Excess gas
[3] . tail gas
[4] . sequestra
[5] . scrub out

(> 95%) پس از تصفیه گاز CO_2 را می‌دهد. پتانسیل بالای برای کاهش انتشار CO_2 مربوط به فرایند FINX همراه و بدون CCS[1] در شکل ۸ نشان داده شده است.

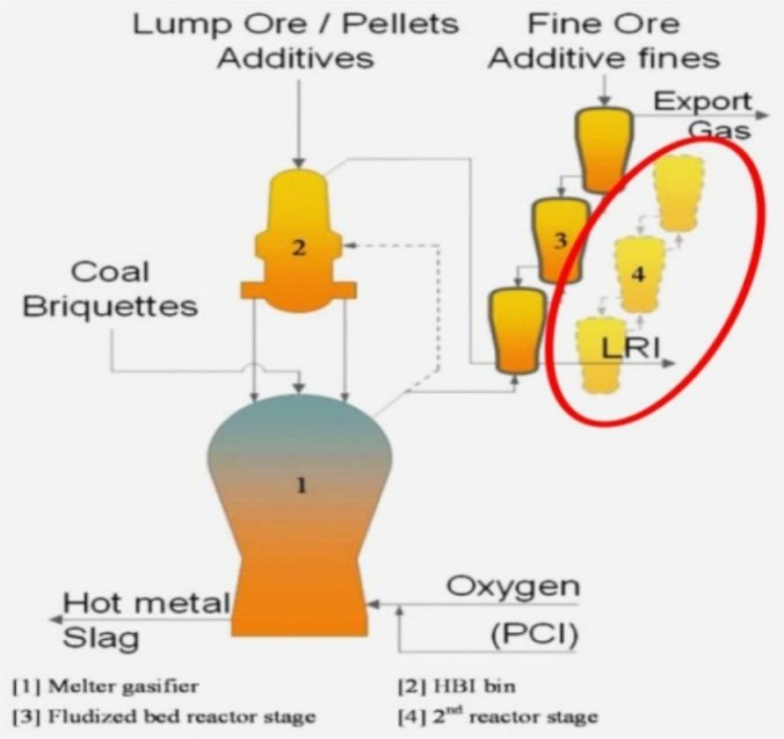


شکل ۸: پتانسیل بالای فرایند FINEX برای کاهش انتشار CO_2 همراه و بدون CCS.

۹- محصول فرایند FINEX جهت کاربرد در کوره بلند:

آهن نیم احیا شده[2] به عنوان محصول خروجی از روش FINEX می‌تواند جهت کاهش مصرف کک، سنگ‌آهن و گندله در کوره بلند مورد استفاده قرار گیرد. در این حالت میزان مذاب تهیه شده در کوره بلند افزایش یافته، میزان مصرف کک کاهش یافته و در نتیجه علاوه بر مزایای اقتصادی منجر به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. بنابراین علاوه بر تولید آهن اسفنجی مرغوب می‌توان از واحد FINEX به عنوان واحد واسطه در مجاورت کوره بلند جهت تولید آهن نیم احیا شده برای افزایش بازده کوره بلند استفاده نمود. در این حالت می‌توان برای تولید بیشتر محصول آهن نیم احیا شده، ابعاد راکتورهای بستر سیال را افزایش و یا تعداد راکتورهای موازی را افزایش داد. شماتیکی از فرایند FINEX با راکتورهای بستر سیال توسعه‌یافته جهت تولید آهن نیم احیا در شکل ۹ نشان داده شده است.

[1] . carbon capture and storage
[2] . low reduction iron



شکل ۹: شماتیکی از فرایند FINEX با راکتورهای بستر سیال توسعه‌یافته جهت تولید آهن نیم احیا.

۱۰- ملاحظات اقتصادی:

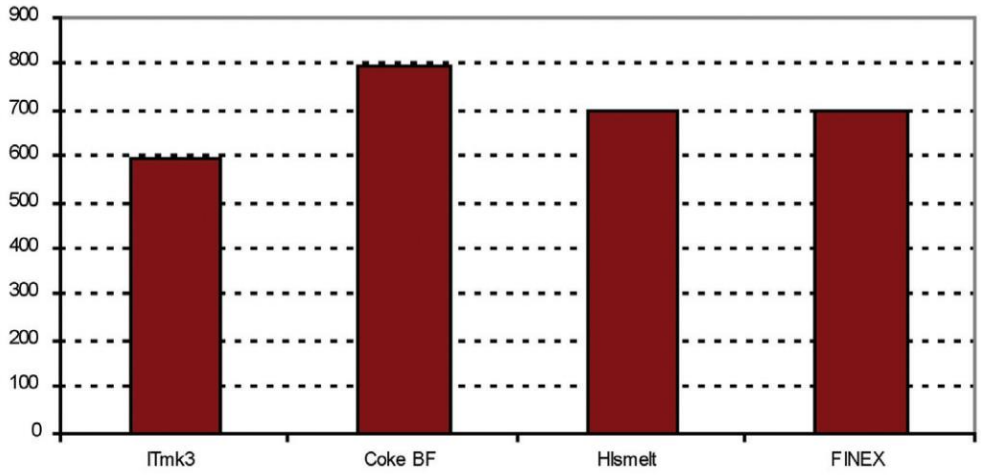
حذف واحدهای کلوخه سازی[1] و کک سازی[2] از فرایند فولادسازی و همچنین امکان استفاده از نرمه سنگ‌آهن و توان استفاده از سنگ‌آهن با عیار پایین می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در تولید فولاد نسبت به روش‌های موجود شود. همچنین ادعا شده است که فرایندهای مقدماتی برای ساخت واحد FINEX نسبت به ساخت واحد کوره بلند با مقیاس مشابه نیاز به هزینه کمتری دارد، علاوه بر این می‌توان انتظار کاهش ۱۵-۱۰ درصدی در هزینه‌های تمام شده تولید را به دلیل استفاده از مواد خام ارزان‌تر، کاهش هزینه‌های مربوط به تأسیسات، تعمیرات و نگهداری، گازهای آلوده‌کننده و زمان تولید داشت. به‌طور کلی ادعا شده است که هزینه ساخت و تولید در طرح FINEX حدود ۳۵ درصد کمتر از کوره بلند می‌باشد.

[1] . sintering
[2] . coke oven

جهت ارزیابی اقتصادی با در نظر گرفتن هزینه‌های تولید فلز مذاب و مقایسه با دیگر تکنولوژی‌ها، بایستی پیکربندی تمام واحد تولید آهن و فولاد را در نظر گرفته و با هم مقایسه شود. موارد زیر هزینه‌های فرایند FINEX در رقابت با روش سنتی کوره بلند را بیان می‌کند.

الف) هزینه‌های سرمایه‌ای (CAPEX[1]) کمتر

هزینه‌های CAPEX کمتر شامل عدم نیاز به واحدهای پر هزینه کک سازی و زینترینگ؛ استفاده از محوطه فشرده‌تر و نیاز به زمین کمتر، حجم کمتر ساخت‌وساز و سرمایه‌گذاری کمتر برای ادغام و تجمیع امکانات و تسهیلات نظیر نیرو، شبکه جاده‌ای، توزیع آب و برق و غیره می‌باشد. مقایسه هزینه‌های CAPEX فرایند FINEX با فرایندهایی نظیر کوره بلند و HIsmelt در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

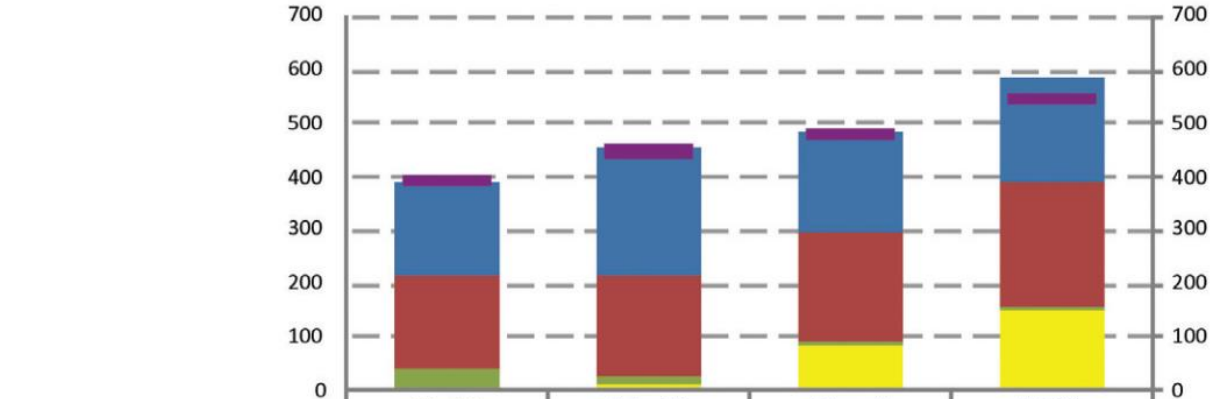


شکل ۱۰: مقایسه هزینه‌های CAPEX دو فرایند FINEX و کوره بلند.

ب) هزینه‌های عملیاتی کمتر

در این مورد می‌توان به نکاتی نظیر عدم احتیاج به درجه کیفی بالای زغال‌سنگ، آهک و سنگ‌آهن اشاره نمود. همچنین مخلوط سازی و ترکیب مواد خام نیز در این روش نیاز نمی‌باشد. مقایسه هزینه‌های OPEX دو فرایند FINEX و کوره بلند در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

[1] . Capital Expenditure



	ITmk3	Coke BF	HIsmelt	FINEX
Iron burden	172	239	191	191
Carbon burden	176	189	200	232
Binders/Fluxes	40	10	10	10
Oxygen	0	15	84	150
Total (afterslag/gas credits)	387	441	474	540

شکل ۱۱: مقایسه هزینه‌های OPEX دو فرایند FINEX و کوره بلند.

۱۱- محدودیت فرایند FINEX

با وجود مزایای ذکر شده برای فرایند FINEX هنوز قابلیت جایگزین شدن به‌جای فرایند کوره بلند سنتی را ندارد. نقطه ضعف اصلی فرایند FINEX این است که به دلیل نابالغ بودن این تکنولوژی، امروزه خروجی این فرایند حدود ۱/۵ میلیون تن بوده که تنها نصف خروجی مربوط به کوره بلند سنتی می‌باشد. در نتیجه ادامه تحقیقات در زمینه بهبود فرایند FINEX به خصوص برای واحد ذوب کننده گازی که هم‌زمان به عنوان راکتور در موقع احتراق زغال‌سنگ و تولید گاز احیایی عمل نموده، نیاز می‌باشد. شبیه فرایند کوره بلند، عملکرد واحد ذوب کننده گازی به میزان زیادی تحت تأثیر توزیع زغال‌سنگ و بار می‌باشد، زیرا توزیع مناسب منجر به افزایش بازده تبادل حرارتی بین گاز و بار می‌شود. زه کشی مذاب آهن و سرباره نیز موضوعی حیاتی برای اطمینان از توزیع جریان گاز در قلب واحد ذوب کننده گازی می‌باشد. علاوه بر این، نگهداری و تنظیم مناسب عمق منطقه دمش برای افزایش منطقه فعال کوره امری ضروری می‌باشد. این موضوع باعث حرکت نرم گاز محترق و استفاده مؤثر از آن در تمام طول بستر ثابت می‌شود. واضح است که پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی رخ داده در واحد ذوب کننده گازی بسیار پیچیده می‌باشد، زیرا در این واحد ۴ فرم از مواد شامل گاز، مایع، پودر و جامد حضور دارند. درک جریان چنین مجموعه چند فازی پایداری

عملکرد و افزایش بازدهی فرایند امری ضروری می‌باشد. در این زمینه تحقیقات متفاوتی انجام گرفته است به‌طوری که استفاده از مدل‌های ریاضی برای درک بهتر فرایندهای پیچیده رخ داده در واحد ذوب کننده گازی توانسته تا حدودی راهگشا باشد. ارزیابی مناسب نفوذپذیری جامد و توزیع جریان گاز-جامد در واحد ذوب کننده گازی جهت پیش‌بینی دقیق و قابل اتکا نسبت به جریان دیگر فازها و همچنین فرایندهای شیمیایی/حرارتی امری ضروری می‌باشد. از دیگر محدودیت‌های فرایند FINEX مصرف مقادیر بسیار بالای اکسیژن می‌باشد. همچنین زغال مورد استفاده در فرایند FINEX بایستی پایداری حرارتی بالایی داشته تا اطمینان کافی از تشکیل بستر زغال نیمه‌سوخته در واحد ذوب کننده گازی حاصل شود.

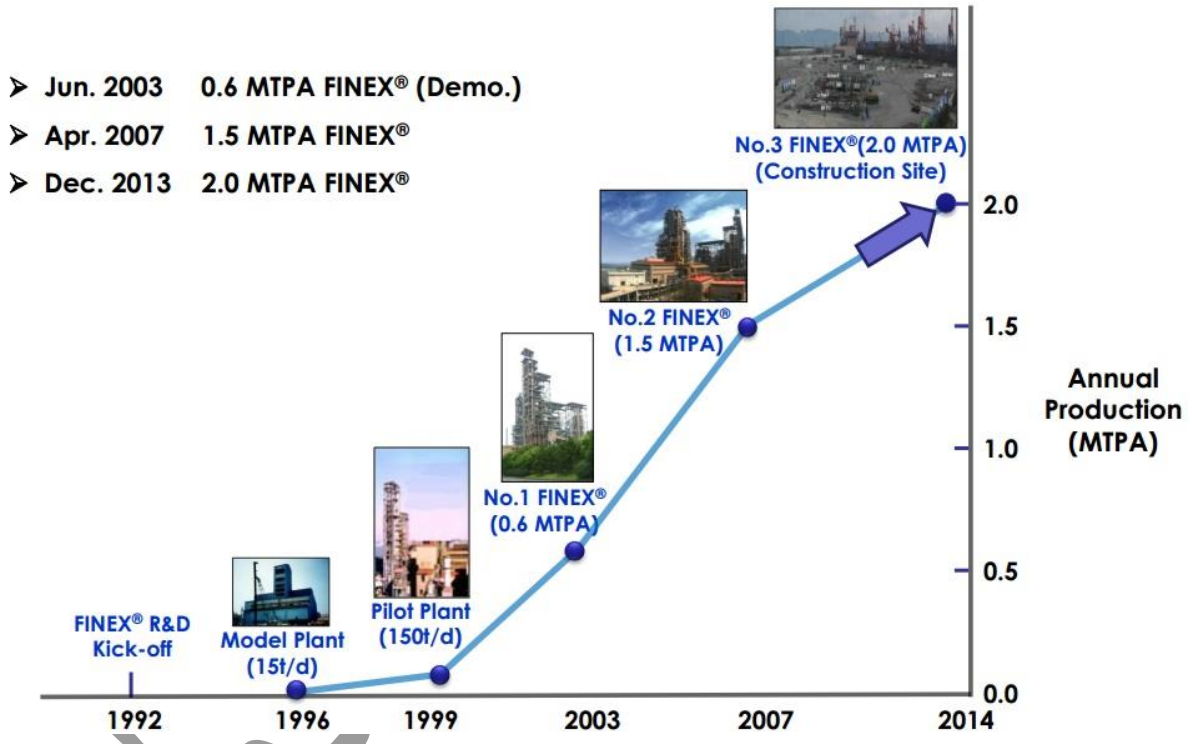
به‌منظور مقایسه سه نوع فرایند HIsmelt، COREX و FINEX، مزایا و محدودیت سه فرایند به صورت خلاصه در جدول ۶ اشاره شده است.

جدول ۶: مقایسه سه تکنولوژی نوین تولید آهن و بررسی مزایا و معایب هر کدام.

نام فرایند	فرایند HIsmelt	فرایند COREX	فرایند FINEX
مزایا	هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی پایین‌تر نسبت به دو فرایند دیگر، محصولات آهنی با کیفیت بالا، فرایند دوستدار محیط‌زیست	این فرایند نیازمند استفاده از اکسید آهن با کیفیت و خوراک کک با کیفیت بالا نبوده و همین دلیل هزینه و میزان آلودگی کاهش می‌یابد.	هزینه‌های مربوط به پلت و زینترینگ و در نتیجه مشکلات زیست‌محیطی در این فرایند مرتفع شده است.
محدودیت	چدن تولید شده حاوی گوگرد به میزان تقریباً ۳-۲ برابر بیشتر از چدن تولید شده با کوره بلند می‌باشد. بنابراین چدن تولید شده با فرایند HIsmelt نیاز به گوگردزدایی قبل از استفاده دارد.	این فرایند نسبتاً هزینه‌های بالایی داشته و مشکلات زیست‌محیطی مربوط به آماده‌سازی پلت و زینترینگ نیز بایستی مد نظر قرار گرفته شود.	میزان بهره‌برداری این فرایند پایین‌تر از دو فرایند دیگر بوده به‌طوری که میزان خروجی آن نصف فرایند کوره بلند سنتی می‌باشد.

۱۲- واحدهای FINEX در صنعت فولاد دنیا:

تحقیقات در زمینه فرایند FINEX از سال ۱۹۹۲ میلادی آغاز و در سال ۱۹۹۹ یک کارخانه به صورت پایلوت با ظرفیت ۱۵۰ تن در روز در شرکت POSCO ساخته شد. در ادامه و با پیشرفت تکنولوژی مربوطه واحدهای FINEX1 با ظرفیت سالانه ۶۰۰ هزار تن در سال ۲۰۰۳، FINEX2 با ظرفیت سالانه ۱/۵ میلیون تن در سال ۲۰۰۷ و FINEX3 با ظرفیت سالانه ۲ میلیون تن در سال ۲۰۱۴ با همکاری POSCO و Siemens مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. تغییرات تاریخی فرایند FINEX در گذر زمان در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: رخدادهای تاریخی فرایند FINEX.

همچنین قرارداد احداث واحد FINEX در صنعت فولاد کشور ایران نیز با شرکت POSCO به امضا رسیده است. فولاد چابهار از جمله طرح‌های مشترک صنعت فولاد ایران و شرکت POSCO کره جنوبی می‌باشد. البته تأمین برق و گاز به عنوان دو نیاز اساسی برای طرح FINEX جهت راه‌اندازی واحد فولادسازی از اهمیت بالایی برخوردار است. میزان مصرف برق در روش FINEX به شدت بالا می‌باشد.

No.2 FINEX®
(1.5 MTPA)
No.1 FINEX®
(0.6 MTPA)
No.3 FINEX®
(2.0 MTPA)
Fluidized bed Reactor
Melter-gasifier

شرکت فولاد

POSCO POHANG WORKS (KOREA) – FINEX® F-0.6M DEMONSTRATION PLANT

The plant commenced operation in 1995 as the first COREX® C-2000 plant. In parallel the FINEX® research and development started. Following initial laboratory and pilot-plant tests for the FINEX® Process, the existing Corex C-2000 plant was converted to the FINEX® F-0.6M Demonstration Plant which commenced operations in May 2003. And after just a few months, it became clear that the production target would not only be met but also exceeded, with the same plant now producing 800,000 tons of high quality hot metal per year. The plant was shut down in July 2014 and is to be relocated to India.

POSCO POHANG WORKS (KOREA) – FINEX® F-1.5M PLANT

On the basis of the successful results achieved at the FINEX® F-0.6M Demonstration Plant and following optimization of equipment and process parameters, the decision was quickly taken to build the bigger sized FINEX® F-1.5M plant having a nominal production capacity of 1.5 million tons of hot metal per year. This plant commenced operation in April 2007.

POSCO POHANG WORKS (KOREA) – FINEX® F-2.0M PLANT

The FINEX® F-2.0M plant for the annual capacity of 2.0 million tons of hot metal succesfully commenced operation in January 2014.

نتیجه‌گیری:

سازگاری، ارتقا و بهبود تکنولوژی‌های تولید آهن روز به روز از اهمیت بالاتری در بازار فعال و پویای فولاد برخوردار می‌شود تا جایی که تقاضاهای آین۸۹۲۹

ده در هیچ یک از راهکارهای متداول دیده نشده است. چالش‌های آینده شامل تغییرات جاری در بخش مواد خام، کاهش هزینه‌های مربوط به انرژی و قوانین زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تر می‌باشد.

فرایند FINEX به عنوان یکی از تکنولوژی‌های نوین تولید آهن قابلیت رقابت با فرایند کوره بلند را دارد. امروزه بهینه‌سازی بیشتر فرایند FINEX هنوز در حال جریان بوده و بهبود مزایای اقتصادی و تکنولوژیکی فرایند هنوز در حال بررسی و پیشرفت می‌باشد.

فرایند FINEX آینده روشنی برای فرایندهای ذوب-احیا را ترسیم می‌نماید. در طول مدت زمان کوتاهی تحولات زیادی در عملکرد فرایند مذکور صورت گرفته و به‌طور مداوم در حال بهبود می‌باشد. سرعت تحولات در فرایند FINEX به گونه است که قطعاً راه را برای تولید فولاد با هزینه کمتر هموار خواهد نمود.

عملکرد فرایند FINEX نشان دهنده آینده روشن فرایندهای ذوب-احیا می‌باشد. در طول مدت زمان کوتاهی، تعدادی واحد تولید آهن به روش FINEX توسعه یافته و تلاش‌های مستمری جهت بهبود فرایند در حال رخداد می‌باشد.

از آنجایی تولید آهن به روش سنتی کوره بلند همراه با افزایش محدودیت‌ها و فشارهای زیست‌محیطی و اقتصادی می‌باشد، تلاش روزافزونی در جهت توسعه تکنولوژی‌های ذوب مستقیم در حال انجام می‌باشد. هر چند به نظر می‌رسد که بهبود و ارتقا تکنولوژی‌های نوین نظیر FINEX تا حدی مشکل و زمان پیش‌بینی شده برای آن بیش از انتظار می‌باشد.

پژوهشکده فولاد

مراجع:

[1] S.-J. Lee, E.-H. Lee, Case Study of POSCO-Analysis of its Growth Strategy and Key Success Factors, (2009).
[2] U. Jain, Corex & Finex-New Developments in Utilization of Low Grade Raw Materials, (2013).
[3] J. Schenk, W. Kepplinger, F. Wallner, H. Kim, S. Joo, I. Lee, Development and future potential of the Finex process, in: 2 nd International Congress on the Science and Technology of Ironmaking and 57 th Ironmaking Conference, 1998, pp. 1549-1557.
[4] L. WANG, L.-h. CHEN, H.-o. LV, Development situation of COREX smelting reduction process [J], Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 4 (2006) 025.
[5] M. Cho, K. HG, L. HG, Energy and Pollutants Reducing Technologiesin New Ironmaking Processes at POSCO, ISIJ international, 42 (2002) S33-S37.
[6] S. Joo, H. Kim, I. Lee, J. Schenk, U. Gennari, F. Hauzenberger, FINEX: a new process for production of hot metal from fine ore and coal, Scandinavian journal of metallurgy, 28 (1999) 178-183.
[7] G. Peer, FINMET® and FINEX®: Fluidized-bed applications for iron production, in: IFSA, 2005, pp. 245-255.
[8] F. Plaul, C. Böhm, J. Schenk, Fluidized-bed technology for the production of iron products for steelmaking, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 109 (2009) 121-128.
[9] C. Thaler, T. Tappeiner, J.L. Schenk, W.L. Kepplinger, J.F. Plaul, S. Schuster, Integration of the Blast Furnace Route and the FINEX®-Process for Low CO2 Hot Metal Production, steel research international, 83 (2012) 181-188.
[10] B. Agrawal, A. Mathur, New Ironmaking Processes: Relevance to India, in: MMMM 2011 Conference, 2011.
[11] J.H. Noldin Jr, An overview of the new and emergent ironmaking technologies.
[12] A.Z.-w.H. Su-ju, G.L.Z. Ying-wei, Technology and Economy Analysis on FINEX Process [J], Journal of Hebei Institute of Technology, 2 (2007).
[13] Shibu John, FINEX : An Old Visuon of the Iron and Steel Industry Becoms Reality, abm week (2016).

"جهت مطالعه مقالات جدید در زمینه صنعت آهن و فولاد و آشنایی با فناوری های نوین صنعت فولاد، به سایت پژوهشکده فولاد مراجعه نمایید."

031-33913921
031-33912588
SteelResearchCenter
SRC.iut.ac.ir
دانشگاه صنعتی اصفهان
SRC@of.iut.ac.ir