Archive of SID

اولین کنفرانس احتراق ایران
بهمن ماه ۱۳۸۴ - تهران- دانشگاه تربیت مدرس
انجمن احتراق ایران

کاربرد OEC[1] در راستای کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی در صنعت فولاد ایران

عباسعلی فرداد[۲]،مهدی بیدآبادی[۳]، محمد صدیقی[۴]،آرمان سیدی[۵]
تهران، میدان رسالت، خیابان هنگام، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک
آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق
ar.seyyedi@delvarafzar.com

چکیده

افزایش درصد حجمی اکسیژن در اکسید کننده، خواص مناسبی در واکنش احتراق ایجاد می‌نماید. افزایش انتقال حرارت، کاهش تولید CO_2وNO_x ، کاهش مصرف سوخت و کاهش حجم محصولات احتراق از خصوصیات این روش می‌باشد. با توجه به توسعه روشهای جذب مولکولی و کاهش ریسک و هزینه تامین اکسیژن، استفاده از احتراق اکسیژن افزا در دهه گذشته در صنایع مختلف مانند صنعت فولاد، آلومینیوم، شیشه و سیمان رشد محسوسی داشته است. صنعت فولاد از لحاظ انرژی بری سهم مهمی در سبد انرژی کشور دارد، سهم مصرف گاز طبیعی در این صنعت از کل صنعت ۱۸ درصد و از مصرف کل کشور ۴/۵ درصد می‌باشد. در این مقاله چگونگی استفاده از این فن آوری و انجام تحلیل هزینه- فایده مورد توجه قرار گرفته است و در نهایت امکان استفاده از آن در صنعت فولاد بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: احتراق اکسیژن افزا- کوره پیش گرم- کوره قوس الکتریکی- قیمت گاز طبیعی.

۱- مقدمه

در ایران به طور متوسط برای تولید هر تن فولاد، ۵۸٪ بیش از استاندارد کشورهای صنعتی انرژی مصرف می شود[۱]. در حال حاضر فولاد مبارکه اصفهان که از لحاظ بهره وری شرایط مساعدتری نسبت به بقیه فولادسازی ها دارد، برای تولید هر تن کلاف گرم ۲۵/۵۷ گیگاژول انرژی مصرف می کند که این رقم در آلمان ۲۰/۶ و در ژاپن ۲۰/۷ است. یکی از جدیدترین راهکارها برای کاهش مصرف انرژی، استفاده از احتراق اکسیژن افزا است که تاثیر بسزائی در افزایش راندمان حرارتی کوره ها دارد[۲]. در این روش به ترکیب هوا که شامل ۲۱٪ اکسیژن و ۷۸٪ نیتروژن است، اکسیژن اضافی تزریق می‌شود که باعث افزایش راندمان انتقال حرارت و کاهش آلودگی می‌گردد. در صنعت فولاد کوره های پیش گرم و کوره های قوس الکتریکی جایگاههای مناسبی برای استفاده از این فن آوری هستند. در صورتی که بتوان از کاهش مصرف سوخت، کاهش آلایندگی و افزایش نرخ ذوب بار در کوره، هزینه های تامین اکسیژن را تامین نمود، می‌توان از این فن آوری در راستای بهبود وضعیت تولید فولاد استفاده کرد. در روشهای جذب مولکولی مانند روشهای VSA, PSA,VPSA تولید اکسیژن از هوا در دمای محیط و

1. Oxygen Enhanced Combustion

۲- استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران
۳- استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران
۴- عضو هیئت علمی دانشگاه هوایی ستاری
۵- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

www.SID.ir

Archive of SID

با استفاده از خاصیت جذب مواد مصنوعی متخلخل صورت می گیرد. این مواد که دارای لایه نازکی از زیرکونیم هستند، تحت اثر نوسان فشار و یا نوسان دما کار جذب و رها سازی ذرات نیتروژن را انجام می‌دهند و دستگاه جدا ساز در یک سیکل جذب و احیا در دو محیط جداگانه، اکسیژن و نیتروژن را از یکدیگر جدا می‌سازد. مصرف انرژی در این روش حدودا ۱ کیلو وات بر نرمال متر مکعب اکسیژن است و توسعه این روشها زمینه های مساعدی را برای محققین درOEC فراهم آورده است.

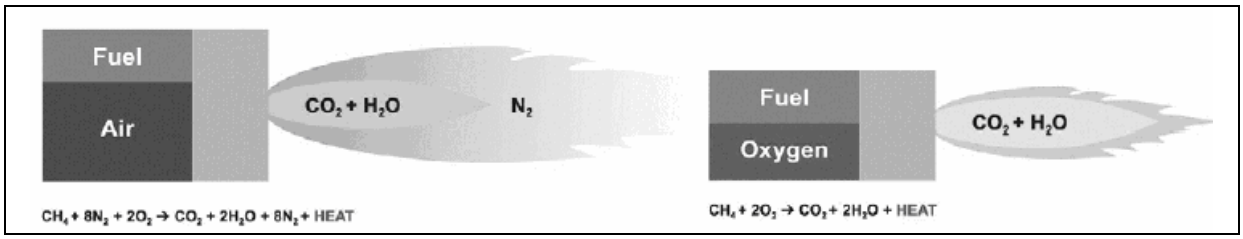
۲- احتراق اکسیژن افزا

در فرآیند های احتراق صنعتی از اکسیژن موجود در هوا به عنوان اکسید کننده استفاده می شود. در احتراق اکسیژن افزا درصد حجمی اکسیژن در اکسید کننده از ۲۱ تا ۱۰۰ درصد معین می‌شود. در صورتی که از اکسیژن خالص برای احتراق استفاده شود فرآیند احتراق اکسیژن سوز[1] نام می‌گیرد.(شکل۱)

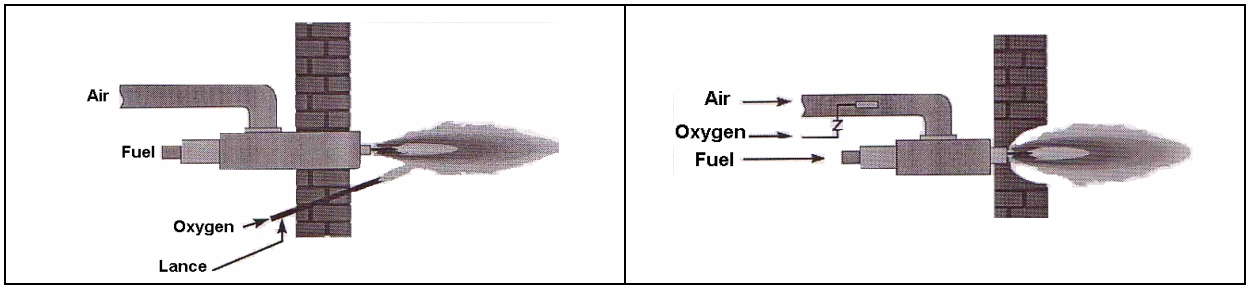
پیشرفت های جدید در زمینه روشهای جداسازی اکسیژن از هوا و کاهش هزینه تامین اکسیژن باعث توسعه استفاده از واکنش احتراق OEC شده است. در روشهای جدید جداسازی اکسیژن نیازی به رساندن دمای هوا به ناحیه Cryogenic یعنی حدودا ۱۸۷- درجه سانتیگراد نیست و اکسیژن در دمای محیط از هوا جدا می‌گردد. این عامل سبب شده است که فرآیندهای احتراقی، توجیه هزینه برای استفاده از اکسیژن داشته باشند. افزودن اکسیژن به دو صورت مختلف انجام پذیر است .

۱- تهیه مخلوط اکسید کننده/سوخت و تشکیل شعله Premixed

۲- تزریق اکسیژن به داخل شعله هوا و سوخت (لنس اکسیژن)



شکل۱- احتراق اکسیژن سوز در مقایسه با احتراق سوخت هوا



شکل۲- (راست) شعله پیش مخلوطOEC- (چپ) لنس اکسیژن

۳- رژیم عملکرد

واکنش های OEC از لحاظ O2 Enrichment Level به سه دسته تقسیم می‌شوند. در رژیم اول که به رژیم Low Level معروف است، $\Omega<0.3$[2] می‌باشد. این روش معمولا در صنایعی که تغییرات کمی در شکل کوره و مواد نسوز امکان پذیر است، صورت می‌گیرد. در بسیاری از موارد مشعل های هوا سوز را می توان با تغییرات ناچیز تا $\Omega=0.28$ رساند. به طور مثال صنعت

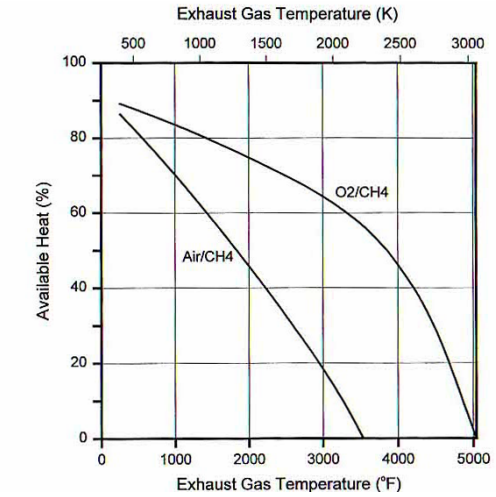
1. Oxyfuel Combustion
2. Oxygen Partail Pressure

www.SID.ir

Archive of SID

سیمان یکی از صنایعی می باشد که می‌توان در آن از این محدوده غنی سازی توسط اکسیژن استفاده کرد، بدون اینکه تغییری در ساختار و فعل و انفعالات شیمیایی آن حاصل شود. در رژیم دوم که به High Level معروف است، $\Omega>0.9$ می‌باشد. این روش عمدتا در کوره های دما بالا که استفاده از اکسیژن به مقدار زیاد و افزایش هزینه ناشی از آن بتواند پاسخگوی افزایش انتقال حرارت باشد به کار گرفته می‌شود. به محدوده $0.3<\Omega<0.9$ محدوده Medium Level گفته می شود، که در این بخش نیز به علت دمای بالا، ساختار کوره و خصوصا حد تحمل مواد نسوز باید مورد نظر قرار گیرد. به دلیل آلودگی مربوط به NO_x این محدوده کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در شکل ۳ گرمای دسترس[1] واکنش احتراق هوا-متان و اکسیژن-متان آمده است[۲]. همانطور که مشاهده می‌شود هرقدر دمای گازهای خروجی بالاتر باشد، انرژی بیشتری توسط گازها از محفظه خارج می شود و در دمای شعله، گرمای دسترس به صفر می رسد چون هیچ حرارتی از گازهای احتراق گرفته نمی شود.



شکل۳- گرمای دسترس و دمای گازهای خروجی از محفظه احتراق

همانطور که از شکل۳ بر می آید استفاده از شعله هوا متان دردمای بالا مفید به استفاده نمی باشد و به همین دلیل نیز در صنایعی مثل صنعت ریخته گری فولاد در جایی که دمای ریخته گری فولاد در حد 2000k است از کوره های الکتریکی به جای کوره های احتراقی استفاده می‌شود. در این دما گرمای دسترس واکنش هوا متان ۱۸٪ و گرمای دسترس واکنش اکسیژن متان در حدود ۶۵٪ است.

۴- مزایای احتراقی

افزایش بهره وری انتقال حرارت: در دمای بالاتر از۷۰۰ درجه سانتی گراد انتقال حرارت تشعشعی مد غالب انتقال حرارت می باشد و در کوره ها نیز به این دلیل، تشعشع اهمیت بسیار بالایی دارد. نرخ انتقال حرارت تشعشعی در واکنش OEC به دو دلیل بالاتر از واکنش احتراق هوا/سوخت است.

۱- دمای بالاتر، زیرا انتقال حرارت تشعشعی با توان چهار تا پنج دما متناسب است.

۲- خصوصیات تشعشعی نیتروژن، راندمان پائین کوره های هوا سوز به حضور نیتروژن در محصولات احتراق باز می گردد. انتقال حرارت از سه مود هدایت، جابجائی و تشعشع صورت می‌گیرد. در اغلب کوره ها مود تشعشع غالب است. ذرات دو اتمی مانند N_2 خاصیت تشعشعی ندارند و در این مود انتقال حرارتی شرکت نمی‌کنند. در احتراق هوا و گاز طبیعی حدوداً ۷۰٪ حجمی محصولات احتراق را نیتروژن دو اتمی تشکیل می دهد که در مود تشعشع شرکت نمی‌کند و تنها می‌توانند از طریق

1. Available Heat

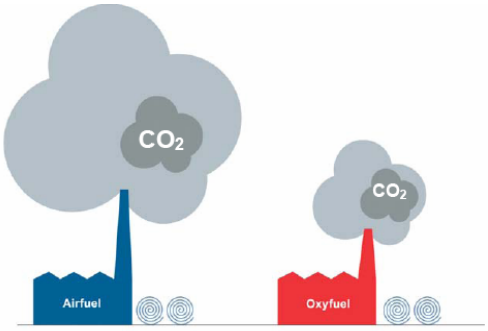
www.SID.ir

Archive of SID

جابجایی و هدایت انتقال حرارت کند که با توجه به سرعت زیاد محصولات احتراق فرصت کافی برای انتقال حرارت جابجایی وجود ندارد، نتیجتاً ۷۰٪ از گازهای موجود گرم شده ولی با مواد ذوب شونده در کوره انتقال حرارت نمی‌کند. در واکنش احتراق اکسیژن افزا با افزایش اکسیژن و کاهش نیتروژن، سهم CO_2 و H_2O که سه اتمی هستند و در تشعشع شرکت می کنند، افزایش می‌یابد و می‌توان به واسطه این فرآیند به راندمان بالاتر و کاهش مصرف سوخت بر واحد محصول تولیدی رسید. با استفاده از OEC انرژی حرارتی بیشتری به بار داخل کوره می‌رسد و مقدار کمتری از انرژی به دلیل گرم کردن N_2 از دست می‌رود. علاوه بر موارد یاد شده به علت افزایش دما، طول موج انرژی تشعشعی ماکزیمم در نمودار وین به سمت طول موج های کوچکتر انتقال می یابد و ضریب نفوذ انرژی حرارتی در بار شفاف افزایش می‌یابد.

تبدیل مصرف برق به مصرف سوخت: با استفاده از فرآیند OEC امکان جایگزینی مصرف برق با مصرف گاز به وجود می‌آید. در مشعلهای هوا سوخت، ماکزیمم دمای قابل حصول در حدود ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد است، در حالی که در بسیاری از کوره های فولاد به دمای ۱۸۰۰ درجه و بالاتر نیاز است. برای نمونه می توان کوره ذوب قراضه را عنوان کرد که به ناچار در آن از قوس الکتریکی که هزینه ای به مراتب بالاتر از مشعلهای سوخت دارد استفاده می شود. استفاده از الکتریسیته برای تولید گرما در کشوری مثل ایران که برق خود را عمدتا از نیروگاههای حرارتی بدست می آورد اصلا مناسب نیست. در نظر بگیرید که ۱۰۰ ژول انرژی از احتراق سوخت در نیروگاه بدست می‌آید، راندمان نیروگاهها در ایران به طور متوسط ۳۵٪ است، این بدان معنا است که ۶۵ ژول از انرژی برای تولید الکتریسیته از دست می‌رود. راندمان شبکه توزیع نیز حدودا ۸۵٪ است، پس از ۳۵ ژول باقی مانده ۵ ژول نیز در شبکه توزیع تلف می شود و نهایتا از ۱۰۰ ژول اولیه تنها ۳۰ ژول به مصرف کننده می‌رسد. حال مصرف کننده (مثلا کوره قوس الکتریکی) دوباره الکتریسیته را به حالت اولیه خود(گرما) تبدیل می‌کند. در حال حاضر با استفاده از OEC به راحتی می توان به دمای ۲۰۰۰-۱۸۰۰ درجه سانتی گراد رسید. به طور نمونه مصرف انرژی الکتریکی در فولاد سازیهای امریکا به طور متوسط ۴۷۵ کیلووات ساعت بر هر تن کلاف گرم است، این رقم در فولاد مبارکه ۱۱۸۰ کیلو وات ساعت است که هزینه زیادی را به کشور تحمیل می‌کند.

کاهش تولید گازهای گلخانه ای: در کارخانجات بزرگ فولاد که معمولا فرآیند های متنوعی از تولید کک تا تولید ورق های عریض در اختیار دارند به ازای تولید هر تن فولاد، ۲ تن دی اکسید کربن تولید می‌شود. از لحاظ حرارتی یک مشعل هوا-سوخت۱۰مگاواتی با هوای پیش گرم شده ۳۵۰ درجه سانتی گراد با یک مشعل ۶/۷ مگاواتی اکسیژن سوز بدون پیش گرم برابری می‌کند. این موضوع راهنمای خوبی برای بدست آوردن معیاری از کاهش آلودگی دی اکسید کربن است. (شکل۴)



شکل ۴- کاهش تولید دی اکسید کربن در احتراق اکسیژن- سوخت نسبت به هوا-سوخت

در پیمان کیوتو تصریح شده است که سطح تولید جهانی CO_2 در پایان سال ۲۰۰۵ باید به سطح تولید درسال ۱۹۹۵ برسد. برای رسیدن به این منظور در بسیاری از کشورهای مشمول این پیمان CO_2را از گازهای احتراق جدا می کنند. با توجه به اینکه در احتراق اکسیژن-سوخت محصولات تنهاH_2O, CO_2 هستند، جدا سازی دی اکسید کربن در OEC کم هزینه تر از جدا کردن آن در احتراق هوا سوخت به علت غلظت بالاتر آن است واین موضوع یکی از دلایل تمایل صنایع فولاد برای استفاده از OEC است.

www.SID.ir

Archive of SID

۵- کوره‌های قابل تبدیل به OEC

دو روش کوره بلند و احیای مستقیم برای تولید فولاد مورد استفاده هستند که در این میان قسمت عمده ای از کوره های خط تولید در هر دو روش مورد استفاده هستند. در ذیل لیستی از کوره‌هایی که تاکنون به مشعلهای اکسیژن افزا مجهز شده- اند، آمده است[۳] :

- کوره های قوس الکتریکی
- انواع کوره های Reheat
- مشعلهای Ladle Preheat
- کوره های قسمت های رول، فرج و آنیل

و حتی بسیاری دیگر از فرآیندهایی که غیر احتراقی محسوب می شوند، مانند بهینه سازی BOF .

۶- بررسی اقتصادی در شرایط ایران

هزینه های OEC در دو بخش عمده خلاصه می‌شود:

- هزینه تامین اکسیژن با خلوص معین
- هزینه ایجاد تغییرات در مشعل، کوره و احیاناً در صورت نیاز ایجاد تغییر در باقی قسمتهای خط تولید به این علت که نرخ تولید معمولا افزایش می‌یابد.

برای تحلیل اقتصادی این موضوع با استفاده از آمار موجود کارکرد این فن آوری در اروپا،کاهش ۵۰ تا ۷۰ درصد در مصرف سوخت در اثر استفاده از OEC در صنعت فولاد گزارش شده است[۴].[۱] می توان در OEC یک حد توازن بین کاهش هزینه سوخت و هزینه تامین اکسیژن در نظر گرفت. یک تحلیل اقتصادی ساده معین می کند که اگر تنها هزینه سوخت و اکسیژن را مدنظر قرار دهیم، چه تغییراتی در هزینه کارکرد ایجاد می‌شود. هزینه متعادل شده [۲] را به صورت عبارت زیر تعریف می کنیم.

$$NC = E(C.F + 1)$$

NC هزینه متعادل شده، E فاکتور راندمان، C هزینه اکسیژن به هزینه سوخت (در یک واحد) و F نسبت دبی اکسیژن به دبی سوخت است. در حالت احتراق هوا- سوخت NC=1 می باشد. در صورتی که NC<1 باشد هزینه کارکرد OEC از سوخت- هوا پایین تر است و اگر NC>1 آنگاه هزینه کارکرد OEC بالاتر از احتراق سنتی است. فاکتور راندمان به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f = \frac{\eta(O_2) - \eta(O_2 = 0)}{\eta(O_2 = 0)}$$

$$E = 1 - f = \frac{2\eta(O_2 = 0) - \eta(O_2)}{\eta(O_2 = 0)}$$

f درصد افزایش جزئی راندمان سوخت است. $\eta(0)$ راندمان سوخت در حالت پایه است و $\eta(O_2)$ راندمان سوخت در احتراق اکسیژن افزا می‌باشد. این راندمان در یک دبی مشخص اکسیژن بر واحد سوخت محاسبه می‌شود. فرض کنید که راندمان حرارتی مشعل هوا سوخت ۴۰٪ و راندمان مشعل اکسیژن- سوخت در همین حالت ۷۰٪ است. آنگاه $f = \frac{70-40}{40} = 0.75$ ،که نشان می دهد مشعل اکسیژن-سوخت ۷۵٪ کاراتر از مشعل سنتی هوا-سوخت عمل می‌کند.

عبارت بی بعد راندمان برابر است با E=1-0.75=0.25 که نشان می‌دهد تنها ۲۵٪ مقدار پایه سوخت برای تولید یک واحد محصول در احتراق اکسیژن افزا مورد نیاز است. حال یک مورد مطالعه روی این موضوع انجام می دهیم. فرض می‌کنیم قیمت گاز طبیعی۲۴ و هزینه اکسیژن ۶۶ تومان بر متر مکعب است(شرایط واقعی ایران). نسبت هزینه متعادل شده اکسیژن به سوخت برابر است با ۲،۷۵ که با توجه به ترکیبات گاز ،۲ حجم اکسیژن برای سوزاندن یک حجم گاز طبیعی مورد نیاز است.

۱- با احتساب انرژی مصرف شده در جداسازی اکسیژن

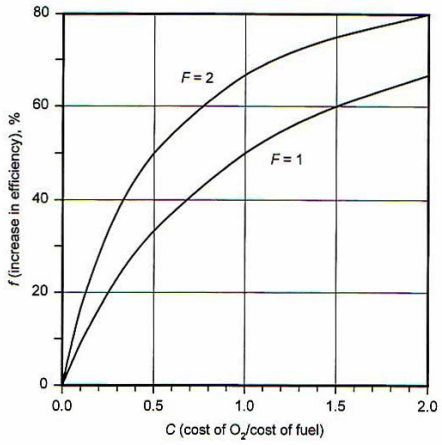
2. Normalized Cost

www.SID.ir

Archive of SID

حال $NC = 0.25[2.75\times 2+1]=1.625$ که نشان می دهد هزینه احتراق اکسیژن افزا از احتراق سنتی بالاتر است و در این مورد استفاده از احتراق OEC از لحاظ اقتصادی (با در نظر گرفتن قیمت داخلی گاز و اکسیژن) و بدون مد نظر قراردادن افزایش تولید، به صرفه نمی‌باشد. اگر در رابطه فوق نسبت قیمت اکسیژن به سوخت را مجهول در نظر بگیریم، برای رسیدن به صرفه اقتصادی C=1.5 بدست می آید که با فرض قیمت ثابت گاز، حد قیمت اکسیژن برابر ۳۶ تومان بر متر مکعب بدست می‌آید. هزینه سوخت و اکسیژن نیز در مناطق مختلف جهان متفاوت است در مناطقی که هزینه سوخت بالا و هزینه تامین اکسیژن پایین است، OEC توجیه مناسبی پیدا می‌کند.

در شکل ۵ می‌توان مطالب عنوان شده را جمع بندی کرد. در این شکل با (F=1,2) مباحث مطروحه بررسی شده است، در صورتی که با در نظر گرفتن مختصات C_9f نقطه بدست آمده پایین تر از نمودارF قرار گرفت، آنگاه هزینه تامین اکسیژن جوابگوی کاهش در مصرف سوخت نیست و در صورتی که نقطه مورد نظر بالاتر از منحنی F بدست آمد ،OEC از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. در صورتی که C=0.5, F=2 باشد، مینیمم افزایش در راندمان سوخت باید در حد ۵۲٪ باشد تا هزینه تامین اکسیژن با کاهش مصرف سوخت سر به سر شود. البته اگر در تحلیلی جامعتر درآمد کاهش آلودگی و افزایش تولید را نیز مد نظر قرار دهیم حد قیمت اکسیژن به سوخت کاهش می‌یابد. با این توضیح حتی با ۵۰٪ افزایش راندمان احتراق نیز امکان توجیه هزینه این طرح با درآمد ناشی از کاهش هزینه سوخت وجود ندارد و باید به دنبال عوامل دیگری من جمله کاهش آلودگی برای توجیه این طرح باشیم.



شکل ۵- تغییرات نقطه سر به سر در توجیه اقتصادیOEC

در صورتی که قیمت گاز را در حد قیمت صادراتی ایران در نظر بگیریم (هر متر مکعب ۸۲ تومان)، آنگاه طرح با قیمت فعلی اکسیژن توجیه اقتصادی پیدا می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

احتراق اکسیژن افزا تاثیر بسیار مناسبی در افزایش راندمان احتراق و کاهش آلودگی در کوره های صنعت فولاد دارد. گلوگاه استفاده از این فن آوری در ایران نسبت هزینه اکسیژن به گازطبیعی است، مطمئنا گازی که حاصل میلیونها سال فعل و انفعالات شیمیایی است باید ارزش بیشتری از اکسیژن موجود در هوا داشته باشد. این نسبت (هزینه یک متر مکعب اکسیژن به گاز) در ایران در حدود ۲/۷۵ است در صورتی که این رقم در امریکا حدود ۰/۵۴ می باشد و در کشورهای مختلف زیر یک می‌باشد. متاسفانه قیمت گذاری منابع ارزشمندی چون گاز طبیعی در کشور ما، مصرف کننده را به سمت استفاده نادرست سوق می‌دهد و انگیزه محققین را در جهت ایجاد تحولات علمی و صنعتی کاهش می‌دهد. با چشم پوشی از ۱۰ تا ۲۰ درصد

www.SID.ir

Archive of SID

افزایش تولید در اثر استفاده ازOEC در صنعت فولاد و همچنین چشم پوشی از اثرات کاهش آلودگی، با فرض قیمت فعلی گاز طبیعی(۲۴۰ ریال بر متر مکعب)، برای وجود توجیه اقتصادی، ماکزیمم قیمت اکسیژن نباید از حدود ۴۰۰ ریال بر متر مکعب بالاتر باشد در حالی که قیمت فعلی اکسیژن در حدود۶۶۰ ریال بر متر مکعب است. در صورتی که ارزش گاز را قیمت صادراتی ایران در نظر بگیریم (۸۸۰ ریال) آنگاه استفاده ازOEC در صنعت فولاد کشور دارای توجیه اقتصادی می‌باشد.

مراجع

۱- آمار مقایسه ای مصرف انرژی وزارت نفت، شبکه اطلاع رسانی نفت۱۳۸۴.

2- Charles E, Baukal, "Oxygen Enhanced Combustion", 1st Edition, 1998.
3- Wells, M. B. and Vonesh, F. A., "Oxy-fuel burner technology for electric arc furnaces, Iron Steelmaker, 1986.
4- Breithaupt, P.P., and Roberts, P.A., "Improvement of burners for reheating furnaces with respect to heat transfer and emissions" Eur. Steelmaking Development and perspectives in Rolling and Reheating , Luxemburg 1995
5- Charles E, Baukal, "Computational fluid dynamics in industrial combustion", 1st Edition, 2001.

www.SID.ir