POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

کربن‌زدایی و ادغام هیدروژنی صنایع فولاد: توسعه، چالش‌ها و تحلیل‌های فناوری اقتصادی اخیر

چکیده

صنعت فولاد یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای با نیاز انرژی قابل توجه است. در حال حاضر، ٪73 فولاد جهان از طریق کوره ذوب آهن اکسیژن پایه، مبتنی بر کک زغال‌سنگ تولید می‌گردد که حدود دو تن کربن‌دی‌اکسید به ازای هر تن فولاد تولید شده منتشر می‌نماید. این بررسی، فناوری‌های عمده، پیشرفت‌های اخیر، چالش‌ها و مقایسه‌های فنی‌اقتصادی فن‌آوری‌های فولادسازی را گزارش نموده و بر ادغام هیدروژن در فرآیندهای نوظهور و تاسیس آهن و فولادسازی تاکید می‌نماید. آزمایش‌های قابل توجهی به‌ویژه در آلمان برای جایگزینی زغال‌سنگ تزریق شده در لوله‌های انفجار کوره با هیدروژن در حال انجام است. با این حال، مشخص نیست که این رویکرد بتواند به دلیل چالش‌های فنی مرتبط، فراتر از ٪30 جایگزینی کک گسترش یابد. فناوری‌های ذوب مستقیم و بستر سیال می‌توانند 20 تا 30 درصد کربن‌دی‌اکسید کمتر بدون استفاده از جذب و ذخیره کربن منتشر کنند. پیامدهای انرژی هیدروژن در این فن‌آوری‌ها به‌عنوان جایگزینی برای گاز طبیعی و زغال‌سنگ هنوز به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. کاهش مستقیم سنگ آهن[1] و ذوب ضایعات فولادی بر پایه هیدروژن در یک کوره قوس الکتریکی به نظر می‌رسد بالغ‌ترین مسیرهای فن‌آورانه تا به امروز هستند که قادراند انتشار کربن‌دی‌اکسید تا ٪95 کاهش دهند، اما به در دسترس بودن منابع غنی کنسانتره آهن به‌عنوان خوراک متکی هستند. فن‌آوری‌های کوره‌های میله‌ای، فرآیند رایج ساخت آهن کاهش یافته مستقیم هستند که بیش از 72 درصد از کل تولید سهم دارند. این فناوری با گاز طبیعی به‌عنوان سوخت اصلی و کاهنده توسعه یافته است. با این حال، اکنون در حال سازگاری است تا عمدتاً بر روی هیدروژن کار کند تا یک محصول آهن کاهش یافته مستقیم کم‌کربن تولید نماید. ساخت آهن و فولاد بر پایه پلاسما و الکترولیز از دیگر فناوری‌های بالقوه برای استفاده از هیدروژن با پتانسیل کاهش کربن‌دی‌اکسید بیش از ٪95 است. با این حال، این فن‌آوری‌ها در مرحله مقدماتی توسعه با سطح آمادگی فناوری زیر6 هستند. چالش‌های فناورانه بسیاری برای کاربرد هیدروژن در تولید فولاد نظیر چالش‌های توزیع گرما به دلیل فرآیند کاهش گرماگیر هیدروژن، متعادل نمودن مقدار کربن در فولاد تولید شده (به‌ویژه استفاده از آهن کاهش یافته مستقیم بدون کربن)، حذف مواد گنگ و تامین منابع هیدروژن تجدیدپذیر مقرون به صرفه و سنگ آهن با کیفیت بالا (Fe >65)، وجود دارد. با کاهش کیفیت سنگ آهن در سراسر جهان، چندین شرکت در حال بررسی ذوب آهن کاهش یافته مستقیم قبل از فولادسازی، احتمالاً با استفاده از فناوری قوس غوطه‌ور برای از بین بردن مواد گنگ هستند. از این رو برای آزمایش پارامترهای فرآیند و کیفیت

[1] Direct reduction of iron ore

محصول، به تلاش‌های قابل توجهی در مقیاس آزمایشی و نیمه صنعتی نیاز است. تحلیل ما پیش‌بینی می‌کند که هیدروژن تا سال 2035 نقش مهمی در کربن‌زدایی صنایع فولاد ایفا خواهد نمود.

نکات نتیجه‌گیری شده و پیشنهادات

ادغام هیدروژن در صنعت فولاد احتمالاً جذاب‌ترین راه حل برای کربن‌زدایی این بخش و رسیدن به هدف انتشار صفر خالص تا سال 2050 است. مسیر BF-BOF[۲] شاید بر صنایع فولادی برای حداقل چند دهه به‌عنوان یک مسیر فولادسازی مقرون به صرفه غلبه نماید. تلاش‌هایی در سراسر جهان برای جایگزینی کک زغال‌سنگ با هیدروژن و زیست‌توده تجدیدپذیر از مسیر BF-BOF انجام شده‌است. آزمایشات مقدماتی، وعده جایگزینی حدود 30 درصد از سوخت‌های فسیلی با هیدروژن خالص را می‌دهد. با این حال، تحقیق و توسعه قابل توجهی در فرآیند و کیفیت محصول مورد نیاز است. به شرطی که همه چیز خوب پیش برود، پیش‌بینی می‌شود تعدادی کارخانه BF-BOF یکپارچه با هیدروژن تا سال 2030 به صورت تجاری در دسترس باشند.

فقط چند فرآیند وجود دارد که پتانسیل توسعه دستیابی به هدف انتشار خالص صفر در صنعت فولاد را دارند. با این حال تا به امروز، کاهش مستقیم آهن با یک کوره قوس الکتریکی یکپارچه (H_2DRI-EAF[3]) به‌طور بالقوه بالغ‌ترین فناوری برای ادغام نمودن هیدروژن است. در سراسر جهان تعدادی آزمایش موفقیت آمیز به صورت آزمایشگاهی و در مقیاس آزمایشگاه جهت آزمودن هیدروژن به‌عنوان یک کاهنده و منبع گرما وجود دارد. در حال حاضر، هیچ فرآیند H_2DRI-EAF در مقیاس تجاری برای ساخت فولاد وجود ندارد. با این حال، با همکاری با سایر شرکت‌ها، Thyssenkrupp، MIDREX و ArcelorMittal کارخانه‌های تولید فولاد مبتنی بر هیدروژن را در مقیاس تجاری به‌ویژه در اروپا راه‌اندازی نموده‌اند. نمایش در مقیاس آزمایشی از تولیدکنندگان مختلف و مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی، نوید جایگزینی 70 تا 100 درصد سوخت فسیلی (یعنی گاز طبیعی) با هیدروژن تجدیدپذیر را نشان می‌داد. در حال حاضر، فرآیند H_2DRI-EAF می‌تواند انتشار کربن‌دی‌اکسید را در مقایسه با DRI-EAF مبتنی بر گاز طبیعی و مسیرهای BF-BOF تا 80-90 درصد (تقریبا 225 کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید بر تن فولاد مایع) کاهش دهد. همچنین هزینه عملیاتی شاخص با استفاده از فرآیند H_2DRI-EAF در محدوده ای 600-800 دلار در هر تن فولاد مایع است. با این وجود، در دسترس بودن هیدروژن مقرون به صرفه و سنگ معدن با عیار بالا، شاید چالش برانگیزترین جنبه این فناوری باشد.

[2] blast furnace-basic oxygen furnace
[3] H_2 direct reduction of iron with integrated electric arc furnace

POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

چالش‌هایی برای حفظ تعادل انرژی در فولادسازی با استفاده از هیدروژن وجود دارد. علاوه بر این، فرآیند فولادسازی به مقداری کربن در فولاد نیازمند است که یک چالش بالقوه برای به کارگیری آهن احیا مستقیم بدون کربن مبتنی بر هیدروژن در کوره قوس الکتریکی است. بنابراین، کربن‌خنثی ذغال زیستی می‌تواند به‌عنوان منبع کربن بالقوه‌ای در کوره قوس الکتریکی استفاده گردد. از آنجا که فرآیندهای کاهش مستقیم سنگ آهن، مواد گنگ را از مواد خوراکی حذف نمی‌کنند، این مواد در آهن کاهش یافته مستقیم باقی مانده و تولید فولاد با کیفیت بالا را با مشکل مواجه می‌نمایند. در حال حاضر تولید آهن کاهش یافته مستقیم، بر کنسانتره‌های غنی از آهن متکی است، اما در صورت توسعه این فناوری ممکن است در آینده در دسترس نباشند. چندین شرکت در حال بررسی مرحله‌ای بین آهن کاهش یافته مستقیم هیدروژنی و فرآیندهای فولادسازی برای حذف مواد گنگ از آهن کاهش یافته مستقیم هستند. این مراحل فرآیندی جدید، باعث افزودن هزینه بر کل فرآیند می‌شوند. در حال حاضر تقریبا هیچ داده‌ای در مورد این واحدهای ذوب وجود ندارد (احتمالاً مبتنی بر فناوری قوس غوطه ور هستند). با این حال، نویسندگان انتظار دارند که اگر تولید آهن کاهش یافته مستقیم هیدروژنی رشد کند، همانطور که بسیاری از مردم پیش‌بینی می‌کنند، این موضوع حوزه اصلی توسعه در دهه آینده باشد[1]. فن‌آوری‌های تجاری کوره میله‌ای مانند MIDREX، HYL و HYBRIT در حالی که تلاش‌های محدودی روی فناوری‌های ذوب مستقیم تجاری دیده می‌شود (COREX، FINEX، HIsmelt، HIsarna)، در ادغام هیدروژن پیشگام هستند. براساس سطح آمادگی تکنولوژی، تا اواسط سال 2030، توسعه صنعتی در مقیاس کامل برای BF-BOF مبتنی بر هیدروژن و کوره قوس الکتریکی مبتنی بر آهن کاهش یافته مستقیم انتظار می‌رود. در عین حال، ممکن است چند دهه طول بکشد تا فناوری‌های امیدوارکننده HPSR، AIE و MOE از نظر تجاری قابل دوام باشند. علاوه بر چالش‌های فناورانه مختلف، محرک اصلی برای مهاجرت موفقیت‌آمیز از سوخت فسیلی به فولادسازی مبتنی بر هیدروژن، تولید با صرفه و پایدار هیدروژن است. در حال حاضر، هیدروژن تجدیدپذیر برای کاربردها در مقیاس تجاری مقرون به صرفه نبوده، منجر به حداقل چهار برابر هزینه‌های سطح بالاتر برای فولادسازی مبتنی بر هیدروژن نسبت به مسیر BF-BOF است. با این حال، تلاش قابل توجهی در سراسر جهان با هدف تولید هیدروژن با کمتر از 2 دلار درکیلوگرم، راه را برای ادغام آن در صنایع فولاد در آینده قابل پیش‌بینی هموار خواهد نمود.

کلیدواژه‌ها

تولید آهن و فولاد، بردار انرژی هیدروژن، کربن زدایی، آهن کاهش‌یافته مستقیم، کوره قوس الکتریکی، اقتصاد فناوری.

POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

Iron and steel manufacturing, Hydrogen energy vector, Decarbonisation, Direct reduced iron, Electric arc furnace, Technieconomics.

Doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136391.

مراجع

[1] Cavaliere, P., Perrone, A., Silvello, A., Stagnoli, P., Duarte, P., “Integration of open slag bath furnace with direct reduction reactors for new-generation steelmaking”, 2022, Metals, Vol. 12.

مرجع اصلی

Shahabuddin M., Brooks G., Rhamdhani M.A., “Decarbonisation and Hydrogen Integration of Steel Industries: Recent Development, Challenges and Technoeconomic Analysis”, Journal of Cleaner Production, 2023, Vol. 395.