درباره اصلاح الگوی مصرف (۴)

بررسی اصلاح الگو در صنایع منتخب انرژی‌بر، بخش معدن و صنایع معدنی (فولاد، مس، آلومینیم و سیمان)

کد موضوعی: ۳۱۰
شماره مسلسل: ۹۶۸۷
خرداد ماه ۱۳۸۸
دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن

به نام خدا

فهرست مطالب

چکیده ۱
مقدمه ۲
۱. فولاد ۲
۲. مس ۱٤
۳. سیمان ۱۹
٤. آلومینیم ۲۸
نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد ٤۲

درباره اصلاح الگوی مصرف (۴)
بررسی اصلاح الگو در صنایع منتخب انرژی‌بر، بخش معدن و صنایع معدنی (فولاد، مس، آلومینیم و سیمان)

چکیده

اصلاح الگوی مصرف در صنایع انرژی‌بر بخش معدن و صنایع معدنی از سه طریق ممکن است:

۱. تغییر تکنولوژی،

۲. اصلاح تکنولوژی موجود،

۳. اصلاح مدیریت تولید.

با توجه به مطالعات صورت گرفته و مطالعه حاضر مشاهده می‌شود که اصلاح الگوی مصرف در صنعت مس به تغییر تکنولوژی از کوره‌های ریورب به کوره‌های فلاش و در صنایع فولاد، سیمان و آلومینیم با اصلاح مدیریت و در برخی موارد اصلاح تکنولوژی موجود (با توجه به راهکارهای ارائه شده در متن) امکان‌پذیر خواهد بود.

مقدمه

بخش صنعت پس از بخش خانگی و حمل‌ونقل، سومین بخش مصرف‌کننده انرژی کشور است که سهم قابل‌توجهی از آن متعلق به بخش صنایع معدنی (فولاد، آلومینیم، سیمان و مس) است که با توجه به ساختار تکنولوژی موجود در هر بخش، میزان مصرف انرژی به‌ازای هر واحد تولید، فاصله قابل توجهی با استاندارد جهانی دارد. بنابراین توجه به میزان مصرف انرژی در هر یک از بخش‌های مذکور و مقایسه آن با مصرف استاندارد جهانی، راهکارهای عملی در جهت رسیدن به مصرف استاندارد در داخل کشور را تبیین خواهد کرد. در این گزارش سعی می‌شود پس از بررسی فرایند تولید هر یک از صنایع معدنی منتخب (فولاد، سیمان، مس و آلومینیم) و مقایسه مصرف انرژی در داخل کشور و استاندارد جهانی، راهکارهای اصلاح الگوی مصرف به تفکیک بیان شود.

۱. فولاد

صنعت فولاد از جمله صنایع معدنی انرژی‌بر، سرمایه‌بر و نیازمند تکنولوژی بالاست که به‌واسطه بالا بودن سهم انرژی و تکنولوژی در تولید و قیمت تمام شده آن، رقابت در عرصه جهانی نیازمند توجه به نوع تکنولوژی تولید و بهینه کردن مصرف انرژی در انواع روش‌های تولیدی آن است.

فرایندهای تولید فولاد

به‌طور کلی برای تولید فولاد، پس از آماده‌سازی سنگ معدن، از دو روش عمده استفاده می‌شود:

روش اول: تهیه آهن‌خام در کوره بلند و ساخت فولاد در کنورتورهای اکسیژنی (احیای غیرمستقیم).

روش دوم: ذوب قراضه یا آهن اسفنجی در کوره‌های قوس الکتریکی (احیای مستقیم).

الف) بررسی روش اول (روش کوره بلند)

در این روش پس از آماده‌سازی سنگ آهن (استخراج و دانه‌بندی آن در محل معدن)، به کمک کک، کلوخ و آهک، احیا و تصفیه صورت می‌پذیرد، در این فرایند، مواد مذکور به‌صورت آگلومره (مخلوط مواد خام سنگ آهن، دولومیت، آهک پخته، کک، سنگ آهک، سنگ منگنز، پوسته‌های اکسیدی نورد، غبارهای کوره بلند و...) وارد کوره بلند شده و پس از دمش هوا، فرایند احیا انجام می‌پذیرد. محصول نهایی کوره بلند حاوی ۳–۴/۵ درصد کربن است که در طی فرایند «کوره بنیادی اکسیژن» میزان کربن موجود به سطح ۰–۱/۵ درصد کاهش یافته و پس از آن فولاد خام تهیه می‌شود. حدود ۶۷– ۶۶/۳ درصد تولید فولاد جهان به این روش انجام می‌شود.

برآورد ضرایب استاندارد نهاده‌های تولید برای تولید یک تن فولاد خام در روش کوره بلند و کوره بنیادی اکسیژن (کنورتور)[1]

با توجه به داده‌های ترازنامه هیدروکربوری سال ۱۳۸۶، متوسط مصرف انرژی در فرایند کوره بلند، کنورتور ۲۵/۸ گیگاژول[2] بر تن است. جدول ۱ متوسط مصرف استاندارد جهانی برای تولید ۱ تن فولاد خام به روش کوره بلند را نشان می‌دهد.[3]

1. Blast Furnace/ Basic Oxygon Furnace

۲. انرژی حاصل از سوخت ۲۶/۳ متر مکعب گاز طبیعی تقریباً معادل یک گیگاژول است.

۳. فرایند تولید فولاد خام به روش کوره بلند شامل مجتمع‌های آگلومره، ککسازی، کوره بلند و کنورتور است که در این بخش به انرژی مصرفی آنها به‌صورت تفکیکی اشاره نشده، ولی در ترازنامه هیدروکربوری سال ۱۳۸۶ قابل دسترسی است.

جدول ۱. ضرایب استاندارد نهاده‌های تولید برای تولید یک تن فولاد خام به روش کوره بلند و کوره بنیادی اکسیژن

عنوان نهاده	ضریب	واحد اندازه‌گیری
سنگ معدن آهن	۱/۷۶۵	تن
هزینه حمل سنگ معدن	۱/۷۶۵	تن
زغال کک	۰/۶۹۷	تن
هزینه حمل زغال کک	۰/۶۹۷	تن
فولاد قراضه	۰/۱۳۶	تن
هزینه جمع‌آوری فولاد قراضه	۰/۱۳۶	تن
اکسیژن	۲۱۰	متر مکعب
آلیاژهای آهن	۰/۰۱۱	تن
کمک ذوب	۰/۵۶	تن
آجرهای نسوز	۰/۰۱۱	تن
کل انرژی مصرفی	*۲۵/۸	گیگاژول/ تن
حقوق و دستمزد	۰/۵	نفر / ساعت

Source: www.STEELONTHENET.

* این رقم از ترازنامه هیدروکربوری سال ۱۳۸۶ استخراج شده و در بند اصلی جدول چنین ردیفی وجود ندارد.

برآورد ضرایب نهاده‌های تولید برای تولید یک تن فولاد خام در روش کوره بلند و کوره بنیادی اکسیژن (کنورتور) در ایران (ذوب آهن اصفهان)

در ایران مجتمع فولاد ذوب آهن اصفهان، فولاد میبد، فولاد قروه و فولاد همدان به روش کوره بلند تولید می‌کنند که بیشترین آن در ذوب آهن اصفهان صورت می‌پذیرد. این تولید در دو کوره بلند انجام می‌شود. برای توسعه تولید فولاد خام به این روش، کوره بلند شماره ۳ نیز در ماه‌های آتی وارد چرخه تولید خواهد شد. ضرایب

نهاده‌های تولید در مجتمع ذوب‌آهن با توجه به اطلاعات موجود، به‌ترتیب جدول ۲ است.

جدول ۲. ضرایب نهاده‌های تولید برای تولید یک تن فولاد خام به روش کوره بلند و کوره بنیادی اکسیژن در ایران

عنوان نهاده	ضریب	واحد اندازه‌گیری
سنگ معدن آهن	۱/۶۸	تن
هزینه حمل سنگ معدن	*	تن
زغال کک	۰/۶۷	تن
هزینه حمل زغال کک	*	تن
فولاد قراضه	۰/۱۴	تن
هزینه جمع‌آوری فولاد قراضه	*	تن
اکسیژن	۱۸۰	متر مکعب
آلیاژهای آهن	٪۱۲۵	تن
کمک ذوب	۰/۴۰۵	تن
آجرهای نسوز	٪۱۸	تن
کل انرژی مصرفی	**۲۸/۶	گیگاژول/ تن
حقوق و دستمزد	*	نفر / ساعت

* اطلاعات موجود نیست.

** این رقم توسط کارشناسان آزاد فولاد استخراج شده که شامل کک‌سازی و آگلومراسیون، کوره بلند و کنورتور است. این رقم در ترازنامه هیدروکربوری معادل ۳۲/۸ گیگاژول بر تن و آمار منتشره توسط شرکت ذوب آهن اصفهان ۳۰/۱۲ گیگاژول بر تن ذکر شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان مصرف انرژی در بخش کوره بلند ایران، طبق آمار ذوب آهن حدود ۴/۳۲ گیگاژول بیشتر از نرخ جهانی است، به‌عبارت دیگر این میزان همان پتانسیل صرفه‌جویی در این روش است که می‌توان آن را به حالت بالفعل تبدیل کرد. برای صرفه‌جویی در این مقدار، نیازی به تغییر تکنولوژی نبوده و تنها بهبود فرایند تولید باید طبق موارد ذیل صورت پذیرد.

راهکارهای کاهش مصرف انرژی در تولید فولاد به روش کوره بلند در ایران

ـ تولید و تهیه مواد اولیه

۱. شستشوی زغال جهت پایین آوردن خاکستر زغال،

۲. بالا بردن خلوص سنگ آهن و آگلومره،

۳. استفاده از گندله قلیایی در کوره بلند،

۴. رفع نوسانات تغذیه گاز طبیعی به‌خصوص در فصل زمستان،

۵. تهیه سنگ آهن با دانه‌بندی مناسب،

۶. پایین آوردن درصد رطوبت زغال،

۷. عدم استفاده از تختال برای تولید مقاطع،

۸. پایین آوردن فسفر سنگ آهن،

۹. استفاده از کک با خاکستر و گوگرد کم و شاخصه CSR و CRI مطلوب،

۱۰. بالا بردن خلوص اکسیژن مصرفی (به بالای ۹۹/۵ درصد).

ـ فرایند تولید

۱. استفاده از کک ریزه (گردویی) در شارژ کوره بلند،

۲. مصرف بهینه آهک در کنورتر،

۳. تنظیم زمان دمش در کنورترها،

۴. کنترل میزان رطوبت در مسیر کک‌سازی تا کوره بلند،

۵. استفاده از فشار دهانه کوره بلند (تی. آر. تی)،

۶. استفاده از سیستم بارگیری بدون زنگ در کوره بلند،

۷. استفاده از گاز هلدر در بخش‌های کک‌سازی، کوره بلند و کنورتر اکسیژنی،

۸. بالا بردن نسبی درجه حرارت دمای هوای دم کوره بلند،

۹. پایین آوردن میزان مصرف آب و در نتیجه مصرف پایین برق،

۱۰. کنترل دقیق دمای شمش در نوردها،

۱۱. جلوگیری از هدر رفتن زغال‌سنگ در حین انتقال،

۱۲. استفاده حداکثر از قراضه در کنورتر با استفاده از دمش ترکیبی،

۱۳. افزایش سهم کنسانتره سنگ آهن تا حد ممکن در آگلومراسیون،

۱۴. استفاده از فناوری ریخته‌گری مداوم مقاطع شبیه به محصول نهایی،

۱۵. برنامه‌ریزی و اجرای بهینه سامانه نگهداری و تعمیرات،

۱۶. استفاده از سامانه دیسپاچری و کنترل انرژی به‌صورت اتوماتیک (استفاده از نرم‌افزار و سخت‌افزار)،

۱۷. گرانوله کردن سرباره در محوطه ریخته‌گری کوره بلند،

۱۸. استفاده فرایند کک‌سازی با بازیافت حرارت،

۱۹. استفاده از حرارت گازهای خروجی جهت خشک کردن زغال،

۲۰. جداسازی و تولید یخ خشک (CO_2) از گاز خروجی.

استفاده از حرارت گازهای خروجی جهت گرم کردن اکسیژن ورودی

ـ تجهیزات به‌کار رفته

۱. استفاده از تورپیدوکار برای انتقال چدن مذاب،

۲. عایق‌بندی مناسب خطوط انتقال انرژی،

۳. استفاده از گاز هلدر به‌جای سوزاندن گاز،

۴. تغییر محل دمش سوخت‌های کمکی از تویره به ساپلوی کوره بلند،

۵. پوشش‌کاری جوی‌های چدن مذاب کوره بلند،

۶. استفاده از سیستم‌های بهینه تزریق سوخت‌های کمکی در کوره بلند هم‌زمان با افزایش درصد اکسیژن در هوای دم،

۷. استفاده از برج خنک‌کننده خشک به‌جای برجِ تَر در نیروگاه،

۸. کنترل دقیق بر روی احتراق کائوپرها،

۹. جلوگیری از اتلاف بخار در محل والوها و تله‌های بخار در خطوط انتقال بخار،

۱۰. عایق‌کاری مناسب ساختمان‌ها،

۱۱. استفاده از سیستم خاموش کردن خشک کک،

۱۲. استفاده از فناوری افزایش ارتفاع بستر مواد در آگلوماشین،

۱۳. استفاده از تویره‌های با دوام بالا (دو محفظه‌ای)،

۱۴. استفاده از نسوزهای با کیفیت بالا و نسوزهای یکپارچه (منولیتیک)،

۱۵. استفاده از خنک‌کننده‌های مسی در بازسازی و نوسازی کوره بلند،

۱۶. بازسازی و نوسازی باطری‌های ککسازی،

۱۷. آب‌بندی درب سلول‌ها،

۱۸. استفاده از درایوهای با سرعت متغیر در کمپرسورهای گاز کک،

۱۹. استفاده از مشعل‌های با هوای پیش گرم شده در آگلومراسیون،

۲۰. استفاده از زغال‌های نامرغوب در آگلومراسیون به‌جای کک،

۲۱. استفاده از ماشین‌های ریخته‌گری مداوم چندمنظوره،

۲۲. گرانوله کردن چدن مذاب در محوطه (در وضعیت اضطراری)،

۲۳. استفاده از فناوری Soaking Bar در مجرای کوره بلند،

۲۴. استفاده از سیستم هوای دم دو کمپانساتوری در کوره بلند،

۲۵. استفاده از تجهیزات لیزری اندازه‌گیری ضخامت نسوز پاتیل و کوره‌ها،

۲۶. استفاده مجدد از نسوزهای کارکرده (بازیافت).

ب) بررسی روش دوم (روش احیای مستقیم)

در این روش معمولاً سنگ آهن در حالت جامد به‌وسیله گاز یا کک احیا شده و تبدیل به آهن اسفنجی می‌شود پس از آن با استفاده از دو فرایند میدرکس یا اچ.وای.ال احیای مستقیم شده و به فولاد تبدیل می‌شود. در ایران دو شرکت بزرگ فولاد مبارکه و فولاد خوزستان به این روش تولید می‌کنند. در این روش هر چه‌قدر میزان مصرف قراضه در فرایند تولید بیشتر باشد، به همان میزان مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

برآورد ضرایب استاندارد نهاده‌های تولید برای تولید یک تن فولاد خام به روش کوره قوس الکتریک (روش احیای مستقیم)

اساساً در بررسی میزان مصرف انرژی استاندارد در روش قوس الکتریک، کوره‌های

با شارژ خالص قراضه را به‌عنوان پایه در نظر می‌گیرند. بنابراین در مقایسه کشورهای مختلف و محاسبه اختلاف مصرف انرژی و مصرف استاندارد، تنها کوره‌های شارژ قراضه را به همدیگر می‌سنجند. با توجه به این موضوع، در حال حاضر مصرف استاندارد کوره‌های به شارژ خالص قراضه، حدود ۹/۷۹-۷/۴۳ گیگاژول بر تن است، ولی این میزان با استفاده ترکیب آهن اسفنجی به‌عنوان ماده اولیه افزایش می‌یابد.

برآورد میزان مصرف انرژی در تولید یک تن فولاد به روش قوس الکتریکی در ایران

استفاده از روش احیای مستقیم یا قوس الکتریکی برای تولید فولاد خام در ایران، به‌دلیل وجود منابع گازی فراوان و ارزان‌قیمت، بیشتر از روش کوره بلند مورد توجه قرار گرفته است. به‌طوری‌که مجتمع فولاد مبارکه و فولاد خوزستان از این روش برای تولید فولاد خام استفاده می‌کنند. با توجه به اطلاعات دریافتی از شرکت فولاد مبارکه، متوسط مصرف انرژی برای تولید ۱ تن فولاد خام در این روش، حدود ۲۲/۴۹ گیگاژول بر تن بوده است که تفاوت فاحشی به استاندارد جهانی دارد.

یکی از عمده‌ترین علل این تفاوت، استفاده از گندله و در نتیجه آهن اسفنجی در فرایند تولید در شرکت فولاد مبارکه است. بنابراین مقایسه ارقام مصرف انرژی فولاد مبارکه می‌باید در قالب تکنولوژی تولید خود مورد بررسی قرار گیرد. به‌طور متوسط،

کل انرژی مصرفی به این تکنولوژی حدود ۱۴/۴ گیگاژول بر تن است.[1] با توجه به این موضوع، پتانسیل صرفه‌جویی در این روش حدود ۸/۰۹ گیگاژول می‌تواند باشد که برای بالفعل کردن این پتانسیل راهکارهای ذیل پیشنهاد می‌شود.

راهکارهای بهبود مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی

۱. دمش گاز اکسیژن،
۲. متالورژی پاتیلی (ثانویه)،
۳. دیواره‌های خنک‌شونده آبی،
۴. ترانس با توان بالا (۱/۶ مگاولت آمپر بر تن فولاد)، (نسبت ترانس‌ها به ظرفیت کوره)،
۵. پایش رایانه‌ای،
۶. سقف خنک‌شونده با تزریق سوخت با اکسیژن،
۷. تشکیل سرباره پف‌کننده،
۸. تخلیه ذوب از کف،
۹. عملیات ذوب با مذاب باقی‌مانده،
۱۰. کوره پاتیلی (LF)،
۱۱. تخلیه ذوب از کف به‌صورت خارج از مرکز،
۱۲. پیش گرم کردن قراضه،

---

۱. ۱۴/۴ متوسط مصرف انرژی تولیدکنندگانی است که از آهن اسفنجی و قراضه به‌طور درصدی مشخص استفاده می‌کنند.

۱۳. کوره‌های با جریان مستقیم،

۱۴. بهم‌زن کفی،

۱۵. لانس مانیپولاتوری،

۱۶. ولتاژ بالا،

۱۷. جبران‌ساز استاتیکی توان رآکتیو (SVC)،

۱۸. بلوک‌های خنک‌شونده در ناحیه سرباره،

۱۹. فناوری کو ـ ژن،

۲۰. قراضه و آهن اسفنجی تمیز و سنگین (بسیار با اهمیت و تأثیرگذار است)،

۲۱. سیستم دو پوسته، شافتی و نوار نقاله‌ای برای شارژ مداوم،

۲۲. نسوزهای یکپارچه،

۲۳. آجرهای با کیفیت بالا،

۲۴. به‌کارگیری لاستیک‌های فرسوده به‌عنوان منابع کربن و انرژی،

۲۵. شارژ آهن اسفنجی گرم،

۲۶. شارژ چدن مذاب،

۲۷. هم‌خوانی و هماهنگی با کوره پاتیلی و ریخته‌گری مداوم،

۲۸. شارژ مداوم آهن اسفنجی،

۲۹. به‌کارگیری سرباره در تولید سیمان،

۳۰. کوره‌های با جریان مستقیم (DC)،

۳۱. آهن اسفنجی با درجه متالیزاسیون و کربن بالا،

۳۲. سامانه تعمیرات گرم نسوزها،

۳۳. استفاده از شمش چدن در شارژ کوره،

۳۴. استفاده از گیره آلومینیمی الکترود گرافیتی،

۳۵. مشعل‌های رژنراتیو در خشک و گرم کردن پاتیل و پاتیل میانی،

۳۶. بهره‌برداری مداوم کوره،

۳۷. شارژ آهن اسفنجی گرم با جاذبه زمین در کوره،

۳۸. ایجاد قوس با طول زیاد،

۳۹. کاهش زمان قطع جریان (Power Off) کوره،

۴۰. تصفیه غبار و استفاده از Zn، Pb و Fe آن،

۴۱. استفاده از Hot Charge نورد گرم (شارژ اسلب گرم به کوره‌های نورد)،

۴۲. استفاده از Hot Charge گندله (شارژ گندله کرم به کوره‌ها)،

۴۳. بازیافت انرژی حرارتی از دودکش‌ها.

۲. مس

مس یکی از قدیمی‌ترین، مفیدترین و پرمصرف‌ترین عناصری فلزی بوده و به شکل خالص سولفیدی و اکسیدی در طبیعیت یافت می‌شود. عمده‌ترین مصارف مس درصنایع انتقال الکتریسیته، لوله‌کشی، ارتباطات و ساختمان است.

از آنجا که مهم‌ترین بخش انرژی‌بر در تولید مس، بخش ذوب است که بیش از ۸۰ درصد انرژی مصرفی، در این بخش مورد استفاده قرار می‌گیرد، تنها به فرایندهای ذوب اشاره شده و انرژی مصرفی در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرایندهای ذوب مس در جهان و مقایسه آنها

فرایندهای ذوب مس در جهان توسط ۸ تکنولوژی قابل انجام است که به تفکیک اشاره می‌شود.

الف) فرایند ذوب تشعشعی اتوکمپو[1] یا فلاش

امروزه نسل چهارم این فناوری به‌عنوان روش، غالب تولید مس در جهان مطرح است و مس تولیدی با استفاده از این روش، معادل ۵۰ درصد مس تولیدی جهان است. در این روش کنستانتره مس با میزان رطوبت بسیار کم به همراه مواد سرباره‌ساز و هوای غنی شده نسبت به اکسیژن با استفاده از روش دمش به مس مات تبدیل می‌شود. این فرایند در بسیاری از موارد از نظر مصرف انرژی خودکفا بوده و نیازی به انرژی حرارتی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی ندارد. ظرفیت بهینه اقتصادی فرایند ذوب تشعشعی در محدوده ۰/۵ تا ۲ میلیون تن کنستانتره است.

مهم‌ترین ضعف این روش اقتصادی نبودن آن در ظرفیت‌های بالای تولید و تولید میزان بالای عناصر و مهم‌ترین مزیت آن عمر طولانی کوره و تولید پیوسته گازهای خروجی غنی از SO_2 است.

ب) فرایند ذوب تشعشعی اینکو[2]

در این فرایند کنستانتره مس و مواد سرباره‌ساز با میزان رطوبت ۰/۳ درصد به همراه اکسیژن صنعتی به داخل کوره دمیده شده و به مس مات تبدیل می‌شود. عملیات ذوب از نظر انرژی خودکفا بوده و عیار مات تولیدی با توجه به ترکیب

1. Outokumpu Flash Smelting
2. Inco Flash Smelting

شیمیایی کنستانتره و طراحی کوره تغییر می‌کند. مهم‌ترین مزیت این روش میزان بسیار کم غبار تولیدی و عمر طولانی کوره است و مهم‌ترین ضعف آن عدم استفاده کارا از انرژی حرارتی است.

ج) فرایند نوراندا[1]

این فرایند اولین فرایند ذوب در حمام مذاب مس بوده و از دهه ۱۹۷۰ میلادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرایند هوای غنی شده با اکسیژن به داخل حمام مذاب مس دمیده شده و مات مس با عیار ۷۰-۷۲ درصد تولید می‌شود. سرباره تولیدی در این روش نیاز به پالایش و فراوری بیشتری دارد و پس از سرمایش، خردایش و طبقه‌بندی به کوره بازگردانیده می‌شود.

د) فرایند تنینت[2]

این فرایند بسیار شبیه کوره نوراندا است و تفاوت‌های جزئی در سیستم‌های باردهی کنستانتره و مواد سرباره‌ساز با فرایند نورندا دارد.

نقاط ضعف این روش، میزان بالای مس اتلافی در سرباره و طول عمر کوتاه کوره است.

هـ) فرایند ذوب پیوسته میتسوبیشی[3]

در این فرایند با استفاده از کنستانتره خشک به همراه مولد سرباره و سرباره‌ساز، غبار بازیافت شده با دمش هوای غنی شده نسبت به اکسیژن (۵۵ درصد)، مات پرعیار

1. Noranda Reactor
2. Tenient Modified Convertor
3. Mitsubishi Continues Smelting

مس (۶۸ درصد) و سرباره تولید می‌شود. سپس سرباره تولیدی به کوره پالایش هدایت شده و سرباره و مات از یکدیگر جدا می‌شود. ویژگی این روش آن است که سرباره پالایش یافته مستقیماً و بدون نیاز به عملیات فراوری بیشتر به محل انباشت سرباره منتقل می‌شود.

و) فرایند ذوب مس با استفاده از کوره الکتریکی

در این روش کنستانتره خشک مس به همراه مواد سرباره‌ساز از طریق منافذ و دریچه‌های تعبیه شده در سقف به کوره تغذیه شده و در اثر عبور جریان الکترودهای کربنی به سرباره ذوب شده و به مات کم‌عیار تبدیل می‌شود. مهم‌ترین مزیت این روش سطح بسیار بالای بازیابی عناصر گرانبها و مهم‌ترین ضعف آن مصرف زیاد انرژی الکتریکی است.

ز) فرایند ذوب[1]

این فرایند از سال ۱۹۹۲ تاکنون در صنایع مس آمریکا، هند و چین مورد استفاده قرار گرفته و امروزه بیش از ۱/۵ میلیون تن کنستانتره مس در جهان با استفاده از این روش تولید می‌شود. در این فرایند از زغال سنگ، سوخت مایع و گاز به‌عنوان منابع ثانوی انرژی استفاده می‌شود. فرایند Isasmelt/Ausmelt مات پرعیار مس ۶۰ درصد تولید می‌کند، ولی امکان جدایش مات و سرباره در محصول تولیدی وجود ندارد. مهم‌ترین مزیت این روش میزان بالای بهره‌وری فرایند (۶۸-۸۰ درصد)،میزان تولید غبار بسیار کم و کوره ساده و کم‌هزینه است.

1. Isasmelt/Ausmelt

ح) فرایند دمش از بالا در راکتور دوار[1]

در این روش کنستانتره خشک و مواد سرباره‌ساز از طریق یک مجرای آب خنک به درون کوره وارد شده، با احتراق اکسیژن و گاز طبیعی ذوب می‌شود. سرباره خروجی از این فرایند، دارای درصد مس بالاست. مهم‌ترین مزیت این روش هزینه سرمایه‌گذاری کم آن است. هزینه بهره‌برداری به‌دلیل طول عمر بسیار کم کوره به‌شدت بالاست که این امر باعث شده است از این فرایند برای تولید مس به‌صورت صنعتی در هیچ واحد ذوبی استفاده نشود.

ط) کوره شعله‌ای یا کوره ریورب

کوره شعله‌ای یا ریورب، نوعی کوره بوته‌ای سوختی است که در آن کانی پرعیار ذوب شده و لایه‌های جدای مات و سرباره مذاب را تشکیل می‌دهد. استفاده از این کوره‌ها به‌خاطر کاربرد متنوع این کوره‌هاست به‌طوری که همه نوع مواد اعم از کلوخه‌ای یا ریز، مرطوب یا خشک در این کوره به راحتی استفاده می‌شود. بزرگ‌ترین مشکل این کوره‌ها مصرف مقادیر زیاد سوخت‌های هیدروکربوری در مقایسه با دیگر روش‌هاست.

روش‌های تولید مس در ایران

روش‌های تولید مس در ایران شامل دو روش کوره ریورب و اتوکمپو یا کوره فلاش است.

1. Top Blown Rotary Converteor

مقایسه مصرف انرژی در برخی از روش‌های منتخب

در جدول ۳ مقدار مصرف انرژی در روش‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۳. مقدار مصرف انرژی به ازای هر تن کنستانتره (گیگاژول بر تن)

روش ذوب	کوره* (ریورب رطوبتی)	کوره* (ریورب خشک)	کوره الکتریکی	روش اینکو	روش اتوکمپو یا فلاش	روش نورندا و روش تنینت	روش میتسوبیشی
مصرف انرژی	۳۷/۱۲	۳۲/۶۳	۴۴/۸۶	۲۲/۴۳	۱۹/۹۶	۲۵/۳۳	۲۰/۶۶

* تنها تکنولوژی است که فقط در ایران مورد استفاده قرار گرفته است.

ملاحظه می‌شود که روش اتوکمپو یا فلاش با ۱۹/۹۶ گیگاژول بر تن کمترین مصرف انرژی و روش کوره الکتریکی با ۴۴/۸۶ گیگاژول بر تن بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است.

راهکارهای اصلاح الگوی مصرف در تولید مس

بهترین روش اصلاح الگوی مصرف در بخش ذوب مس ایران، تغییر تکنولوژی از کوره‌های ریورب به سمت کوره فلاش است.

۳. سیمان

سیمان ترکیبی از اکسید کلسیم (آهک) با سایر اکسیدها نظیر اکسید آلومینیم، اکسید سیلیسیم، اکسید آهن، اکسید منیزیم و اکسیدهای قلیایی است که در مجاورت با آب

واکنش هیدراتاسیون انجام داده و سخت می‌شوند. عمده‌ترین نوع سیمان تولیدی در دنیا «سیمان پرتلند»[۱] است که از پودر نمودن توأم کیلینکر[۲] همراه با مقدار مناسبی سنگ گچ در آسیاب به‌دست می‌آید.

روش‌های مرسوم تولید سیمان در جهان

چهار روش برای تولید سیمان در جهان وجود دارد:

۱. روش تر، ۲. روش نیمه‌تر، ۳. روش خشک، ۴. روش نیمه‌خشک.

در روش‌تر، خاک‌رس مصرفی در دستگاه دوغاب‌ساز تبدیل به دوغاب شده، سپس دوغاب خاک‌رس به همراه سنگ آهک در آسیاب موادخام مخلوط و نرم گشته و تبدیل به دوغاب با غلظت بیشتر می‌شود. پس از تنظیمات لازم توسط آزمایشگاه، به‌عنوان خوراک کوره، مورد مصرف قرار می‌گیرد. در روش‌تر نیمه‌تر، مواد خروجی از آسیاب مواد، به‌صورت دوغاب است و قبل از ورود به کوره به‌وسیله فیلترپرس، آب آن گرفته شده و به‌صورت کیک به کوره تغذیه می‌گردد.

در روش خشک مواد اولیه به‌صورت خشک وارد آسیاب می‌شوند. پودر خروجی از آسیاب، پس از تنظیم، به‌عنوان خوراک کوره مصرف می‌گردد.

در روش نیمه خشک، مواد اولیه به‌صورت خشک با یکدیگر مخلوط گشته و به آسیاب مواد خام هدایت می‌شوند. مواد خروجی از آسیاب به‌صورت پودر است که

---

۱. سیمان معمولی است که به‌دلیل شباهت رنگ بتون حاصل از آن با سنگ آهک موجود در پرتلند انگلستان، موسوم به سیمان پرتلند شده است.

۲. کیلینکر محصول خروجی از کوره سیمان است که به‌صورت دانه‌های نسبتاً گرد قهوه‌ای یا خاکستری تیره است.

قبل از تغذیه این پودر به کوره، مقداری آب روی آن پاشیده می‌شود و آن را به‌صورت اماج یا گرانول در آورده و به کوره تغذیه می‌نمایند.

هر یک از این روش‌ها با استفاده از انواع کوره‌های تر، قائم و خشک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

اگرچه انتخاب نوع روش به‌کار گرفته شده در تولید سیمان بستگی به خصوصیات مواد خام، هزینه سوخت، در نظر گرفتن مکان تولید و غیره دارد. ولی به‌طور کلی روندی که در اکثر کشورهای تولیدکننده سیمان مشاهده می‌شود، حرکت به سمت کنار گذاشتن روش تر و جایگزینی آن با روش خشک، مخصوصاً با کوره‌های خنک[1] است که علت اصلی این امر اهمیت بالای انرژی در کل هزینه‌های تولید سیمان است.

مصرف انرژی در صنعت سیمان جهان

در بخش سیمان، مصرف انرژی در کشورهای مختلف براساس کیلوکالری بر کیلوگرم کیلینکر تعریف می‌شود که این رقم در میان کشورهای تولیدکننده عمده سیمان متفاوت است. برای مثال متوسط مصرف انرژی حرارتی در صنعت سیمان چین در سال ۲۰۰۵ معادل ۹۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم کیلینکر است. مهم‌ترین علت بالا بودن مصرف انرژی در تولید سیمان کشور چین مربوط به وجود کوره‌های کوچک و قدیمی است که همچنان در چین فعال هستند. البته در صنعت سیمان چین، پروژه تولید انرژی الکتریکی از بازیافت انرژی گازهای خروجی سیستم پخت در

1. NSP

بسیاری از کارخانه‌ها اجرا شده است که با این روش حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد انرژی مورد نیاز تأمین می‌شود. در مجموع توجه به مصرف ضایعات، نوسازی صنعت اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی و مصرف گسترده مواد افزودنی تولید سیمان‌های آمیخته، مهم‌ترین راهکارهای این کشور در راستای بهینه‌سازی مصرف بوده است.

در مثالی دیگر، در هند میانگین مصرف انرژی حرارتی در صنعت سیمان ۸۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم کیلینکر و انرژی الکتریکی ۱۰۰ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم کیلینکر گزارش شده است که البته متوسط مصرف انرژی حرارتی در فرایندهای خشک ۷۳۰ کیلوکالری بر کیلوگرم کیلینکر بیان شده است. طبق آمار موجود در کشور هندوستان، از فرایندهای خشک مجهز به پیش‌گرم‌کن ٦ مرحله‌ای و پری‌کلساینر استفاده شده است. که در این فرایند توانسته‌اند مصرف انرژی حرارتی را به کمتر از ٦٧٠ کیلوکالری بر کیلوگرم کیلینکر و انرژی الکتریکی را به کمتر از ۷۰ کیلووات ساعت بر کیلوگرم کیلینکر برسانند.

میانگین مصرف انرژی در کشورهای عضو نفتا (کشورهای عضوی پیمان تجارت آزاد آمریکای شمالی شامل آمریکا، کانادا و مکزیک) در حال حاضر به‌طور متوسط انرژی الکتریکی بیش از ١٤٠ کیلووات ساعت بر کیلوگرم کیلینکر است که طرح‌های بهینه‌سازی به سرعت برای کاهش آن در حال اجرا هستند.

در صنعت سیمان ژاپن حدود ۲۰ تا ٤٠ درصد قیمت تمام شده محصول را انرژی تشکیل می‌دهد. کشور ژاپن در بازیافت انرژی الکتریکی از حرارت گازهای خروجی سیستم پخت، پیشتاز است و از این راه توانسته است حدود ۳۰ درصد از انرژی مصرفی کارخانه‌ها را تأمین کند. در صنعت سیمان ژاپن، در سال ۲۰۰۵

مصرف متوسط انرژی الکتریکی کمتر از ۹۳ کیلووات ساعت برکیلوگرم کیلینکر و مصرف انرژی حرارتی به کمتر از ۶۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم کیلینکر بوده و در سال‌های اخیر روند روبه کاهشی داشته است. از طرف دیگر این کشور مصرف زباله‌ها در کوره‌های سیمان و تولید سیمان‌های آمیخته و بازیافت انرژی الکتریکی را از گازهای خروجی پیش‌گرم‌کن به‌عنوان روش‌های بهینه‌سازی مصرف به‌شدت دنبال می‌کند.

در کشورهای عضو سمبورو (کشورهای عضو اتحادیه سیمان اروپا شامل ۲۴ کشور و ۲ عضو وابسته) انرژی به‌طور متوسط ۴۰ درصد قیمت تمام شده محصول را تشکیل می‌دهد. مصرف متوسط انرژی حرارتی در اروپا که در سال ۱۹۸۸ معادل ۹۳۵ کیلو کالری بر کیلوگرم کیلینکر بوده است، در سال ۲۰۰۲ به کمتر از ۸۵۰ رسیده و انرژی الکتریکی مصرفی نیز بین ۹۰ تا ۱۰۵ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم کیلینکر است. به‌طور متوسط در حال حاضر ۱۷ درصد انرژی حرارتی مورد نیاز در اروپا از طریق زباله‌ها تأمین می‌شود که این سهم برای برخی از کارخانه‌ها بیش از ۸۰ درصد است.

روش‌های تولید و مصرف انرژی در صنعت سیمان ایران

صنعت سیمان یکی از صنایع بزرگ مصرف‌کننده انرژی در کشور است. به‌طوری که سالیانه بیش از ۲۳۰۰ میلیون لیتر مازوت، ۸۰۰ میلیون مترمکعب گاز و ۳ میلیارد کیلووات ساعت انرژی الکتریکی مصرف می‌کند.

در حالت کلی صنعت سیمان را می‌توان از لحاظ مصرف انرژی به سه بخش تقسیم کرد:

۱. بخش آماده‌سازی مواد اولیه،

۲. بخش پخت کیلینکر،

۳. بخش آماده‌سازی نهایی محصول از کیلینکر:

ـ بخش آماده‌سازی مواد اولیه، بخشی است که به‌شدت به انرژی الکتریکی وابسته است و نزدیک به ۳۰ درصد انرژی الکتریکی مصرفی (یعنی حدود ۲۵-۳۵ کیلووات ساعت بر تن) در این بخش مصرف می‌شود.

ـ پخت کیلینکر بیشترین مصرف انرژی را از میان سه بخش مذکور دارد. این بخش به‌تنهایی ۹۰ درصد انرژی فسیلی و حدود ۳۰ درصد انرژی الکتریکی را مصرف می‌کند.

ـ بخش آماده‌سازی نهایی نیز نیازمند انرژی الکتریکی بالاست و رقمی حدود ۴۰-۴۵ درصد انرژی الکتریکی در این قسمت مصرف می‌شود.

با توجه به موارد مذکور مصرف انرژی ویژه الکتریکی SEC_e به‌صورت فرمول زیر محاسبه شده که واحد آن کیلووات ساعت بر هر تن سیمان است.

$$SEC_e = [[(a+b)1/6+C]0/96+d]$$

a= مصرف انرژی ویژه الکتریکی در واحد سنگ‌شکن.

b= مصرف انرژی ویژه الکتریکی در واحد آسیاب مواد خام.

c= مصرف انرژی ویژه الکتریکی در سیستم کوره.

d= مصرف انرژی ویژه الکتریکی در واحد آسیاب سیمان.

۱/۶= ضریب ثابت تبدیل مواد اولیه به کیکنلر.

۰/۹۶= ضریب ثابت افزودن درصد سنگ گچ به کیلینکر جهت تبدیل به سیمان.

انرژی ویژه حرارتی نیز به میزان مصرف انرژی حرارتی به ازای واحد تولید اطلاق شده و بر حسب کیلوکالری محاسبه می‌شود.

انرژی حرارتی در بخش سیمان کشور بستگی زیادی به نوع تکنولوژی مورد استفاده در واحدهای تولیدی دارد. به‌طوری که می‌توان کارخانجات سیمان را از لحاظ انرژی به کارخانجات کم‌مصرف، مصرف متوسط و پرمصرف تقسیم‌بندی کرد.[1] در حال حاضر کوره‌های قدیمی‌تر با مصرف انرژی حرارتی حدود ۲۰۰۰ کیلو کالری بر کیلوگرم کیلینکر بیشترین میزان هدررفت انرژی را در این بخش دارا هستند و این در حالی است که میزان مصرف کوره‌های جدید داخلی در حدود ۸۷۰ کیلو کالری بر کیلوگرم کیلینکر است.

در مورد انرژی الکتریکی مصرفی در بخش سیمان کشور نیز آمار دقیقی به‌دست نیامده است. نکته قابل توجه اینکه در چند سال گذشته ترکیب استفاده از منابع فسیلی نیز در این بخش تغییر اساسی یافته است و سهم گاز مصرفی از ۳۵ درصد حامل‌های انرژی حرارتی به بیش از ٦۵ درصد رسیده و روند حذف مازوت ادامه دارد.

با توجه به موارد فوق، می‌توان چنین گفت که متوسط انرژی مصرفی در صنعت سیمان معادل ۳۷ درصد بالاتر از نرم جهانی قرار دارد و این امر بیانگر این مطلب است که لزوم توجه جدی به کاهش مصرف انرژی در این بخش بسیار جدی است.

۱. مؤسسه استاندارد در تعریف خود از مصرف استاندارد برای کارخانجات سیمان از این اصطلاح استفاده کرده به‌طوری که برای هر یک از آنها مصرف متفاوتی را تعریف کرده است.

راهکارهای اصلاح الگوی مصرف انرژی در صنعت سیمان

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران بار مصرف انرژی و گروه‌های مصرف الکتریکی و حرارتی را به تفکیک مرحله‌ای برای انواع کارخانجات کم‌مصرف، مصرف متوسط و پرمصرف آورده است که این استانداردها از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ تعریف شده که می‌باید طی این سال‌ها استانداردها بهبود یابند.

ولی به‌طور کلی برای اصلاح الگوی مصرف انرژی در صنعت سیمان و رسیدن به این اهداف می‌توان اقدامات زیر را انجام داد:

الف) بهبود مدیریت تولید

مدیریت تولید یکی از راهکارهای بهبود کارایی انرژی است که بدون نیاز به سرمایه‌گذاری‌های مجدد قابل اجراست. کاهش اتلاف انرژی، بازدید عملکرد استانداردهای خط تولید، بهبود هزینه‌های آموزش نیروی کار، فعالیت گروهی برای بهره‌برداری بهتر از تکنولوژی موجود (شامل خاموش کردن موتورهای بهره‌برداری بیکار و تقویت عایق‌های حرارتی) را می‌توان به‌عنوان مؤلفه‌های اساسی این راهکار عنوان کرد.

ب) بهبود تجهیزات تولید

این مرحله شامل بهبود کارایی مصرف انرژی در تجهیزات مورد استفاده از طریق تعدیل خط تولید موجود به‌منظور فراهم ساختن زمینه بازیافت ضایعات یا به‌کارگیری تجهیزات افزایش‌دهنده کارایی انرژی و استفاده مؤثر از بازیافت حرارت هدررونده، در دیگ سوخت و ژنراتورهای مورد استفاده در کارخانجات سیمان است.

ج) بهبود تکنولوژی جدید

این مرحله شامل تغییرات اساسی در مراحل تولید، به‌وسیله توسعه تکنولوژی است. قابل ذکر است که این کار احتیاج به سرمایه‌گذاری زیادی در تجهیزات دارد، اما نتیجه این مدرنیزه کردن پروسه تولید، کارایی بالاتر انرژی، کیفیت بالاتر محصول، ارزش‌افزوده بالاتر، افزایش تولید محصول و ذخیره نیروی انسانی است. به‌طور کلی می‌توان فرایند بهبود کارایی انرژی در صنعت سیمان را به‌صورت جدول ۴ خلاصه کرد:

جدول ۴. مراحل اصلاح الگوی مصرف انرژی در صنعت سیمان کشور

مراحل بهبود کارایی انرژی	مرحله مواد خام	مرحله پختن کلیتکر	مرحله نهایی تولید
بهبود مدیریت تولید	ـ انتخاب مواد خام ـ کنترل درجه سایش مواد ـ کنترل بهینه محیط سایشی مواد	ـ انتخاب سوخت ـ جلوگیری از نشست هوا	ـ کنترل درجه سایش مواد ـ کنترل بهینه محیط سایش مواد
بهبود تجهیزات تولید	ـ استفاده از مواد ضایعاتی صنایع (خاکستر سبک) ـ بهبود کنترل سیستم درجه حرارت فشار ـ بهبود سیستم مخلوط‌کننده و همگنی مواد مخلوط شدنی ـ جایگزینی خنک‌کننده دوار	ـ استفاده از مواد ضایعاتی صنایع (تایر ضایعاتی) ـ جایگزینی بخارگیر و خنک‌کننده از چند چرخه به EP ـ بازیافت گازهای خروجی از خنک‌کننده برای خشک کردن مواد خام تولید برق	ـ نصب آسیاب سیمان مدار بسته ـ نصب سیستم کنترل خوراک کوره

مراحل بهبود کارایی انرژی	مرحله مواد خام	مرحله پختن کلیتکر	مرحله نهایی تولید
بهبود تکنولوژی تولید	ـ استفاده از روش خشک به جای روش تر ـ استفاده از آسیاب‌های غلتکی به‌جای آسیاب‌های گویی تونکی	ـ استفاده از روش خشک به جای تر ـ تبدیل سوخت از نفت به گاز طبیعی ـ استفاده از کوره NSP به‌جای SP ـ استفاده از مواد ضایعاتی صنایع (خاکستر آتش‌نشانی) ـ استفاده از کولرهای شبکه‌ای به‌جای کفی	

۴. آلومینیم

فلز آلومینیم با داشتن خواص منحصر بفرد در تمام صنایع از جمله صنایع غذایی، صنایع اتومبیل‌سازی، صنایع هواپیمایی و فضایی، صنایع دریایی، ساختمان و ... کاربرد دارد.

با وجود استفاده از قراضه آلومینیم در تولید آهن رشد مصرف آن در حال حاضر نزدیک به ۴-۵ درصد در سال است به‌طوری که مصرف کلی آن در جهان در سال ۲۰۰۸ بالغ به ۳۵ میلیون تن و مصرف ایران ۳۰۰-۴۰۰ هزار تن شد. تولید ایران نیز نزدیک به ۲۲۰ هزار تن در سال است.

فرایندهای تولید آلومینیم

آلومینیم فلزی است که از تولید صنعتی آن ۱۲۰ سال می‌گذرد و در این مدت فرایند آن تغییر چندانی نکرده است. تحقیقات فعلی نیز نشان می‌دهد که تا ۵۰ سال آینده هم تغییرات عمده‌ای در فرایند تولید که همان فرایند احیای اکسید آلومینیم «آلومینا» توسط جریان برق در حلال کریولیت است حاصل نخواهد شد.

گرچه فرایند تولید آلومینیم یکسان است، ولی تکنولوژی‌های متفاوتی در جهان مرسوم است که عبارت‌اند از:

۱. Reynolds آمریکایی،

۲. Nosrk Hydro روسی،

۳. Peching فرانسوی،

۴. Kaiser آمریکایی ـ کانادایی،

۵. DubaI امارات متحده عربی در دوبی.

گرچه در مدت بیشتر از یک قرن که از تولید صنعتی آلومینیم می‌گذرد و تغییر عمده‌ای در فرایند آن انجام نشده، ولی شدت جریان احیا از ۴۰۰۰ آمپر اولیه در حال حاضر به ۳۷۵ هزار آمپر رسیده است، البته هنوز کارخانجاتی در دنیا به‌کار تولید مشغولند که با ۶۰–۷۰ هزار آمپر کار می‌کنند.

شدت جریان احیا بستگی کامل به انتخاب تکنولوژی در شروع اجرای طرح تولید دارد و معمولاً تا مدت چندین سال غیرقابل تغییر است و میزان تولید هر دیگ تولید بستگی به‌شدت جریان عبوری از دیگ دارد.

$$M= ۰/۳۳ \times ۲۴ \times KA \times CE$$

شدت جریان کار بخش آلومینیم المهدی ۱۷۵ کیلو آمپر، ایرالکو ۷۰ کیلو آمپر و مجتمع بندرعباس ۲۲۰ کیلوآمپر است.

میزان انرژی مورد نیاز هر کیلوگرم از این کارخانجات به‌ترتیب ۱۸–۲۰، ۱۵–۱۷ و ۱۴–۱۶ کیلووات ساعت است.

انواع کوره‌های ذوب آلومینیم

مجتمع‌های تولید آلومینیم معمولاً شمش تولید می‌کنند و شمش تولیدی را به کارخانجات پایین‌دستی که مصرف‌کننده فلز آلومینیم هستند تحویل می‌دهند. برای ذوب در این کارخانجات معمولاً:

۱. کوره‌های زمینی،

۲. کوره‌های شعله‌ای

۳. کوره الکتریکی (که این کوره‌ها خود به دو دسته کوره‌های مقاومتی و کوره‌های القایی تقسیم می‌شوند) به‌کار می‌روند.

مراحل تولید آلومینیم

آنُدسازی

در فرایند تولید آلومینیم از روش الکترولیز، استفاده از آنُدهای کربنی، ضروری است. آنُد در کارگاه آنُدسازی با مخلوط کردن کک نفتی، قیر صنعتی و آنُدهای مستعمل و سپس پخت آن در کوره تولید می‌شود.

احیا (الکترولیز)

واحد احیا، بخش اصلی در فرایند تولید آلومینیم است. مواد اولیه شامل پودر آلومینا، کریولیت و مواد افزودنی در داخل دیگ احیا ریخته شده و پس از ذوب، در اثر الکترولیز (عبور جریان برق مستقیم از مذاب) آلومینیم خالص تولید می‌شود. بخش احیا عمده‌ترین بخش مصرف‌کننده انرژی در فرایند تولید شمش آلومینیم است.

ریخته‌گری

آلومینیم تولیدی در بخش احیا به کوره‌های نگهدارنده بخش ریخته‌گری منتقل می‌شود. سپس نمونه‌برداری از مذاب انجام شده و با افزایش مواد افزودنی، آلیاژ موردنظر ساخته شده و در نهایت به‌صورت شمش‌های آلومینیم ریخته‌گری می‌شود.

تکمیل و تولید محصول نهایی

در این بخش ابتدا در کوره‌های عملیات حرارتی، همگن‌سازی برخی از محصولات که نیاز به عملیات حرارتی دارند انجام می‌شود. سپس شمش‌های آلومینیم در ابعاد مختلف برش و بسته‌بندی شده و محصول نهایی تولید می‌شود.

روش‌های تولید شمش‌های نوردی

معمولاً دو روش برای تهیه شمش نوردی استفاده می‌شود: روش مداوم[1] و روش

1. Countinus

نیمه مداوم و یا تکباری.[1]

روش مداوم: این روش از سرعت تولید بالایی برخوردار است. در این روش، ذوب‌ریزی به‌صورت مداوم ادامه پیدا می‌کند. به این صورت که محفظه‌ای از فولاد گرم که در زیر پاتیل مذاب قرار دارد مذاب را به‌صورت دائم دریافت می‌کند، مذاب پس از رها شدن از پاتیل وارد محفظه شده و در مرحله اول آب گردهایی که در قسمت بالای محفظه قرار دارند مذاب را به مرحله خمیری می‌رساند در مرحله بعد مذاب به مرحله آب فشان رسیده و به‌طور کامل منجمد می‌شود و در پایان تیغه‌ای که در انتهای محفظه قرار دارد فلز را برش زده و بر روی صفحه نقاله می‌اندازد.

روش تکباری: این روش که در کارخانه‌ها و به‌وسیله قالب‌های ماسه‌ای انجام می‌شود به این صورت است که ابتدا کوره را به مقدار معینی شارژ کرده سپس شارژ آماده شده را در قالب‌های مورد نظر می‌ریزند.

میزان مصرف انرژی در تولید آلومینیم در جهان

به‌طور معمول و با توجه به استاندارد جهانی، برای تولید آلومینیم از آلومینا، حدود ۱۳ تا ۱۵ کیلو وات / ساعت برق انرژی لازم است که این میزان با توجه به موقعیت و میزان استهلاک کارخانجات درباره مورد اشاره تغییر خواهد کرد. قابل توجه اینکه از نظر تئوریک انرژی لازم برای تولید یک کیلوگرم آلومینیم، ۶/۵ کیلووات/ ساعت است. به‌دلیل اختلاف فاحش بین انرژی الکتریکی تئوریک لازم و انرژی الکتریکی عملی برای تولید یک کیلوگرم آلومینیم، روش‌هایی برای کم کردن این فاصله پیشنهاد می‌شود

1. Non Countinus

نمونه‌ای از روش‌های جایگزین، فرایندی مبتنی‌بر الکترولیز آلومینیم است.

برآورد شاخص‌های مصرف انرژی در صنعت آلومینیم و میزان پتانسیل قابل صرفه‌جویی انرژی در ایران

کارخانجات تولید شمش آلومینیم (آلومینیم اولیه)، حدود ۹۴ درصد از کل مصرف انرژی در صنعت آلومینیم را دارا هستند. صنعت آلومینیم در کشور، در حال حاضر از مصرف انرژی بالایی در مقایسه با صنایع مشابه در دیگر کشورها برخوردارند.

با توجه به تعریف مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی مصرف انرژی الکتریکی ویژه (SECe) در فرایند تولید شمش آلومینیم (آلومینیم اولیه)، عبارت است از نسبت میزان مصرف انرژی الکتریکی بر میزان محصول آلومینیم تولیدی. این مقدار با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید و واحد آن بر حسب کیلووات ساعت بر کیلوگرم آلومینیم تولیدی بیان می‌شود:

$$(SECe)=\frac{\text{انرژی الکتریکی مصرفی (KWh)}}{\text{محصول آلومینیم تولیدی (Kg)}}\quad KWh/Kg$$

معیار مصرف انرژی الکتریکی در فرایندهای تولید شمش آلومینیم

گروه‌بندی فرایندهای تولید شمش آلومینیم موجود در کشور

فرایندهای تولید شمش آلومینیم موجود در کشور، در دو گروه به‌شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند:

۱. فرایند با تکنولوژی ۷۰ کیلو آمپر،

۲. فرایند با تکنولوژی ۱۷۰ کیلو آمپر.

در هر یک از دو گروه فوق دو معیار مصرف انرژی به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

الف) معیار مصرف انرژی برای مجموع دو بخش احیا و ریخته‌گری،

ب) معیار مصرف انرژی برای کل فرایند (شامل کلیه بخش‌های مصرف‌کننده انرژی فرایند).

معیار مصرف انرژی الکتریکی در فرایندهای تولید شمش آلومینیم (آلومینیم اولیه) موجود

معیارهای مصرف انرژی الکتریکی برای فرایندهای تولید شمش آلومینیم موجود در کشور به‌صورت جدول ۵ است. مصرف انرژی الکتریکی ویژه، بیشتر از مقدار حداکثر در جدول ۵ مجاز نیست.

جدول ۵. معیار مصرف انرژی الکتریکی در انواع فرایندهای تولید شمش آلومینیم موجود در کشور

گروه	نوع فرایند (رجوع شود به بند «۴-۱»		معیار مصرف انرژی الکتریکی (kwh/kg)		
			۱۳۸۶-۱۳۸۵	۱۳۸۹-۱۳۸۷	۱۳۹۰ به بعد
۱	فرایند با تکنولوژی ۷۰ کیلوآمپر	الف) مجموع دو بخش احیا و ریخته‌گری	$SEC_e \leq ۱۸/۲$	$SEC_e \leq ۱۸$	$SEC_e \leq ۱۶/۵$
		ب) کل فرایند (شامل کلیه بخش‌های مصرف‌کننده انرژی فرایند)	$SEC_e \leq ۱۸/۵$	$SEC_e \leq ۱۸/۲$	$SEC_e \leq ۱۶/۸$
۲	فرایند با تکنولوژی ۱۷۰ کیلوآمپر	الف) مجموع دو بخش احیا و ریخته‌گری	$SEC_e \leq ۱۸$	$SEC_e \leq ۱۷/۵$	$SEC_e \leq ۱۵/۵$
		ب) کل فرایند (شامل کلیه بخش‌های مصرف‌کننده انرژی فرایند)	$SEC_e \leq ۱۸/۵$	$SEC_e \leq ۱۷/۸$	$SEC_e \leq ۱۵/۸$

معیار مصرف انرژی الکتریکی در فرایندهای تولید شمش آلومینیم جدیدالاحداث

معیار مصرف انرژی برای فرایندهای تولید شمش آلومینیم (آلومینیم اولیه) جدیدالاحداث، حداکثر ۱۳/۵ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم آلومینیم تولیدی است.

جدول ۶. معیار مصرف انرژی الکتریکی در فرایندهای تولید شمش آلومینیم جدیدالاحداث

	معیار مصرف انرژی الکتریکی در فرایندهای جدیدالاحداث در ۵ سال آتی (kwh/kg)
مجموع دو بخش احیا و ریخته‌گری	$SEC_e \leq ۱۳/۵$

همان‌طور که مشاهده می‌شود مصرف انرژی الکتریکی در واحدهای جدیدالاحداث بین ۴-۵ (kwh/kg) کمتر از واحدهای موجود باید باشد که این هم گامی در جهت اصلاح تکنولوژی‌های موجود محسوب می‌شود.

ارائه راهکارها و توصیه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت آلومینیم ایران

راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در دو قسمت، امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی و سوخت فسیلی ارائه شده است که به‌شرح زیر است:

۱. امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی

ـ بارگذاری مناسب ترانسفورماتورها

برای اینکه ترانسفورماتورهای صنعتی با حداکثر راندمان کار کنند، باید ضریب بار آنها بین ۰/۴ تا ۰/۷ باشد. درصورت خارج بودن ضریب بار از این محدوده، راندمان ترانس نسبت به راندمان ماکزیمم افت پیدا کرده و شاهد تلفات بارداری ترانس در میزان کار آن خواهیم بود. همچنین ضریب قدرت ثانویه ترانس نیز باعث تغییرات

راندمان ترانس می‌شود. هر چه این ضریب قدرت به یک نزدیک‌تر باشد، راندمان ترانس افزایش می‌یابد.

ـ صرفه‌جویی انرژی الکتریکی از طریق کنترل دور فن‌ها (نصب VSD)

حجم هوایی که توسط فن جاری می‌شود با سرعت گردش فن تغییر می‌کند. توان الکتریکی لازم برای فن با توان سوم سرعت فن متناسب است. ازاین‌رو وقتی جریان هوای مورد نیاز متغیر باشد، از نظر مصرف انرژی در فن‌ها مفیدتر است، با کنترل سرعت موتور فن‌ها، جریان هوا تنظیم می‌شود که موجب کاهش توان ورودی فن می‌شود. اغلب می‌توان با کاهش ۱۰ درصد حجم هوا، به میزان ۳۰ درصد مصرف انرژی را با نصب VSD کاهش داد.

ـ تبدیل کوره‌های پیش‌گرم قالب الکتریکی به حرارتی

با توجه به راندمان پایین نیروگاه‌های کشور که حدود ۳۰ درصد است و تلفات زیاد در شبکه توزیع، درصورت تبدیل کوره‌های پیش‌گرم قالب الکتریکی به حرارتی با راندمان حدود ۶۰ درصد، میزان انرژی حرارتی مصرفی با لحاظ کردن راندمان نیروگاه و تلفات شبکه به کمتر از نصف کاهش می‌یابد و صرفه‌جویی انرژی و ریالی حاصل می‌شود.

ـ تبدیل کوره‌های پیش‌گرم بیلت الکتریکی به حرارتی

کوره‌های حرارتی نسبت به کوره‌های پیش‌گرم بیلت الکتریکی انرژی کمتری را استفاده می‌کنند. اگرچه قیمت این کوره‌ها بیشتر از کوره‌های پیش‌گرم است و با توجه به مطالعات انجام گرفته این هزینه در ظرف زمانی نزدیک به سه سال جبران می‌شود.

۲. امکان صرفه‌جویی در مصرف سوخت فسیلی

در ذیل راهکارهایی جهت کاهش مصرف سوخت در انواع کوره‌های ذوب و نگهدارنده، پیش‌گرم بیلت، پیش‌گرم قالب، کوره‌های ایجینگ، دیزل ژنراتورها، بویلرها، کوره‌های پخت رنگ، کوره‌های هموژن و همچنین بازیافت انرژی از آنها مطرح شده است که به توضیح راجع به هر یک از آنها می‌پردازیم:

ـ کوره‌های ذوب و نگهدارنده

این کوره‌ها عمده مصرف‌کنندگان سوخت فسیلی در یک کارخانه تولید پروفیل آلومینیم است. اکثر کارخانجات تولید آلومینیم داخلی دارای کوره‌های ذوب و نگهدارنده‌اند. به‌علت دما و دبی بالای گازهای خروجی از این کوره‌ها می‌توان با بازیافت حرارت به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد.

ـ کوره‌های پیش‌گرم بیلت

راهکارهای زیر جهت کاهش مصرف سوخت فسیلی کوره‌های پیشگرم بیلت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد:

۱. تنظیم سوخت و هوا،

۲. بهینه نمودن طراحی کوره، کاهش یا حذف موتور مکنده اگزوز خروجی و استفاده از مکش طبیعی.

ـ کوره ایجینگ

در تمام کارخانجات داخلی مشاهده می‌شود که کوره‌های ایجینگ با ۳۰ تا ۷۰ درصد ظرفیت بارگیری شده و راه‌اندازی می‌شود. این کار باعث اتلاف سوخت می‌شود.

به‌علت بسته بودن سیکل هوا در کوره ایجینگ لازم است کلیه منفذهای عبور یا خروج هوا به داخل کوره کاملاً بسته شود. این کار را می‌توان با قرار دادن مواد نسوز بین درزها یا بستن کامل درب‌های انجام داد. عایق‌بندی و بازسازی عایق‌های بدنه کوره‌های قدیمی نیز باعث افزایش راندمان کوره‌های ایج می‌گردد. از دیگر راهکارها، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تنظیم دقیق سوخت و هوا در مشعل کوره،
- تنظیم سوخت و هوای بویلرها،
- عایق‌بندی بدنه بویلر جهت کاهش تلفات حرارتی از بدنه،
- تمیز کردن کویل‌های آبگرم بویلر جهت افزایش ضریب انتقال حرارت.

بررسی کوره‌های پخت رنگ

در کوره‌های پخت رنگ نیز مانند کوره‌های ایجینگ می‌توان راهکارهای زیر را جهت بهینه‌سازی ارائه کرد:

- تنظیم سوخت و هوا،
- کنترل دمای کوره،
- عایق‌بندی بدنه کوره،
- تعویض چیلر جذبی با چیلرهای تراکمی.

کاهش نشتی و کنترل سرعت در کمپرسورها

هوای فشرده به‌عنوان انتقال‌دهنده انرژی در صنایع، مورد استفاده قرار می‌گیرد و

نوعی انرژی خیلی گران است، ولی در کارخانجات داخلی به‌عنوان یک منبع انرژی ارزان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشترین درصد اتلاف هوای فشرده در اثر نشتی خطوط انتقال هوای فشرده است. در اثر نشتی هوای فشرده، فشار سیستم افت پیدا می‌کند و کمپرسور سریع‌تر زیر بار می‌رود، به‌علت اینکه کمپرسورها با توجه به نیاز سیستم به هوای فشرده با حداکثر بار کار نمی‌کنند، می‌توان با استفاده از محرکه‌های دور متغیر (VSD) مصرف انرژی را در کمپرسورها کاهش داد.

جدول ۷ خلاصه پیشنهادها جهت اصلاح الگوی مصرف انرژی در صنعت آلومینیم را نشان می‌دهد:

جدول ۷. خلاصه پیشنهادها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت آلومینیم

پیشنهادها بهینه‌سازی مصرف انرژی	انرژی صرفه‌جویی شده				مجموع ارزش صرفه‌جویی لازم (میلیون ریال)	میزان سرمایه‌گذاری لازم (میلیون ریال)
	گیگاژول/ سال	ارزش (میلیون ریال)	مگا وات (ساعت در سال)	ارزش (میلیون ریال)		
تنظیم دقیق سوخت و هوا در کوره‌های ذوب	۸۹۹۷/۴	۳۴/۵	—	—	۳۴/۵	بدون هزینه
پیش‌گیرمایش هوای احتراق از حرارت خروجی دودکش	۱۶۸۴۰/۳	۵۲	—	—	۵۲	۲۳۰
تهیه آب گرم از بازیافت حرارت کوره‌ها	۵۰۹۸۸/۵	۱۹۱	—	—	۱۹۱	۶۲۰

پیشنهادها بهینه‌سازی مصرف انرژی	انرژی صرفه‌جویی شده				مجموع ارزش صرفه‌جویی لازم (میلیون ریال)	میزان سرمایه‌گذاری لازم (میلیون ریال)
	گیگاژول/ سال	ارزش (میلیون ریال)	مگا وات (ساعت در سال)	ارزش (میلیون ریال)		
پیش‌گرمایش شمش Ingot از بازیافت حرارت کوره‌ها	۸۵۷۳	۲۳/۷	—	—	۲۳/۷	۱۲۰
تعویض چیلر تراکمی به جذبی	—	—	۱۷۰۶	۲۲۲	۲۲۲	۶۰۰
کنترل دورفن‌های کارخانه	—	—	۷۶۲/۶	۱۰۰/۱	۱۰۰/۱	۲۶۵/۵
تبدیل کوره‌های پیش‌گرم قالب الکتریکی به حرارتی	—	—	۳۴۳	۶۳/۷	۶۳/۷	۱۶۵
تبدیل کوره‌های پیش‌گرم بیلت الکتریکی به حرارتی	—	—	۱۰۶۶/۸	۳۰۰	۳۰۰	۸۰۰
کنترل سرعت در کمپرسورها	—	—	۷۹۷	۱۱۰/۶	۱۱۰/۶	۱۳۵
بهینه‌سازی در سیستم روشنایی کارخانه	—	—	۲۹۱	۳۸	۳۸	۲۵/۸

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد

با توجه به پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی در کشور، در صنایع مختلف معدنی و ارائه راهکارهای مختلف، مشاهده می‌شود که علل اتلاف انرژی در بخش‌های مختلف موجود، به سه دلیل عمده بوده است:

۱. عدم اعمال مدیریت صحیح بر روند تولید و استفاده صحیح از امکانات موجود،

۲. نقص تکنولوژی موجود،

۳. نبود کارایی مناسب در استفاده از تکنولوژی موجود.

با توجه به سه مورد مذکور، پیشنهاد می‌شود قانونی برای تشویق یا جریمه صنایع انرژی‌بر در استفاده مناسب از انرژی به‌صورت ذیل مورد تصویب قرار گیرد:

«پس از تعریف استاندارد مصرف انرژی در هر یک از صنایع، با توجه به انواع تکنولوژی، صنایعی که زیر سقف استاندارد مصرف می‌کنند مورد تشویق و صنایعی که بالای استاندارد مصرف می‌کنند مورد جریمه تصاعدی قرار می‌گیرند».

شناسنامه گزارش | **شماره مسلسل: ۹۶۸۷**

عنوان گزارش: درباره اصلاح الگوی مصرف (۴) بررسی اصلاح الگو در صنایع منتخب انرژی‌بر، بخش معدن و صنایع معدنی (فولاد، مس، آلومینیم و سیمان)

نام دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه معدن و صنایع معدنی)

تهیه و تدوین: فرید دهقانی، محمد جباری

همکاران: کارشناسان آزاد بخش فولاد (ذوب آهن اصفهان و فولاد مبارکه)، انجمن فولاد، کارشناسان آزاد شرکت ملی مس ایران، مشاوران گروه معدن و صنایع معدنی (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی)، علیرضا تقی‌زاده، علی‌اصغر اژدری

ناظر علمی: محمدرضا محمدخانی

متقاضی: عزت‌اله اکبری (رئیس کمیسیون و صنایع و معادن)

ویراستار تخصصی: ـــــ

ویراستار ادبی: ـــــ

واژه‌های کلیدی و معادل انگلیسی آنها: ـــــ

تاریخ انتشار: ۱۳۸۸/۳/۴